



CIRIAF



A.D. 1308
unipg
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PERUGIA

XXIII CONGRESSO NAZIONALE C.I.R.I.A.F.

SVILUPPO SOSTENIBILE, TUTELA DELL'AMBIENTE E DELLA SALUTE UMANA

Perugia 13-14 aprile 2023

ATTI

Perugia: Morlacchi Editore University Press, 2023.

ISBN 978-88-9392-442-9 (online)

L'edizione digitale on-line del volume è pubblicata ad accesso aperto su
www.morlacchilibri.com/universitypress.

La presente opera è rilasciata nei termini della licenza Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>).

La licenza permette di condividere l'opera, nella sua interezza o in parte, con qualsiasi mezzo e formato, e di modificarla per qualsiasi fine, anche commerciale, a condizione che ne sia menzionata la paternità in modo adeguato, sia indicato se sono state effettuate modifiche e sia fornito un link alla licenza.

© 2023 Morlacchi Editore

Pubblicato da Morlacchi Editore University Press, Piazza Morlacchi 7/9, 06123 Perugia

www.morlacchilibri.com

SEGRETERIA

congresso@ciriaf.it

www.ciriaf.it
centro.ciriaf@unipg.it

Tel. 075.585.3717
Fax 075.585.3697

Via G. Duranti, 67
06125 Perugia


CIRIAF - Centro Interuniversitario di Ricerca sull’Inquinamento e sull’Ambiente - “Mauro Felli”
Università degli Studi di Perugia

XXIII CONGRESSO NAZIONALE CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell’Ambiente e della Salute Umana - Atti
Perugia, 13-14 aprile 2023, Università degli Studi di Perugia

Perugia: Morlacchi Editore University Press, 2023.
ISBN 978-88-9392-442-9 (online)

Impaginazione e progetto grafico di copertina:
Roberto Fiorella (CIRIAF - Università degli Studi di Perugia)

 L’edizione digitale on-line del volume è pubblicata ad accesso aperto su
www.morlacchilibri.com/universitypress.

La presente opera è rilasciata nei termini della licenza Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>). La licenza permette di condividere l’opera, nella sua interezza o in parte, con qualsiasi mezzo e formato, e di modificarla per qualsiasi fine, anche commerciale, a condizione che ne sia menzionata la paternità in modo adeguato, sia indicato se sono state effettuate modifiche e sia fornito un link alla licenza.

© 2023 Morlacchi Editore

Pubblicato da Morlacchi Editore University Press, Piazza Morlacchi 7/9, 06123 Perugia

www.morlacchilibri.com

Temi Congressuali

- Energie rinnovabili e impianti sostenibili
- Sostenibilità ambientale ed economico-sociale
- Edilizia sostenibile e bioarchitettura
- Modelli di economia circolare e filiere innovative integrate
- Clima e cambiamenti climatici
- Inquinamento e Salute Umana
- Progetto Vitality

Comitato organizzatore

Francesco Asdrubali

Elisa Belloni

Beatrice Castellani

Valentina Coccia

Michele Goretti

Lorenzo Silvestri

Comitato scientifico

Francesco Asdrubali

Giorgio Baldinelli

Paolina Bongioannini Cerlini

Bruno Brunone

Cinzia Buratti

Pietro Buzzini

Simonetta Cirilli

Franco Cotana

Francesco Fantozzi

Elisa Moretti

Anna Laura Pisello

Federico Rossi

Alessandro Toscano

Segreteria Organizzativa

Ilaria Castellini

Roberto Fiorella

Leandro Lunghi

Fabio Meattelli

Maria Angela Polverini

Indice

Introduzione	p. VII
Dignità dell'uomo e dignità del pianeta.	
Un ritratto delle prospettive interreligiose di fronte al Climate Change.	p. 1
<i>Simon Francesco Di Rupo</i>	
Fight to planned obsolescence and right to reparability.	p. 15
<i>Gabriele Toscano</i>	
Evaluation of monolithic aerogel glazing systems for thermal performance and daylight in hot and dry conditions: a case study of an Iranian school.	p. 22
<i>Mehrangiz Mastoori, Elisa Belloni, Francesca Merli, Gloria Pignatta, Cinzia Buratti</i>	
Innovazione giuridica per la sostenibilità: obiettivo e risultato della ricerca scientifica progettuale.	p. 36
<i>Sabrina Brizioli</i>	
AgriTech and Innovation.	p. 56
<i>Andrea Alunni, Lilian Volcan, Rosaria Pignataro</i>	
Polymorphic regenerated silk with wood polyphenolic extracts for fully bio-based water resistant adhesives.	p. 76
<i>Emanuele Cesprini, Marco Paolantoni, Luca Valentini, Gianluca Tondi</i>	
Studio preliminare sull'impiego di estratti polifenolici da sottoprodotti dell'industria elaiotecnica applicati alle carni di cinghiale.	p. 82
<i>Caterina Altissimi, Peter Paulsen, Rossana Roila, Raffaella Branciarri, David Ranucci</i>	
Green energy potential strategies combining architectural and plant system regeneration.	p. 91
<i>Carla Balocco, Lorenzo Leoncini</i>	
Renewable Energy Community models for internal woodlands areas using biomass, thermal and electric carriers.	p. 110
<i>Luca Brunelli, Elisa Belloni, Franco Cotana, Ilaria Pigliautile</i>	
Approccio BIM multi-dominio per edifici a zero emissioni di carbonio. L'esempio di un complesso termale.	p. 123
<i>Simone Forastiere, Cristina Piselli, Benedetta Pioppi, Carla Balocco, Fabio Scurpi, Anna Laura Pisello</i>	

Inquinamento atmosferico, mobilità e salute umana.	
L'approccio geografico all'analisi della prima fase della pandemia in Italia.	p. 144
<i>Fabio Fatichenti, Gino Filippo Massetti</i>	
Design and performance analysis of a small-scale prototype water condensing system for atmospheric emissions abatement.	p. 159
<i>Franco Cotana, Valentina Coccia, Ramoon Barros Lovate Temporim, Leandro Lunghi, Andrea Nicolini, Anna Magrini, Daniele Dondi, Dhanalakshmi Vadivel, Marco Cartesegna, Oleksandra Tryboi</i>	
Relationship among energy system capacity, energy system efficiency and annual gas consumptions for boiler heating systems modelled in RETScreen using simulation data from TRNSYS.	p. 179
<i>Leone Maria Barbaro, Gabriele Battista, Emanuele de Lieto Vollaro, Roberto de Lieto Vollaro</i>	
Acoustic characterisation and quality assessment of Cremona's Ponchielli theatre in the post-epidemic period.	p. 188
<i>Ruoran Yan, Antonella Bevilacqua, Lamberto Tronchin</i>	
Analisi e validazione di sistemi GNSS basati su sensori a basso costo per applicazioni navigazionali.	p. 203
<i>Laura Marconi, Fabio Radicioni, Aurelio Stoppini</i>	
Valutazione della sostenibilità in riferimento ad Agenda 2030 per i paesi dell'Unione Europea attraverso un approccio integrato GIS-Analisi multicriteri.	p. 223
<i>Elena Ricciolini, Arianna Tiralti, Luisa Paolotti, Lucia Rocchi, Antonio Boggia</i>	
Environmental benefits of Renewable Energy Communities: the role of demand flexibility.	p. 240
<i>Elena Tarpani, Ilaria Pigliautile, Benedetta Pioppi, Elisa Moretti, Anna Laura Pisello</i>	
Analisi del comfort ambientale multi-dominio negli spazi interni e dell'impatto sulla produttività degli occupanti nei luoghi di lavoro temporaneo.	p. 254
<i>Andrea Silei, Ilaria Pigliautile, Claudia Fabiani, Cristina Piselli, Carla Balocco, Fabio Scieurpi, Anna Laura Pisello</i>	
Evaluation of different inorganic salts in Salting-out process of γ-valerolactone/water solutions.	p. 272
<i>Giacomo Fabbrizi, Leonardo Lorenzi, Mattia Gelosia, Tommaso Giannoni, Franco Cotana, Andrea Nicolini</i>	

Revalorization of agrifood industry by-products:**natural extracts as a sustainable strategy to enhance food safety. p. 282***Rossana Roila, Raffaella Branciarì, Sara Primavilla, Caterina Altissimi,
Luana Perioli, Andrea Valiani, Cinzia Pagano, Gianluca Veneziani, David Ranucci***Sostenibilità della produzione di carne Chianina:****quale futuro per gli allevamenti a ciclo chiuso? p. 287***Lucio Cecchini, Aleksej Antonini, Francesca Maria Sarti, Sara Carè,
Massimo Chiorri, Biancamaria Torquati***The contribution of windows to the acoustic insulation of facades:****prescriptions and materials. p. 296***Claudio Ivona, Umberto Berardi***Progressi nello sviluppo di materiali per imballaggi sostenibili. p. 313***Nicoletta Terlizzi, Umberto Berardi***Circularità nella mobilità elettrica: focus sul ciclo di vita delle batterie agli ioni di Litio. p. 333***Flavio Scrucca, Giorgio Baldinelli, Grazia Barberio, Lucio Postriotti, Cem Karaca***La prima Comunità Energetica rinnovabile di Assisi:****analisi tecnico-economica e legale. p. 349***Elisa Moretti, Ettore Stamponi, Simona Stoklin, Michele Eugeni, Christian Cavazzoni,
Marco Luigi Marchetti, Patrizia Fortini, Stefania Proietti***Definizione di modelli di Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) incentrate sulla
riqualificazione dell'edilizia scolastica da implementare nel territorio italiano:****primi scenari del progetto eduCER. p. 369***Luca Brunelli, Elisa Belloni, Maria Luisa Cotana, Ilaria Pigliautile,
Anna Laura Pisello, Fabio Santini***Produzione di idrogeno molecolare tramite foto-sonolisi dell'acqua:****stato dell'arte nel contesto italiano. p. 382***Piergiovanni Domenighini, Ferdinando Costantino, Anna Donnadio,
Morena Nocchetti, Alceo Macchioni, Federico Rossi, Franco Cotana***Organosolv lignin as renewable feedstock in polyols production using a microwave system. . p. 399***Tommaso Giannoni, Tiziano Galmacci, Mattia Gelosia, Ramoon Barros Lovate,
Giacomo Fabbrizi, Gianluca Cavalaglio, Ippolita Mecca, Paola Iodice*

Life cycle analysis of Heat production from biomass of SRC and perennial grasses plantations in Ukraine.	p. 408
<i>Oleksandra Tryboi</i>	
Narrative Medicine to counteract the spread of zoonosis on natural and anthropized areas due to the effects of climate change and globalization.	p. 419
<i>Raoul Ciappelloni, Maria Luisa Marenzoni, Eros Rivosecchi, Matteo Rocchetti, Andrea, Domenichini, Marco Servili, Angelo Carfagna, Stefania Mancini, Angelika Riganatou, Luciano Sonaglia, Mehmet Erman Or, Bengü Bilgiç, Md Tanvir Rahman</i>	
L'altro: l'aspetto relazionale nella giurisprudenza climatica.	p. 429
<i>Cristiana Angelini</i>	
Approach to energy analysis using Building Information Modeling (BIM) software.	p. 443
<i>Annamaria Ciccozzi, Tullio de Rubeis, Giovanni Pasqualoni, Domenica Paoletti, Dario Ambrosini</i>	
Recycling biomass ashes on the road pavements: a multimethod approach.	p. 454
<i>Elia Pandolfi Balbi, Costanza Cambi, Cristina Montanari, Maximiliano Fastelli, Gianluca Cerni, Alessandro Corradini, Franco Cotana, Corrado Bocci, Paola Comodi</i>	
Multi-domain approach to evaluate human comfort outdoors: a case study in central Italy. ..	p. 468
<i>Roberta Jacoby Cureau, Iliara Pigliautile, Ioannis Kousis, Anna Laura Pisello</i>	
Benessere 4D. Programmazione di attuatori in legno stampati in 4D per il miglioramento passivo del benessere igrometrico e percettivo.	p. 483
<i>Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Giulia Pelliccia</i>	
Architettura per la condivisione energetica.	
Sperimentazione sulle Comunità Energetiche Rinnovabili verso la cultura del risparmio.	p. 493
<i>Francesco Asdrubali, Paolo Civiero, Stefano Converso, Federico Fiume, Dante Maria Gandola, Antonino Laudani, Paola Marrone, Iliara Montella, Martina Palermo, Alberto Raimondi, Marco Ranzato, Francesco Riganti Fulginei</i>	
Need for the implementation of biosecurity in animal farming.	p. 513
<i>Chiara Poeta, Silva Costarelli, Alessandro Monacelli, Emiliano Lasagna, Raffaella Franceschini, Maria Luisa Marenzoni</i>	
Modulating the transition temperature of VO2 for sustainable radiative cooling in buildings. ..	p. 519
<i>Francesco Marchini, Roberto Bondi, Roberto D'Amato, Claudia Fabiani, Loredana Latterini, Anna Laura Pisello</i>	

Monitoring the thermal potential of low-cost radiative cooling materials under static and dynamic conditions of exposure.	p. 532
<i>Chiara Chiatti, Ioannis Kousis, Claudia Fabiani, Laura Carlосena, Anna Laura Pisello</i>	
Doping-induced Control of the Metal-Insulator Transition (MIT)	
Temperature in Thermochromic VO₂ for Radiative Cooling Applications: a Combined Density Functional Theory and Ab-initio Molecular Dynamics investigation.	p. 546
<i>Costanza Borghesi, Claudia Fabiani, Roberto Bondi, Loredana Latterini, Anna Laura Pisello, Giacomo Giorgi</i>	
I possibili impieghi dell'idrogeno verde nell'industria pesante e il ruolo chiave delle hydrogen valleys.	p. 554
<i>Giorgio Grossi, Fausto Arpino, Christian Canale, Gino Cortellessa, Marco Dell'Isola, Luigi Del Plato, Carmelo Fallone, Giorgio Ficco</i>	
Valorisation of olive mill wastes for biostimulant, biogas and soil organic fertilizer production.	p. 572
<i>Daniela Pezzolla, Daniele Del Buono, Ciro Tolisano, Dario Priolo, Marco Rallini, Claudia Zadra, Luigi Torre, Debora Puglia, Giovanni Gigliotti</i>	
Combining Slinky GHEX and hybrid heat pump for renewable energy retrofit of a historic building: results from an in-field monitoring campaign.	p. 582
<i>Silvia Cavagnoli, Claudia Fabiani, Henk Witte, Antonino Bonanno, Valeria Palomba, Andrea Frazzica, Franco Cotana, Anna Laura Pisello</i>	
Environmental Assessment of eco-sustainable plasters additivated with hydrochar.	p. 599
<i>Carolina Santini, Claudia Fabiani, Fabiana Frota de Albuquerque Landi, Marco Barbanera, Alessandro Cardarelli, Franco Cotana, Anna Laura Pisello</i>	
Determinazione dell'impronta di carbonio di edifici pubblici: due casi di studio di impianti sportivi di nuova progettazione.	p. 612
<i>Claudia Pacchiega, Agnese Marcazzani, Laura Mazzini, Carlotta Tasca, Patrizio Fausti</i>	
Health + VR: valutazione dell'impatto sulla salute di diverse configurazioni progettuali.	p. 629
<i>Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Filippo Cornacchini, Chiara Mommi</i>	
Literacy ed Ecoliteracy: quando leggere contribuisce allo sviluppo dell'intelligenza ecologica.	p. 641
<i>Maria Ermelinda De Carlo, Giulia Toti</i>	

- La scuola come modello di sostenibilità. Progetti, sperimentazioni e ricerche applicate.** p. 656
Paolo Verducci, Valerio Palini, Francesco Demma
- Monitoraggio sistematico dei consumi e del microclima interno per l'ottimizzazione della risorsa energetica e il mantenimento del comfort indoor: strategie per una Pubblica Amministrazione più sostenibile.** p. 668
Maria Giulia Proietti, Ettore Stamponi, Marco Elefante, Giacomo Romagnolo, Francesco Longhi, Emanuele Montenovolo, Luca Proietti, Elisa Moretti
- I distretti agroalimentari di qualità in Umbria. Un modello di governance territoriale strategica per l'economia circolare.** p. 689
Luca Fondacci, Francesca Caproni, Rosaria Pignataro, Francesco Giorgianni
- Vantaggi energetici ed economici delle comunità energetiche: un caso studio riferito ad una città del sud Italia.** p. 706
Concettina Marino, Antonino Nucara, Maria Francesca Panzera, Matilde Pietrafesa

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Introduzione

Le tematiche relative allo sviluppo sostenibile, divenute negli ultimi anni di pressante attualità e quindi di tendenza, sono da sempre al centro del Congresso Nazionale CIRIAF, giunto alla ventitreesima edizione, e diventato nel tempo un importante appuntamento annuale per le ricerche in materia di energia e ambiente, con una crescente partecipazione di ricercatori che orientano i propri studi verso un approccio interdisciplinare alla sostenibilità. Quando ancora il dibattito scientifico su temi quali le fonti energetiche rinnovabili e alternative, la pianificazione e l'efficienza energetica, l'economia circolare, la mobilità sostenibile, nonché sugli effetti sanitari e socio-economici dell'inquinamento ambientale era limitato all'ambito accademico e non ancora allargato alla società civile italiana, il CIRIAF, in maniera lungimirante, ha promosso il proprio congresso nazionale, con cadenza annuale, aprendolo a contributi interdisciplinari e provenienti dal mondo degli Enti di ricerca, delle pubbliche amministrazioni, delle agenzie ed associazioni ambientali. Ed in effetti alcuni dei player più importanti che operano in Italia nel settore dello sviluppo sostenibile, e che pubblicano ad esempio rapporti sull'economia circolare e la green economy, hanno intrapreso la propria attività dopo l'avvio del Congresso CIRIAF.

L'edizione numero 23 del congresso, dal consueto titolo "SVILUPPO SOSTENIBILE, TUTELA DELL'AMBIENTE E DELLA SALUTE UMANA", si è tenuta presso il Polo di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia, nei giorni 13 e 14 aprile 2023, con una significativa partecipazione in presenza dopo le edizioni in modalità telematica e le restrizioni dovute alla pandemia da COVID-19.

E' con grande piacere che presentiamo gli atti del congresso, riuniti come ormai da qualche anno per motivi ecologici in questo e-book, e caratterizzati da oltre 50 memorie scientifiche su temi che spaziano dalle energie rinnovabili all'edilizia sostenibile e all'economia circolare, passando anche per gli aspetti di sostenibilità economico-sociale e le tematiche sempre più attuali relative a clima e ambiente.

Il Presidente del Comitato Scientifico

Prof. Franco Cotana

Il Presidente del Comitato Organizzatore

Prof. Francesco Asdrubali

Il Direttore del CIRIAF

Prof. Bruno Brunone

Perugia, 13-14 aprile 2023, Università degli Studi di Perugia

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

ARTICOLI SCIENTIFICI

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Dignità dell'uomo e dignità del pianeta. Un ritratto delle prospettive interreligiose di fronte al *Climate Change*

Simon Francesco Di Rupo ^{1,*}

¹ Dottorando di Ricerca in Etica della Comunicazione, della Ricerca Scientifica e dell'Innovazione Tecnologica, Dipartimento FISSUF, Università degli Studi di Perugia

* Autore di riferimento. E-Mail: simonfrancesco.dirupo@studenti.unipg.it

Abstract: Sebbene a un primo sguardo il *Climate Change* imponga una presa in considerazione delle scienze naturali e tecnologiche, per arginarne e dominarne i rischi, anche la filosofia detiene, su questo tema, uno spazio di riflessività di non poco conto. Nello specifico del nostro contributo, vorremo concentrarci sulle sollecitazioni che le religioni ricevono, e restituiscono, rispetto a un tema che chiama in causa l'etica, il senso della vita, la sensibilità verso il mondo creaturale e la visione della storia. Una chiave di volta contemporanea risiede nel *Laudato Si* di Papa Francesco del 2015, con il richiamo a un dialogo comune, trasversale, in nome di un concetto di "ecologia integrale". La curiosità si innesca dal momento che la risposta interreligiosa di fronte alle sfide del creato si potrebbe configurare come ricomponimento delle frammentazioni secolari, poiché a suo modo anche la secolarizzazione è un cambiamento "climatico" dei saperi e delle tradizioni. Il nostro vuole quindi porsi come contributo umanistico integrativo e non ostativo rispetto alle scienze, le quali a buona ragione rivestono un ruolo imprescindibile per arginare le più nefaste conseguenze delle problematiche geologico-climatologiche. Pertanto, di fronte a un tema sia urgente che annoso, il nostro sguardo vuole dare voce alle religioni con lo scopo di un ampliamento di coscienza sul tema del "senso" del nostro vivere, poiché il nostro abitare il mondo non è un solo soggiornare, ma un nostro proiettarci verso la comprensione della nostra dignità.

Keywords: Interreligioso; ecologia; secolarizzazione; enciclica; filosofia; intercultura; post-secolare.

1. Introduzione. Anche la secolarizzazione è a suo modo un “cambiamento climatico”

*La natura unisce qualche volta
alle nostre azioni effetti e spettacoli
con una specie di prefazione cupa e intelligente,
come se volesse farci riflettere.*

(Victor Hugo)

Il presente contributo vuole configurarsi come uno spunto di ampliamento sul tema del *Climate Change* partendo da una questione filosofica di fondo. Nel dibattito scientifico sui cambiamenti climatici, uno dei temi più importanti riguarda sicuramente il fattore di influenza sull'ambiente caratterizzato dalle attività dell'uomo che, nel procedere storico, connotano il nostro pensare al pianeta sia come territorio abitabile, sia come un “mondo”. Mentre il pianeta è un dato di fatto fisico, di volta in volta descritto e circoscritto dall'osservazione scientifica, il concetto di mondo riguarda la totalità del nostro pensare la dimensione in cui non viviamo solo in qualità di mortali e bipedi, ma anche in quanto esseri coscienti e creativi. In questo quadro, così come cambiano geologicamente le ere del pianeta, così vivono, in un vortice di dialettiche e torsioni, le nostre visioni di questa complessità, costituita dai nostri sogni, i nostri incubi, le nostre previsioni e credenze anche in materia di ciò che è invisibile. Motivo per cui anche la secolarizzazione, come cambiamento dei paradigmi inerenti alla vita religiosa dell'uomo, è a suo modo un cambiamento “climatico”. Il nostro interesse sarà dunque quello di riflettere sul *Climate Change* come opportunità di ripensamento del sentire e vivere religioso nella contemporaneità.

Esiste infatti uno scenario filosofico che può andare oltre le litanie nichilistiche post-moderne, in cui gli scenari distopici della “morte di Dio” e dell'uomo occupano lo spazio dell'angoscia ancor prima del dato di fatto di un pianeta in sofferenza. In questo senso potremmo dire che la storia della filosofia contemporanea ha mostrato i segni di un surriscaldamento prima ancora che fosse lo stesso pianeta a patirlo.

La filosofia della religione può incarnare un ruolo fondamentale sia all'interno del proprio settore, sia come ponte per un dialogo interdisciplinare, per sgomberare il campo da una narrazione autoreferenziale, poiché ha la capacità di trattare la fede nel mondo come un punto di partenza riguardo l'amore che si deve al pianeta. Non solo la “fine” del mondo, ma anche il suo “fine” deve ritrovare una sua centralità teoretica a beneficio del dibattito delle scienze.

Tenendo conto che la laicizzazione e la desacralizzazione della società tecnologica accentuano la perdita di riferimento a un mistero della vita, poiché esso si svincola gradualmente dall'esperienza della fede, a buona ragione Aurelio Rizzacasa sottolinea come “inizio” e “fine” sia dal punto di vista della vita individuale che collettiva «*si riducono per lo più ad essere dei limiti cronologici senza coinvolgimenti emotivi [...] le ansie, le insicurezze e le paure dell'umanità trovano la loro esorcizzazione esistenziale mediante la rimozione dei contenuti simbolici*»[1], quali sono quelli offerti dalle tradizioni spirituali, unitamente alle crisi delle democrazie rappresentative e dalla imperante tecnologizzazione della vita. La secolarizzazione è indubbiamente l'emersione della criticità dei modelli narrativi che si susseguono nelle impronte culturali della storia, ma ciò non è sufficiente per squalificare i fenomeni millenaristici,

ossia quel complesso di «*diverse utopie positive o negative che accompagnano i progetti sociali di una redenzione etico-politica dell'umanità sofferente [...] il millenarismo in generale tende al rinnovamento della storia e dell'uomo. È anche vero, in senso più profondo e più nascosto, che il millenarismo esprime, soprattutto, la nostalgia del futuro*» [2 Ivi, p.24].

Pertanto, in realtà, la produzione simbolica di un mondo da riconquistare accomuna ogni epoca e, nonostante gli innumerevoli cambiamenti di paradigma, la ricerca di senso rimane una sana inquietudine dell'uomo. Un monito filosofico già proveniva, profeticamente, dalle parole del Guenther Anders autore de *L'Uomo è antiquato* (1956), quando sosteneva che il concetto di progresso ci ha “reso ciechi all'Apocalisse” [3]:

Se si pensa quali insignificanti eventi storici (o anche presagi) erano bastati a sollevare ingenti ondate di agitazione escatologica, di terrore, come pure di speranza [...] il fatto che oggi regna una “bonaccia escatologica”, quantunque la fine sia entrata effettivamente nell'ambito del possibile e di mezzi di comunicazione disponibili ce ne sia a volontà, appare addirittura allucinante. Se si prescinde dall'agitazione nella cerchia degli scienziati – caso del resto unico: paura dell'Apocalisse proprio tra gli areligiosi.

In questo quadro noi possiamo collocare il nostro presente filosofico come *post-secolare*, in cui, consapevoli del millenarismo inconscio che fa da sfondo alle preoccupazioni esistenziali collettive, possiamo nutrire la nostra riflessività con delle domande fondamentali: dal momento in cui l'uomo si mobilita per contrastare i pericoli dell'abitabilità del mondo, egli ha a cuore solo la sua sopravvivenza o ha anche in animo di riconnettersi con il senso di una storia universale? Qual è l'oggetto della cura verso il pianeta? Esso è da considerare solo come un vivente che ospita altri viventi, fra cui noi, o permane anche, nel nostro difendere la salute del mondo, l'indizio di un'*ulteriorità* sacra da preservare? Come dice Paolo Costa [4]:

Il concetto di secolarizzazione, tuttavia, può essere adoperato anche in un'accezione più sofisticata, supponendo l'esistenza di una sostanza originaria (la *forma mentis o vitae* religiosa) che può subire un processo di mondanizzazione – il trasferimento, cioè, da un piano spirituale, trascendente o sovranaturale al mondo sensibile e materiale: in una parola, all' «al di qua». Il desiderio di immortalità personale, per esempio, può trasformarsi nella voglia ardente di lasciare un segno nella storia. L'aspirazione alla santità in una dedizione esemplare ai doveri della vita quotidiana.

In questo senso non avremo più a cuore un concetto vago di salvezza ultraterrena, sia che ci si “creda”, o “no”, ma giocheremo la partita di un sentimento religioso nella salvezza del terrestre secondo i principi di una educazione planetaria al saper-abitare il mondo. Se il mondo non fosse sacro, perché salvarlo?

2. La *Laudato Si'* di Papa Francesco

*Laudato si', mi' Signore,
per sora nostra madre Terra
la quale ne sustenta et governa,
et produce diversi fructi con coloriti fiori et herba.
Laudato si', mi' Signore,
per quelli che perdonano per lo tuo amore
e sostengo infirmitate e tribolazione.
(San Francesco, Cantico delle Creature)*

L'idea di un creato che ha bisogno di cure è carattere distintivo dell'enciclica *Laudato Si'* di Papa Francesco, del 2015. Il tema della crisi ambientale si colloca al di dentro di questioni che investono sia la sfera politica, sia economica che appunto religiosa, dovendo richiamarsi a uno specifico concetto di creaturalità da re-introiettare, preservare, proiettare in un'ottica di salvezza. Pertanto l'ottica della religione, in questo caso cattolica, non può attenersi alla mera attestazione dei fatti, ma deve necessariamente interpretare questi come indizi di significati; i quali attengono, dice la teologa Teodora Rossi, al concetto di "amartologia", ossia la dottrina dell'errore umano rappresentato dal peccato originale, «essendone una tappa che si rivela gradualmente, e che vede intrecciate, nella creatio continua, sia la logica della bontà della creazione, sia quella della libertà dell'essere umano prima e dopo il peccato originale), sia, infine, quella della riparazione»[5].

La visione sapienziale di Papa Francesco, ci dice sempre Teodora Rossi, si esprime nel considerare come «nel creato vigono leggi e dinamismi che sono ignoti all'essere umano e che, tuttavia, parlano della sapienza divina in un linguaggio che deve necessariamente oltrepassare i termini dell'evidenza empirica e aprirsi a tutti i registri coscienziali» [6 Ivi, p.187].

La *Laudato Si'* si afferma come la prima enciclica interamente dedicata alla questione ecologica, in cui si colgono elementi di ampio respiro "ecumenico" e un'apertura nei confronti dei più recenti guadagni della scienza. Osserva a tale proposito Laura de Gregorio [7]:

La legittimità dell'esperienza religiosa non deve rimanere peraltro fine a sé stessa: la religione e la scienza, fornendo approcci diversi alla realtà, devono perseguire un confronto intenso e produttivo per entrambe. Più precisamente, è necessario da un lato un dialogo fra le religioni orientato alla cura della natura, alla difesa dei poveri, alla costruzione di una rete di rispetto e di fraternità. Dall'altro è indispensabile che le stesse scienze si aprano l'un l'altra, evitando che ognuna si chiuda nei limiti del proprio linguaggio e che le singole specializzazioni si traducano in isolamento e assolutizzazione del relativo sapere.

Il merito fondamentale dell'enciclica consiste nell'essersi collocata, sul piano storico-culturale, come una terzietà rispetto alle polarizzazioni fra ambientalisti misantropi e antropocentristi disposti ad accettare distruzioni ambientali pur di sfamare gli appetiti tecnocratici, mostrando che l'una è il duale dell'altro. Non si può separare la lotta alla fame e la disegualianza sociale senza tenere in debita considerazione il tema ecologico, in quanto l'ambiente è un bene comune globale oppure, per dirla meglio e alla maniera dell'enciclica, è la "nostra casa comune".

In Italia, la posizione appena accennata è trattata dall'economista Stefano Zamagni, il quale, nel sottolineare l'importanza dell'enciclica nota come l'economia di mercato sa parlare del passato e del presente di fronte al dato osservato, mentre il futuro come dimensione di senso è appannaggio della riflessione spirituale e filosofica insita nell'enciclica [8]:

Papa Francesco suggerisce di adottare uno sguardo ecologico capace di porsi in relazione con tutte le dimensioni di valore e perciò capace di vedere il rischio di finire schiacciati da quel circuito mortale che combina l'aumento dell'efficienza (la potenza) dovuto alla tecnoscienza con l'espansione illimitata della soggettività (la volontà di potenza). Ecco perché occorre recuperare l'idea di limite ed ecco perché la ragion tecnica non è più una guida sicura per un modello di sviluppo umano integrale. Si tenga presente, infatti, che è l'unione di potenza e di volontà di potenza a generare la *hybris* che conduce al collasso.

La coscienza del limite non può, vista la portata immensa del rischio e dunque anche delle eventuali soluzioni, non affacciarsi a una forma risolutiva da rappresentarsi come un concetto di *biodiversità economica* e di dialogo interculturale. Dice sempre Zamagni: «*ecologia ed economia hanno la medesima radice – oikos – che designa la casa comune abitata dall'uomo e dalla natura. Ma da quando è iniziato l'Antropocene [...] è accaduto che, con intensità via via crescente, la società degli umani ha buttato "fuori casa" la natura*»[9]. Come direbbe Spinoza "Tutta l'idea del mare è in una goccia d'acqua", cita Zamagni, per cui «*l'idea tutta dell'attuale "disagio di civiltà" è espressa da uno qualsiasi dei punti toccati nell'enciclica. Ecco perché è necessario – ci raccomanda la Laudato si' – cambiare in fretta la nostra capacità di sguardo sulla realtà*» [10].

Allo scopo di comprendere come sia affrontato quanto sintetizzato finora, giova citare direttamente le parti della *Laudato Sì* [11, d'ora in poi *LS*] maggiormente indicative. In *LS* n.48 emerge uno spunto perfettamente in linea con quanto da noi detto in sede d'introduzione, circa il cambiamento climatico da intendersi sia in senso fisico che culturale: «*L'ambiente umano e l'ambiente naturale si degradano insieme, e non potremo affrontare adeguatamente il degrado ambientale, se non prestiamo attenzione alle cause che hanno attinenza con il degrado umano e sociale*».

Il degrado non può essere solo oggetto di constatazione, ma deve essere ragionato in termini di rimessa in discussione dei paradigmi tecnocratici de-umanizzanti: «*la mancanza di preoccupazione per misurare i danni alla natura e l'impatto ambientale delle decisioni, è solo il riflesso evidente di un disinteresse a riconoscere il messaggio che la natura porta inscritto nelle sue stesse strutture*» (*LS* n.117).

È pertanto fondamentale riconoscere, come nella citazione dal *Cantico* di Francesco posto in esergo, il fatto che la "matre Terra" non sia solo un'immagine allegorica e antropizzante della natura, in quanto nella sua sostanza vuole indicare all'intelligenza insita nel disegno divino, che pone nella natura stessa la verità cifrata che l'uomo deve saper leggere attraverso la disposizione spirituale. Non a caso viene adottato il termine "strutture" per intendere la logica che in natura precede l'attività dell'uomo, al quale egli deve accordarsi secondo misura, riconoscendogli una matrice divina. È in questo atto di responsabilità che consiste la "lode". Il "Signore" non viene lodato nel senso di una superficiale

acclamazione entusiastica, o almeno non solo: la lode è la forma di riconoscimento che l'uomo ha il compito di attuare sia per ringraziare che per curare e propiziare. A tale proposito, il filosofo Salvatore Natoli, in commento all'enciclica, denuncia [12]:

Purtroppo, nel nostro mondo, lo osserva Papa Francesco, la lode ha cessato da tempo di essere canto, ringraziamento, gioia collettiva. Non so con quanta frequenza ma, per molti versi, sembra che la lode si sia mutata in ricerca del facile successo di cui è perfino difficile rilevare il fallimento perché spesso va fuori moda prima ancora che la sua parabola sia del tutto consumata. Ci fu un tempo in cui la gloria reclama per sé l'immortalità; oggi pare che sia in larga parte rimpiazzata dalla vanagloria.

A buona ragione Natoli sottotitola il suo commento così: "dove il non credente incontra il credente". Poiché la ridiscussione dei toni narcisistici con cui l'uomo cede alla vanagloria lo spazio antico della gloria è un problema filosofico che non richiede la patente della fede conclamata per essere discusso, ma del buonsenso, della profondità spirituale e dell'acume teoretico. È anche, ad un livello di comprensione delle forme religiose che noi vorremmo favorire, un piano su cui si gioca l'importanza dell'atto religioso in senso trasversale e mondiale. Come Papa Francesco osserva in LS n.11: «*Ogni volta che Francesco guardava il sole, la luna, gli animali più piccoli, la sua reazione era cantare, coinvolgendo nella sua lode tutte le altre creature. Egli entrava in comunicazione con tutto il creato, e predicava persino ai fiori e li invitava a lodare e amare Iddio, come esseri dotati di ragione*».

Come verrebbe accolto oggi, secondo un atteggiamento spiccatamente nichilista e profano, un siffatto disporsi spiritualmente nei confronti del mondo fisico? Probabilmente verrebbe derubricato a patologia. Ma se l'occidentale indebolisce un aspetto fondamentale del suo vivere religiosamente la natura in favore di un pensiero meramente calcolante nell'ottica di una felicità temporanea ed usa e getta, perché non appellarsi a un'integrazione universale del sentimento religioso, pur mantenendo le dovute specificità, con l'intento di promuovere un ritorno a una spiritualità futuribile e ricettiva? Il merito di questa apertura, nel *Laudato Si'*, è di enorme importanza. In primo luogo, nelle premesse:

Rivolgo un invito urgente a rinnovare il dialogo sul modo in cui stiamo costruendo il futuro del pianeta. Abbiamo bisogno di un confronto che ci unisca tutti, perché la sfida ambientale che viviamo, e le sue radici umane, ci riguardano ci toccano tutti [...] Abbiamo bisogno di una nuova solidarietà universale (LS n.14).

In secondo luogo, nel ribadire la necessità di un incontro di forme culturali e spirituali di diversa provenienza:

Se teniamo conto della complessità della crisi ecologica e delle sue molteplici cause, dovremmo riconoscere che le soluzioni non possono venire da un unico modo di interpretare e trasformare la realtà. È necessario ricorrere anche alle diverse ricchezze culturali dei popoli, all'arte e alla poesia, alla vita interiore e alla spiritualità. Se si vuole veramente costruire un'ecologia che ci permetta di riparare tutto ciò che abbiamo distrutto, allora nessun ramo delle scienze e nessuna forma di saggezza può essere trascurata, nemmeno quella religiosa con il suo linguaggio proprio (LS n.63).

3. Esempi concreti di posizioni interreligiose sul Climate Change

Ciò che risulta necessario sottolineare, giunti a questo punto della questione, è che il richiamo al dialogo non rimane lettera morta, nello scenario internazionale. Qualora nella teorizzazione di una “ecologia integrale” riscontrassimo soltanto la patina del “buon discorrere” da parte di soggetti di tutto rispetto, ma in realtà non intersecabili, potremmo ascrivere gli alti temi sin qui trattati alla stregua di una fine, ma improduttiva retorica.

A ben vedere, esempi “empirici” della fattualità di quanto posto in astratto, ci sono. È bene citarne alcuni prima di riprendere in mano il tema filosofico tout-court. La natura circoscritta del nostro saggio ci impone di non avere pretese di esaustività in merito al decorso storico degli eventi e delle istituzioni operanti sul *Climate Change*, poiché richiederebbe un mastodontico lavoro storico che il nostro sguardo filosofico non ha la velleità di rappresentare.

Andando a ritroso nel tempo, nel 2009 si impone sulla scena mondiale la *Interfaith Declaration Of Climate Change* [13], un luogo d’incontro online in cui fedi di ogni parte del mondo hanno sottoscritto un intento programmatico con la seguente visione:

La nostra visione è quella di ripetere in continuazione il messaggio che le religioni della Terra si schierano all'unisono a favore di limiti forti e immediati alle emissioni di "gas a effetto serra", prevalentemente CO₂, dovute al cambiamento climatico. La nostra visione è quella di portare questo messaggio a ogni sessione rimanente dei negoziati sul clima a Bangkok, Barcellona e Copenaghen, ogni volta con leader religiosi diversi, e di rendere la posizione unitaria di fedi e credenze ampiamente divergenti e diverse un evento che faccia notizia.

Nelle centinaia di *endorsements* di allora campeggiano, fianco a fianco, il *Dalai Lama* insieme ad *Asian Muslim Action Network*; il *World Council Of Religion Leaders* insieme a *Volunteers for Africa*, e così via, nel pieno segno dell’interculturalità e della comunione d’intenti.

Un’organizzazione che nasce dal peculiare caso di Stuart Scott [14], attivista nell’era Al Gore del 2007, antesignano e facilitatore del percorso di Greta Thunberg, dal COP14 in Polonia del 2008, passando appunto per il manifesto del 2009 appena citato, giunge fino ai nostri tempi con un percorso «istituito per ispirare e motivare i leader religiosi, di concerto con gli scienziati, a iniziare un esame approfondito del pericoloso cambiamento del sistema climatico del pianeta, spingendo al contempo i responsabili politici a trovare soluzioni rapide, senza esitazioni»[15], riuscendo ad essere approvata dal Consiglio mondiale dei leader religiosi delle *Nazioni Unite*, dal *Consiglio mondiale delle Chiese*, dal *Consiglio centrale della Fede Baha’i*, come anche dalle organizzazioni laiche *Greenpeace*, *350.org* di McKibben e il *Centro per la diversità biologica*, partecipando a dieci *Conferenze delle Parti sui Protocolli di Kyoto* (COP), sino ad incontrare lo stesso Papa Francesco nel 2016, un anno dopo l’enciclica. Un esempio tangibile, non cinematografico, di impegno concreto in materia di ecologia “integrale” e interculturale, così come proposta dall’*Interfaith Declaration* prima e manifestata dalla *Laudato Si’* dopo.

A proposito della ricezione dell’enciclica in particolare, e del “clima” interculturale in generale, vale la pena menzionare altri due esempi particolarmente virtuosi. Il primo è il dettagliatissimo volume

African Perspectives on Religion and Climate Change, del 2022 [16], in cui si alternano, in una serie di interventi, eminenti teologi africani, dallo Zimbabwe al Kenya.

Passando attraverso una sontuosa e originale “valutazione ecofemminista africana del valore dei sistemi di conoscenza indigeni per rispondere al degrado ambientale e al cambiamento climatico” [17, lvi, p.86] si ottiene anche un puntualissimo prospetto sia grafico che testuale della *regional distribution of responses to Laudato Si'* [18, lvi, p.140], in cui si sommano iniziative, workshops, finanche manifestazioni in cui vengono piantati alberi a seguito di preghiere. Un quadro analitico che permette di corroborare prospettive e criticità politiche per ogni regione africana. Il volume è quindi uno strumento sia spirituale che tecnico-scientifico per una “scienza religiosa” in atto.

Il secondo esempio che vogliamo portare per un ritratto delle fonti sul tema allo stato dell’arte (da un punto di vista di ricerca documentale costantemente aggiornato), riguardo il *Yale Forum on Religion and Ecology* [18], una fonte inesauribile di eventi, piattaforme, bibliografie, opere cinematografiche dedicate all’ecologia in chiave trasversale e internazionale, in cui il senso di “comunità” espresso dalle vocazioni religiose incontra e si incrocia perfettamente con lo spazio virtuale inteso come *community*.

Si presenta a questo punto la possibilità di un’osservazione che ci risulta opportuna svolgere a chiosa di questa rapida sintesi di esempi “empirici”.

L’elemento chiave della messa in pratica dei temi etici sta attraversando, in campo religioso su scala mondiale, una fase di elaborazione del processo sacrale: la *ritualizzazione*. La continuità del dibattito pubblico relativo al *Climate Change* sulla base della lettura e interpretazioni di dati, unite alla divulgazione culturale di buone pratiche, sta assumendo la carica di un valore condiviso e interiorizzato sia in sedi istituzionali che popolari, in un modo che riduce gradualmente la necessità di giustificare il tema, sempre più alla portata della coscienza collettiva ed epocale.

Basti chiedere alle giovanissime generazioni lumi sulla questione: spesso e volentieri esse posseggono un quadro molto più dettagliato sul piano delle informazioni, e molto più netto sul lato delle motivazioni volte a un ventaglio di azioni quotidiane coerenti con i valori di riferimento.

Questo non è un processo valoriale descrivibile come mero “indottrinamento”, per usare un termine negativo dell’area semantica dogmatica - ma è anche una *forma mentis* spirituale ormai endemica financo nella laicità. Non siamo nel campo della sola “scolarizzazione” dei valori, ma di una vera e propria assunzione di *incivilimento*, se vogliamo usare un termine molto rappresentativo, spesso utilizzato dallo Stefano Zamagni testé citato. Si tratta di un elemento da cui ripartire, se si intende non solo rinnovare un rispetto generico verso la natura, ma anche – aspetto cruciale - *ri-sacralizzare* il nostro punto osservazionale, in vista di un’azione cooperante consapevole. Risulta suggestivo, a riguardo, lo spunto del teologo Sigurd Bergmann, quando osserva [20]:

Per quanto riguarda la sfida di rispondere ai cambiamenti climatici, la mia riflessione ci porta a un problema di ricerca centrale per un futuro programma. Come possono i rituali e la ritualizzazione dei luoghi funzionare come omeostati ecologici, al fine di catalizzare modalità creative di adattamento culturale alle diverse condizioni ambientali? [...] Se la teoria dei rituali ha ragione nel constatare che tutti i processi sociali includono elementi di ritualizzazione, possiamo affrontare i problemi ambientali e anche l’ecoteologia da una nuova prospettiva.

La nuova prospettiva cui si richiama Bergmann, a nostro avviso, non può non tenere conto del contributo essenziale costituito dal pensiero di Raimon Panikkar, in chiave ecologica e interreligiosa al contempo. I luoghi potranno funzionare come omeostati ecologici religiosamente diretti solo se prima avremo una mappa spirituale in grado di “sondare i terreni” sul piano filosofico, prevenendo dogmatizzazioni e aprendo alle diversità culturali.

4. La proposta filosofica di Raimon Panikkar su dialogo interreligioso ed «ecosofia»

*Se non avviene un vero incontro religioso fra noi e la Terra,
finiremo per annientare la vita stessa sul pianeta.
Il dialogo interreligioso non è soltanto un tema accademico
o una questione ecclesiale o “ufficiale”, e ancor meno
una nuova moda sorta perché le liturgie sono diventate noiose
o è diminuito il numero di chi le frequenta.
(Raimon Panikkar, *Dialogo interculturale e interreligioso*)*

Raimon Panikkar (1918 – 2010), di cultura indiana e spagnola, potrebbe essere definito tecnicamente un filosofo, un teologo, un presbitero, ma è principalmente riconosciuto come una guida spirituale del ventesimo secolo. Non siamo di fronte a un “guru” evangelizzatore di un nuovo credo, come molti si sono succeduti nelle culture cosiddette “alternative” della New Age. Panikkar è stato un uomo della “tradizione”, ossia un autore in grado di porsi in dialogo approfonditamente con le religioni senza snaturarne i principi, cercando incessantemente i terreni comuni dal punto di vista spirituale. La finalità di una ricerca di tal tipo è efficace in senso largo solo se motivata, *in nuce*, da un movente interiore di crescita e di saggezza; solo in un secondo momento, e con infaticabile studio e attenzione per la pertinenza dei propri riferimenti, questa espansione di coscienza sarà alimentata dalla volontà di contribuire in positivo allo sviluppo della collettività. Un processo di maturazione concettuale squisitamente “filosofico”, in senso classico e antico che parrebbe banale sottolineare, ma che vale la pena ribadire nei tempi di oggi in cui anche il filosofo tende alla tecnicizzazione e burocratizzazione esasperata del suo lavoro, rischiando di perdere di vista la connessione necessaria fra dimensione etica e teoretica.

Le caratteristiche di questo autore ci permettono di porlo come interlocutore privilegiato delle tematiche sin qui espresse. Infatti, egli si contraddistingue per due filoni a noi fondamentali: il dialogo interculturale/interreligioso e il concetto di “ecosofia”, che ne è *naturale* conseguenza. Ma attenzione: quando ci riferiamo alla disposizione interiore del nostro autore non ci limitiamo a un inquadramento biografico per favorire empatia nei suoi riguardi. Siamo già al di dentro della sua proposta filosofica, quando capiamo quanto il disporsi spiritualmente in senso aperto appartenga già al concetto di dialogo *intrareligioso*, in Panikkar. Ad un primo sguardo disattento, saremmo tentati nel definire *intrareligioso* il dialogo interno a una confessione, a un’istituzione religiosa, e *interreligioso* il dialogo internazionale che poi avviene appunto su base istituzionale. In Panikkar questa dualità del dialogo, invece, corrisponde alla dinamica della conoscenza filosofica. Alla maniera di Pico della Mirandola, il dialogo

intra- recita qui *enim se cognoscit, in se omnia cognoscet* (chi conosce il proprio sé conosce tutto in se stesso). Nel volume *Dialogo Interculturale e Interreligioso* Panikkar specifica [21]:

Il dialogo intrareligioso è un dialogo interiore in cui si lotta con l'angelo, con il *daimon*, e con sé stessi. Come potremo avere accesso al Tutto di una verità liberante, se il nostro prossimo sembra nutrire credenze diverse, a volte completamente incompatibili con le nostre convinzioni? Tale dialogo interiore non è un monologo né un semplice soliloquio con "Dio"; e neppure una riflessione sul Credo dell'interlocutore o su un'altra religione. Non è una ricerca, dettata da curiosità e simpatia, su una diversa concezione del mondo. In questo dialogo noi siamo alla ricerca della salvezza, e accettiamo di ricevere insegnamenti da chiunque altro, non solo da quelli del nostro gruppo.

Così si trascende, intende dire Panikkar, quel rischio di interpretare la sfera religiosa come una nostra proprietà privata. Allenarsi all'accoglimento della trascendenza nella propria esperienza con qualsivoglia alterità è l'esercizio per antonomasia dell'uomo di spirito che non si contenta di arroccarsi in torri d'avorio: «*quando date testimonianza della vostra fede, non difendete voi stessi o i vostri interessi mascherati, per quanto sacri vi possano apparire. Guardate gli uccelli del cielo: cantano e volano senza difendere la propria musica o la propria bellezza*» [22, ivi p.23]. Del resto, aggiungiamo noi, come potrebbe alimentarsi una sensibilità verso la natura e verso il clima, senza imparare lezioni, dalla natura stessa, in quanto traccia del divino?

Non a caso il nostro filosofo concepisce la realtà come *cosmoteandrica*, ossia come un complesso di relazioni fra cosmo, Dio e l'uomo. Per Panikkar non si costituisce dialogo se prima non si comprende l'altro (che questo altro sia la Terra, un altro uomo, o il divino) come interno a questa tripartizione del reale, in cui ognuno è intimamente coinvolto. Non siamo alla stregua di un pensiero di asettica tolleranza: siamo all'interno di un pensiero di profondo *riconoscimento*. Come direbbe sempre Pico della Mirandola, che lo stesso Panikkar ama citare: *semper occulta quadam est concatenatio*; c'è sempre una certa concatenazione nascosta.

Allo scopo di coniugare l'*intrareligioso* con l'*interreligioso*, Panikkar offre un quadro delle "regole del gioco", che giova al nostro discorso elencare per intero. Egli sostiene, come punto archimedeo delle sue tesi, che l'incontro fra le religioni deve necessariamente essere di tipo religioso, come atteggiamento strutturale legato a un principio valoriale. Sono otto regole, ben specifiche, quelle che il filosofo delinea per il dialogo interreligioso [23, ivi, p.83]:

Prima: *l'incontro deve essere libero da ogni apologetica di parte*. Se il seguace di qualsiasi religione avvicina un altro credente con l'idea aprioristica di difendere la propria religione, invaliderà la virtuosità dialogica. Mantenere fede alle proprie credenze non significa utilizzarle come scudo e spada.

Seconda: *deve essere libero da apologetiche generali*. Non si deve cadere nel pericolo di associarsi ad altre esperienze religiose come forma di "crociata" contro gli irreligiosi. Non è l'"Uomo moderno" il "nemico" contro cui fare fronte comune; non è proprio l'inimicizia a contare, ma la concordia: è il luogo sacro di convergenza, a ispirare l'azione.

Terza: *bisogna affrontare la sfida della conversione*. Lo spirito religioso autentico richiede lealtà. La persona di fede entra in dialogo anche correndo il rischio della conversione, poiché senza pregiudizi, per fiducia della verità. È molto probabilmente la più complicate delle regole d'ingaggio.

Quarta: *la dimensione storica è necessaria ma non sufficiente*. L'uomo religioso non è il portavoce della sua religione, ma un membro di una comunità e un soggetto appartenente a una storia che lo precede e succede. Il dialogo non deve però fermarsi alla sola dimensione storica; deve favorire anche la creatività e il movimento dinamico e reciproco di comprensione: «*a essere in gioco nel dialogo religioso non è la Storia delle religioni e neanche la fenomenologia comparata delle religioni, bensì una fede vivente ed esigente*» [24, Ivi, p.86].

Quinta: *non è un semplice congresso di filosofia*. Nessuna religione si accontenta di essere soltanto ortodossia, pertanto senza «*una certa dose di filosofia, non è possibile alcun dialogo*» [ibidem], soprattutto come intelligenza ermeneutica. L'attenzione al linguaggio di ciascuna religione è fondamentale. Panikkar porta l'esempio del termine "idolo". Imporre categorie proprie che sono estranee all'altra religione non solo neutralizza il dialogo ma corrisponde a un pericolo di mistificazione e intolleranza.

Sesta: *non è solo un simposio di teologia*. Non esiste, al principio del dialogo, un linguaggio comune. Le teologie sono «*sforzi tesi all'intelligibilità di una data tradizione religiosa, generalmente all'interno della stessa (fidens quarens intellectum)*» [25, Ivi, p.90], pertanto, per evitare che il dialogo interreligioso sia «*un banale hobby culturale*» [ibidem] si rende necessario che i seguaci delle rispettive tradizioni siano membri illuminati e pensanti, così da favorire punti di intersezione "omeomorfica". Panikkar suggerisce un esempio suggestivo: potrebbe essere interessante ad esempio «*un esame della tradizionale nozione indiana di Karman e della moderna idea occidentale di storicità*». È in questa ricerca di comunanza che si annida la possibilità di superare il rischio "congressuale".

Settima: *non è un semplice incontro ecclesiale*. I rapporti ufficiali fra esponenti religiosi sono oggi ineludibili. Ma non possono ridursi ad incontri in cui ciascuno si limita solo a rappresentare e difendere la propria comunità di credenti. Vanno affrontati i problemi pratici e immediati attraverso collaborazione senza appoggiarsi a soluzioni di comodo già dimostrate fruttuose, ponendosi riflessivamente.

Ottava: è un *incontro religioso nella fede, speranza e carità*. Qui per religioso non si intende la devozione. Si riferisce piuttosto all'integralità della persona coinvolta nel dialogo. Si mette sul tavolo del dialogo tutto ciò che siamo, e non solo il nostro essere soggetti aderenti a dettami dottrinali. Per "fede" non intenderemo le formulazioni dogmatiche: «*non discutiamo di sistemi ma di realtà, e della maniera in cui queste realtà si manifestano in modo da rivestire un significato anche per il nostro interlocutore*» [26, Ivi p.91].

Tutte queste otto regole sono dunque subordinate a un principio unico, ossia che il dialogo non è un momento profano ma «*un atto religioso, quindi sacro, con cui siamo presi dalla verità e dalla fedeltà ai 'tre mondi' senza nessun secondo fine o intenzione. In questa creativa attività religiosa si manifesta l'autentica vitalità della religione*» [27, Ivi, p.93]. Giova ricordare, onde evitare di fraintendere il "centrismo" della posizione di Panikkar, che queste otto "regole" non sono ammonizioni per il cristiano

al cospetto delle altre religioni, o per il musulmano per le altre religioni, e così via. Questo è un elenco di “buone pratiche”, per usare una formula di moda, valide per *ognuno* degli attori di qualsivoglia dialogo interreligioso. Ricordarsi questo durante la lettura dell’elenco spoglia da ogni velleità fondamentalista e da qualsiasi atteggiamento difensivista, che fra l’altro, ad un occhio attento, viene disincentivato proprio dalle prime due regole.

È in questo quadro preliminare che possiamo affrontare anche il contenuto di un dialogo ecologico auspicabile. È infatti a partire da queste premesse che Panikkar svolge le sue riflessioni in merito all’*Ecosofia*, perché «*il mondo è anche una categoria di tipo religioso, a patto che non trasformiamo la religione in una setta*» [28]. Panikkar, in questo volume specifico sull’*Ecosofia*, ci tiene a sottolineare le differenze d’approccio con l’“ecologia”, pur non avendo assolutamente l’intenzione di squalificare i movimenti ecologisti come superficiali. La sua proposta è quella di “spiritualizzare” la concezione ecologica legata allo sfruttamento della Terra come risorsa, ancora troppo ancorata all’«*ossessione baconiana di dover gestire, cioè controllare un pianeta altrimenti selvaggio e inanimato*» [29, Ivi p.32]. Il neologismo che intende giustapporre la “sofia” al “logos” intende comunicare «*l’intuizione che né l’antropocentrismo né il razionalismo (anche nel senso migliore del termine rendono giustizia al problema. L’oikos non è il nostro habitat naturale, è la casa di tutti gli esseri*» [ibidem]. Non si tratta dunque, per Panikkar, di definire questa “casa” come l’astronomico pianeta Terra dell’universo scientifico, né il solo mondo della consapevolezza umana come ad esempio viene figurato nelle filosofie di Husserl, Jaspers o Heidegger, nonostante l’ammirazione di Panikkar per il loro procedere teoretico – ma di una “casa comune” molto vicina a quella di Papa Francesco, oseremmo dire – della quale «*tentiamo di decifrare la ‘sophia’, o piuttosto di partecipare alla sua sapienza [...] richiama più da vicino il ‘kosmos’ divino dei presocratici o la realtà descritta nel ‘nasadiyasukta’ e nel ‘purusasukta’, i due celebri inni del ‘Rg-veda’*» [30, Ivi, p.33]. In questo passaggio, possiamo notare, Panikkar compie esattamente lo sforzo connettivo intrareligioso propedeutico a quello interreligioso di cui sopra. Non un mero esercizio comparatistico, quanto un pionieristico soggiornare presso i sentieri delle saggezze comuni, come viene poi finalizzato in questo stralcio che riteniamo valido per chiudere il nostro ritratto [31, Ivi, p.36]:

La parola «ecosofia» suggerisce una sapienza di cui non siamo noi i proprietari. Questa sapienza (*prajna*) deriva dalla realtà stessa, come affermerebbe il vedanta; dalle sfere celesti, direbbe Platone; o dall’opera divina della creazione, propugnerebbe il monoteismo. La moderna frattura tra epistemologia e ontologia ha trasformato la prima in idolatria antropocentrica e la seconda in superstizione acritica [...] Qui tocchiamo i limiti dell’*humanum*. Ed è qui che ci conduce la ecosofia: alla scoperta della nostra contingenza, alla consapevolezza della nostra reale situazione.

5. Conclusioni

Il percorso svolto sin qui ha avuto l’intenzione di porsi una domanda semplice quanto abissale: se l’impegno ecologico si dipana nel mondo contemporaneo con crescente fervore, ciò è dovuto al solo impeto alla sopravvivenza e alla salvaguardia della vita terrena dell’uomo, oppure, oltre questo, vi è anche un’assunzione di responsabilità che trascende il solo mobilitarsi *pro domo sua*? Oltre l’uomo e la sua casa - la sua “domo”, appunto – vi è il *sacro* a costituire il senso, della nostra cura?

Vi è forse, nei tratti sin qui disegnati, un elemento terzo rispetto a una prospettiva atea e utilitarista, così come di una prospettiva che interpreta il soggiorno dell'uomo sulla Terra come un solo periodo di prova in terra. Nonostante l'impossibilità di un lavoro puntuale sulla complessa natura del tema teologico e antropologico, il nostro saggio ha nutrito il piccolo desiderio di fornire un ritratto umano che vada oltre il vicariato verso Dio o viceversa verso la propria espulsione del sacro dalla sfera interiore. L'ispirazione fondamentale del presente lavoro è stata quella di concepire una vitalità dell'esperienza e del sentimento religioso che lancia un ponte alla stanchezza profana post-metafisica. Può esistere nel concepire in modo congruo e attuale la religione un punto di intersezione *«tra una genealogia congetturale della ragione, l'inquietudine per le tendenze autodistruttive della modernità globalizzata e la fragile forza controfattuale di idealizzazioni che nascono spontaneamente nel cuore stesso della prassi quotidiana delle persone»*, nota brillantemente Paolo Costa [Op. Cit., p.170]. È in questo concetto basilare che si annida il proposito che abbiamo pensato per questo saggio: ossia un ricomponimento delle frammentazioni secolari che non squalifichi *ex abrupto* la religione come un bene antiquario inabilitato alla lettura dei tempi moderni.

La religione ha per sua costituzione tutti gli strumenti per favorire un "clima" nel rapporto fra l'uomo e la sua dignità. Poiché essa non può passare altrove che presso il sentiero di ciò che lo trascende. Chissà, dunque, che la cura per l'ambiente non sia solo una "tutela", ma una forma di felicità, per l'uomo, perché come dice Jorg Lauster *«questo lo libera dalla necessità di concepire come felicità soltanto ciò che è il prodotto delle sue idee e dei suoi tentativi pratici di tradurlo in atto. Lo rasserena, perché presagisce che la buona riuscita della sua vita è già anticipata in un fondamento molto più profondo»* [32]. Poiché è nell'amore per il vivente che si coltiva l'indizio dell'infinito.

Concludiamo affidando un'ultima suggestione alle parole dell'*Oratio de Hominis Dignitate* di Pico della Mirandola [33]:

Auguriamo questa pace agli amici e al nostro tempo. Auspichiamola per ogni casa in cui entriamo. Desideriamola per la nostra anima, perché così essa possa diventare casa di Dio. Quando l'anima si sarà tolta di dosso le incrostazioni per mezzo della morale e della dialettica, quando si sarà adornata della pompa regale di una filosofia molteplice e avrà coronato gli stipiti delle porte con i serti della teologia, discenda allora il Re della gloria e dimori presso di lei, accompagnato dal Padre. Se ella si mostrerà degna di un ospite così illustre, allora, indossando una veste d'oro come abito nuziale, fasciata della variopinta ricchezza delle scienze, accoglierà lo splendido ospite non più come ospite, ma come sposo.

References

- 1-2. Aurelio Rizzacasa, *L'eclisse del tempo. Il fine e "la fine" della storia*, Città Nuova, Roma 2001, p.177.
3. Guenther Anders, *L'uomo è antiquato. Considerazioni sull'anima nell'epoca della seconda rivoluzione industriale*, Bollati Boringhieri, Torino 2006, p.260.
4. Paolo Costa, *La città post-secolare. Il nuovo dibattito sulla secolarizzazione*, Queriniana, Brescia 2019, p.20.
- 5-6. Teodora Rossi, *La Laudato Si'. Elementi per un'ermeneutica del pensiero di Papa Francesco*, Angelicum, Vol.93, n.1 (2016), Pontificia Studiorum Universitas a Sancto Thomas Aquinate in Urbe, pp.177-178. Available online: <https://www.jstor.org/stable/10.2307/26392546>

7. Laura De Gregorio, *Laudato Si': per un'ecologia autenticamente cristiana*, in *Stato, Chiesa e pluralismo confessionale*, rivista telematica, n.41/2016, ISSN 1971- 8543, p.9.
- 8-9-10. Zamagni, S., *Laudato Si' ed ecologia integrale: civilizzare l'economia e custodire il creato*, link: [Laudato si' ed ecologia integrale: civilizzare l'economia e custodire il creato – Chiudiamo la forbice](#), consultato il 27/03/2023.
11. Papa Francesco, *Laudato Si'. Sulla cura della casa comune*, Libreria Editrice Vaticana, Città del Vaticano 2015. Nel testo, da qui in poi: *LS*, con annesso il numero di paragrafo.
12. Salvatore Natoli, *Laudatio come beatitudine. Dove il non credente incontra il credente*, in Papa Francesco, *Laudato Si. Sulla cura della casa comune*, Editrice La Scuola, Brescia 2016, p.163.
13. Cfr. [Interfaith Declaration on Climate Change](#): « *Our vision is to repeat the message over and over that the religions of Earth stand as one behind strong and immediate limits to climate changing emissions of 'greenhouse gasses', predominantly CO2. Our vision is to take this message to each remaining session of the climate negotiations in Bangkok, Barcelona and Copenhagen, each time with different religious leaders, and to make the unified stand of widely divergent and differing faiths and beliefs into newsworthy events*», traduzione nel testo da parte nostra. Consultato il 28.03.2023.
14. Per un inquadramento della figura di Stuart Scott in ambito *green*: [Stuart Scott - Green Culture World](#)
15. Robert Hunziker, *La religione incontra il cambiamento climatico*, Los Angeles 03.01.2021, trad.it. di Thomas Schmid. Available online: [La religione incontra il cambiamento climatico \(pressenza.com\)](#), consultato il 28.03.2023.
- 16-17-18. AA.VV., *African Perspectives on Religion and Climate Change*, a cura di Ezra Chitando, Ernst M. Conradie e Susan M. Kilonzo, Routledge, Oxon 2022, The Open Access version of this book, available at www.taylorfrancis.com, has been made available under a Creative Commons Attribution-Non Commercial-No Derivatives 4.0 license. DOI: 10.4324/9781003147909.
19. Cfr. [Interreligious | Yale Forum on Religion and Ecology](#), consultato il 28.03.2023.
20. Sigurd Bergmann, *Climate Change changes religion. Space, Spirit, Ritual – Technology – through a theological lens*, in *Studia Theologica* 63,, Routledge, Taylor&Francis 2009, DOI 10.1080/00393380903345057, p.114.
- 21-22-23-24-25-26-27. Raimon Panikkar, *The Intrareligious dialogue*, Paulist Press, New York 199, trad. it. *Dialogo interculturale e interreligioso*, in *Opera Omnia*, a cura dell'autore e di Milena Carrara Pavan, Voume VI/2, Jaca Book, Milano 2013, p.17.
- 28-29-30-31. Raimon Panikkar, *Ecosofia. La saggezza della Terra*, Jaca Book, Milano 2015. Traduzione di Dario Rivarossa da un testo inedito in inglese intitolato *Ecosophy, an Interculture Reflexion*, p.31.
32. Jörg Lauster, *Dio e la felicità. La sorte della vita buona nel cristianesimo*, Queriniana, Brescia 2006, p.197.
33. Pico della Mirandola, *La dignità dell'uomo*, Nuova Universale Einaudi 2022, A cura di Raphael Ebgi. Traduzione di Francesco Padovani. Testo latino a fronte, p. 29.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Fight to planned obsolescence and right to reparability

Gabriele Toscano

Ph.D. candidate in Consumer Law, Department of Economics, University of Perugia

E-Mail: gabriele.toscano@gmail.com

Abstract: The paper aims to analyze the phenomenon of planned obsolescence and the tools to combat it, in view of its serious environmental implications, in the light of recent EU legislation.

Keywords: Planned obsolescence; Environmental impact; Right to repair; Consumer protection; Waste recycling; Environmental sustainability; Linear chain; Green deal.

1. The phenomenon of planned obsolescence

The phenomenon of planned obsolescence has existed for many years but since electronic devices have become more and more present in our lives, it has become increasingly important especially in recent years¹.

The term “planned obsolescence” was first used in the 1920s when the major manufacturers of incandescent light bulbs signed an agreement to reduce their lifetime².

The objective of this business-political strategy³ was very simple: a light bulb that lasted too long was bad for the economy because consumers did not buy new bulbs. For this reason, it was decided to limit the life of light bulbs to around one thousand hours of use. This was a strategy that marked the beginning of the technique wanted by companies to reduce the running time of a product and to ensure replacement with the latest generation. According to the most authoritative literature⁴, the expression identifies the process by which, in modern industrial societies, consumer’s needs for accelerated replacement of technological or other types of goods are aroused.

¹ Latouche, S., *Usa e getta. Le follie dell’obsolescenza programmata*, Bollati Boringhieri, Torino, 2015.

² Zolea, S., *Verso un diritto dell’obsolescenza programmata: ipotesi legislative, novità giurisprudenziali e spunti comparative*, *giustiziacivile.com*, 2021, I, 35.

³ Bellizzi Di San Lorenzo, A., *Obsolescenza programmata dei prodotti e dei dati personali*, *Osservatorio sulle fonti*, 2019, I, 31.

⁴ Item Planned obsolescence, *Enc. Treccani*, Available online.

This process is triggered by the production of goods subject to a rapid decline in functionality, and other kind of realized by means of appropriate expedients introduced at the production stage (use of poor quality materials, planning for repairing costs higher than those of purchase, etc.), as well as by means of the diffusion and advertising of new models to which irrelevant changes are made on the functional level, but substantial on the formal one.

Over the years, the case of incandescent light bulbs was not the only one of planned obsolescence. A few years later there was another case concerning nylon stockings for women⁵. The material by which women's stockings were made was very durable, therefore the durability of the product was very high, and they never broke. For this reason, companies found ways to lower the quality of the product in order not to risk closure: in this way (as we can see nowadays) the quality is lower and women's stockings break very easily, so that new stockings are continually sold.

Over time, the term obsolescence has become increasingly associated to the world of computing and electronics. Smartphone, followed by washing machines, refrigerators, and other household appliances, is one of the products most subject to this ageing process.

To sum up, planned obsolescence can be defined as the industrial strategy that limits the life cycle of a product to a sufficiently short period with the aim of fueling the demand for products on the market.

2. Effects and consequences of consumer goods' sale

According to a recent Italian law proposal to amend the Consumer Code titled "Other provisions to fight the programmed obsolescence of consumer goods", this phenomenon is the paradoxical and paradigmatic result of the evolution of global consumerism: it is the set of techniques that cause consumer objects-goods to expire arbitrarily and intentionally induced to increase profits and sales of an object⁶.

In other terms, the life cycle of a given consumer object is consciously limited, by programming its failure, to arouse in consumers, the need to replace that same object immediately, discouraging the purchase of spare parts (which often turn out to be unaffordable or even uninstallable)⁷.

This interesting law proposal amendment a selective part of the Italian Consumer Code to target the phenomenon of planned obsolescence. This law proposal is composed of nine articles: article 1 defines the concept of planned obsolescence; article 2 establishes the rights of the consumer; article 3 identifies obligations and prohibitions for the producer; article 4 introduces among the general obligations also the lifespan of consumer goods; article 5 expands the general information content concerning consumer goods; article 6 increases the validity of the legal guarantee (for defects or lack of conformity) of consumer goods; article 7 establishes general rules on the supply of spare parts; article 8 provides that the National Council of Consumers and Users shall promote studies, research

⁵ Latouche, S., *Usa e getta. Le follie dell'obsolescenza programmata*, Bollati Boringhieri, Torino, 2015.

⁶ Italian law proposal, 8 July 2018, n. 615, by senators Castaldi, Paragone, Anastasi, Vaccaro, Croatti, Lanzi, Puglia and Giroto. Available online: https://www.senato.it/japp/bgt/showdoc/18/DDLPRES/0/1105851/index.html?part=ddlpres_ddlpres1.

⁷ Zolea, S., *Obsolescenza programmata e diritto: noterelle comparative*, *giustiziacivile.com*, 2019, V, 23.

and conferences on the consequences of the practice of planned obsolescence; and article 9 establishes sanctions.

Recently, the Legislative Decree n. 170 of 4 November 2021 introduced some amendments to the Consumer Code regarding the sale of consumer goods⁸, became effective on 1st January 2022, and applies to consumer sales contracts concluded, after that date⁹.

Unfortunately, regarding planned obsolescence nothing has been transposed and the proposed law n. 615 of 9 July 2018 has remained unused¹⁰.

3. Instruments to fight planned obsolescence and role of the European Union

The law proposal of 2018 could have been a good start to fight planned obsolescence in Italy, but as we have seen, it has not become law.

However, the impetus came from the European Union because in March 2021 enacted the Regulation n. 341 became effective on 1st March 2021, and should include long-lasting products that can be repaired, better labeling and extended warranties¹¹.

According to the European legislator, an effective right to repair should cover the life cycle of products, including design, fundamental ethical principles of production, harmonization of evaluation protocols and consumer information, including labeling on reparability¹². It should also promote more efficient and sustainable use of resources, waste reduction and wider use and reuse of products.

The new European regulation on repairs has the following objectives: that products are designed to last longer, to be repaired safely and that their components are easily removable. In addition, it is desirable that an adequate right to repair would give industry and consumers free access to information regarding repair and maintenance. For digital devices, application updates should be reversible and not lead to a decrease in performance, for example in smartphones. Furthermore, updates should be made available for a minimum period and consumers should be fully informed of this availability at the time of purchase.

The reason for this is that, according to the European legislator, practices that unduly limit the right of reparation or lead to obsolescence could be considered unfair commercial practices and prohibited by European law¹³.

The new repair regulation is a good thing in tackling planned obsolescence because it provides: incentives for consumers to repair a product rather than replace it, such as extending warranties or

⁸ Pagliantini, S., *Contratti di vendita di beni: armonizzazione massima, parziale e temperata della Dir. UE 2019/771, Giurisprudenza italiana*, 2020, I, 217-238 and Alpa, G., *Aspetti della nuova disciplina delle vendite nell'Unione europea, Contratto e impresa*, 2019, III, 825-830.

⁹ The new rules apply to sales contracts between a consumer and a seller (B2C), concluded both online and offline, concerning tangible movable goods. Also included in the scope of the Decree are contracts for the provision of digital content or services, if they are incorporated into or interconnected with the goods and provided with the goods under the contract of sale, regardless of whether the digital content or services are provided by the seller or by a third party.

¹⁰ Pagliantini, S., *Diritto contrattuale dei consumatori*, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli, 2022.

¹¹ Imbruglia, D., *Mercato unico sostenibile e diritto dei consumatori, Persona e Mercato*, 2021, III, 495-510.

¹² De Cristofaro, G., *La nuova disciplina della vendita mobiliare nel codice del consumo*, Giappichelli, Torino, 2022.

¹³ Granelli, S., *Pratiche commerciali scorrette e invalidità del contratto: il D.d.l. S1151 di revisione del codice civile, Jus*, 2020, I, 179-186.

supplying a replacement device for the duration of the repair; harmonized rules on consumer information, including repair scores, estimated life span, spare parts, repair services and availability of software updates; smart tagging tools like QR codes; a mechanism of joint responsibility between producer and seller in case of non-conformity of products; and finally durability and repair requirements included in a future eco-design directive¹⁴.

This regulation was born above all due to the problem of waste disposal, in fact since 2017 the idea was rumored in the halls of the European Parliament to try to put a stop to all this waste that causes damage to the environment. In fact, waste disposal is a consequence of planned obsolescence: there is talk of an enormous amount of storage: over fifty million pieces of garbage globally, with refrigerators, dishwashers and washing machines in first place in terms of weight, size and difficulty of transport and disposal¹⁵. In fact, this commercial policy produces a continuous flow of waste which is then shipped to third world countries: however, more than 80% of electronic waste is impossible to repair and entire container loads are abandoned in landfills in every part of the country which is increasingly becoming the dumpster of the world's garbage.

A situation that risks to exponentially increase with no possibility of return¹⁶.

4. A look around French experience

France has recently introduced by law the so-called "repairability index" on electronic product labels. With the repairability index, each product presents a whole series of information that allows the consumer to disassemble, repair and find spare parts for the product¹⁷.

More precisely, this label will report a vote from one to ten calculated on a grid of five items: documentation; ease of disassembly; availability of spare parts; price of spare parts; specific criteria related to the product category with a score calculated from specific sub-criteria for the relevant product category. The final score of the repairability index, which can go up to ten, is obtained by averaging the scores of the various criteria. An attempt to counter one of the main causes of the excessive consumption of resources and the production of electronic waste¹⁸.

This new law is only the completion of the fight against planned obsolescence because Planned obsolescence in France this practice is a crime under the Penal Code¹⁹. This is thanks to a new law of 2015, which provides for very high fines for companies that abuse the market strategy. The sanctions

¹⁴ Simone, A., L'economia circolare non è il riciclo, *Rivista giuridica dell'ambiente*, 2019, IV, 671-684 and Tempesta, G., Ecodesign: profili normativi, *Rivista giuridica dell'ambiente*, 2019, IV, 685-699.

¹⁵ Abondio, I., Le nuove prospettive della gestione dei rifiuti in Italia tra "fattore di pressione" e art. 14 del Patto mondiale per l'ambiente, *Il diritto dell'economia*, 2021, II, 323-364.

¹⁶ Ferrara, R., "Brown economy, green economy, blue economy": l'economia circolare e il diritto dell'ambiente, *Diritto e processo amministrativo*, 2018, III, 801-835.

¹⁷ The French legislator defines planned obsolescence as the set of techniques designed to deliberately reduce the life of a product to increase the replacement rate. In short, a series of tricks that push producers to use poor quality components regardless of the purchase price to have greater control over the longevity of the product put on sale. French law identifies and punishes different methodologies.

¹⁸ La Rosa, E., Obsolescenza programmata e diritto penale: una relazione "complicata", in *Rivista trimestrale di diritto penale dell'economia*, 2020, fasc. 3-4, pp. 568-604.

¹⁹ Zolea, S., Il reato di obsolescenza programmata in Francia: un'analisi comparativa, in *Rassegna dell'Arma dei Carabinieri*, 2019, fasc. 1, pp. 87-102.

vary from 300k euros to 5% of the value of the annual turnover in France, and a maximum of two years' imprisonment for the director of the company. The goal is to reduce waste, promote the conservation of natural resources and, as usual, defend consumers.

5. Conclusions

Solving the problem of planned obsolescence, however important from the point of view of sustainable development, presents enormous difficulties despite the will of consumers. Recent surveys have shown that European citizens would rather repair their technology products than change them frequently. For these reasons, instead of finding solutions that are impossible in the short and medium term, both to propose and above all to implement, these conclusions aim to propose some reflective temperaments.

The first temperament concerns investing in waste recycling, because the circularity pays off. This is revealed by new data published by the European Commission on the implementation of the circular economy action plan adopted in December 2015. In the following year, circular activities including repair, reuse and recycling generated value added of almost 150 billion euros at European level, with an investment of around 20 billion euros. Investing in waste is worthwhile because, if we take the example of technological products, it is possible to reuse many components that would otherwise have to be thrown away: plastic, metal components, gold, silver, copper, etc. Little material for a single product but multiplied by billions of pieces makes all the difference in the world. In this way it is possible to build new products with lower costs and to guarantee people, even less well-off, the possibility of accessing the purchase of products that are always updated. This is because another of the problems of planned obsolescence concerns the so-called update problem. With the update, an aesthetically new product stops working because the internal software becomes old and no longer suitable with the new programs. Surely technology advances and it is correct that there are new more advanced programs, but it is not correct to have so many unused products that generate garbage. For these reasons, a serious recycling program is necessary so that obsolete products are disposed of and regenerated with new and more performing ones.

The second temperament is to invest in economic incentives for the purchase of new products both for transport and for technological consumption. Cars too are goods subject to planned obsolescence, and it is known in fact that some parent companies find themselves forced to leave the markets (such as, for example, the Chevrolet range in Europe) due to the economic difficulties of the system and, consequently, the inability to find spare parts. From this it follows that many people, in a situation of serious economic crisis and lack of work - such as the one we are experiencing today - find it impossible to change their car when it becomes obsolete. This is very dangerous because an old and uninspected car (also due to the economic crisis in this case) as well as polluting can cause accidents, with danger both for the driver and for other motorists.

Environmental protection is connected to numerous human rights, including the right to life, the right to health, the right to an adequate standard of living, etc. It is no coincidence that the United Nations Organization has also intervened to define the so-called human environment by establishing

that man has a fundamental right to freedom, equality, and satisfactory living conditions, in an environment which allows him to live in dignity and well-being. He has a solemn duty to protect and improve the environment for present and future generations²⁰.

Planned obsolescence also has undoubted advantages, as scientific research and technological progress allow the discovery of new products, updated and in step with the times. If there weren't planned obsolescence, not understood as the production of goods designed to fail prematurely or become obsolete in the short and medium term, but as a normal development of science, many surgical interventions would not be possible today (think, for example, of the most sophisticated to operate on the heart or eyes that once did not exist). But all this must not interfere either with the environment or with human dignity.

Human dignity brings with it the right to a healthy environment and to a common good that respects that of every single person. It applies both to the protection of the environment, but above all to the principle of human dignity.

References

- Abondio, I., Le nuove prospettive della gestione dei rifiuti in Italia tra “fattore di pressione” e art. 14 del Patto mondiale per l’ambiente, *Il diritto dell’economia*, 2021, II, 323-364.
- Alpa, G., Aspetti della nuova disciplina delle vendite nell’Unione europea, *Contratto e impresa*, 2019, III, 825-830.
- Bellizzi Di San Lorenzo, A., Obsolescenza programmata dei prodotti e dei dati personali, *Osservatorio sulle fonti*, 2019, I, 31.
- De Cristofaro, G., *La nuova disciplina della vendita mobiliare nel codice del consumo*, Giappichelli, Torino, 2022.
- Ferrara, R., “Brown economy, green economy, blue economy”: l’economia circolare e il diritto dell’ambiente, *Diritto e processo amministrativo*, 2018, III, 801-835.
- Granelli, S., Pratiche commerciali scorrette e invalidità del contratto: il D.d.l. S1151 di revisione del codice civile, *Jus*, 2020, I, 179-186.
- Imbruglia, D., Mercato unico sostenibile e diritto dei consumatori, *Persona e Mercato*, 2021, III, 495-510.
- La Rosa, E., Obsolescenza programmata e diritto penale: una relazione “complicata”, in *Rivista trimestrale di diritto penale dell’economia*, 2020, fasc. 3-4, pp. 568-604.
- Latouche, S., *Usa e getta. Le follie dell’obsolescenza programmata*, Bollati Boringhieri, Torino, 2015.
- Pagliantini, S., Contratti di vendita di beni: armonizzazione massima, parziale e temperata della Dir. UE 2019/771, *Giurisprudenza italiana*, 2020, I, 217-238
- Pagliantini, S., *Diritto contrattuale dei consumatori*, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli, 2022.
- Simone, A., L’economia circolare non è il riciclo, *Rivista giuridica dell’ambiente*, 2019, IV, 671-684

²⁰ Planned obsolescence is a phenomenon in contrast with the 12th Sustainable Development Goal of the United Nations (to guarantee sustainable production and consumption models), which implies negative environmental effects due to the large amount of waste it generates and the consequent difficulty in disposing of it.

- Tempesta, G., Ecodesign: profili normativi, *Rivista giuridica dell'ambiente*, 2019, IV, 685-699.
- Zolea, S., Il reato di obsolescenza programmata in Francia: un'analisi comparativa, in *Rassegna dell'Arma dei Carabinieri*, 2019, fasc. 1, pp. 87-102.
- Zolea, S., Obsolescenza programmata e diritto: noterelle comparative, *giustiziacivile.com*, 2019, V, 23.
- Zolea, S., Verso un diritto dell'obsolescenza programmata: ipotesi legislative, novità giurisprudenziali e spunti comparative, *giustiziacivile.com*, 2021, I, 35.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Evaluation of monolithic aerogel glazing systems for thermal performance and daylight in hot and dry conditions: a case study of an Iranian school

Mehrangiz Mastoori^{a,*}, Elisa Belloni^b, Francesca Merli^b, Gloria Pignatta^c, Cinzia Buratti^b

a CIRIAF, University of Perugia, Via G. Duranti 93, Perugia 06125, Italy

b Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 93, Perugia 06125, Italy

c School of Built Environment, UNSW: University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia

* Reference Author. E-Mail: Mehrangiz.Mastoori@studenti.unipg.it

Abstract

While skylights and transparent surfaces in educational buildings can provide natural light and contribute to the overall visual appearance of the space, they can also create several problems such as energy loss, glare, solar heat gain, and lack of thermal comfort. Increasing thermal performance and daylight of windows in buildings is crucial to limit these problems and guarantee health and well-being, energy efficiency, sustainability, cost savings, and aesthetics. This study focuses on assessing the impact of monolithic aerogel on thermal performance and daylight of two primary school classrooms located in the hot climate of Shiraz, Iran. Three different glazing systems with thicknesses of 24 mm, 26 mm, and 36 mm were examined, including an innovative aerogel-based solution. Energy simulations showed that the aerogel outperforms traditional double-glazing systems in terms of annual energy requirements (approximately 355.7 kWh/m² for the North part and 334.7 kWh/m² for the South part), despite a slight increase in electricity consumption. The use of aerogel also enhances visual comfort conditions and decreases the glare ratio (below the critical threshold of 35% which is classified as imperceptible glare). This research highlights the potential of aerogel as an innovative solution for energy-saving in buildings without sacrificing optical performance. Overall, the findings of this study provide important insights for designing sustainable buildings in hot and dry regions.

Keywords: Education buildings; Aerogel insulation; Glazing systems; Daylight performance; Thermal performance; Visual comfort; Energy savings.

1. Introduction

The design of buildings envelopes has a significant impact on the consumption of renewable resources. In developed countries, energy consumption in the construction sector is more than 33% of total energy [1]. Not only the residential and commercial sectors are the main responsible for in Iran, but also the energy consumption in public buildings is high compared to international standards. In this country, the average energy consumption in school buildings as a major category of public structures is more than 160 kWh/m² [2], which is 2/5 times more than the energy consumption of schools in developed countries (about 65 kWh/m²) [3]. Architectural design is a complicated process that involves the integration of buildings, inhabitants' requirements, and environmental conditions [4, 5].

This process requires special attention since it plays a key role in the development of sustainable buildings able to respond to occupant's demands, especially when it comes to educational buildings where architecture directly affects children's learning abilities. Therefore, school buildings should put a particular focus on occupant comfort as well as student and teacher performance, and at the same time, use the least possible amount of energy [6,7]. Despite the high energy consumption, thermal comfort is not usually provided in classrooms [8].

Windows play an important role in creating thermal and visual comfort for occupants in buildings. On the other hand, windows are always affected by a large amount of heat from the sun [9]. Moreover, daylighting is an integral aspect of indoor environmental quality assessment in buildings. The use of daylight in the environment not only results in the reduction of electrical energy consumption but also contributes to the creation of a space that has a positive influence on the health and well-being of building users. Several researchers have shown that daylight affects the educational practice of the students involving an increase in productivity, improves human performance, and has biological effects on the production of cortisol, a hormone that regulates the day-night cycles as well as the students' concentration [10]. However, daylight can result in visual discomforts such as glare and unwanted reflections and ultimately lead to the disruption of the thermal balance of rooms through overheating. For this reason, keeping the balance between the maximization of daylight harvesting and risk management of potential discomforts is the most ambitious challenge for designers [11].

Aerogel is a nanostructured solid material characterized by low density and high porosity (>90%), with a thermal conductivity lower than 0.020 W/mK. It is available in granular and monolithic forms: granular aerogels are easy to handle because they could be poured like a powder [12], but the monolithic panels are transparent and allow vision through the window. In the last decade, many studies were carried out on monolithic aerogel as an innovative material and solution for building applications. Buratti et al. [13-14] have done a lot of research as pioneers in this field. In most of the research on aerogel insulation and its types as a new material in the construction field, the aim is to recognize its properties and its impact on the climate issue and then use it as a sustainable material in residential buildings. Most studies have examined the thickness and dimensions of transparent glazing systems with aerogel and compared them with existing solutions in terms of heating, cooling, and lighting energy demand, acoustics, and lighting performance. Buratti et al. [13] investigated the energy performance of a new double-glazing system with monolithic aerogel in non-residential buildings

application in different climates. The influence of the innovative transparent system was studied in terms of heating and cooling energy demand by means of Energy Plus™ 8.4 simulations, over a time interval of 1 year. Despite a slight increase in cooling energy demand, the innovative solution allowed a reduction in heating up to 7%, 12%, and 15% for Helsinki, Paris, and Turin, respectively with respect to a low-e double glazing system. In 2019, Michele Zinzi et al. [14] studied the comparison of solar and light performance of monolithic aerogel and conventional glazing to examine optical and visual properties of monolithic aerogel as insulating material in the transparent envelope. Dynamic simulation models were used for calculating the annual energy demand for heating, cooling, and lighting of an office building with large strip windows in the east and west wall. Window-to-wall ratios of 50% and 100% were considered in different climate conditions. Results were compared with conventional solutions, such as double and triple glazing units. Their results showed the high value of the solar factor increases the energy demand for cooling (about 11% in moderate climates), becoming worse when increasing the window-to-wall ratio. The energy demand for artificial lighting is quite similar for all the investigated solutions, with the aerogel window characterized by a good light transmission. Moreover, aerogel is a promising building envelope material that can be used to improve thermal and lighting performance. In different studies and measurements carried out a few years ago [15,16,17], it was found that when compared to a double low-emission standard window, a double-glazing system with monolithic aerogel in the air gap allows a 55% reduction in heat losses and a 25% in light transmission.

Reim et al. [18] prepared an aerogel glazing of 56 mm consisting of two sheets of 16 mm and obtained a very low heat transfer coefficient and solar transfer coefficient of 35%. Garnier et al. [19] studied the optical and thermal properties of aerogel glazing in an office in London and showed that the amount of solar energy and brightness with aerogel system is 30% less than double glazing one. A university in New York, New Jersey, used aerogel Calga glass to build energy-efficient windows, and results showed that the aerogel glazing system is four times more efficient than the ordinary one [20]. Window glasses allows light and vision within the building. Different glasses exhibit distinct energy-performance characteristics which is ability to heat transfer resistance (U-value; UV), through glazing active controlling of solar heat gain (Solar Heat Gain Coefficient; SHGC) and light amount passing through the glazing material (visible transmittance; VT). Depending on the UV, SHGC and VT amount on the windows, users can be able to select appropriate window for improving effectiveness of daylight at maximum level [21]. The novel interest in monolithic aerogel is justified by the rapid production process, able to reduce costs and waste [22,23].

In this paper, a monolithic aerogel glazing system was proposed and studied through simulation The energy and visual performances of the proposed glazing system were considered. A typical educational building model in Shiraz (which is a typical Hot-Dry city) was constructed as a case study. It is the first time that the monolithic aerogel glazing system was considered in educational building under Hot-Dry climate.

2. Methodology

In order to compare the thermal performance and daylight of four different types of glazing systems in educational buildings, a second story-story building is selected as a case study and introduced in section 2.1. To evaluate the thermal and daylighting performance of two classrooms located within the educational building numerical simulations are performed by using Rhinoceros version 7.0, Grasshopper version 1.0.0007, and Ladybug plugin version 1.4 as reported in section 2.2.

2.1. Case study

Two typical classrooms (each presenting length of 7 m, width of 6 m, and height of 4 m for a total floor area of 507 m² for the entire educational building), one facing South and one North, are considered as case studies (Figures 1 and Figure 2). The window of the building has a double-glazing system (float glass layer (6 mm), argon 90% (16 mm), float glass layer with low-e (4 mm), for a total thickness of 26 mm) with a thermal transmittance U-value equal to 1.1 W/m²K [13]. Thermal characteristics of building components based on common Iranian materials are shown in Table 1 [24]. The building also uses the Heating, Ventilation, and Air conditioning (HVAC) system for heating and cooling; the used energy sources are natural gas and electricity. The temperature set point for cooling and heating is 28°C and 20°C, respectively, according to the Iranian Internal Standard (i.e., 19 of the Iranian National Building regulations) [25]. According to the regulations of the School Renovation and Development Organization [26], the lighting level in the classrooms is set at 300 lux. There are thirty-five students in each class, and the building is occupied from 7 a.m. to 2 p.m., from September 21 to June 21 (from Saturday to Thursday), except on public holidays [27].

Table 2 shows the input data and the variables applied to the software. In the simulation, four types of glazing systems are considered for the windows of the building both in north and south classroom façade.

The innovative solution (AER-DGU), is a double glazing unit (DGU) glass composed by float clear glass (4.7 mm), monolithic aerogel (15 mm), and float clear glass 4.7 mm and it is compared with the following commercially glazing systems (Table 2):

- double glazing unit glass with low-e coating and argon (90%) in the gap (LOW-E DGU);
- triple glazing unit (TGU) glass with double low-e coating and argon (90%) in the gap (LOW-E TGU).
- single glazing unit glass with clear float glass (simple window glass).

As shown in Table 2 [13], U-value of the aerogel window is comparable to low-e glazing one, while U-value of the double glazing with low-e coating is 30% lower than the one of the aerogel samples. The g-value of the aerogel sample (0.70) is higher than other systems. The difference between these values causes different thermal performance during the months of the year and affects the cooling, heating, and lighting loads as well as the energy consumption of the building.

Figure 1. Plan of the second floor of the educational building (studied spaces are marked in green).

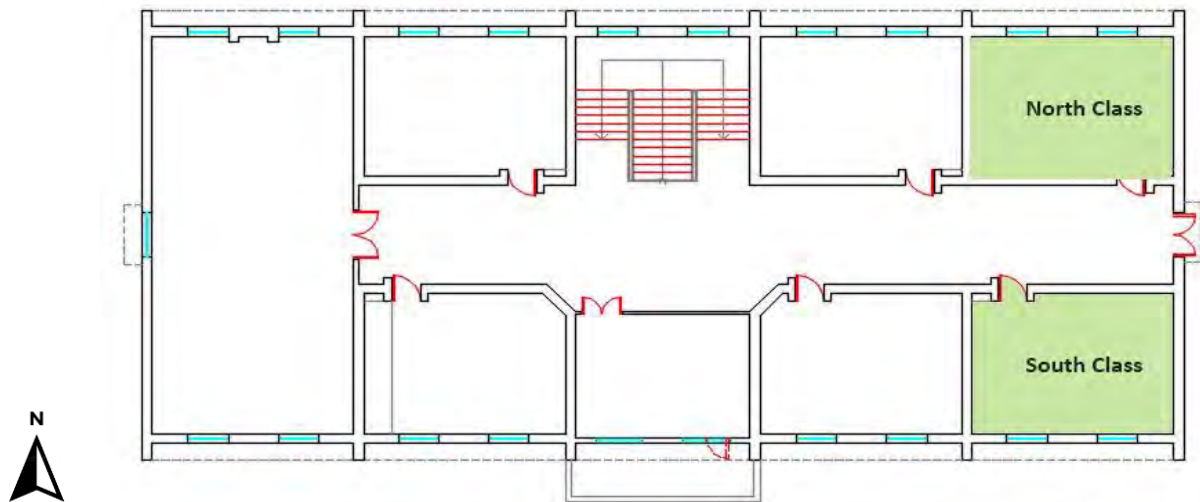


Figure 2. The 3D model of the case study: Rhinoceros software (studied spaces are marked in green).

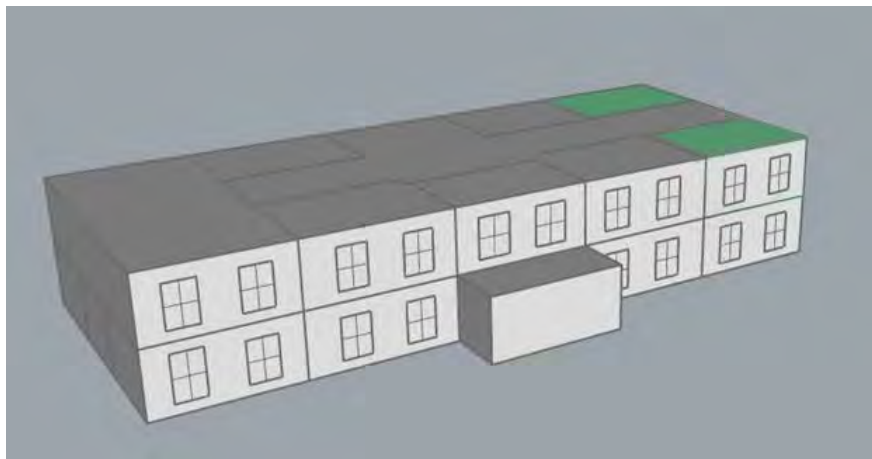


Table 1. Thermal properties of building envelopes.

	Construction	Thickness [m]	U-value [W/m ² K]	Specific Heat Capacity [J/kgK]	Density [kg/m ³]
External wall	brick work outer	0.1	0.84	800	1700
	EPS expanded polystyrene (standard)	0.08	0.04	1400	15
	concrete block (medium)	0.2	0.51	1000	1400
Internal wall	gypsum plasterboard	0.01	0.16	840	800
	gypsum plasterboard	0.02	0.16	840	800
	concrete Block (medium)	0.2	0.51	1000	1400
Floor	gypsum Plasterboard	0.02	0.16	840	800
	floor screed	0.01	0.41	840	1200
	cast concrete (lightweight)	0.3	0.38	1000	1200
	EPS expanded polystyrene (standard)	0.2	0.04	1400	15
Roof	ceiling tiles	0.01	0.05	1000	380
	Asphalt	0.005	1.15	840	2330
	EPS expanded polystyrene (standard)	0.04	0.04	1400	15
	reinforced concrete (medium)	0.3	2.3	1000	2300
	gypsum plasterboard	0.01	0.16	840	800

Table2. Constructive, thermal, and optical features of the investigated glazing systems [8].

Glazing	Description	Thickness [mm]	Visible transmittance τ_v [-]	Solar factor g [-]	U-value [W/m ² K]
AER-DGU	float clear glass (4.7 mm), monolithic aerogel (15 mm), float clear glass (4.7 mm)	24.4	0.69	0.70	1.0
LOW-E DGU	float clear glass (6 mm), argon 90% (16 mm), low-e float clear glass (4 mm)	26	0.76	0.55	1.1
LOW-E TGU	low-e float clear glass (4 mm), argon 90% (12 mm), float clear glass (4 mm), argon 90% (12 mm), low-e float clear glass (4 mm)	36	0.66	0.44	0.7
Single glass	Clear glass (6mm)	6	0.88	0.82	5.8

2.2 Thermal and daylight analysis tools

The present study aims to investigate and compare the thermal performance and daylight of four different types of glazing systems in the educational building through library study, and simulation analysis. Rhinoceros modeling tool was used to model the educational building. A Rhinoceros plugin, Grasshopper can provide strong performance in design and optimization methods by developing an environmentally friendly architectural design [28]. As shown in Figure 3 [29], energy plus engine, through ladybug tools for energy simulation, and Grasshopper as the platform for parametric modelling and optimization process were employed. The Radiance and the Daysim, as daylight simulation engine, has been selected to evaluate visual comfort. In this research, Rhinoceros version 7.0, Grasshopper version 1.0.0007, and Ladybug plugin version 1.4 were used to model and simulate the two classrooms and evaluate their thermal and daylighting performance. In order to evaluate the thermal performance of the building, the energy use intensity index (EUI) was selected: all window systems are evaluated by using the Ladybug-tools plugin (using the Energy Plus engine).

The quality of daylight distribution and visual comfort were assess using the following metrics by the software:

- Useful Daylight Illuminance (UDI): this metric defines the annual time fraction that indoor horizontal daylight illuminance at a given test point reaches in each domain. 100 Lux were chosen as the lower bound, and 2000 Lux as the upper bound of useful illuminance. UDI was chosen as the principal measure of daylighting performance because a good daylighting solution meets both the illuminance and visual comfort requirements of occupants [15];
- Spatial Daylight Autonomy (sDA): This metric describes the annual sufficiency of ambient daylight levels in interior environments and is defined as the percent of an analysis area that meets a minimum daylight illuminance level for a specified fraction of the operating hours per year [16];
- Daylight Glare Probability (DGP): Glare is a human sensation defined as “light within the field of vision that is brighter than brightness which the eyes are adapted” by Harper Collins. DGP was classified into four groups comprising imperceptible (35-40), perceptible (35-40), disturbing (40-45) and intolerable (45-100) [17].

- Visual Comfort Probability (VCP): Guth [18] introduced this metric to evaluate comfort glare, and it was later modified to be applied to all types of lighting systems [19].
- Daylight Autonomy (DA): Metric indicates that the interior space receives ample daylight [16].

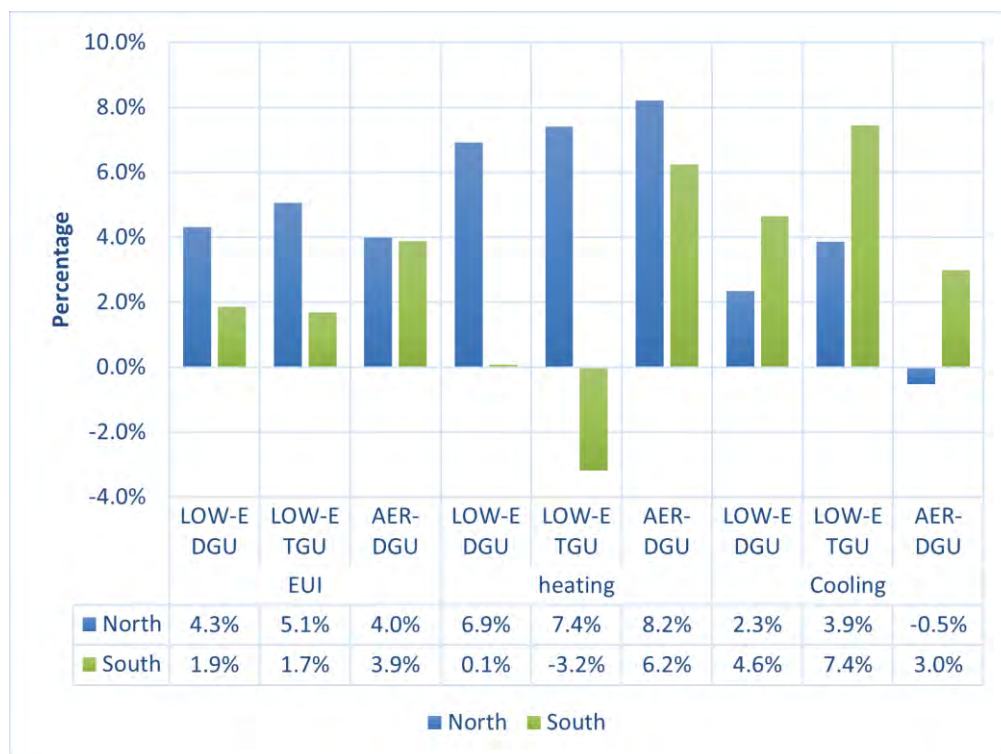
3. Results and Discussion

This section reports a summary and an interpretation of the main findings obtained from the thermal (section 3.1) and visual (section 3.2) analysis performed in this study.

3.1. Thermal performance

The energy use intensity (EUI) of the North and South part of the building in Shiraz was analyzed over the course of a year. The results indicate that the EUI of AER-DGU glazing system is approximately 355.7 kWh/m² for the North part and 334.7 kWh/m² for the South part. Figure 3 shows a comparison of the EUI-values of AER-DGU in relation to other glazing systems. The innovative window provides better performance in the South exposure throughout the year (up to 4% improvement compared to single glazing). However, in the North, the EUI value of AER-DGU is slightly worse than that of low-e glazing systems. This may be due to the high g-value of the AER-DGU, which leads to a reduction in heating load and thus results in better performance in the South classroom that receives solar radiation.

Figure 3. Comparison between the innovative AER-DGU solution and other traditional glazing systems (i.e., LOW-E DGU and LOW-E TGU) in terms of EUI, heating and cooling, where the positive percentage correspond to an improvement and a negative percentage to a worsening with respect to a single window.



The results of the study showed that The innovative window provides better performance in the South exposure throughout the year (up to 4% improvement compared to single glazing). (Figure 3). The innovative solution resulted in higher heating energy savings in double glazing system with monolithic aerogel, which is characterized by higher solar radiation. The higher solar factor of the aerogel windows increases the heat gain, resulting in greater energy savings. However, the high value of the solar factor for the double-glazing system with monolithic aerogel also increases the energy demand for cooling in both classrooms, except for simple window in the southern façade, as confirmed in [20].

Based on these findings, glazing systems with monolithic aerogel could be considered a good solution for space heating, and demand of in educational buildings, especially in the South façade. As schools are closed for three months in the summer, the inefficient performance of this window system in reducing cooling load can be ignored during that period. Therefore, the use of glazing systems with monolithic aerogel could be a suitable option for the educational building under study, considering the climatic conditions and energy-saving potential.

3.2. Daylight performance and visual comfort

UDI, DGP, and sDA are commonly used metrics for evaluating daylight performance and visual comfort. The assessment is divided into two parts: illuminance indices and glare indices. Figure 4 shows that the double-glazing system with monolithic aerogel provides a good illuminance distribution (UDI-values ranging between 100–2000 lux) for about 63% and 70% of the time in a year for South and North classrooms, respectively. The difference in UDI between the two classrooms is small, and all values are within an acceptable range. The AER-DGU system is ranked second in terms of UDI performance for both classrooms. In contrast, sDA considers the availability of daylight for occupancy with a 300-lux threshold. The window with higher visible transmittance is ranked higher in sDA. Therefore, the AER-DGU system is ranked third in sDA performance for both classrooms. Figure 5 provides a visual representation of the ranking of the different glazing systems based on sDA.

Figure 4. Illuminance indices (UDI and sDA) for all alternative in the North and South classrooms.

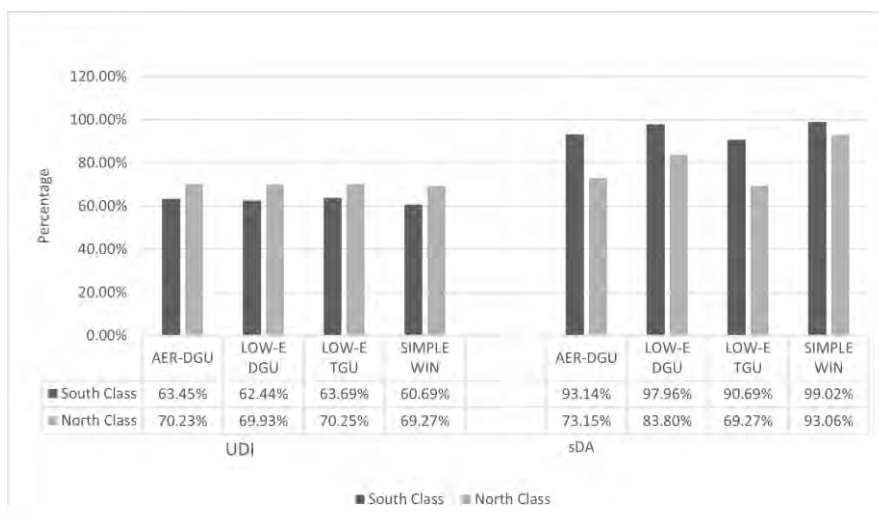
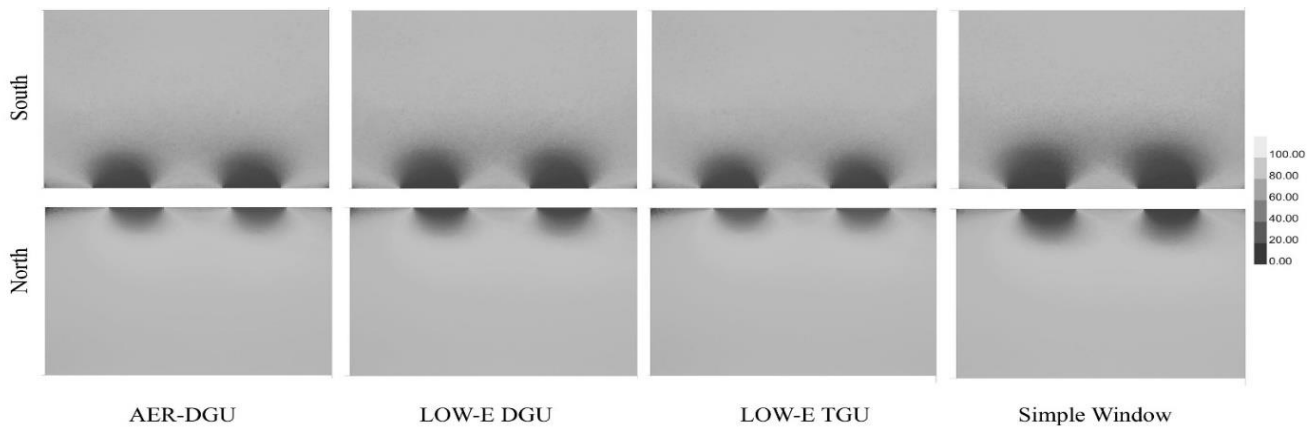
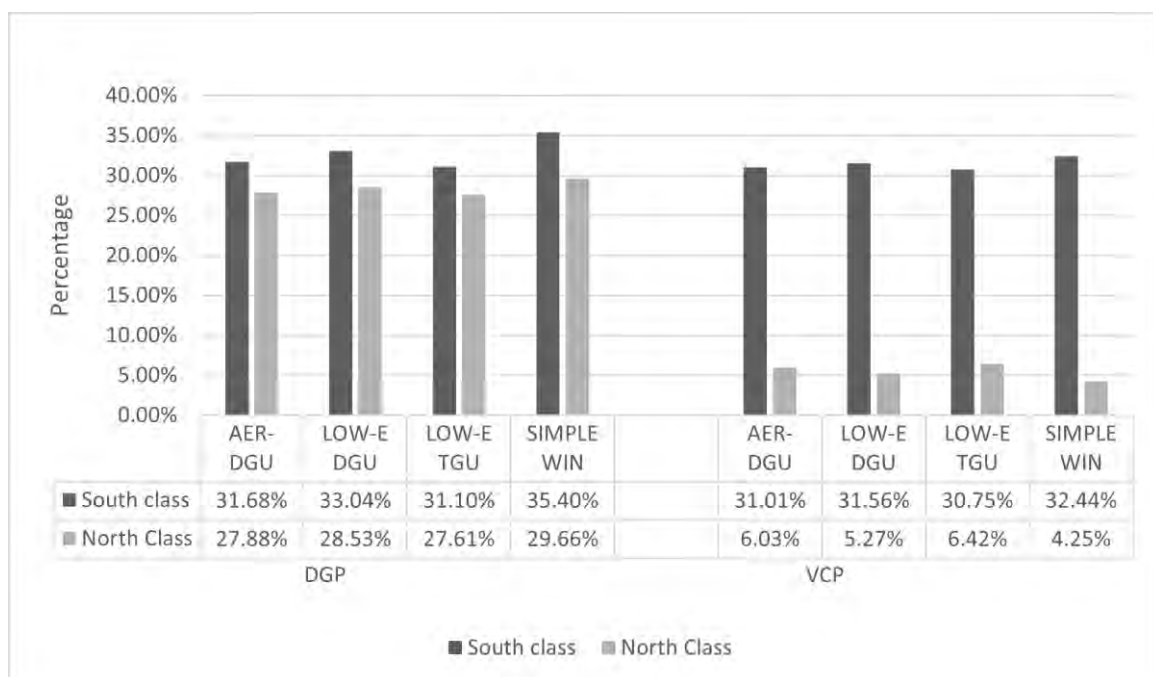


Figure 5. The UDI map of all alternatives for the North and South classrooms.



In addition, the Daylight Glare Probability (DGP) and Visual Comfort Probability (VCP) were calculated for two classroom spaces located on the second floor of the school, at heights of 1.8 m and 2 m from the window, and at a height of 0.8 m above the floor to represent a seated person. The view direction was assumed to be perpendicular to the window surface, which represents a worst-case scenario for potential glare, although it is rather unrealistic as desks are typically positioned to allow a view direction parallel to the window. Figure 6 shows that all alternatives, except for a simple window in the South classroom, are below the critical threshold of 35% and are classified as imperceptible glare. In both classrooms, the AER-DGU ranked second after LOW-E TGU. This order is consistent in the North classroom for the VCP metric, but in the South class, the AER-DGU falls to third place. The VCP investigates human comfort from a specific angle of view.

Figure 6. Glare indices (DGP and VCP) for all alternatives in both classrooms.



To describe the variation of sun positions during the year, simulations were conducted for two significant days: the summer solstice (June 21st) and the winter solstice (December 21st). These days represent the minimum and maximum values of solar elevation and irradiance, respectively. The simulations were run for three time points on each day: 9 a.m., 12 p.m., and 3 p.m., while considering the wall thickness of 20 cm and a room height of 3.5 m.

The daylight performance simulation assumed clear sky with sun, minimum 300 lux on the work plane at 0.80 m from the floor, no shading, and artificial light. The Daylight Autonomy (DA) metric indicates that the interior space receives ample daylight. Figures 7-10 show the light distribution quality for the three time points on the two days. The AER-DGU window system ranks third among all the systems considered. However, its maximum illumination record does not exceed 2000 lux, except on December 21st at 12 pm.

The results show that the amount of light entering the classroom during a summer day is high, emphasizing the need for shading to prevent excessive radiation and glare.

Figure 7. The illumination distribution for three time points (9 a.m., 12 p.m., and 3 p.m.) on 21 December for the North classroom.

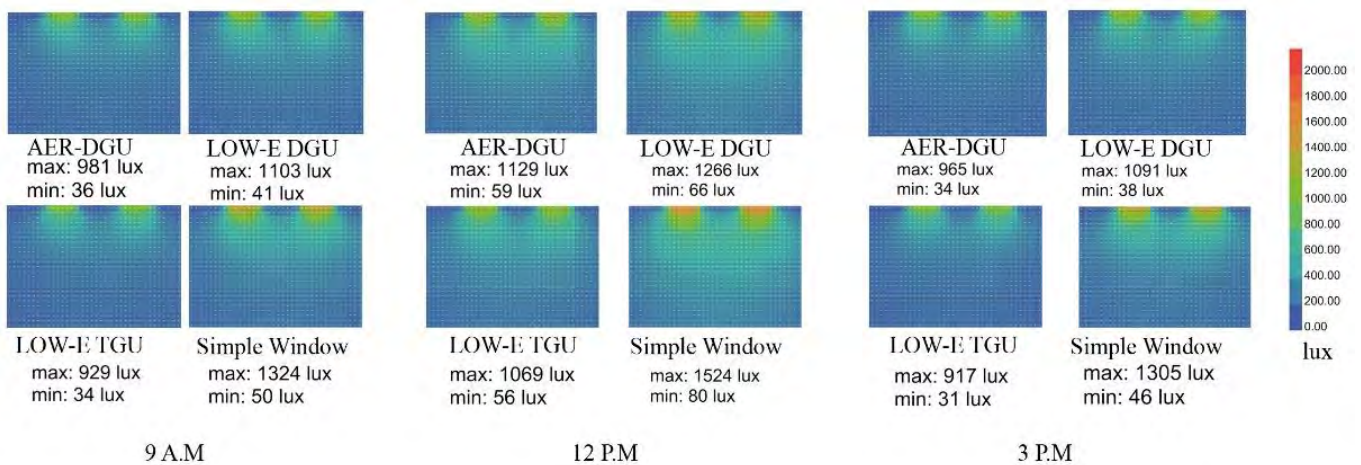


Figure 8. The illumination distribution for three time points (9 a.m., 12 p.m., and 3 p.m.) on 21 December for South classroom.

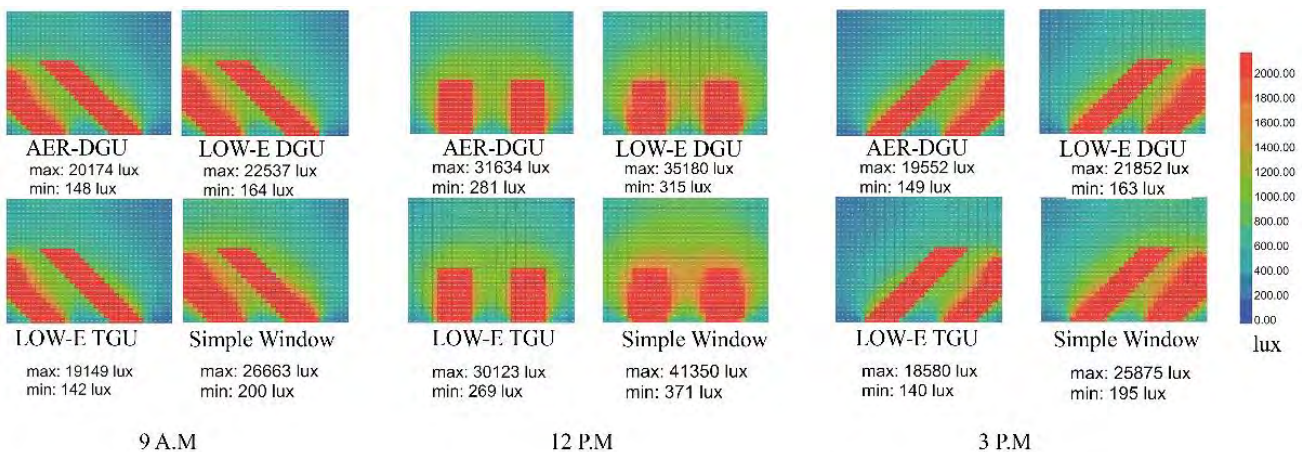


Figure 9. The illumination distribution for three time points (9 a.m., 12 p.m., and 3 p.m.) on 21 June for North classroom.

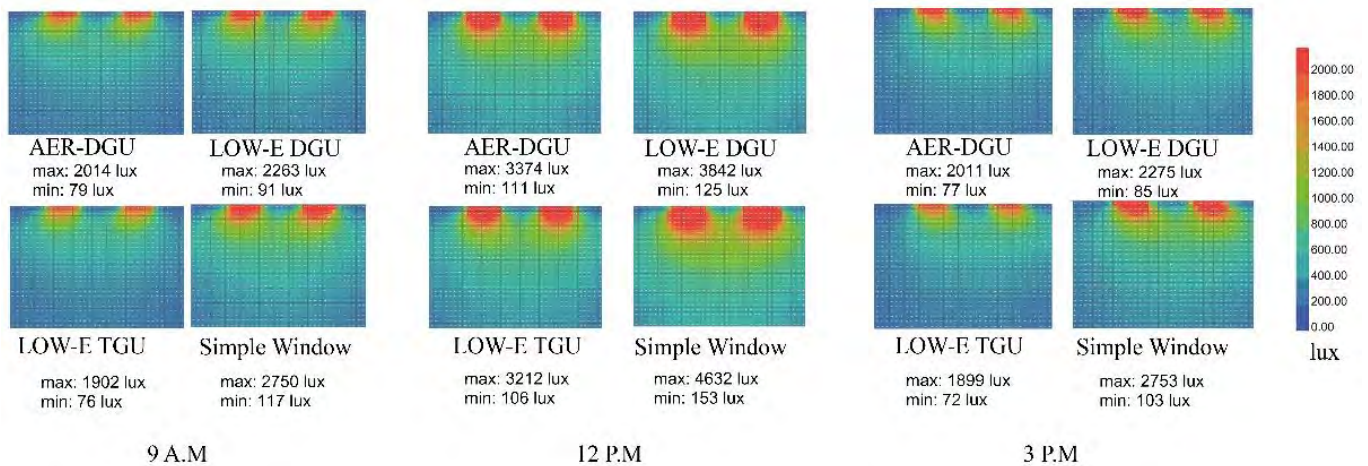
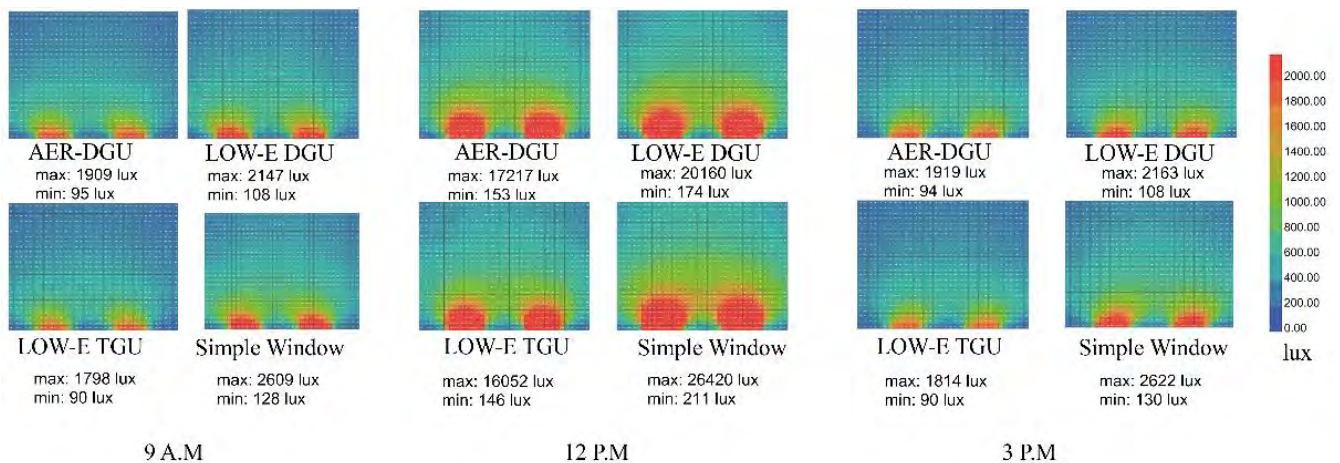


Figure 10. The illumination distribution for three time points (9 a.m., 12 p.m., and 3 p.m.) on 21 June for South classroom.



4. Conclusions

Different options for designing windows have a great impact on energy efficiency in buildings with large glazing surfaces: low u-values can be important to ensure acceptable heating demand and low energy use. At the same time, the transfer of solar energy, g-value, must be thoroughly evaluated, especially in hot climates. Innovative glazing able to allow very low heat transfer, good daylighting, and considerable lightweight can be suitable solutions.

In this paper, the thermal and visual characteristics of three glazing systems with different thicknesses in an educational building located in Iran were studied and their performance compared in terms of energy efficiency and daylighting.

The results showed that the use of windows filled with monolithic Aerogel can be an effective solution for reducing energy consumption and improving thermal comfort, especially in the southern classroom with a hot climate. Using AER-DGU with monolithic in the southern classroom caused 2.1,

2.3, and 4% reduction in EUI compared to the Low E-DGU, Low E-TGU, and simple window, respectively. Simultaneously, in the northern window, the EUI increased by 0.3 and 1.1% compared to Low E-DGU and Low E-TGU, while it decreased by 4.2% with respect to the simple window. Although, in reduction of cooling load, LOW-E TGU has the best performance in the southern and northern classroom, AER-DGU has better performance in reduction of heating load that is most important and significant in this climate and building function. In summary, the AER-DGU with monolithic aerogel outperformed other window systems in terms of reducing heating demand and providing good daylighting, while the Low-E TGU had the best performance in reducing cooling load. However, all glazing systems showed good performance in the annual daylight metrics, and the AER-DGU ranked second after LOW-E TGU. These are because of moderate u-value and high g-value than other window systems.

Monolithic aerogel is an innovative transparent material with attractive optical properties. AER - DGU in both classrooms was reviewed as second place, after LOW-E TGU, in all annual daylight metrics. The metrics that window systems assess by them are UDI, sDA, DGP, and VCP. Although AER-DGU does not work best, all metric has a good performance and do not exceed or underrate each metric.

Using double glazing systems with monolithic Aerogel compared with Low E-DGU and Low E-TGU results in the reduction of consumed energy, increase of thermal comfort.

This method of measuring energy and daylight in educational buildings can be used in schools in other climates. The results of the present study indicate that the use of windows filled with monolithic Aerogel are among the suitable solutions for energy saving and glare counteracting in educational spaces, especially in the southern classroom, with hot climate.

Future research could focus on optimizing the design of shading systems and evaluating their impact on energy performance and glare reduction. Additionally, more attention should be paid to acoustic comfort in educational buildings, and further research is needed to develop visualizable computer programs that can facilitate the evaluation of acoustic comfort for indoor environments. In future works, minimization of discomfort glare with the use of various WWR and shading systems and comparison of them to find the most suitable system can be implemented as the phase of optimization. Examination of this objective was not possible in this research since the calculation concerning each of the analyses of DGP and shading systems is computer intensive. Consequently, considering both calculations simultaneously was very time-consuming.

References

1. Iran Ministry of Energy, Energy Balances of Islamic, Republic of Iran; Iran Ministry of Energy, 2006.
2. Iranian Fuel Conservation Organization, Modification of Energy Consumption Patterns in Schools and Offices, 2009, [in Persian].
3. Im P, Haberl J. A survey of high-performance schools, Proceedings of the Fifteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, Orlando, 2006.
4. Golabchi, M., Noorzai, E., Golabchi, A., Gharouni Jafari, K. Building Information Modeling. Tehran University Press. 2016.
5. Gharouni Jafari, K., Ghazi Sharyatpanahi, N.S., Noorzai, E. BIM-based integrated solution for

- analysis and management of mismatches during construction. *J. Eng. Design Tech.* 2020.
6. Zhang, A., Bokel, R., Dobbelsteen, A.V.D., Sun, Y., Huang, Q., Zhang, Q. Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China. *Energy Build.* 2017,139, 371–384.
 7. Lee, K.S., Han, K.J., Lee, J.W. The impact of shading type and Azimuth orientation on the daylighting in a classroom– focusing on effectiveness of Façade shading, comparing the results of DA and UDI. *Energies* 10 (5), 635–655.
 8. Iravan S. School Architecture in Iran, Available from: <http://www.designshare.com/index.php/articles>, Accessed 14.12.2012.
 9. Yanping Y, Hujin W, Lixiu Y, Tao X, Yunfei D, Ping F, Thermal and day lighting performance of aerogel glazing systems in large atrium building under cooling dominant climates, international conference on Applied energy 22-25 August 2018, Hong Kong, China.
 10. Mangkuto, R.A., Dewi, D.K., Herwandani, A.A., Koerniawan, M.D., Faridah, 2019. Design optimization of internal shading device in multiple scenarios: Case study in Bandung, Indonesia. *J. Build. Eng.* 24, 100745.
 11. Tabadkani, A., Banihashemi, S., Hosseini, M.R., 2018. Daylighting and visual comfort of oriental sun responsive skins: A parametric analysis. *Build. Simul.* 11 (4), 663–676 2003, 320(1): 125-156.
 12. Jelle, B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities. *Energy Build.* 2011, 43, 2549–2563.
 13. Cinzia Buratti, Elisa Moretti, Elisa Belloni, Michele Zinzi. “Experimental and Numerical Energy Assessment of a Monolithic Aerogel Glazing Unit for Building Applications.” *Appl. Sci.* 2019, 9, 5473.
 14. Michele Zinzi, Giuseppe Rossi, Ann M. Anderson, Mary K. Carroll, Elisa Moretti, Cinzia Buratti, Optical and visual experimental characterization of a glazing system with monolithic silica aerogel, *Solar Energy* 183 (2019) 30–3915.
 15. Jensen, K.I.; Schultz, J.M.; Kristiansen, F.H. Development of windows based on highly insulating aerogel glazing. *J. Non-Cryst. Solids* 2004, 350, 351–357.
 16. Duer, K.; Svendsen, S. Monolithic silica aerogel in super insulating glazing. *Sol. Energy* 1998, 63, 259–267.
 17. Buratti, C.; Moretti, E. Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems. *Appl. Energ.* 2012,97, 430–437.
 18. Reim M K, Rner W, Manara J, et al. Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting. *Solar Energy*, 2005, 79(2): 131-139
 19. Garnier C, Muneer T, Mccauley L. Super insulated aerogel windows: Impact on daylighting and thermal performance. *Building and Environment*, 2015, 94:231-238
 20. <https://www.kalwall.com>.
 21. Kranti Kumar M, NatrajKranthi. Factors Affecting the Day lighting performance in the Residences, *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* ISSN: 2277-3878, Volume-7

- Issue-6S2, April (2019).
22. Carroll, M.K.; Anderson, A.M.; Gorka, C.A. preparing silica aerogel monoliths via a rapid supercritical extraction method. *J. Vis. Exp.* 2014, 84, e51421.
 23. Bhuiya, M.M.H.; Anderson, A.M.; Carroll, M.K.; Bruno, B.A.; Ventrella, J.L.; Silberman, B.; Keramati, B. Preparation of monolithic silica aerogel for fenestration applications: Scaling up, reducing cycle time, and improving performance. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2016, 55, 6971–6981.
 24. Haghight Nejad, K., Utilizing augmented reality to guide the user to reduce energy consumption in the building (in Persian), in Architecture and Urban Design Department. 2020, Tehran University of Art.
 25. BHRC, 19 of the Iranian National Building Code: Energy Conservation in Building. 2 ed. Vol. 1. 2018, BHRC. 340.
 26. Zomorodian, M. and F. Nasrollahi, Architectural design optimization of school buildings for reduction of energy demand in hot and dry climates of Iran. *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning*, 2013. 23: p. 41-50.
 27. Qingsong, M. and H. Fukuda, Parametric Office Building for Daylight and Energy Analysis in the Early Design Stages. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2016. 216.
 28. LLC, L.T. Ladybug Tools. 2021 [cited Jan 27, 2021; Available from: <https://www.ladybug.tools/>].
 29. Parnian Bakmohammadi, Esmatullah Noorzai, Optimization of the design of the primary school classrooms in terms of energy and daylight performance considering occupants' thermal and visual comfort, *Energy Reports* 6 (2020) 1590–1607.
 30. IES, Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). 2012, Illuminating Engineering Society. .
 31. Kittiwoot Chaloeitoy , Masayuki Ichinose and Szu-Cheng Chien, Determination of the Simplified Daylight Glare Probability (DGPs) Criteria for Daylit Office Spaces in Thailand. *Buildings* 2020, 10, 180.
 32. Guth SK. A method for the evaluation of discomfort glare. *Illum Eng* 1963; 57: 351–64.
 33. IES. Outline of a standard procedure for computing visual comfort ratings for interior lighting. *J Illum Eng Soc* 1973; 2(3): 328–44.
 34. Cinzia Buratti, Elisa Moretti, Michele Zinzi. High Energy-Efficient Windows with Silica Aerogel for Building Refurbishment: Experimental Characterization and Preliminary Simulations indifferent Climate Conditions.
 35. Parnian Bakmohammadi, Esmatullah Noorzai, Optimization of the design of the primary school classrooms in terms of energy and daylight performance considering occupants' thermal and visual comfort, *Energy Reports* 6 (2020) 1590–1607.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Innovazione giuridica per la sostenibilità: obiettivo e risultato della ricerca scientifica progettuale

Sabrina Brizioli ^{1,*}

¹ Assegnista di ricerca, PhD in Scienze Giuridiche, Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Giurisprudenza, via Alessandro Pascoli, 31,06123, Perugia (PG)

* Autore di riferimento Sabrina Brizioli. E-Mail: sabrina.brizioli@unipg.it

Abstract: La descrizione delle attività e obiettivi di due progetti, l'uno nazionale e l'altro europeo, darà conto della promozione dello sviluppo sostenibile (nelle sue tre articolazioni: economica, sociale e ambientale) attraverso la predisposizione di regole di condotta rispettose degli indici di impatto ambientale e la gestione equa delle risorse biologiche. Principiando dall'analisi del diritto ambientale internazionale ed europeo, lo studio prospetta modelli di codici etici ambientali e dichiarazioni ambientali di prodotto, *policies* consorziali e accordi di accesso e utilizzazione del materiale biogenetico per le aziende e per la comunità scientifica. Nonostante la differenza dei campi di indagine, emerge come i percorsi progettuali attivati condividano il rispetto dei *target* di sostenibilità, il coinvolgimento di molteplici *stakeholder* e l'attenzione al rispetto per l'ambiente nei processi produttivi e scientifici. In entrambi i progetti, la sostenibilità si articola in strumenti di innovazione giuridica che hanno la potenzialità di rendere effettivamente operativi doveri di dovuta diligenza *green*. Peraltro, la novità dei medesimi risiede sia nel veicolare una nuova comunicazione della sostenibilità sia nell'inquadrare le conseguenze ambientali e socio-economiche nelle catene di valore aziendali e della ricerca. L'autrice ritiene che ciò diriga verso una maggiore eco-compatibilità delle strategie d'impresa e della pianificazione delle attività scientifiche, ciò ben oltre la teorica adozione di generici standard. In conclusione, si attesta come nei progetti siano le nuove generazioni di imprenditori agricoli e ricercatori ad avvertire una più spiccata etica della sostenibilità e ciò richieda un ammodernamento del ruolo del giurista con maggiori competenze nella materia ambientale.

Keywords: agricoltura sostenibile; codice etico ambientale; dichiarazioni ambientali di prodotto; PIC; MAT(s); MTA(s)

1. Introduzione

Diffusa è la percezione che strumenti giuridici innovativi possano costituire un acceleratore della sostenibilità, orientando i comportamenti degli attori socio-economici verso una maggiore responsabilità ambientale in linea con gli obiettivi dell'Agenda Onu. È proprio tale assunto che si intende articolare nelle attività progettuali svolte e/o ancora in essere riferibili ai due progetti: "Agenda 2030 e agricoltura sostenibile. Strumenti di innovazione giuridica per l'impresa agricola: codici di autoregolamentazione e dichiarazioni ambientali di prodotto" (di seguito più brevemente indicato come Progetto Agenda 2030 e agricoltura sostenibile) e "*INnovation in Truffle cultivation, preservAtion, proCessing and wild truffle resources management*" (di seguito indicato con l'acronimo INTACT). Nella pianificazione progettuale, l'approccio metodologico si è basato sull'analisi dell'implementazione della normativa multilivello della sostenibilità, principiando da quanto stabilito dalle fonti del diritto internazionale ed europeo dell'ambiente. Nel presente studio, dopo aver brevemente tracciato le linee di ricerca dei progetti e i rispettivi obiettivi, saranno passate in rassegna le principali tematiche affrontate e l'apporto innovativo di taluni strumenti giuridici, il cui fine è quello di articolare catene di valore responsabili e consapevoli nella transizione ecologica aziendale e nelle partnership progettuali. In tale prospettiva, operano la promozione dello sviluppo sostenibile nella sua triplice dimensione (economica, sociale e ambientale), la necessità di realizzare pratiche rispettose degli indici di impatto sul clima e l'uso sostenibile delle risorse biologiche. I percorsi di ricerca, attivati in entrambi i progetti sopra menzionati, condividono il rispetto dei target di sostenibilità, il coinvolgimento di molteplici *stakeholder*, la prospettazione di standard di consumo e produzione responsabili, l'incremento di valori relativi alla circolarità ed equità negli scambi dei materiali nonché, l'attenzione agli ecosistemi. Su tale comune impianto concettuale sono stati predisposti modelli di strumenti giuridici quali: i codici di autoregolamentazione, le dichiarazioni ambientali di prodotto, le *policies* per la gestione del materiale biogenetico per attività di ricerca e sviluppo (*Research and Development*–acronimo R&D e così di seguito indicata) e gli accordi per il trasferimento del materiale. Nelle conclusioni di questa analisi, si darà conto dei principali risultati rispetto al profilo socio-economico e, in particolare, la più spiccata attitudine alla responsabilizzazione aziendale e della ricerca, la tecnicizzazione della sostenibilità e la prospettiva eco-sostenibile delle future generazioni di imprenditori e ricercatori, questi ultimi sempre più attenti nell'attivare strategie di comunicazione e disseminazione della conoscenza effettivamente realistiche del loro impatto ambientale.

La finalità di esporre gli obiettivi e i risultati conclusivi (e di medio termine) riferibili al Progetto Agenda 2030 e agricoltura sostenibile e INTACT (l'uno nazionale e l'altro europeo) nasce dall'esigenza di dare prova di come si stia concretizzando una veste giuridica della coscienza etica ambientale. Questa ultima, non soltanto alimenta i modelli di sviluppo nazionali, ma innerva la programmazione della ricerca europea e, in una prospettiva più ampia, si sta diffondendo nella società anche attraverso il miglioramento della comunicazione della sostenibilità e l'emersione di buone pratiche. Se ne evidenzia l'enorme potenziale di rinnovamento nella relazione *business to consumer* e di cambiamento in tema di integrità della ricerca quando le risorse naturali sono la matrice operativa e conoscitiva delle attività scientifiche.

2. Inquadramento del Progetto Agenda 2030 e agricoltura sostenibile: ambito di riferimento e obiettivi

Il progetto Agenda 2030 e agricoltura sostenibile è nato nell'ambito della programmazione di attività di ricerca scientifica e tecnologica cofinanziata dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Perugia, Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Giurisprudenza e il *partner* privato, Studio Legale Avv. Eleonora Magnanini. Hanno partecipato attivamente alla ricerca: il Segretariato del Trattato FAO, il 3A-Parco Tecnologico Agroalimentare dell'Umbria (di seguito indicato come Parco 3A), i titolari delle aziende tuderti coinvolte e le figure professionali messe a disposizione dalle medesime. Nella fase di comunicazione dello stato di avanzamento di progetto sono intervenuti esperti e professionisti del settore agroalimentare in rappresentanza di enti certificatori ed enti come Valoritalia e Fondazione Barilla. Il progetto Agenda 2030 e agricoltura sostenibile intercetta l'Obiettivo 2 dell'Agenda Onu "Porre fine alla fame, raggiungere la sicurezza alimentare, migliorare l'alimentazione e promuovere l'agricoltura sostenibile" e il relativo *target* 2.4 che specifica: "Entro il 2030, garantire sistemi di produzione alimentare sostenibili e implementare pratiche agricole resilienti che aumentino la produttività e la produzione, che aiutino a proteggere gli ecosistemi, che rafforzino la capacità di adattamento ai cambiamenti climatici, a condizioni meteorologiche estreme, siccità, inondazioni e altri disastri e che migliorino progressivamente la qualità del suolo". L'attività di ricerca è stata svolta prevalentemente nel Comune di Todi, un territorio ad alta vocazione agricola dove sono stati raccolti e analizzati i dati, e nell'ambito territoriale di Perugia per le attività accademiche, comunicazione e divulgazione dei risultati. La realizzazione degli obiettivi è stata avvalorata da *partnership* funzionali ad innescare un proficuo dialogo bidirezionale tra ricerca e società, coinvolgendo gli attori economici e *stakeholder* operativi nel territorio di riferimento. In particolare, sono state selezionate come target progettuale due aziende locali operanti nel tuderte: Soc. Agr. Top Melon srl (Pantalla-PG) [di seguito **TOP MELON**] e Cantina Peppucci Soc. Agr. S. Antimo [di seguito *Cantina Peppucci*].

Il contatto con le aziende è stato possibile grazie alla mediazione del Parco 3A e al supporto del *partner* Studio Legale Avv. Eleonora Magnanini la cui conoscenza del tessuto imprenditoriale locale ha permesso di rintracciare per dimensione, localizzazione e produzione le aziende campione idonee al progetto.

La promozione dello sviluppo sostenibile, rispetto ai suoi tre profili economico, sociale e ambientale, si traduce nel Progetto Agenda 2030 e agricoltura sostenibile nella ricerca di una strategia aziendale in cui l'etica della responsabilità sociale d'impresa si integra all'attenzione per la tutela dell'ambiente ed entrambe trovano espressione in strumenti giuridici di *governance* e comunicazione agro-alimentare oggettiva, veritiera e credibile. L'Agenda 2030 costituisce il *framework* a livello internazionale che giustifica l'assunzione di *mission* e *policy* aziendali attente alla eco-compatibilità dei cicli produttivi e di distribuzione, innovando modelli di *business* e di investimento. Coerentemente con questa prospettiva, l'Unione europea ha adottato il *Green Deal* Europeo [1], entro il cui ambito è stata inserita la strategia *From Farm to Fork* (dal produttore al consumatore) e il programma per la Biodiversità per il 2030 [2], entrambi diretti a innescare una transizione ecologica dei sistemi agroalimentari. L'importanza di tale obiettivo è testimoniata dal

fatto che ingenti risorse economiche del *NextGeneration* EU saranno destinate alla riconversione dei sistemi agricoli e alla promozione dei prodotti agroalimentari europei dentro e fuori il contesto europeo [3]. In particolare, le Istituzioni europee hanno ribadito il sostegno a quei beni e metodi che sin dalla coltivazione danno priorità a pratiche sostenibili, colture biologiche o modelli di gestione agronomica rispettosi della biodiversità colturale e del consumo del suolo [4].

Nell'affrontare lo stato dell'arte, particolare attenzione è stata rivolta al nuovo modello di PAC 2021-2027 pensato per allinearsi al *Green Deal* europeo e, in particolare, in grado di evidenziare il ruolo del settore agricolo sui cambiamenti climatici e l'ambiente [5]. In quest'ottica, la nuova PAC dovrebbe orientare gli agricoltori verso l'adozione di pratiche più rispettose degli indici di impatto sul clima e sull'ambiente in cambio di finanziamenti diretti: regimi ecologici volontari, gestione sostenibile delle risorse naturali, pratiche legate al clima e all'ambiente sono tra le misure maggiormente incoraggiate in considerazione degli obiettivi europei in tema di sostenibilità in agricoltura.

E infatti, sebbene le politiche europee siano riuscite nel tempo a garantire elevati *standard* di qualità e sicurezza agroalimentare, maggiore attenzione deve essere rivolta alle concrete modalità di intervento a favore della sostenibilità e della sua comunicabilità.

Sebbene l'etichettatura dei prodotti in base alla loro sostenibilità rappresenti un punto cruciale delle strategie europee, gli strumenti a disposizione risultano ancora limitati. Attualmente, sono talvolta in uso etichette che indicano la corrispondenza a certi parametri di riferimento, come nel caso dell'etichettatura dei prodotti biologici o del mercato equo-solidale. Nonostante queste ultime rappresentino un passo avanti nell'indicare l'impegno aziendale verso *standard* ambientalmente e socialmente elevati di produzione, si tratta di meccanismi informativi che non forniscono una piena *discovery* del processo produttivo.

In una prospettiva di sostenibilità, la comunicazione al consumatore estesa ai vari fattori ambientali non avrebbero la limitata funzione di fornire informazioni più veritiere, ma opererebbe come strumento efficace per tracciare l'impronta ecologica degli operatori del settore agro-alimentare.

A livello nazionale, nonostante l'importante evoluzione dei prodotti agricoli *Made in Italy* e le certificazioni di qualità e provenienza, dirette a rappresentare l'eccellenza della filiera agroalimentare italiana [6], gli indicatori di sostenibilità, specie connessa al settore agricolo, presentano una geografia variabile con un evidente divario tra nord e sud [7].

2.1. Principi e caratteri generali degli strumenti di business sostenibile

Il piano di ricerca nel Progetto Agenda 2030 e agricoltura sostenibile ha preso avvio dallo studio del panorama normativo multilivello del settore agro-alimentare cogliendone gli aspetti più controversi, le prospettive da realizzare e scorgere le principali future complessità. Il campo di indagine ha interessato il contesto umbro-tuderte con l'analisi di due tra le più importanti realtà aziendali ivi collocate, differenti per dimensioni, strategia imprenditoriale, target di riferimento e ambito merceologico.

Dopo una ricognizione preliminare del quadro normativo rispetto alle tematiche della *Corporate Social Responsibility*, tutela dell'agro-biodiversità, sviluppo rurale sostenibile, comunicazione e informazione alimentare (con particolare attenzione anche ai profili etici), una più puntuale analisi ha riguardato il concetto di "responsabilità sociale" nel panorama internazionale e europeo. In particolare, è stato fatto riferimento a quanto enunciato nel Libro Verde della Commissione europea del 2001 circa l'integrazione su base volontaria, da parte delle imprese, delle preoccupazioni sociali e ambientali nelle loro operazioni commerciali e nei loro rapporti con le parti interessate [8]. Tale impostazione è stata, quindi, riletta alla luce degli attuali Standard ISO che articolano congiuntamente più fattori: l'ambiente, le prassi gestionali, il soddisfacimento dei consumatori, i diritti umani e le condizioni lavorative, il coinvolgimento e lo sviluppo della comunità [9].

Centrale è stata l'enfasi sulla natura volontaria degli strumenti di autoregolamentazione e in particolare il loro "volontario tecnicismo": come espresso dalla Commissione europea in tema di responsabilità sociale dell'impresa intesa come contributo delle imprese allo sviluppo sostenibile, vi è da un lato la difficoltà di regolamentare in maniera rigida la responsabilità sociale delle imprese e dall'altro la volontà di non inficiare, compromettendola, la libertà di ciascuna impresa nella definizione delle proprie priorità da perseguire, strategie e azioni sostenibili [10]. Nel Progetto Agenda 2030 e agricoltura sostenibile, questa volontarietà tecnica aziendale è stata sviluppata come autodiagnosi per la definizione di regole e buone pratiche effettivamente in grado di esprimere una responsabilità sociale e ambientale sostenibile radicata su valori etici e principi di comportamento, nonché regole di produzione e gestione dell'attività.

Al fine di attivare strumenti in grado di esprimere il tecnicismo volontario dell'impresa responsabile è stata vagliata l'adeguatezza dei modelli organizzativi elaborati sulla scorta del dlgs. 231/2001 [11].

Rispetto al tema della salvaguardia bio-culturale, a livello internazionale sono stati oggetto di studio gli accordi aventi ad oggetto la tutela dell'agro-biodiversità, l'agricoltura sostenibile e lo sfruttamento equo delle risorse genetiche come la Convenzione di Rio sulla biodiversità [12], il Trattato Fao per le risorse fitogenetiche per l'alimentazione e l'agricoltura [13] e il Protocollo di Nagoya [14]. Particolare attenzione è stata riservata alla recente Dichiarazione ONU sui diritti dei contadini e delle altre persone che lavorano nelle zone rurali [15] e agli studi giuridici che offrono degli interessanti sviluppi sul versante dei diritti bioculturali [16-17]. Nel diritto dell'Unione europea importanti impulsi sono stati individuati nei contenuti della riforma della PAC, la cui condizionalità rileva quale stimolo e incentivo all'assunzione di forme di responsabilizzazione etico-ambientale, e nella prospettiva di *eco-schemes* finalizzati alla promozione di agricoltura diversificata, a basso impatto sulle matrici naturali e resiliente agli *shock* climatici.

Riguardo alla comunicazione e informazione, si è potuto evidenziare come da un lato sia esigibile un più penetrante dovere di trasparenza nel rapporto business to consumer e dall'altro lato le aziende si mostrino sempre più propense a far conoscere alla collettività e *stakeholder* i propri modelli etici connotati da un impegno di dovuta diligenza (tale locuzione di seguito anche resa con il termine anglofono *due diligence*)

Sono stati, quindi, esaminati i profili della tutela del consumatore agro-alimentare e il conseguente diritto all'informazione in considerazione del progressivo intervento normativo e giurisprudenziale in tema di "paradigma informativo". Quest'ultimo comporta il bilanciamento tra tutela dei diritti e interessi dei consumatori da un lato e la libertà di espressione e iniziativa economica degli operatori del mercato dall'altro. Si è trattato di un ambito di indagine molto ampio, implicante lo studio di molteplici aspetti quali, ad esempio, la responsabilizzazione ed educazione del consumatore alimentare, la conoscenza dei profili nutrizionali per comunicare la salubrità degli alimenti e promuovere stili di vita sani (*claims* nutrizionali), la progressiva e incisiva *discovery* del ciclo di vita del prodotto [18]. Ciò ha comportato la disamina dei principi e requisiti generali della legislazione alimentare (dal Libro Verde della Commissione del 1997 [19] al Libro Bianco sulla Sicurezza Alimentare del 2000 [20]), le fonti comunitarie in tema di sicurezza alimentare [21], informazioni sugli alimenti [22], e nuovi alimenti [23], nonché la dottrina afferente in tema di doveri informativi, comunicazione *business to consumer* e il passaggio dall'etichetta all'informazione agroalimentare. Significativo è stato anche l'approfondimento sulla giurisprudenza in materia, in particolare l'evoluzione degli indirizzi interpretativi della Corte di Giustizia.

A livello nazionale è stata esaminata la disciplina del Codice del Consumo e il tema della responsabilità per le informazioni al consumatore di alimenti in ambito civilistico.

2.1.1 Il codice etico ambientale e la dichiarazione ambientale di prodotto

Il prototipo di modello di codice etico ambientale elaborato nel Progetto Agenda 2030 e agricoltura sostenibile si occupa, ampliandole, delle disposizioni in tema di tutela ambientale generalmente presenti nei codici etici aziendali adottati sulla base del dlgs. 231/2001. Ciò è stato possibile funzionalizzando concetti, obiettivi e principi quali: sostenibilità ambientale, sociale ed economica, multifunzionalità, prevenzione e precauzione nella gestione del rischio ambientale, corretta e leale informazione agro-alimentare. Così il codice etico aziendale, anche noto come codice di autoregolamentazione e di condotta, diventa un documento contenente non soltanto una serie di regole sociali e morali redatte dall'azienda per l'azienda e riferite all'organismo impresa, alla sua *mission* e *vision* aziendale, alla competitività e qualità dei prodotti, ma un *corpus* di regole in grado di esprimere concrete strategie di tutela ambientale, valorizzazione del prodotto riferito ad un determinato ambito territoriale, utilizzo consapevole delle nuove tecnologie in rapporto al luogo di intervento e preservazione della biodiversità colturale. La tutela ambientale è percepita nella maggior parte dei codici etici aziendali quale stimolo che impegna il soggetto economico ad operare nel rispetto dell'ambiente e della salute delle persone, nella consapevolezza di una responsabilità sociale ed etica verso la comunità in cui opera e da cui trae le risorse umane e naturali. Tuttavia, tale impostazione è spesso più teorica e di rado sviluppata effettivamente nell'organizzazione di impresa. In considerazione di ciò, nel presente progetto è stata proposta una strategia che integra le tematiche ambientali nelle fasi di realizzazione del prodotto, innovazione nella comunicazione con il consumatore, adozione di misure dirette ad evitare o limitare l'illecito e rischio ambientale. Ciascuna parte di cui si compone il codice etico aziendale è stata riletta in questa prospettiva affinché esso non si riduca a semplici dichiarazioni di ecosostenibilità finalizzate al *marketing* e alla costruzione di

un'identità ingannevolmente positiva sotto il profilo dell'impatto ambientale (*greenwashing*). Per questo, pur mantenendo la struttura generale dei codici etici, la disciplina del profilo ambientale è ampliata e riguarda le pratiche, i modelli aziendali e gestionali che effettivamente pongono in essere politiche di sostenibilità ambientale.

I principi e valori di comportamento rappresentano gli elementi più prettamente etici del codice elaborato e la parte ad essi destinata ospita la declinazione ambientale della sostenibilità, il carattere multifunzionale dell'azienda, l'adattamento dello sviluppo aziendale agli impatti ambientali e il riconoscimento dei principi di prevenzione e di precauzione.

Sempre nel capitolo riservato all'etica si trova la concettualizzazione di nuovi parametri di sostenibilità ambientale quali la qualità, il *welfare* ambientale, la tracciabilità e rintracciabilità.

La sezione dedicata all'attività aziendale raccoglie le disposizioni riferite alle tecniche e pratiche agricole ambientalmente orientate (gestione delle matrici naturali, salvaguardia della biodiversità, attenzione agli *shock* climatici e tutela varietale), la comunicazione alimentare, conduzione e gestione consapevole e responsabile del territorio e delle colture nonché delle tecnologie e dell'innovazione. Con particolare riferimento alla comunicazione agroalimentare declinata nel codice etico, essa si pone a fondamento ed è collegata alla dichiarazione ambientale di prodotto e, come si dirà in seguito, rappresenta una più puntuale e veritiera modalità di informazione rivolta al consumatore. Il codice etico ambientale costituisce, infatti, la base giuridica della comunicazione agroalimentare poiché entro il medesimo si trova l'insieme di principi e regole su cui si basa la metodologia "ciclo di vita del prodotto" (*Life Cycle Assessment*–LCA) [24] di cui si compongono le dichiarazioni ambientali di prodotto.

Segue la sezione che, riservata ai rapporti interni ed esterni dell'azienda, si occupa più specificatamente di: rispetto dell'ambiente e la salubrità dei luoghi di lavoro, l'eco-compatibilità del sistema produttivo e la tutela dei lavoratori. Ciò comporta la riduzione al minimo dei rischi di contaminazione, la salvaguardia della persona nelle fasi di trattamento e lavorazione delle materie prime nonché l'effettivo coinvolgimento dei dipendenti nella determinazione di misure di protezione collettiva e individuale. Nei rapporti con *stakeholder* esterni sono introdotte regole riferite al sostegno dell'agricoltura contadina locale, la collaborazione con enti di ricerca e aziende che stimolano lo sviluppo di pratiche colturali innovative, migliorative e ambientalmente compatibili.

Da ultimo, il codice etico ambientale destina una sua parte alla gestione dei rischi ambientali e alla prevenzione dalla commissione di illeciti ambientali. Tale specificazione anticipa e si sviluppa successivamente nelle disposizioni di chiusura sulle violazioni del medesimo e relative conseguenze nei rapporti commerciali o di lavoro.

Con attenzione al panorama normativo di riferimento per ciascuna azienda, e conformemente ai disciplinari di produzione in uso, sono stati elaborati codici etici ambientali specifici per **TOP MELON** e per la *Cantina Peppucci* i cui capitoli articolano principi etici e valori con regole di condotta e autoregolazione volontarie modellate secondo gli standard della responsabilità sociale di impresa con la specifica funzione di disciplinare la *policy* ambientale aziendale.

Al fine di redigere questo importante strumento giuridico-etico è stata necessaria la conoscenza della struttura aziendale, della *mission* stabilita dagli organi di *management* e l'organizzazione della

produzione e distribuzione. Ciò è avvenuto attraverso un costante dialogo con i titolari delle realtà aziendali coinvolte e l'affiancamento delle figure professionali che si occupano delle questioni agronomiche ed ecologiche.

Le disposizioni e regole incluse nei codici etici ambientali realizzati per **TOP MELON** e *Cantina Peppucci* vogliono dimostrare come per entrambi l'introduzione dell'etica e dei principi ambientali rappresenti da un lato un fattore reputazionale chiave, in grado di veicolare *standard* qualitativi superiori, migliorare la competitività aziendale e porre enfasi su aspetti ulteriore nella realizzazione dei prodotti. Peraltro, esse sono consapevoli di come ciò comporti l'adozione di pratiche, metodi e mezzi idonei ad un *business* effettivamente eco-sostenibile. Per questo, oltre al raggiungimento di obiettivi ambientali, nei codici etici sviluppati vi è il riferimento a certificazioni in uso, pratiche agricole colturali, iniziative sociali e organizzazione di filiere sostenibili. Si tratta di indicazioni che traducono le concrete e pratiche attività di **TOP MELON** e *Cantina Peppucci*.

Il Codice etico ambientale predisposto per **TOP MELON** si articola in tredici capitoli sviluppati in sottosezioni che descrivono la politica, gestione e attività dell'azienda.

Dopo l'introduzione che racconta sinteticamente la storia e la *policy* di **TOP MELON**, sono trattati principi e valori di comportamento sotto il profilo ambientale, i metodi agricoli, il rapporto con i consumatori e l'organizzazione della produzione e distribuzione.

Operando nella grande distribuzione, **TOP MELON** pone puntuale attenzione agli impatti ambientali sulle risorse naturali e agli aspetti sociali del lavoro: per questo, sono state sin da subito illustrate da **TOP MELON** le certificazioni in grado di attestarne la conformità opportunamente richiamate nel codice etico ambientale.

Il prototipo di codice etico ambientale di **TOP MELON** è diretto a comunicare come l'azienda impieghi nella produzione orto-frutticola *standard* qualitativi-quantitativi che non soltanto rispondono alla domanda di mercato, ma siano espressione di una effettiva politica ambientale condotta anche a livello locale. Ciò è testimoniato dall'aver incluso nel codice etico ambientale riferimenti alla tracciabilità-rintracciabilità dei prodotti, il valore attribuito alla scienza e tecnologia da campo, l'attenzione a modelli agricoli e metodi di selezione colturale rispettosi delle peculiarità climatiche e del territorio tuderte. Inoltre, sono tratti caratterizzanti di questo codice etico ambientale la specificazione del trattamento delle matrici naturali (in particolare la gestione del suolo e dell'acqua), la rilevanza attribuita alla tutela della persona nell'ambiente di lavoro, il sostegno all'agricoltura contadina locale, l'attivazione di pratiche responsabili dirette a limitare il danno o rischio ambientale.

Il prototipo di codice etico ambientale redatto per la *Cantina Peppucci* si struttura in dieci capitoli e sottosezioni dirette a cogliere le caratteristiche e peculiarità di uno dei settori agricoli più complessi del comparto agroalimentare: quello vitivinicolo.

Con riferimento a questo particolare ambito, lo scopo è stato quello di declinarne gli aspetti ambientali e coglierne i tratti propriamente locali secondo l'impostazione che anima la *Cantina Peppucci*.

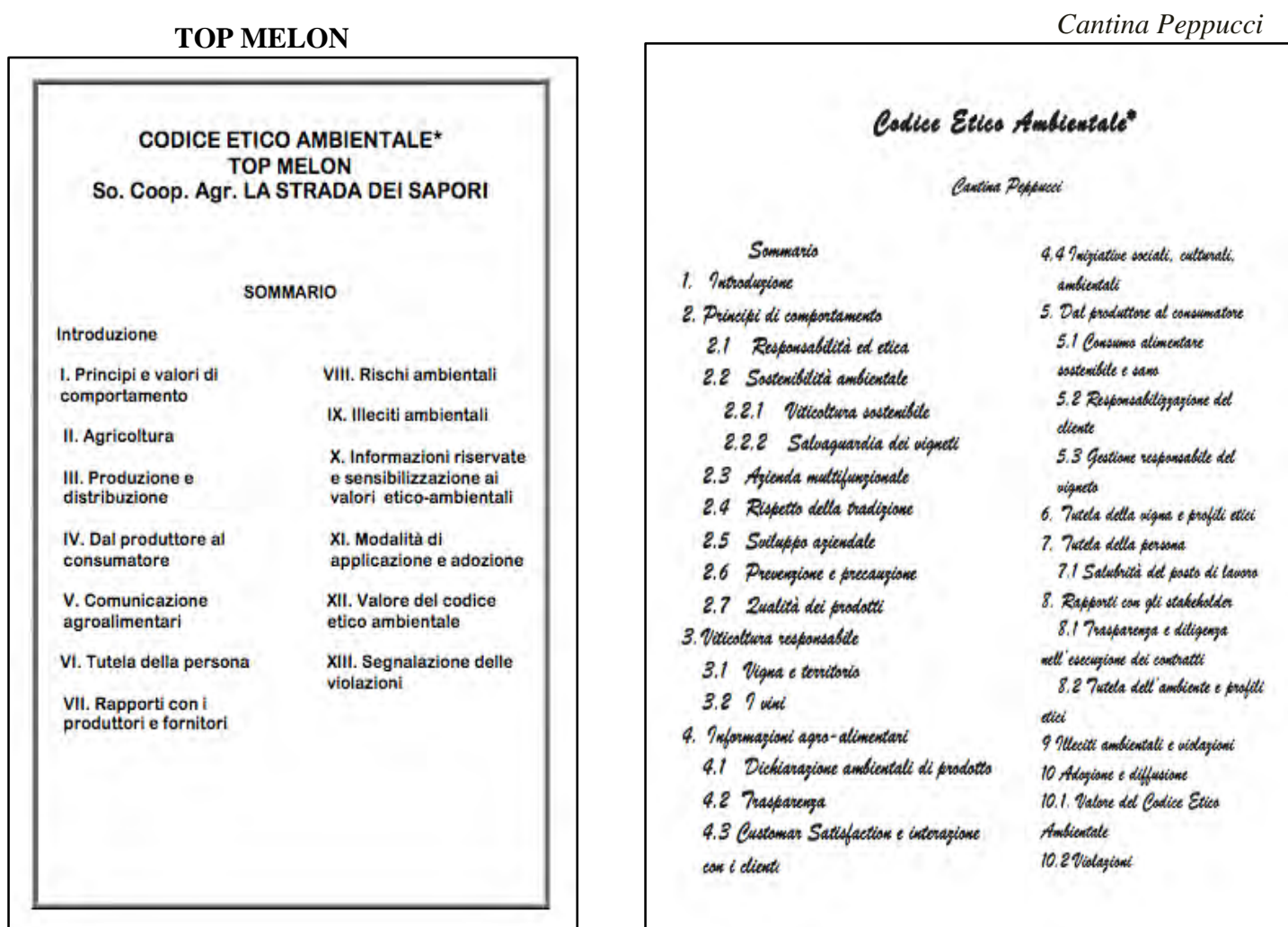
La tradizione e l'obiettivo di produrre vini spiccatamente locali emergono dalla lettura dell'introduzione che, anche in questo caso, ripropone la storia dell'azienda agricola guidata dalla

famiglia Peppucci. Nonostante le differenze rispetto a **TOP MELON**, i codici hanno funzione analoga e condividono taluni temi comuni quali, ad esempio, il carattere multifunzionale dell’azienda, la declinazione della sostenibilità, la tutela del territorio e la gestione colturale-varietale ecologicamente orientata.

Sono, invece, aspetti specifici del codice etico ambientale della *Cantina Peppucci*, la viticoltura sostenibile, l’interazione con il cliente, i profili etici nella gestione della vigna e il trattamento delle uve. Anche per la *Cantina Peppucci* sono state incluse disposizioni relative alla tutela della persona sul luogo di lavoro, il rispetto del valore autoctono della produzione nelle relazioni con gli *stakeholder* e l’astensione da pratiche che danneggiano il biota, la fauna, la flora o impoveriscono la biodiversità.

I codici etici ambientali proposti rappresentano, quindi, dei documenti volontari coerenti con il *management* e la responsabilità etica sociale delle aziende coinvolte. La loro violazione incide sul rapporto di fiducia intercorrente con le medesime e altera la correttezza delle prestazioni con i *partner* commerciali.

Figura 1. Modelli di Codice etico ambientale



La dichiarazione ambientale di prodotto

Parallelamente agli anzidetti modelli sperimentali di codici etici ambientali, il Progetto Agenda 2030 e agricoltura sostenibile ha prospettato l'articolazione di dichiarazioni ambientali di prodotto per **TOP MELON** e per la *Cantina Peppucci*: si tratta di strumenti di comunicazione ambientale che, sulla base di quanto previsto dalle norme della serie ISO 14020, sono di grande interesse per le politiche ambientali comunitarie e una novità nel panorama informativo agroalimentare nazionale.

Esse si fondano su una metodologia che verifica il rispetto di criteri e indici ambientali in tutto il ciclo di vita del prodotto e, in virtù di tale metodo, assicurano veridicità e oggettività delle informazioni espresse.

Il processo di realizzazione delle dichiarazioni ambientali di prodotto prevede non soltanto la raccolta di dati relativi ad ogni fase di produzione, ma comporta l'analisi di ciascun momento della catena di valore in virtù di indici di impatto ambientale. Ne deriva la traduzione di questi ultimi in percentuali numeriche come risultato di operazioni e calcoli di effettivo consumo. Inoltre, i dati così ottenuti devono essere validati e verificati da un ente terzo indipendente che ne certifica la veridicità e l'attendibilità. In ragione di ciò, il lavoro svolto è stato finalizzato alla predisposizione di un modello di dichiarazione ambientale avente ad oggetto una porzione della produzione delle due aziende o specifici beni, con l'individuazione delle fasi oggetto di analisi di ciclo di vita e degli indici di impatto ambientale, ma senza procedere al calcolo dei parametri presi in considerazione. Si precisa, peraltro, come l'esatta stima di consumo relativa ad alcuni indici di impatto ambientale (quali, ad esempio, quelli riferiti al consumo energetico o alle attività di recupero/riciclo del materiale, quantitativo di emissioni da mezzi di trasporto impiegati) è difficilmente calcolabile nel breve termine e si è ritenuto più opportuno limitarsi alla predisposizione teorica di un elenco di parametri e criteri di riferimento.

Nei modelli di dichiarazione ambientale di prodotto prefigurati, i pilastri della sostenibilità ambientale, economica e sociale sono i medesimi del codice etico ambientale, sebbene la loro comunicazione sia più schematica e veicolata dalla metodologia LCA.

Gli obiettivi di questi modelli di dichiarazioni sono molteplici: a) rintracciare e conoscere l'azienda per comprendere il prodotto; b) misurare e migliorare le prestazioni di sostenibilità della filiera produttiva; c) assicurare coerenza tra i dati inseriti e gli impatti ambientali dell'attività aziendale; d) fornire una effettiva analisi dei pilastri ambientali, sociali ed economici.

Relativamente al profilo ambientale e congiuntamente alle aziende campione, si è provveduto alla scelta del prodotto oggetto della dichiarazione, fornendone una descrizione sintetica e segnalando le fasi di ciclo di vita nell'arco temporale che va "dal campo alla distribuzione".

Nella realizzazione delle dichiarazioni ambientali di prodotto per **TOP MELON** e la *Cantina Peppucci* sono stati presi in considerazione le specificità di una parte della produzione e le caratteristiche di un determinato prodotto. La sezione che precede lo schema degli indici di impatto ambientale costituisce una sorta di scheda tecnica di prodotto arricchita dalla breve descrizione del contesto aziendale. Quindi, sono specificati i criteri di appartenenza a un determinato gruppo merceologico, elementi funzionali a renderli confrontabili con altri della medesima categoria.

La dichiarazione ambientale di prodotto di **TOP MELON** riguarda le varietà di meloni (*cucumis melo*) che rappresentano il 90% della produzione di cucurbitacee e costituiscono il *core business*.

Sono indicate con brevi descrizioni: le caratteristiche del melone retato, liscio e gialletto nonché le loro percentuali di produzione sul totale delle cucurbitacee di **TOP MELON**.

Segue l'analisi della fase di produzione "dalla selezione varietale alla distribuzione" passando per la coltivazione in campo e il confezionamento in azienda. La caratterizzazione del prodotto si chiude con l'indicazione dei contenuti nutrizionali.

Sulla scorta di quanto precedentemente evidenziato, la produzione è stata suddivisa nelle fasi *upstream*, *core* e *downstream* con relativa specificazione delle attività svolte in ciascuna di esse.

La sezione riservata agli indicatori ambientali riporta i medesimi suddivisi in emissioni dirette o indirette di gas ad effetto serra, entità riferite ai consumi energetici e potenziale di consumo delle risorse naturali (acqua, suolo). Con riferimento ai rifiuti, elencati separatamente e distinti per tipologia, rilevano in considerazione della loro produzione nel ciclo di vita del prodotto. Nello scenario di fine prodotto sono inclusi il *packaging* e la stima della *carbon footprint* con la specificazione della fase che incide di più su di essa. La parte conclusiva della dichiarazione ambientale di prodotto, fornisce ulteriori chiarimenti tramite glossario dei termini adoperati, indica i contatti e menziona l'ente certificatore terzo che provvede alla verifica e validazione di quanto riportato nel documento.

La dichiarazione ambientale di prodotto della *Cantina Peppucci* riguarda, invece, la produzione di vini e, nello specifico, ne è stato oggetto il Montorsolo Grechetto di TODI DOC.

Anche in questo caso, si è fornita dapprima una indicazione sintetica dell'azienda con successiva descrizione delle modalità di conduzione e gestione dei vigneti.

Nella sezione che si occupa più propriamente del contenuto della dichiarazione si trova il dettaglio delle caratteristiche del prodotto preso in esame, quindi, i dati riferiti all'origine, la tipologia di vigneto, la vinificazione e le connotazioni del vino (colore, profumo, gusto e temperatura).

La metodologia LCA è rappresentata dal percorso che va "dalla vigna alla bottiglia" e che comprende, anche in questo caso, la fase agricola *upstream*, quella della cantina *core* e della distribuzione *downstream*. A ciò sono state aggiunte quella di consumo e di smaltimento.

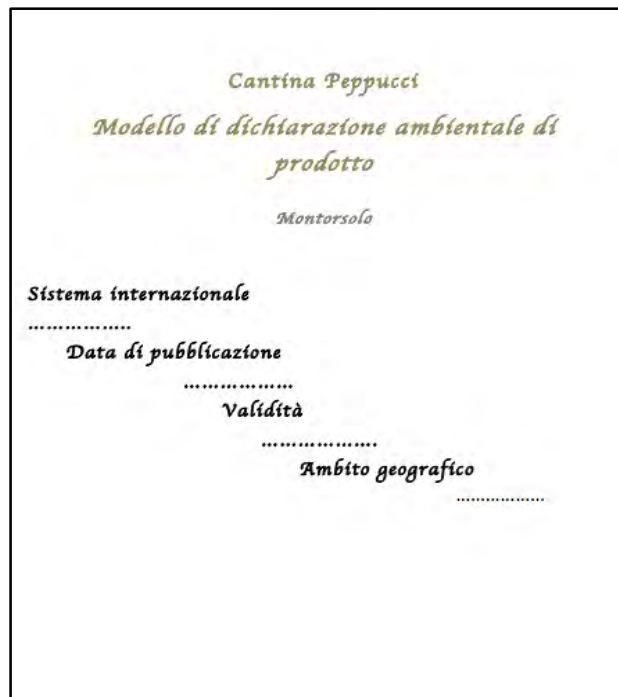
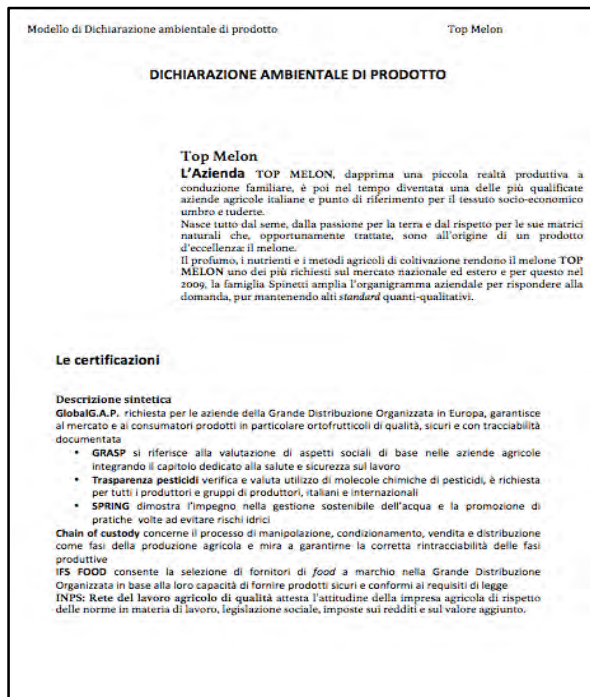
Gli indicatori di sostenibilità, inseriti in base ad un modello causa-effetto, concernono parametri riferiti alle emissioni dirette o indirette, efficienza ed entità dei consumi energetici, consumi diretti o indiretti di acqua e suolo (incluse le azioni inquinanti e fenomeni biologici, efficienza e conservazione del suolo), impatti sulla biodiversità colturale sul patrimonio paesaggistico. Separatamente sono elencati i rifiuti per tipologia e smaltimento. In conclusione, sono inserite le informazioni e i contatti nel rispetto del principio di trasparenza e la menzione dell'ente di verifica indipendente che si esprime sulla valutazione di sostenibilità.

Le dichiarazioni ambientali di prodotto realizzate dovrebbero essere, pertanto, documenti accessibili e disponibili a tutti coloro che intrattengono rapporti con **TOP MELON** e *Cantina Peppucci*: si tratta di importanti strumenti di comunicazione in grado di orientare le scelte di consumatori responsabili. Esse sono la dimostrazione di come i processi produttivi possano adattarsi a parametri ambientali che ne rendano percepibile ed evidente la stima dell'impatto sull'ambiente. Inoltre, ne è un principio basilare, quello del "miglioramento continuo" per cui eventuali modifiche e aggiustamenti possono essere apportati in considerazione di nuove esigenze ambientali.

Figura 2. Modelli di Dichiarazioni ambientali di prodotto

TOP MELON

Cantina Peppucci



3. Il contesto e la ratio operativa del Progetto INTACT: focus sul profilo giuridico-etico

Centri di ricerca, università ed enti finanziatori sono sempre più interessati alle tematiche della sostenibilità ponendo attenzione all’impatto delle proprie attività sull’ambiente e sulla società. L’agire sostenibile e il rispetto di parametri ambientali sono centrali nello svolgimento di studi e analisi su risorse biologiche di rilevante interesse economico e sociale come i tartufi, oggetto di INTACT, un progetto inserito nel contesto delle Marie Skłodowska–Curie Actions e finanziato nell’ambito del programma Horizon 2020 dell’Unione europea. Questo progetto di durata quadriennale ha come obiettivo quello di creare una rete internazionale ed europea per lo studio della conservazione, gestione sostenibile, coltivazione-trasformazione e ricognizione della normativa relativa ai tartufi. Il coordinamento della rete è svolto dal CNR-ISAFoM (Consiglio Nazionale delle Ricerche-Istituto per I Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo) in collaborazione con il CNR-IBBR (Consiglio Nazionale delle Ricerche-Istituto di Bioscienze e Biorisorse). L’Università degli Studi di Perugia partecipa con due Dipartimenti: DSA3, per l’identificazione dei tartufi con strumenti morfologici e molecolari, mentre il Dipartimento di Giurisprudenza si occupa delle questioni normative e bioetiche soprattutto in relazione alla protezione della biodiversità. I partners del consortium INTACT provengono da sette paesi e rispettivamente sono coinvolti tre continenti: Europa, Africa e America del Sud.

Nel progetto INTACT, il gruppo di esperti per i profili legali-etici ed economici (*Work Package 6*, indicato di seguito come WP6), non soltanto realizza attività formative per i membri del consortium, dirette a comunicare il principio di uso sostenibile delle risorse biologiche nelle attività di ricerca, ma più concretamente ha come scopo la predisposizione di strumenti giuridici (*policies*, linee guida e accordi) per lo scambo del materiale biologico tartufigeno, e delle relative risorse genetiche, integrando così la dimensione ambientale agli aspetti socio-economici della sostenibilità. Questi dispositivi legali-etici, che diventeranno a tutti gli effetti prodotti della ricerca, operano nel rispetto degli obiettivi e dei requisiti sanciti dai trattati internazionali e dai regolamenti europei [25] in tema di salvaguardia della biodiversità e uso sostenibile delle matrici biologiche. Nel panorama internazionale si è affermato un sistema di accesso alle risorse genetiche ed equa condivisione dei benefici derivanti dalla loro utilizzazione (*Access and Benefit-sharing*–acronimo ABS e di seguito così indicato) il cui scopo è quello di fornire certezza giuridica e trasparenza nella gestione della biodiversità genetica. Il meccanismo di ABS, sancendo il principio internazionale della sovranità statale sulle risorse biologiche, prescrive che l'utilizzatore interessato all'accesso al materiale genetico, richieda e ottenga dallo Stato fornitore il consenso informato (*Prior Informed Consent*– acronimo PIC e di seguito così indicato) prima di realizzare le attività di ricerca e sviluppo (*Research and Development*–acronimo R&D e di seguito così indicata). L'autorizzazione è accompagnata dalla stipula di condizioni di utilizzazione reciprocamente concordate tra la parte che fornisce le risorse genetiche e quella che le riceve (*Mutually Agreed Terms*–acronimo MAT(s) e di seguito così indicati) [26]. Sebbene le convenzioni internazionali non stabiliscano in dettaglio il contenuto di questi accordi, ne sono aspetti generali: la manifestazione del consenso alla messa a disposizione del materiale, l'accordo di distribuzione dei benefici, il trasferimento tecnologico e la garanzia che l'utilizzazione avvenga in maniera sostenibile. Sulla scorta di ciò, gli Stati parte dei trattati internazionali sono tenuti ad adottare misure legislative ed amministrative necessarie al fine di stabilire le condizioni per l'accesso e l'utilizzazione, fornire informazioni sulle modalità per richiedere il previo consenso informato, ricevere risposta certa dall'autorità nazionale competente in tempo ragionevole e fissare procedure certe per richiedere ed ottenere il materiale.

3.1. *Integrità della ricerca e equità negli scambi di materiale biologico*

Il principio di universalità della ricerca, avvalorato nel progetto INTACT dalla realizzazione di periodi di secondment dei ricercatori presso gli istituti dei partners del consortium, ha comportato che il primo profilo legale-etico affrontato dagli esperti del WP6 fosse la formazione degli scienziati in tema di accesso ai tartufi e al loro materiale genetico, nonché ai dati e alle informazioni ad essi relativi per poter realizzare gli obiettivi progettuali. A tal fine è stato realizzato un ciclo di seminari concernenti gli aspetti dello scambio del materiale tartufigeno e l'analisi economica dell'utilizzazione del medesimo.

Tuttavia, se da un lato è acclamato il rispetto dell'accesso alle risorse genetiche e alla condivisione dei benefici derivanti dal loro utilizzo nelle modalità prescritte dalle fonti normative di derivazione internazionale, ed è quindi esigibile un dovere di *due diligence* e responsabilità da parte degli scienziati e centri di ricerca utilizzatori, dall'altro lato questi ultimi devono essere in grado di condurre

le proprie attività senza eccessivi impedimenti di ordine burocratico o procedure oltremodo restrittive. Ne deriva l'importanza del bilanciamento tra integrità della ricerca ed equità internazionale negli scambi del materiale biogenetico. Tale equilibrio è al tempo obiettivo e funzione progettuale perché l'operato della comunità scientifica concorre a stabilire, in virtù del suo essere uno dei principali utilizzatori delle risorse genetiche, le future condizioni di ricerca sulla biodiversità e sostenibilità ambientale. Nell'ambito del Progetto INTACT, il rispetto delle normative nazionali in tema di ABS richiede una proficua collaborazione tra lo Stato fornitore e gli utilizzatori del materiale genetico tartufigeno sin dal momento dell'accesso e la partnership continua in sede di attività di R&D sul materiale messo a disposizione. I ricercatori e gli istituti di ricerca coinvolti, dopo un monitoraggio della localizzazione dei tartufi e della opportunità di indagine morfologica delle specie, attivano strategie per la richiesta del PIC e rispetto dei MAT(s). Ciò ha reso prioritaria da parte del WP6 l'organizzazione di una serie di attività di *training* indirizzate alla comunità scientifica coinvolta e finalizzate a fornire informazioni utili circa le procedure da seguire per l'accesso e il trasferimento dei tartufi tra i partner del progetto. Lo scopo di tali attività formative non è soltanto quello di supportare il *consortium* ma anche creare le condizioni che promuovano e incoraggino una ricerca effettivamente consapevole della conservazione e uso sostenibile della biodiversità tartufigena.

Figura 3. INTACT Workshop WP6



3.1.1. Previo consenso informato (PIC), termini reciprocamente concordati (MAT) e accordi di trasferimento del materiale (MTA(s))

Il primo strumento di garanzia della legalità nell'accesso alle risorse genetiche è il PIC dello Stato fornitore e/o delle comunità indigene o locali in conformità a quanto sancito dalle legislazioni nazionali. Le procedure di accesso alle risorse genetiche devono essere chiare e trasparenti, non arbitrarie e in grado di garantire procedure efficaci con tempistiche adeguate. In presenza di normative nazionali che disciplinano l'accesso, è necessario ottenere dallo Stato fornitore un permesso, o un documento equivalente, che costituisce la prova da parte di quest'ultimo di aver espresso il proprio previo consenso. Il PIC deve essere manifestato per iscritto, in maniera chiara e trasparente ed emanato da un'autorità competente specificatamente individuata dallo Stato. Rispetto alla prassi nella conduzione della ricerca, non si tratta semplicemente di una manifestazione di assenso al coinvolgimento nelle attività progettuali ma costituisce, più specificatamente, una

condizione necessaria per la messa a disposizione del materiale biologico sottoposto alla sovranità nazionale. Il conseguimento del PIC rappresenta un momento particolarmente complesso, e al tempo stesso condizionante [27], per il prosieguo dell'investigazione da parte dei ricercatori perchè impegna nella non semplice individuazione del soggetto titolare del potere di esprimere il consenso all'accesso. È, pertanto, opportuno che i ricercatori o gli enti di ricerca utilizzatori del progetto INTACT ottengano il PIC dalle autorità competenti ovvero da altri titolari di diritti coinvolti, come le comunità locali o indigene che sono custodi o proprietari delle medesime. Quest'ultima eventualità è, a maggior ragione, prospettabile in caso di accesso alle risorse genetiche tartufigene *in-situ* (con il prelievo di campioni di materiale biologico in uno specifico luogo) ovvero nelle campagne di bioprospezione ad ampio spettro. La centralità del PIC è tale da influenzare la negoziazione di MAT(s) per l'utilizzazione del materiale biogenetico. Peraltro, un nuovo PIC deve essere ottenuto per usi che differiscono, per tipologia e scopo, da quelli originariamente stabiliti al momento dell'accesso. Nel caso di materiale proveniente da collezioni *ex-situ* e/o da uno o più intermediari è necessaria una documentazione che attesti il conseguimento del PIC e che l'utilizzazione sia in linea con la ragione di quell'accesso.

Rispetto ai MAT(s), si tratta di accordi tra lo Stato fornitore e gli utilizzatori relativi alle condizioni e ai requisiti di utilizzazione delle risorse genetiche. Nella definizione del contenuto, i MAT(s) possono contenere, tra le altre disposizioni: una clausola relativa alla risoluzione delle controversie, le condizioni per la ripartizione dei benefici (anche in virtù dei diritti di proprietà intellettuale), le modalità di utilizzazione successive da parte di terzi, le misure di gestione delle sopravvenienze come le variazioni nelle finalità di utilizzazione. Rispetto al progetto INTACT, l'utilizzazione è intesa prevalentemente come attività di ricerca della composizione genetica e/o biochimica del tartufo ma il medesimo materiale può essere acquisito (e scambiato) anche per obiettivi tassonomici, finalità di conservazione e studio degli ecosistemi. In termini di ripartizione dei benefici (prevalentemente non-monetari) nel progetto INTACT si tratterà di garantire la ripartizione dei risultati di R&D, l'inverarsi di cooperazione, collaborazione a programmi di ricerca, in particolare, il coinvolgimento in attività di indagine biotecnologica qualora il Paese di origine non abbia un adeguato impianto tecnologico per procedure di analisi del materiale. Sempre nell'ambito della condivisione dei benefici saranno annoverati nei MAT(s) predisposti per INTACT: l'accesso a collezioni e/o impianti *ex-situ* e banche dati, il trasferimento al fornitore di *know-how* a condizioni il più possibili favorevoli, i rapporti istituzionali e professionali che possano condurre a successive attività di collaborazione, l'accesso all'informazione scientifica in materia di conservazione e uso sostenibile della biodiversità del tartufo.

Nella realtà delle utilizzazioni del materiale biogenetico, l'esecuzione delle attività di R&D può realizzarsi non necessariamente nel luogo ove si è avuta disponibilità del campione, bensì si renda opportuno il trasferimento presso altre sedi per ragioni di analisi e studio. In tali casi, sopraggiunge l'esigenza di redigere un accordo di trasferimento del materiale (*Material Transfer Agreements*–MTA(s)) nel quale le parti coinvolte si accordano circa le modalità dello spostamento. Sebbene nulla escluda che i MAT(s) possano assumere la forma di MTA(s), a rigore occorre distinguere la rispettiva *ratio*: mentre il strumento indica le condizioni concordate tra fornitore-utilizzatore in base alle quali il materiale genetico è utilizzato e sulla base di un consenso all'accesso previamente concesso; il

secondo è diretto a specificare le modalità di trasferimento da un fornitore a un ricevente includendo i diritti e gli obblighi intercorrenti tra i medesimi. Sono oggetto di MTA(s) le condizioni relative allo spostamento del materiale del campione biologico, includendo, inoltre, cosa il ricevente possa o non possa fare ad esempio: che tipo di R&D realizzare sulla risorsa genetica, la possibilità o meno di replicare o alterare il materiale biogenetico, la limitazione del trasferimento a parti terze, proibizione/permesso alla commercializzazione della risorsa trasferita, inclusi i risultati di R&D, nonchè, da ultimo, il ri-trasferimento al fornitore di quanto non utilizzato a fine progetto. In INTACT il contenuto di MTA(s) è strettamente connesso alla procedura di PIC e MAT(s), questi ultimi entrambi inclusi come allegati del primo e prova di legalità, trasparenza e dovuta diligenza nel rispetto del sistema ABS. MTA(s) possono essere parte di accordi finalizzati ad attività di R&D condivisa o quando il permesso è concesso per svolgere indagini in una specifica area. Questi strumenti di più ampio contenuto sono annoverati come accordi di bioprospezione (*Bioprospecting Agreements*) il cui scopo è, per l'appunto, consentire all'utilizzatore l'accesso al territorio del fornitore al fine di ricercare specie selvagge o esplorarne la biodiversità [28].

3.1.2. Dovuta diligenza e migliore prassi

Se quanto sin ora descritto rispetto al progetto INTACT è concettualmente ricondotto ad un generale principio di equità internazionale finalizzato alla conservazione e sostenibilità, nel più specifico contesto europeo trova applicazione, anche in ragione dei partner del progetto in questione, il dovere di dovuta diligenza oggetto del Regolamento Ue n. 511/2014 sulle misure di conformità per gli utilizzatori risultanti dal Protocollo di Nagoya (di seguito Regolamento ABS). Nell'attuazione del Protocollo di Nagoya nelle materie di propria competenza, il Regolamento ABS disciplina le misure intese a garantire che l'utilizzo delle risorse genetiche all'interno del territorio dell'Unione, e dopo l'entrata in vigore del Protocollo di Nagoya in Europa, avvenga in conformità alla normativa ABS. Il Regolamento ABS interessa le risorse genetiche provenienti dagli Stati che hanno ratificato il Protocollo di Nagoya e che hanno conseguentemente predisposto misure nazionali in tema di accesso ed equa ripartizione dei benefici derivanti dall'utilizzazione delle risorse genetiche. L'articolo 4 del Regolamento ABS sancisce l'obbligo di dovuta diligenza in capo agli utilizzatori, questo ultimi a tenore dell'art. 3, par. 4 del medesimo: "qualsiasi persona fisica o giuridica che utilizza le risorse genetiche". Ne deriva che la dovuta diligenza è esigibile dai singoli, inclusi i ricercatori, e dalle organizzazioni, come università, centri di ricerca, piccole e medie imprese ma anche multinazionali, e indipendentemente dalle loro dimensioni e dell'essere/non essere entità a scopo di lucro.

Il dovere di dovuta diligenza comporta che l'utilizzatore nell'Unione è tenuto a reperire, conservare e trasmettere ad altri utilizzatori le informazioni utili e necessarie ad assicurare che l'accesso alle risorse genetiche avvenga in conformità alle disposizioni normative e regolamentari degli Stati fornitori. Nel Progetto INTACT, la *due diligence* connota sin dall'inizio la pianificazione delle investigazioni sul materiale tartufigeno, attraverso la raccolta e l'utilizzo sistematico di informazioni relative alla normativa ABS nei contesti nazionali dei partner del consortium. In applicazione del Regolamento ABS, la conformità all'obbligo di dovuta diligenza nel Progetto INTACT garantisce che le

informazioni necessarie all'ABS del materiale biogenetico dei tartufi siano disponibili lungo tutta la catena di R&D.

La conformità delle disposizioni del Regolamento ABS può realizzarsi anche attraverso la predisposizione da parte di associazioni di utilizzatori di una combinazione di procedure, strumenti e meccanismi che realizzano il dovere di diligenza, e al contempo, ne assicurano il rispetto. Tali pratiche, rappresentano quella migliore prassi che la Commissione europea attesta seguendo un sistema di riconoscimento (istituito sulla base dell'art. 8 del Regolamento ABS) e, sostanzialmente, supportato dal vaglio delle informazioni e degli elementi di prova fornitigli.

Nell'ambito del progetto INTACT, la predisposizione di procedure interne, codici di condotta e modelli di clausole contrattuali standard dirette ai partners del consortium è strumentale all'effettivo scambio dei tartufi e, contemporaneamente, un obiettivo di realizzazione delle *best practices*. Queste ultime devono, necessariamente, fondarsi su una base giuridica che tenga conto delle fonti normative nazionali e regionali nonché del coinvolgimento delle associazioni, autorità locali e comunità di riferimento (per il contesto nostrano in particolare il Comune di Pietralunga mentre quello spagnolo *Diputación Provincial de Huesca*)

5. Conclusioni

Sulla scorta della disamina delle attività intraprese, il primario e più evidente valore aggiunto dei progetti, Agenda 2030 e agricoltura sostenibile e INTACT, è rappresentato dal contribuire ad un avanzamento dello stato dell'arte in tema di dovuta diligenza, quest'ultima intesa come nozione funzionalizzante della sostenibilità sia nel dar vita a modelli di business aziendale *green* sia nella conduzione di attività di R&D finalizzate alla conservazione e mantenimento della biodiversità. Declinare in questi due ambiti l'impegno verso la tutela dell'ambiente, e contemporaneamente fare leva sui processi produttivi e sulla pianificazione della ricerca, ha significato intervenire in senso responsabilizzante, introducendo nelle partnership di progetto principi e criteri di solidarietà ambientale, economia circolare e utilizzo razionale delle risorse naturali. Facile da enunciare, la sostenibilità risulta come un paradigma operativo particolarmente complesso al momento della sua effettiva implementazione perché implica l'adozione di misure e pratiche particolarmente invasive dei processi aziendali e scientifici, nel caso di specie l'attenzione all'impatto ambientale nelle fasi di produzione e l'indicazione di adeguati meccanismi per conseguire la disponibilità del materiale biogenetico tartufigeno. L'orizzonte tematico individuato trova conferma nella proposta di direttiva europea relativa al dovere di diligenza delle imprese ai fini della sostenibilità [29] che riconosce come fondamentale il ruolo degli operatori socio-economici per il successo della transizione verso una economia verde e climaticamente neutrale e per il conseguimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile dell'ONU, compresi le rispettive finalità in materia di diritti umani e ambiente. Tale proposta si prefigge come scopo quello di articolare una normativa in materia di dovuta diligenza per le società, diretta a promuovere il rispetto dei diritti umani e la tutela dell'ambiente nelle catene di valore in cui esse partecipano. Tale direttiva comporta la prevenzione e l'assunzione di responsabilità da parte degli operatori economici degli impatti negativi sui diritti umani e sull'ambiente, quindi, l'obbligo di mettere in atto adeguati sistemi e misure di *governance* e gestione.

In secondo luogo, l'indagine congiunta dei due progetti permette di evidenziare come la sostenibilità non richieda soltanto un approccio culturale da trasmettere alle comunità di riferimento ma, più specificamente, necessita della formazione di figure tecnico-professionali in grado di tradurre la conoscenza teorica e lo studio delle fonti in strumenti innovativi. Con riferimento al profilo giuridico, ne deriva una rivalutazione del ruolo del giurista che, inserito in contesti aziendali e nei *consortia* di progetto, supporta il *management* nella definizione di modalità e procedure per il rispetto delle molteplici normative ambientali internazionali, comunitarie e nazionali. A riprova di quest'ultimo assunto, nel progetto Agenda 2030 e agricoltura sostenibile molteplici profili aziendali hanno intercettato aspetti giuridici: dalle questioni inerenti la salvaguardia dell'ambiente che riguardano tanto la messa in campo quanto la distribuzione degli alimenti (tutela della biodiversità, disciplinari di metodi agricoli, gestione degli scarti e normative sugli imballaggi), ai regimi autorizzativi, di pianificazione delle *mission* agroalimentari (specie a livello di filiera), senza escludere le certificazioni di processo e di prodotto volontarie o obbligatorie. Nel progetto INTACT, il WP6 affianca costantemente il lavoro dei ricercatori nel corso delle procedure di accesso al materiale biogenetico al fine di assicurare il rispetto della legislazione nazionale, delle consuetudini, dei protocolli e, ove presenti, delle procedure delle comunità autoctone e locali.

Da ultimo, ma non meno importante, si attesta il ruolo delle nuove generazioni di imprenditori agricoli, professionisti agronomi e ricercatori in grado di rendere effettivamente operative la multifunzionalità dell'azienda, l'ecocompatibilità della produzione e l'etica ambientale della ricerca. I giovani che subentrano nella conduzione dell'azienda e le giovani professionalità, anche attraverso l'introduzione di metodi agricoli innovativi e di precisione, rappresentano il vero volano dello sviluppo agricolo e rurale perché sono in grado di cogliere le opportunità offerte dall'agricoltura 4.0 e ammodernare il comparto produttivo anche, e soprattutto, all'insegna della sostenibilità sociale ed ambientale. Nel contesto della ricerca scientifica, i giovani ricercatori sono più sensibili alla multidisciplinarietà progettuale, alla collaborazione con gli esperti legali e all'integrazione degli aspetti ambientali, economici e sociali delle loro ricerche nel senso di una sostenibilità della scienza (*sustainability science*).

Riferimenti bibliografici

1. Commissione Europea, Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni, *Il Green Deal europeo*, Bruxelles, 11.12.2019, COM(2019)640 def.
2. Commissione europea, Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni, *Strategia dell'UE sulla biodiversità per il 2030_ Riportare la natura nella nostra vita*, Bruxelles, 20.5.2020, COM (2020)380 def.
3. European Commission, *The EU's 2021-2027 Long-term Budget and NextGeneration EU. Facts and Figures*, 2021, Office of the European Union, Luxembourg, p. 10.
4. European Commission, *List of potential agricultural practices that Eco-schemes could support*, 2021, disponibile online: <https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2021-01/factsheet-agri->

- [practices-under-ecoscheme en 0.pdf](#) (ultimo accesso 31 marzo 2023).
5. Commissione europea, Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni, *Il futuro dell'alimentazione e dell'agricoltura*, Bruxelles, 29.11.2017, COM(2017)713 def.
 6. Coldiretti, *Greenitaly, l'agricoltura italiana la più verde d'Europa*, 2019, disponibile online: <https://www.coldiretti.it/ambiente-e-sviluppo-sostenibile/greenitaly-lagricoltura-italiana-la-piu-verde-deuropa>. (ultimo accesso 31 marzo 2023)
 7. ISTAT, Rapporto SDGs 2020, informazioni statistiche per l'Agenda 2030 in Italia, 2020 disponibile online: [https://www.istat.it/it/files/2020/05/Rapporto SDGs 2019 comunicato.pdf](https://www.istat.it/it/files/2020/05/Rapporto%20SDGs%202019%20comunicato.pdf). (ultimo accesso 31 marzo 2023).
 8. Commissione delle Comunità europee, *Libro verde. Promuovere un quadro europeo per la responsabilità sociale delle imprese*, Bruxelles, 18.7.2001, COM(2001)def.
 9. ISO, Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and Procedures, disponibile online: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14025:ed-1:v1:en>. (ultimo accesso 31 marzo 2023)
 10. Commissione delle Comunità Europee, *Comunicazione della commissione relativa alla Responsabilità sociale delle imprese: un contributo delle imprese allo sviluppo sostenibile*, Bruxelles, 2.7.2002, COM (2002)347 def.
 11. Decreto Legislativo 8 giugno 2001 n. 231, *Disciplina della responsabilità amministrativa delle persone giuridiche, delle società e delle associazioni anche prive di personalità giuridica, a norma dell'art. 11 della legge 29 settembre 2000, n. 300*, G.U. n. 140 del 19 giugno 2001.
 12. Convention on Biological Diversity, Rio de Janeiro, 5 giugno 1992, UNTS, vol. 1760, p. 79.
 13. FAO, The International Treaty on Plant Genetic Resources for Food and Agriculture, Rome, 2001, 2400 UNTS 303.
 14. Nagoya Protocol on Access to Genetic Resources and the Fair and Equitable Sharing of Benefits Arising from their Utilization to the Convention on Biological Diversity, Nagoya, 2010, UNTS v.3008.
 15. United Nations Declaration on the Rights of Paesants and Other People Working in Rural Areas, UN Doc. A/RES/73/165.
 16. Sanjay Kabir Bavikatte, *Stewarding the earth: Rethinking property and the emergence of biocultural rights*, 1st ed.; Oxford University Press: New Dehli, India, 2014.
 17. Giulia Sajeve, *When rights embrace responsibilities. Biocultural rights and the conservation of environment*; Oxford University Press: New Delhi, India, 2018; pp.115-154.
 18. Matteo Ferrari; Umberto Izzo. *Diritto alimentare comparato*, il Mulino: Bologna, Italia, 2012; pp. 121-163.
 19. Commissione delle Comunità Europee, Libro Verde della Commissione, Principi generali della legislazione in material alimentare nell'Unione Europea, Bruxelles 30.04.1997 COM(97)176 def.
 20. Commissione delle Comunità Europee, Libro bianco sulla sicurezza alimentare, Bruxelles, 12.1.2000, COM(1999) 719 def.
 21. Regolamento (CE) N. 178/2002 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 28 gennaio 2002, che

- stabilisce i principi e i requisiti generali della legislazione alimentare, istituisce l'Autorità europea per la sicurezza alimentare e fissa procedure nel campo della sicurezza alimentare, GU 1.2.2002 L 31.
22. Regolamento (UE) N. 1169/2011 del Parlamento europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2011 relativo alla fornitura di informazioni sugli alimenti ai consumatori, che modifica i regolamenti (CE) N. 1924/2006 e (CE) n. 1925/2006 del Parlamento europeo e del Consiglio e abroga la direttiva 87/250/CEE della Commissione, la direttiva 90/496/CEE del Consiglio, la direttiva 1999/10/CE della Commissione, la direttiva 2000/13/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, le direttive 2002/67/CE e 2008/5/CE della Commissione e il regolamento (CE) n. 608/2004 della Commissione, GUUE 22.11.2011 L 304/18.
 23. Regolamento (UE) 2015/2283 del Parlamento europeo e del Consiglio del 25 novembre 2015 relativo ai nuovi alimenti e che modifica il regolamento (UE) n. 1169/2011 del Parlamento europeo e del Consiglio e abroga il regolamento (CE) n. 258/97 del Parlamento europeo e del Consiglio e il regolamento (CE) n. 1852/2001 della Commissione, GUUE 11.12.2015 L 327/1
 24. European Commission, European Platform on Life Cycle Assessment (LCA) disponibile online: <https://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.htm>. (ultimo accesso 31 marzo 2023)
 25. Regolamento (UE) N. 511/2014 del Parlamento europeo e del Consiglio del 16 aprile 2014 sulle misure di conformità per gli utilizzatori risultanti dal protocollo di Nagoya relativo all'accesso alle risorse genetiche e alla giusta ed equa ripartizione dei benefici derivanti dalla loro utilizzazione nell'Unione, GUUE 20.5.2014 L150/59; Regolamento di esecuzione (UE) 2015/1866 della Commissione del 13 ottobre 2015 che stabilisce le norme dettagliate per l'attuazione del regolamento (UE) n. 511/2014 del Parlamento europeo e del Consiglio relativo al registro delle collezioni, al monitoraggio della conformità dell'utilizzatore e alle migliori prassi, GUUE 20.10.2015 L 275/4.
 26. Florian Rabitz. *The global governance of genetic resources*; Routledge: London/New York, UK/USA, 2017; pp 9-108.
 27. Sabrina Brizioli, Shifting variables in regulating genetic resources: definition, legal status and access. *Diritto e Processo Derecho Y Proceso – Right & Remedies. Focus: Environmental Law and Policy*, 2019, pp. 411-440.
 28. UNCTAD, *The Convention on Biological Diversity and the Nagoya protocol: Intellectual Property Implications. A Handbook on the Interface between Global Access and Benefit Sharing Rules and Intellectual Property*; UNCTAD: Geneva, Switzerland, 2014, pp. 153-166.
 29. Commissione europea, Proposta di direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio relativa al dovere di diligenza delle imprese ai fini della sostenibilità e che modifica la direttiva (UE) 2019/1937, Bruxelles 23.2.2022, COM(2022)71 def.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

AgriTech and Innovation

Andrea Alunni ^{1*}, Lilian Volcan ², Rosaria Pignataro ³

¹ C.I.R.I.A.F. – SSTAM, Via Duranti, 63 – 06125 – Perugia, Italy

² International Gender Studies (IGS) Centre at the Lady Margaret Hall of the University of Oxford, UK

³ Direttore Scuola Superiore Territorio Ambiente e Management (SSTAM) - Rome, Italy

* Autore di riferimento. E-Mail: andrea.alunni@hotmail.com

Abstract: “The future agriculture will be an agriculture of knowledge...” Commissioner Phil Hogan [1]. To advance this idea, the EC launched a dedicated platform to promote innovation in the agricultural that connects research and practice to meet farmers, foresters and rural communities’ future challenges [2].

Indeed, feeding the world’s growing population in a sustainable way and reducing the impact of climate change are major challenges. Some [3] point at “Smart Agriculture” to tackled them, others [4] suggests that AgriTech, the man-technology alliance, will make it possible. Still, the shift promises a revolution never seen before in agriculture and keep drawing the attention of many companies, investors and governments looking to stimulate innovation in this area, which enticed this research to examine ways in which creativity and innovation help AgriTech. Findings indicate skill formation plays a crucial role in advancing the rural economy and highlight that the intersection between scientific knowledge, technical expertise, and creativity adds value in agriculture while the passage towards an agriculture of knowledge [5]. This phenomenon has been examined through the lenses of European game-changing technologies and business models funded by the European Innovation Council (EIC), which has not only effectively engaged deep-tech startups in tackling climate change and improving resource management through AgriTech but is also creating new job opportunities, promoting sustainable practices, improving access to services while attracting talent, investment, and resources to rural areas in Europe [6].

Keywords: agriculture of knowledge, innovation, technology, AgriTech, skills formation, creativity, deep-tech, European Innovation Council, intellectual property, innovation funding.

1. Introduction

According to Commissioner Phil Hogan [1] “The future agriculture will be an agriculture of knowledge” and the process it entails has been actively supported in the EU by dedicated platforms that promote innovation in the agricultural to connect research and practice [2]. Indeed, feeding the world’s growing population in a sustainable way and reducing the impact of climate change are challenges that can be tackled through innovation. Some [3] technologies englobed under the umbrella of “smart agriculture” promise a revolution never seen before in agriculture, which is supported by the fact that patenting in smart agriculture has increased greatly, creating a shift in the traditional mechanical agricultural technologies towards electronics and Artificial Intelligence (AI) inventions. Others [4] consider that AgriTech, i.e. the man-technology alliance, will make it possible. In fact, innovators of the smart agriculture can rely now on platforms like the one launched in 2022 by WIPO to connect green technology providers from around the world with people seeking environmentally friendly solutions; provides projects matchmaking and, for innovators focusing on Climate Change, offers a Green Technology Book with inspiring overview of 200 available innovations and cutting-edge technologies together with a range of potential funders, legal counsel, and local and international commercial networks [7].

This research examines ways in which creativity and innovation help AgriTech guided by the following three research questions: (1) What are the elements of skill formation that play a crucial role in advancing rural economy? (2) How is agriculture using creativity to add value to traditional agriculture? and (3) How is the EU supporting the agriculture of knowledge? In order to answer these questions, a comprehensive literature review was carried out. Findings are presented as follows: in a first section, this research offers an account on arguments that support that skills and education play a crucial role in innovation and list key elements of skill formation that play a crucial role in advancing the rural economy, this is further elaborated in a second section, where emerging approaches from the intersection between scientific knowledge, technical expertise, and creativity are considered as instrumental elements to create added value in agriculture. This research then closes, in a third section, examining under the lenses of the activities sponsored by the European Commission the way in which the European Innovation Council (EIC) manages, advances and scales up deep-tech solutions for agriculture.

Main findings indicate that skills formation is instrumental to foster technology adoption in rural areas as it enables: (i) rural communities to access online services and markets; and (ii) small and medium-sized enterprises (SMEs) in rural areas to access national and international markets and technologies to successfully increase the productivity and income [13]. On a point of finding ways to add value to traditional agriculture, creativity seems to have been re-discovered at two complementary levels, the first, by surpassing the traditional conviction of seeing agriculture as a technical and scientific industry while giving way to the growing recognition of the role that creativity can play in agriculture in adding value to agriculture by creating new products, processes, and services, and by enhancing the aesthetic qualities of agricultural products [20]. The second, refers to creative approaches used to bring closer technology and local traditions to develop innovative solutions that address challenges such as

climate change, food security, and poverty all over the world. In Europe, for example, there is a growing movement that focuses on promoting sustainable agriculture, supporting small-scale farmers, and creating value-added products through approaches, such as that of Slow Food, La Via Campesina, and Terre de Liens, which have demonstrated the potential for the creative agriculture movement to promote a more resilient and equitable food system.

The trend to effectively increase food production while decreasing the impact of ordinary agriculture on climate change is currently supported by the European Commission through initiatives such as the one championed by the European Innovation Council (EIC) to promote rural business through the funding of deep-tech startups that foster the development of disruptive and game-changing innovative solutions to reduce environmental impact and improve resource management in rural areas while creating new job opportunities, promoting sustainable practices, improving access to services as well as attracting talent, investment, and resources [41].

Preliminary conclusions indicate that the elements of skill formation such as lifelong learning, social capital, tailored programs, rural entrepreneurship and technology that play a crucial role in advancing rural economic growth and community development, which suggests that the future in agriculture will heavily rely on education, technical skills and knowledge to transform ordinary agriculture into an agriculture of knowledge. It is also concluded that the convergence between rural economy, creativity, and technology is a key element in driving economic growth and rural development not only for fostering innovation and entrepreneurship but also for promotion of sustainable agriculture, supporting small-scale farmers, and creating value-added products [29]. It has also created new opportunities for rural businesses to access global markets, scale up innovation while boosting cultural preservation in the process of exploring creative applications to the agriculture of knowledge including the use of art and design. In this process, for example, Europe through the European Innovation Council (EIC) supports the development and scale up innovative agriculture-related deep-tech solutions to provide the agricultural industry with innovative solutions to improve efficiency, productivity, and sustainability. This has had a significant impact on the consolidation of the agriculture of knowledge in Europe and increased its competitiveness compared to other developed economies.

One area that was not cover in this study, due to the focus of the article, and that can be worth exploring is the comparison between the EIC initiative and other similar developed by other deep-tech leading countries such as USA, Japan, Israel and South Korea to better understand the dynamics of funding, the areas of priorities and the size of the investments so as to find lessons learnt and trends that can be used in the consolidation of agricultural knowledge process.

2. How rural economy can be advanced through skills formation

According to the World Bank's report on "Skills for Rural Transformation," investing in skills development can help to increase agricultural productivity, promote entrepreneurship, and create new employment opportunities in rural areas [8]. The report highlights that "skills development is a fundamental driver of economic and social progress, and is essential for rural development and poverty reduction" (p. 2).

Skills formation can also help rural communities adapt to changing economic circumstances and technological advancements. The European Union's (EU) report [9] on rural development notes that "investment in education and training is a key factor in ensuring that the rural workforce is able to adapt to changing economic circumstances and take advantage of emerging opportunities" (p. 19).

Furthermore, skills formation can enhance the human capital of the rural workforce, which in turn can improve productivity, innovation, and competitiveness. A study conducted by the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) [10] found that "human capital is one of the key factors determining productivity growth, and that skill levels play a critical role in determining the capacity of firms and economies to innovate and compete" (p. 8).

Several elements of skill formation play a crucial role in advancing the rural economy. Here following are the top five identified as the most effective in advancing the rural economy:

2.1. *Embracing lifelong learning* is essential for individuals in rural communities to acquire new skills and knowledge throughout their careers [9].

Research has shown that lifelong learning is essential for the development of skills and knowledge among rural populations. In particular, programs that focus on vocational education and training, entrepreneurship, and digital skills have been found to be particularly effective in advancing the rural economy [10]. By providing individuals with the necessary skills and knowledge, lifelong learning can help to create new jobs and businesses in rural areas. This can help to reduce poverty, increase income levels, and improve the standard of living in rural areas [11].

In the present world, lifelong learning has become an essential aspect of personal and professional development. In this paper, we will discuss why lifelong learning is essential for the development of skills and knowledge among rural populations. In particular, we will focus on vocational education and training, entrepreneurship, and digital skills advancing the rural economy.

The rural population often lacks access to education and training facilities, which limits their opportunities to learn new skills and knowledge. Therefore, lifelong learning provides an opportunity for rural populations to learn new skills and knowledge, which can help them to improve their employability and economic status [12].

Vocational education and training are essential as well for the development of skills and knowledge among rural populations. Vocational education and training provide individuals with the necessary skills and knowledge to perform a specific job or trade. In rural areas, vocational education and training can help individuals to acquire skills that are in demand in the local economy. This can improve their employability and enable them to contribute to the local economy [11].

Entrepreneurship is another area where lifelong learning can be beneficial for rural populations as it provides individuals with an opportunity to start their own businesses and contribute to the local economy. Lifelong learning can help individuals to acquire the necessary skills and knowledge to start and run a successful business. This can help to create new jobs and improve the economic prospects of rural areas [13].

In this context, digital skills are becoming increasingly important in the modern world. Digital skills enable individuals to access information and communicate with others, which can help to improve their economic prospects. Lifelong learning can help individuals to acquire digital skills, which can help them to access new job opportunities and improve their employability. In rural areas, digital skills can help individuals to overcome geographical barriers and access new markets [12].

2.2. Developing social capital, such as networks, trust, and shared values, can enhance cooperation and information exchange among individuals and businesses in rural communities, leading to increased innovation and entrepreneurship [13].

The literature [14] suggests that social capital plays an essential role in the development of rural communities, in particular due to its capacity to foster collaboration, networking and social cohesion. This, because social capital refers to the social networks, norms, and trust that facilitate cooperation and coordination among individuals and groups. In rural areas, social networks and relationships play a vital role in accessing resources, information, and opportunities for individuals and groups to work together to solve problems, access resources, and build stronger communities.

Studies [15] show that strong social capital can lead to better economic outcomes, improved health and well-being, and a higher quality of life for rural residents. In particular when collaboration makes individuals and groups working together to achieve common goals. For example, in rural areas, collaboration can be essential for accessing resources and building stronger communities.

Authors [14, 16] agree that programs that encourage collaboration among individuals and groups, such as cooperative businesses, can be effective in advancing the rural economy. They specify that, beside collaboration, networking is another critical element of social capital as it helps the process of building relationships and connections with others, which in rural areas can be essential for accessing resources, information, and opportunities. And, on a point of social cohesion, a third critical element of social capital, they highlight the importance of achieving a degree in which individuals and groups in a community feel connected and committed to one another and suggest that building stronger communities and addressing common challenges. This can be done through programs such as community events and shared spaces to effectively advance rural economy, lead to better economic outcomes, improved health and well-being, and a higher quality of life for rural residents [15].

2.3. Focusing on tailored training programs are instrumental to address the specific needs and challenges of rural communities. According to OECD research [13] it can improve the relevance and effectiveness of skill development initiatives. This is in line with studies [17] which findings indicate that programs tailored to the specific needs of rural populations are more effective than general programs, for example, programs that focus on the unique challenges facing women, youth, and disadvantaged groups in rural areas have been found to be particularly effective.

This is relevant if considering that rural populations have unique challenges and needs that are different from those in urban areas, in which case general programs that are designed to address the needs of the entire population may not be effective in addressing the unique challenges faced by rural

populations. For this reason, in recent years the focus has been increased on programs that are tailored to the specific needs of rural populations. Here following are listed a few inspiring examples of these programs which focus was to address the needs of women, youth, and disadvantaged groups.

2.4. *Promoting rural entrepreneurship* through training and mentoring programs can also create new job opportunities and support the development of small and medium-sized enterprises (SMEs) in rural areas. According to the European Commission [9] rural entrepreneurship can play a critical role in advancing the rural economy. This is also confirmed by research [18] which findings suggest that programs that focus on entrepreneurship education, business development, and access to finance can be particularly effective in fostering entrepreneurship in rural areas. Entrepreneurship thus has been identified as a critical driver of economic growth and development. Rural entrepreneurship, in particular, plays a crucial role in advancing the rural economy. However, rural entrepreneurs face unique challenges such as limited access to finance, markets, and business development services. Therefore, programs that focus on entrepreneurship education, business development, and access to finance are particularly effective in fostering entrepreneurship in rural areas.

2.5. *Adopting new technologies*, such as digital tools and precision agriculture, can improve productivity and competitiveness in the rural economy. [13]. In particular, programs that focus on digital skills, e-commerce, and the use of technology in agriculture and other rural industries have been found to be particularly effective in advancing the rural economy [19].

Technology has the potential to play a transformative role in advancing the rural economy. Programs that focus on digital skills, e-commerce, and the use of technology in agriculture and other rural industries have been found to be particularly effective in advancing the rural economy. This paragraph provides an overview of the role of technology in advancing the rural economy and highlights successful programs that have been implemented in different parts of the world.

Technology can help to address the unique challenges facing rural economies, such as limited access to markets and services, low productivity, and isolation. The following are examples of how technology can be used to advance the rural economy:

Digital skills are essential for individuals and businesses to thrive in the digital economy. In rural areas, digital skills can help to bridge the digital divide and enable individuals and businesses to access online services and markets. Programs that provide digital skills training and support have been found to be effective in empowering rural communities [13]. Likewise, E-commerce can provide rural businesses with access to national and international markets, enabling them to reach a wider customer base and increase their revenue.

To wrap up, academic literature supports the idea that skills formation can play a crucial role in advancing the rural economy. There was no credible literature source that explicitly disagree with the fact that skill formation can play a crucial role in advancing the rural economy and, although research in this field is ongoing and there may be additional and/or differing opinions on the best strategies for rural development, the majority of the literature supports the importance of education and skill

development in rural areas for economic growth and community development. In particular, on the importance of programs that focus on lifelong learning, social capital, tailored programs, rural entrepreneurship, and technology which have been found to be particularly effective in advancing the rural economy.

3. How agriculture is gaining added value from creativity

Agriculture is one of the oldest and most essential industries in the world. However, in recent years, there has been a growing interest in how agriculture can gain added value from creativity. According to recent research [20] agriculture has traditionally been seen as a technical and scientific industry, but there is growing recognition of the role that creativity can play in agriculture. In this context additional research [21] clarifies that agriculture has traditionally been seen as a technical and scientific industry due to the focus on improving productivity and efficiency through the application of scientific and technical knowledge.

This approach, some authors [22] argue, has been successful in increasing yields and improving food security, but it has also led to negative environmental impacts and social inequalities. As a result, others [23] withstand there is growing recognition of the role that creativity can play in agriculture, particularly in the process of adopting resourceful approaches to add value to agriculture to create new products, processes, and aesthetic qualities of agricultural products. Moreover, agriculture is evolving towards inclusive application approaches, including:

Sustainable agroforestry: where the land use system involves the integration of trees with crops and/or livestock to attain sustainable agricultural practice that can improve soil quality, increase biodiversity, and provide multiple benefits to farmers. This approach combines traditional knowledge with modern scientific and technical expertise to create innovative solutions to agricultural challenges.

Precision Agriculture: as an approach that uses modern technologies, such as GPS, remote sensing, and machine learning, to optimize crop production by combining scientific knowledge with technical expertise to create innovative solutions to overcome agricultural challenges and allow farmers to increase crop yields, reduce input costs, and improve environmental sustainability.

Participatory Plant Breeding: this approach involves the active participation of farmers in the plant breeding process so as to combine their traditional knowledge with modern scientific and technical expertise to create new crop varieties that are adapted to local environments and farming systems. Participatory plant breeding can improve crop yields, increase food security, and preserve traditional agricultural knowledge.

Likewise, creativity is also leading to the development of new approaches for producing, processing, and distributing agricultural products. One of these resourceful approaches derived from creativity and local knowledge applied to the agriculture of knowledge is typified in agroecology, which integrates ecological principles with social and cultural values to create sustainable food systems [24]. Another successful approach is expressed in participatory plant breeding, which involves farmers and other stakeholders in the breeding process to create varieties that meet local needs and preferences [25]. Both of these approaches recognize the importance of creativity and local knowledge in agriculture.

Other successful creative applications to the agriculture of knowledge approach include the use of art and design to promote sustainable off-farm agricultural practices [26], such as the development of value-added products from agricultural waste [27], and the use of social media and other digital tools to connect farmers and consumers and promote their products and the benefits of producing them under traditional practices [28]. These approaches demonstrate the potential for creativity to contribute to sustainable agriculture and highlight the need for a more holistic approach that integrates social, cultural, and environmental considerations with technical and scientific knowledge.

The above indicates how the use of creativity is advancing the agriculture of knowledge. Following are some successful examples, which relevance is growing at global level:

- **Agritourism:** is a growing trend in which farmers open up their farms to visitors and offer a range of activities, such as farm tours, tastings, and workshops. Agritourism can help farmers to diversify their income streams and create new markets for their products. In addition, it can provide an opportunity for farmers to educate the public about agriculture and promote sustainable farming practices.
- **Urban Agriculture:** involves growing food in urban areas, such as rooftop gardens, community gardens, and vacant lots. Urban agriculture can help to increase access to fresh, healthy food in urban areas and provide opportunities for community building and education.
- **Food Hubs:** are organizations that aggregate and distribute local food products to retailers, restaurants, and institutions. Food hubs can help to create new markets for local farmers and provide consumers with access to fresh, healthy food.

3.1 The creative agriculture movement is expanding globally

The creative agriculture movement is driven by the recognition that traditional agriculture practices are not always sustainable or economically viable, and that innovative approaches are needed to create a more resilient and equitable food system.

For instance, Europe has been at the forefront of the creative agriculture movement. The European Union has invested heavily in research and development in agriculture, and there has been a growing recognition of the role that creativity can play in agriculture. The creative agriculture movement in Europe has focused on promoting sustainable agriculture, supporting small-scale farmers, and creating value-added products [29].

Therefore, the creative agriculture movement in Europe is a response to the challenges faced by small-scale farmers, including limited access to markets, increasing competition from large-scale agricultural enterprises, and the impacts of climate change. The movement in Europe is driven by a diverse range of actors, including farmers, artists, designers, chefs, and entrepreneurs. These actors collaborate to develop innovative approaches to agriculture that promote sustainability, creativity, and social justice. This movement is also characterized by a strong focus on community building and local empowerment.

The following are examples of successful applications of the creative agriculture movement in Europe:

1. Slow Food: is a grassroots organization that promotes good, clean, and fair food. It was founded in Italy in 1989 and has since expanded to over 160 countries (<https://www.slowfood.com/what-we-do/>) to emphasize the importance of traditional food cultures, biodiversity, and local food systems. It also supports small-scale farmers and promotes sustainable agriculture practices.
2. La Via Campesina: is an international movement that advocates for the rights of small-scale farmers and promotes sustainable agriculture. It was founded in 1993 and now represents over 200 million farmers in over 80 countries. La Via Campesina is characterized by a strong focus on social justice, food sovereignty, and community empowerment.
3. Terre de Liens: is a French organization that promotes land conservation and supports small-scale farmers. It was founded in 2003 and has since acquired over 4,000 hectares of land for sustainable agriculture (<https://terredeliens.org/en/terre-de-liens/our-history/>) and is characterized by a strong focus on community engagement and the democratization of land ownership.

Nevertheless, the creative agriculture movement is not limited to Europe. There has been growing interest in the role that creativity can play in agriculture in other regions of the world, such as Asia and Africa. In these regions, the focus has been on using creativity to address challenges such as climate change, food security, and poverty [30].

3.2 How traditional knowledge has contributed to shape the agriculture of knowledge?

The agriculture of knowledge is a holistic approach that combines traditional knowledge with modern scientific and technical expertise to create innovative solutions to agricultural challenges. This approach recognizes that the successful implementation of modern agricultural technologies requires an understanding of the local environment and cultural context. Therefore, it emphasizes the importance of local knowledge and community involvement in the development and implementation of agricultural technologies.

This approach has evolved over time as researchers, policymakers, and farmers recognize the value of integrating diverse knowledge systems to develop innovative solutions that are sustainable, context-specific, and socially and culturally appropriate.

One of the earliest references to the concept of the agriculture of knowledge can be found in the work of Norman Uphoff and colleagues [31], who proposed the System of Rice Intensification (SRI) in the 1980s. SRI is a set of agricultural practices that aim to increase rice yields while reducing the use of inputs such as water, seeds, and fertilizers. The approach combines traditional rice-growing techniques with modern knowledge of plant physiology and soil science. Uphoff and colleagues argued that the success of SRI depended on the integration of different forms of knowledge and the active participation of farmers in the innovation process [31].

Since then, the agriculture of knowledge approach has been applied in various contexts and with different crops, livestock, and ecosystems. For instance, the Participatory Plant Breeding (PPB) approach, developed by the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), emphasizes the active involvement of farmers in the development of new crop varieties that are

adapted to their needs and preferences [32]. PPB combines scientific knowledge of plant genetics and breeding with local knowledge of seed selection, crop management, and pest control.

Similarly, the Indigenous Soil and Water Conservation (ISWC) approach, developed by the World Agroforestry Center (ICRAF), aims to promote sustainable agriculture in drylands by combining traditional and scientific knowledge of soil and water management. ISWC involves the use of indigenous practices such as contour bunds, stone lines, and terracing, along with modern techniques such as rainwater harvesting and micro-irrigation. Successful applications of the agriculture of knowledge approach can be found in different parts of the world and across different agricultural systems. For example, in the Andean region of South America, the Potato Park initiative involves indigenous communities in the conservation and management of native potato varieties, while also promoting sustainable tourism and cultural exchange [33].

Therefore, one can safely say that the agriculture of knowledge approach has evolved as a response to the limitations of ordinary agricultural systems to achieve sustainability and the need for more holistic and participatory approaches to agricultural development. More importantly, the agriculture of knowledge involves the integration of scientific knowledge, technical expertise, and creativity to create added value in agriculture [5]. This is confirmed by the fact that successful applications of this approach have demonstrated the value of integrating diverse knowledge systems (traditional and modern) and the importance of local participation and empowerment in the innovation process.

3.3 The rise of intellectual capacities to build economic value in agriculture

The current trend in increasing the use of traditional knowledge and intellectual capital to create economic value in agriculture is gaining momentum worldwide. Traditional knowledge refers to the knowledge, skills, and practices developed by indigenous and local communities over generations, while intellectual capital refers to the intangible assets of an organization, such as its knowledge, patents, and trademarks [34].

Several studies have been conducted on the use of traditional knowledge and intellectual capital in agriculture, highlighting their importance in creating economic value. According to Nambiar and Singh [35], traditional knowledge has a significant role in the development of sustainable agriculture. The authors argue that traditional knowledge can be used to develop new products, improve production processes, and enhance the value of agricultural products. Similarly, Pandey et al. [36] discuss the importance of intellectual property rights in agriculture. They argue that intellectual property rights can be used to protect innovations in agriculture and promote their commercialization.

Overall, intellectual property has played a critical role in transforming agricultural products, processes, and aesthetic qualities in the European and global markets. These various forms of IP have provided legal protection and economic incentives for innovation and creativity in agriculture.

3.4 Intellectual property as the engine of European agriculture of knowledge

Intellectual property (IP) protection has played a crucial role in the development of the European agricultural sector while promoting natural resource conservation, particularly through the use of

patents to drive innovation funding. This has led to the rise of deep-tech and digital technologies that support zero carbon emissions, job creation, and prosperity in the European Union (EU).

One of the most significant studies on the impact of IP protection on innovation in agriculture is by Jaffe and Palmer [37] highlights the role of patents in transforming the European agriculture. A report by the European Patent Office (EPO) found that patents have played a critical role in driving innovation and growth in the European agriculture sector and highlights the increasing importance of digital technologies and data-driven approaches in agriculture and the role of IP protection in driving investment in these areas [38].

Another study by Notten et al. [39] explores the role of IP protection in promoting sustainable agriculture in the EU suggests that patents can play a critical role in supporting the development of new technologies and solutions that can help reduce greenhouse gas emissions, promote biodiversity, and enhance the resilience of the agricultural sector to climate change. This is confirmed by the study by Auci, et al. [40] indicates that increasing agricultural patents reduce the farmers' technical inefficiency and suggests that such an evidence can help policy makers in the effort to enhance farmers' existing knowledge and skills in adapting to climate change by incentivizing farms in being innovative through the development of one or more agricultural patents – specifically biotech patents – to strengthen their capacity to adapt to climate change.

Finally, a report by the European Commission (EC) highlights the potential of deep-tech and digital technologies in supporting the transition to a sustainable and prosperous agricultural sector in the EU. The report identifies the critical role of IP protection in driving investment in these areas, particularly through the use of patents to protect innovative solutions and technologies [41].

Overall, the literature highlights the crucial role of patents in driving innovation, growth, and sustainability in the European agriculture sector. By providing a strong incentive for private investment in research and development, IP protection can support the development and adoption of deep-tech and digital technologies that can support zero carbon emissions, job creation, and prosperity in the EU.

4. How Europe supports rural business through innovation

The European Innovation Council (EIC) is a European Union (EU) initiative that aims to support the development and scaling up of innovative technologies and business models. The EIC provides funding, expertise, and networking opportunities to startups, SMEs, and research institutions in Europe [42].

The EIC objectives are to:

1. Identify and support high-potential startups, SMEs, and research institutions in Europe.
2. Foster the development of disruptive and game-changing innovations that can have a significant impact on society and the economy.
3. Provide funding, expertise, and networking opportunities to help innovative companies and institutions to scale up their operations and reach global markets.
4. Build a vibrant and dynamic innovation ecosystem in Europe that can attract talent, investment, and resources from around the world.

The EIC supports deep-tech innovation in Europe through programs that are designed to provide funding, expertise, and networking opportunities to startups, SMEs, and research institutions. These programmes are:

EIC Accelerator: The EIC Accelerator is a program that provides funding, coaching, and mentoring to startups and SMEs with high-potential innovations. The program offers grants of up to €2.5 million and equity investments of up to €15 million to companies that are developing game-changing technologies and business models.

EIC Pathfinder: The EIC Pathfinder is a program that supports research institutions and consortia that are developing breakthrough technologies and ideas. The program offers grants of up to €4 million to projects that have the potential to create new markets and transform industries.

EIC Transition: The EIC Transition is a program that supports startups and SMEs that have already received funding from other EU programs. The program provides additional funding, expertise, and networking opportunities to help companies to scale up their operations and reach global markets.

EIC Corporate: The EIC Corporate is a program that connects startups and SMEs with large corporations that are looking for innovative technologies and solutions. The program provides networking opportunities, matchmaking events, and mentoring to help companies to build partnerships and collaborations with corporations.

The EIC has been instrumental in promoting rural business success through the funding of deep-tech startups engaged in developing deep-tech for precision agriculture and to reduce environmental impact and improve natural resources management. The EIC funded startups use advanced technology to revolutionize the various European industries (among which agriculture) by providing innovative solutions that improve efficiency, productivity, and sustainability [43].

At the moment, the EIC has provided funding of over €3 billion to startup companies and institutions that helped them to develop game-changing technologies and business models that can have a significant impact on society and the economy while attracting talent, investment, and resources from around the world to position Europe as a global leader in innovation.

4.1 Funding ag-related deep-tech startups brings significant benefits to European rural business

The benefits of EIC funding on the agriculture of knowledge in Europe has been widely studied and documented. One study by Deloitte [44] analysed the impact of EIC funding on European startups and found that it had a significant positive effect on their growth and success. In particular, startups that received EIC funding were more likely to secure follow-on investment, achieve higher revenue growth, and expand into new markets. This, in turn, can lead to increased consolidation of the agriculture of knowledge in Europe as successful startups generate new knowledge and technologies that can be shared with others in the industry.

Another study by the European Parliament [45] assessed the role of the EIC in supporting innovation in agriculture and rural areas. The study highlighted the importance of funding for startups engaged in agriculture of knowledge, as these companies often face significant financial and regulatory barriers. It also emphasized the potential impact of innovation on the competitiveness of European agriculture, especially when compared to other developed economies.

Moreover, a report by the European Commission [41] outlined the key areas of innovation in agriculture, which include precision farming, digitalization, and sustainable practices. EIC funding has been instrumental in supporting startups in these areas, helping to drive innovation and growth in the agriculture of knowledge sector.

4.2 Promising ag-related deep-tech startups funded by the EIC on precision farming

Following are some of the most promising deep-tech startups funded by the EIC (as listed in the European Commission report [41]) that use precision farming and digitalisation to revolutionize the agricultural industry in Europe:

Agrieye: provides farmers with a precision farming solution to optimize crop management via a platform uses satellite and drone imagery, AI, and machine learning to monitor crop health, detect pests and diseases, and predict yields. Agrieye has helped farmers to increase their yields and reduce costs, promoting rural business success in Europe.

Efficient Farming: provides farmers with a data analytics platform to optimize their farming operations. The platform uses IoT devices, AI, and machine learning to collect and analyse data on soil health, weather, and crop growth. By providing farmers with real-time insights, Efficient Farming helps to improve efficiency and reduce costs, promoting rural business success.

AgriTech: also uses advanced technologies such as AI, IoT, and blockchain to improve agricultural productivity in rural areas. By providing farmers with real-time data on weather, soil, and crop health, it helps farmers make informed decisions about planting, irrigation, and harvest. This leads to increased crop yields, reduced water usage, and more efficient resource management.

AgUnity: is a blockchain startup that helps to create transparency and trust in agricultural supply chains. By providing farmers with a mobile app that records every transaction in the supply chain, it helps to ensure that farmers receive fair prices for their products. This creates new economic opportunities for farmers in rural areas and helps to promote sustainable practices.

Taranis: is an AI-powered precision agriculture company that provides farmers with real-time insights on crop health and pest management. Its software uses satellite imagery and AI algorithms to detect crop diseases and pests early, reducing the need for chemical treatments and increasing crop yields. Taranis has raised over \$60 million in funding and is valued at over \$300 million.

Aquabyte: is an AI-powered aquaculture company that provides farmers with real-time insights on fish health and feeding. Its software uses computer vision and machine learning to optimize fish farming operations, reducing feed waste and improving fish health. It has raised over \$10 million in funding and is valued at over \$30 million.

Earthcube: has developed a cloud-based platform to help farmers optimize their irrigation systems, reducing water waste and improving crop yields.

Lusoco: has developed a solar-powered light pole that provides energy-efficient lighting for rural areas without access to the grid.

BioKind: produces organic insect protein for animal feed by using waste products as a feedstock and employing circular economy principles. It helps to reduce waste and promote sustainable farming practices, while making a significant impact on rural business success by providing farmers with a sustainable source of protein for their livestock.

Sylfeed: also produces a sustainable protein source for animal feed using forest waste.

AeroFarms: produces indoor vertical farms to grow fresh produce. By using hydroponics, LED lighting, and data analytics, AeroFarms is able to grow crops with 95% less water and 97% less land than traditional farming methods. AeroFarms has made a significant impact on rural business success by providing farmers with a sustainable and efficient way to grow fresh produce.

4.2 Other promising ag-related deep-tech startups funded by the EIC on sustainable practices

Following are some of the most promising deep-tech startups funded by the EIC that address carbon emissions, infrastructure and healthcare in rural areas to revolutionize the agricultural industry in Europe:

CarbonCure: is a clean technology company that uses AI and blockchain to reduce carbon emissions in the concrete industry. Its technology injects waste carbon dioxide into concrete, reducing the carbon footprint of concrete production while also improving its strength and durability. It has raised over \$50 million in funding and is valued at over \$250 million.

LanzaTech: is a carbon recycling company that uses AI and biotechnology to convert industrial waste gases into sustainable fuels and chemicals. Its technology reduces carbon emissions and promotes circular economy by converting waste into valuable products. This company has raised over \$400 million in funding and is valued at over \$1 billion.

Opus 12: is a clean energy company that uses blockchain technology to convert carbon dioxide emissions into valuable chemicals and fuels. Its technology reduces carbon emissions and promotes

circular economy by using waste carbon as a feedstock for industrial processes. Opus 12 has raised over \$14 million in funding and is valued at over \$40 million.

Solstice: is a clean energy startup that works to improve access to affordable and sustainable energy in rural areas. By partnering with local communities and utilities, Solstice installs community solar projects that provide renewable energy to households and businesses. This creates new job opportunities in the local community and helps to reduce greenhouse gas emissions.

RoadBotics: is a deep-tech startup that uses AI and machine learning to assess the condition of roads and other infrastructure. This technology is particularly useful in rural areas where roads are often in poor condition and may not receive regular maintenance. By providing accurate and up-to-date information on road conditions, RoadBotics helps to improve safety and reduce the cost of maintenance for local governments.

Simprints: is a biometrics startup that uses fingerprint technology to improve healthcare access in rural areas. By providing healthcare workers with mobile biometric devices, Simprints helps to identify patients and track their medical records. This leads to more accurate diagnoses and better treatment outcomes, particularly in areas where patients may not have a formal identification document.

4.3 Gauging the EIC funding impact on the European agriculture of knowledge

The European Innovation Council has been instrumental in supporting rural business success through the funding of ag-related deep-tech startups. These companies are mostly generated from IP-based ideas and use EIC support to advance and scale up their solutions until they successfully reach the market.

The report by Deloitte [44] found that EIC funding had a positive effect on startups growth and success, highlighting that those receiving EIC funding were more likely to secure follow-on investment, achieve higher revenue growth, and expand into new markets. The EIC funding has thus helped deep-tech startups in agriculture of knowledge to attract investment from other sources, such as venture capitalists and angel investors.

The EIC funding has also been instrumental in helping startups engaged in agriculture of knowledge to develop new technologies, practices, and knowledge to address the challenges facing the agricultural sector in Europe. According to a report by the European Union Intellectual Property Office (EUIPO) [46], Europe is a global leader in agricultural innovation due to several factors, including strong intellectual property (IP) protection, a supportive regulatory environment, and public funding for research and innovation, which have contributed significantly to the development of new knowledge and technologies in agriculture.

The report also emphasizes the importance of IP protection in driving agricultural innovation, as it provides incentives for researchers and companies to invest in developing new technologies and

products and notes that European companies and research institutions had filed more patents in the field of agriculture and forestry than any other region. In this regard, the EIC has been instrumental in providing financial support to startups engaged in innovation in agriculture, while also promoting IP protection and enforcement.

In summary, the EIC funding has played a significant role in promoting agricultural innovation in Europe. EIC funding has helped startups engaged in agriculture of knowledge to develop new technologies, practices, and knowledge, which has contributed to the consolidation of the agriculture of knowledge in Europe. Compared with other developed economies, it has led to an increase in the number of successful startups in Europe and has helped to bridge the gap between Europe and other developed economies in terms of innovation in agriculture.

5. Conclusions

Academic literature supports the idea that skills formation can play a crucial role in advancing the rural economy. Although research in this field is ongoing, which indicates that there may be additional opinions on best strategies to consider for rural development, the reviewed literature suggests that lifelong learning, social capital, tailored programs, rural entrepreneurship, and technology have proven particularly effective in advancing the rural economic growth and community development. This is noteworthy, if considering that the future of agriculture will be an agriculture of knowledge, and suggest that it is essential to empower rural populations to enable them to participate in the creative agricultural movement while becoming better equipped to adopt new technologies and farming practices, increase productivity and contribute to economic growth. This is particularly relevant when it comes to “The future of rural youth in developing countries”, where it is suggested [11] that investing in skills development helps to adapt to changing economic circumstances, adopt technological advancements in the effort to increase competitiveness and productivity. Auci et al. [40] also sustain that agricultural patents reduce the farmers’ technical inefficiency and suggest that the development of one or more agricultural patents – specifically biotech patents – strengthens farmers’ capacity to better to both technological advancements and innovative farming practices while increasing their contribution to economic growth and prosperity.

To the question on how is agriculture using creativity to add value to traditional agriculture, literature indicates that in recent years there has been growing recognition of the importance of creativity in driving economic growth and development. In particular, as an essential driver in providing agriculture with new digital and precision opportunities for businesses to compete globally and in fostering the intersection between the rural economy, creativity, and technology which has led to the promotion of sustainable agriculture, supporting small-scale farmers, and creating value-added products [29]. Creativity has also enticed advocacy for developing innovative solutions that address challenges such as climate change, food security, and poverty all over the world which in turns has also helped the expansion of an agriculture of knowledge. In Europe, for example, the intersection between rural economy and creativity has allowed to promote sustainable agriculture, supporting small-scale farmers, and creating value-added products through approaches, such as that of Slow Food, La Via

Campesina, and Terre de Liens, which have demonstrated the potential for the creative agriculture movement to promote a more resilient and equitable food system.

In brief, the intersection between the rural economy, creativity, and technology are essential drivers of economic growth and sustainable development of rural areas. More importantly, this intersection has created new opportunities for rural businesses to access global markets, scale up innovation while boosting cultural preservation including the use of art and design to promote sustainable off-farm agricultural practices [26] and the use of digital tools to connect farmers and consumers and promote their products while using traditional practices (Pascual-Fernández et al., 2020) to: diversify income and new markets through agritourism; increase access to fresh, healthy food in urban areas through urban agriculture; and to create new markets for local farmers and provide consumers with access to fresh, healthy food through food hubs.

Therefore, it is crucial to continue to invest in these three elements to create sustainable economic growth in rural. This aspect was examined through the lenses of deep-tech startups funded by the European Innovation Council (EIC), an initiative by the European Union (EU) aims to support the development and scaling up of innovative technologies and business models by providing funding, expertise, and networking opportunities.

It emerges that the technical, funding and network support provided by the EIC to deep-tech startups engaged in developing deep-tech solutions has had a significant impact on society and the economy while attracting talent, investment, and resources from around the world to position Europe as a global leader in innovation. Besides, the European agricultural industry has gained significant strength compared with other developed economies due to the increased number of successful startups engaged in developing new solutions and products in precision farming, digitalization. EIC funding has in turn helped these startups in improved their funding options to achieve growth and success in new markets as well as to overcome financial and regulatory barriers to compete with other solutions in and beyond the European market.

Finally, the EIC funding had a significant impact on the consolidation of the agriculture of knowledge in Europe as it has led to the development of new technologies, practices, and knowledge, which can be shared with others in the industry, and increased competitiveness compared to other developed economies.

References

1. EIP-AGRI. (2016, January 8). Promoting creativity and learning through agricultural knowledge systems and interactive innovation. Ec.Europe.Eu. Retrieved January 10, 2023, from <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/news/promoting-creativity-and-learning-through-agricultural-knowledge-systems-and-interactive>
2. Agricultural Knowledge and Innovation Systems (AKIS). (2022). In EIP-AGRI (Ed.), Boosting innovation and knowledge flows across Europe. European Commission. https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/eip-agri_agricultural_knowledge_and_innovation_systems_akis_2021_en_web.pdf

3. European Patent Office (EPO). (2022, June 30). Smart agriculture. epo.org. Retrieved February 3, 2023, from https://www.epo.org/app/service/ipcal/i_event.php?id=14121&isPopup=1
4. CAIRORCS Studio. (2023, January). MISSION AGRITECH: INNOVATION IN THE FIELD. Studio Corriere. Retrieved February 10, 2023. Available online: https://studio.corriere.it/philip_morris-lf2-agritech-innovazione-in-campo/
5. McGuire, J., & Burke, B. J. (2018). The agriculture of knowledge and the knowledge of agriculture. *Journal of Rural Studies*, 63, 51-59.
6. European Commission. (2019). Rural development: The European Union's rural development policy. Retrieved from https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/key-policies/common-agricultural-policy/rural-development_en
7. WIPO. (2022). Year in Review 2022. WIPO GREEN. Retrieved February 4, 2022, from https://www3.wipo.int/wipogreen/en/reports/2022.html?utm_source=WIPO+Newsletters&utm_campaign=23a757a6ea-DIS_GREEN_EN_080223&utm_medium=email&utm_term=0_bcb3de19b4-23a757a6ea-256855997.
8. World Bank. (2020). Skills for rural transformation: A framework for policy and action. Retrieved from <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33786>
9. European Commission. (2017). Rural development in the EU. Retrieved from https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/rural-development-2017-brochure_en.pdf
10. Murray, R., & Huggins, R. (2019). Vocational education and training in the rural economy. In *The Routledge Handbook of Rural Studies* (pp. 319-327). Routledge.
11. OECD. (2017). Rural-Urban Partnerships: An Integrated Approach to Economic Development. Retrieved from <https://www.oecd.org/rural/rural-urban-partnerships-an-integrated-approach-to-economic-development-9789264271036-en.htm>
12. Eurydice. (2018). Lifelong Learning in Europe: National Policies and Strategies. Retrieved from https://eacea.ec.europa.eu/national-policies/eurydice/content/lifelong-learning-europe-national-policies-and-strategies_en
13. Gomez, M. I., Ricketts, K. D., & Pritchard, W. (2013). The role of creativity in entrepreneurship and innovation in agriculture and food systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 28(2), 145-153.
14. Kambites, C., & Owen, S. (2006). Rural social capital and rural development: Insights from a Northumberland case study. *Sociologia Ruralis*, 46(4), 330-345.
15. Putnam, R. D. (1993). *Making Democracy Work: Civic Traditions in Modern Italy*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
16. Plaut, P. O., & Carbonell, A. (2019). *Social Capital and Economic Development: Lessons from Latin America*. Cham, Switzerland: Springer.
17. Bryden, J., & Huggins, R. (2018). *Rural Development and Entrepreneurship in Europe*. Routledge.
18. Williams, N., & Vorley, T. (2014). *Entrepreneurship and the rural economy: A review of UK policies*.

- Regional Studies, 48(8), 1353-1375.
19. Morgan, K. (2018). The rural economy and the countryside: Policy and development in the 21st century. Routledge.
 20. Barkley, D. L. (2019). Economic Adaptation: Alternatives for nonmetropolitan areas. Routledge.
 21. Zhang, J., Chen, Y., & Song, W. (2018). Agricultural technical innovation and output growth in China. *Sustainability*, 10(11), 4141.
 22. Pretty, J. (2018). Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. *Science*, 362(6419), eaav0294.
 23. Buck, D. (2017). The role of creativity in sustainable agriculture. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development*, 7(2), 1-4.
 24. Altieri, M. A., Nicholls, C. I., & Henao, A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 869-890.
 25. Sthapit, B., Joshi, K. D., Witcombe, J. R., & Gyawali, S. (2014). Participatory plant breeding is better described as highly client-oriented plant breeding. *ILEIA Newsletter*, 30(3), 12-13.
 26. Orr, C. H. (2017). Art and agriculture: A narrative of sustainability. *The Journal of Arts Management, Law, and Society*, 47(4), 242-255.
 27. Gupta, S., Abu-Ghannam, N., & Scannell, A. G. M. (2018). Bioactive potential and possible health effects of edible brown seaweeds. *Trends in Food Science & Technology*, 73, 60-70.
 28. Pascual-Fernández, J. J., Cano-Orón, L., & Buitrago-Vera, J. (2020). Use of social media by farmers in sustainable agriculture: A systematic literature review. *Sustainability*, 12(5), 1793.
 29. Da Silva, E. B., & Barreiro-Gen, M. (2020). Creative agriculture: A review of the European context. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119308.
 30. Cramb, R. A. (2021). Creative agriculture in Southeast Asia: A review of recent research. *Agriculture and Human Values*, 38(2), 511-525.
 31. Uphoff, N., Randriamiharisoa, R., and Rabenandrasana, J. (1990). Experimenting with farmer.
 32. Bellon, M.R., Adato, M., Becerril, J., Mindek, D., and Perez, R. (2004). Impact of improved maize germplasm on poverty alleviation: The case of Mexico. Research report 135. International Food Policy Research Institute.
 33. Brush, S.B., Taylor, J.E., and Bellon, M.R. (2001). Biological diversity and knowledge: Intellectual property policies and practices in the Andean region. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas.
 34. McGonigle, D. F., Rota Nodari, G., Phillips, R. L., Aynekulu, E., Estrada-Carmona, N., Jones, S. K., ... & Zhang, W. (2020). A knowledge brokering framework for integrated landscape management. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 13.
 35. National 4-H Council. (2023). 4-H History. Retrieved from <https://4-h.org/about/4-h-history/>
 - Nambiar, S., & Singh, A. (2019). Traditional knowledge in sustainable agriculture: A review. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(6), 35-42.
 36. Pandey, P., Bhardwaj, R. K., Kumar, D., & Rathore, H. S. (2020). Intellectual property rights in agriculture: issues and challenges. In *Intellectual Property Rights in Agriculture* (pp. 1-17).

Springer, Singapore.

37. Jaffe, A. B., & Palmer, K. L. (1997). Environmental regulation and innovation: A panel data study. *The Review of Economics and Statistics*, 79(4), 610-619.
38. European Patent Office. (2019). *Patents and the fourth industrial revolution: Agriculture*. Munich: European Patent Office.
39. Notten, A., Hekkert, M. P., & Elzen, B. (2019). The role of intellectual property in sustainable agriculture. *Sustainability*, 11(22), 6317.
40. Auci, S., Barbieri, N., Coromaldi, M., & Vignani, D. (2018). *Agricultural Patents as Strategy for Climate Adaptation: A European Analysis of Farmer's Efficiency*. https://siecon3-607788.cdn77.org/sites/siecon.org/files/media_wysiwyg/auci-barbieri-coromaldi-vignani-97.pdf
41. European Commission. (2020). *Farm to fork strategy*. https://ec.europa.eu/food/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf
42. European Commission. (2021). *European Innovation Council*. Retrieved from https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/eic_en
43. European Parliament. (2018). *The impact of deep tech on industry: The role of start-ups*. Retrieved from [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=EPRS_ATA\(2018\)625154](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=EPRS_ATA(2018)625154)
44. Deloitte. (2020). *The impact of EIC funding: A report on the economic impact of the European Innovation Council's pilot funding programme*. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/innovation/deloitte-nl-innovation-impact-of-eic-funding.pdf>
45. European Parliament. (2021). *Agriculture and rural development in the Horizon Europe framework programme*. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690465/IPOL_STU\(2021\)690465_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690465/IPOL_STU(2021)690465_EN.pdf)
46. European Patent Office and European Union Intellectual Property Office. (2019). *IPR-intensive industries and economic performance in the European Union. Industry-level analysis report*. https://euipo.europa.eu/tunnel-web/secure/webdav/guest/document_library/observatory/documents/reports/IPR-intensive_industries_and_economic_in_EU_2022/2022_IPR_Intensive_Industries_FullR_en.pdf

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Polymorphic regenerated silk with wood polyphenolic extracts for fully bio-based water resistant adhesives

Emanuele Cesprini^{1*}, Marco Paolantoni², Luca Valentini³, Gianluca Tondi¹

¹ Land Environment Agriculture & Forestry Department, University of Padua, Viale dell'Università 16, 35020 Legnaro, Italy

² Department of Chemistry, Biology and Biotechnology, University of Perugia, Italy

³ Civil and Environmental Engineering Department, University of Perugia, Strada di Pentima 4, Terni, 05100, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: emanuele.cesprini@phd.unipd.it

Abstract: Silk, produced by silkworms, has attracted the interest of materials scientists because of its outstanding mechanical properties and applications in environmental engineering. Silkworms construct cocoons by directly spinning silk protein through an anisotropic (liquid crystal)-based dry-spinning process. The main drawback of this process is the intrinsic rigidity that still reduce their technological application. In this study, we report a method that dissolve the individual natural fibers (e. g. regenerated silk (RS)) allowing the bonding with wood polyphenolic extracts named tannins for the production of a bioplastic. We illustrate how it is possible to control the mechanical properties of RS and how the incorporation into a tannin-furanic matrix improves the toughness and thus the adhesive features. Chemical investigation through ATR-FTIR was used to assess the polymorphism of RS. These findings indicate that tannins interact with proteins, producing stable complexes; therefore, the presence of only random coils in the RS/tannin samples can be ascribed to the presence of polyphenols that affect the β -sheet and/or α -helices arrangement. Finally, as a proof of our concept, the mechanical properties of engineered wood products (e. g. a three-layer plywood) showed a significant improvement in dry and wet conditions when RS was added to the tannin-furanic matrix. The proposed strategy provides a new approach to developing formaldehyde-free bio-based wood adhesive with rapid preparation, excellent performance, and sustainability, and verifies the possibility of multifunctional application of agricultural, forestry residues and byproducts of insect farming.

Keywords: regenerated silk; tannins; furanic; engineered wood products; sustainable adhesives.

1. Introduction

The synthesis of biopolymers obtained from nature or waste byproducts with the goal of replacing synthetic plastics is becoming a worldwide urgent challenge to reduce between 241 and 316 MtCO₂ equivalents per year [1-3].

Tannins, which are produced by plants to protect the lignocellulosic body against biological and radiation attacks, have been used to produce biobased plastics [4-12]. The step beyond the state of the art is to promote a free-formaldehyde formulations for their cross-linking [13,14]. Furfuryl alcohol (FA), a derivative of the dehydration of agricultural waste [15], can be considered as the green crosslinker solution to produce fully renewable bioplastics [16-19]. However, the poor moisture resistance as well as the high rigidity [20,21] still limit their application.

Recently, proteins combined with tannins or furanic derivatives, represented a step forward in the wood adhesive sector [22, 23]. Silk fibroin (SF) is an inexhaustible biopolymer, which can be extracted from silkworms [24]. The primary structure of SF, which is composed of repetitive glycine-alanine-glycine-alanine-glycine-serine (GAGAGS) repeating sequences, can form crystalline domains with β -sheet conformation. As a result, the biopolymer is a water insoluble, thermally stable, and UV absorbing material since SF molecules contain numerous aromatic amino acids [24,25]. SF thus represents a new alternatives to the main vegetal proteins currently proposed [26,27].

In this work, a facile approach for FA-based wood adhesives, was proposed by mixing SF dissolved in formic acid and CaCl₂ with tannin/FA. An interaction mechanism for the tannin/FA/SF (TFS) wood adhesive was proposed. This research proposes a novel strategy for preparation of sustainable animal protein wood adhesives as valid alternative to traditional formaldehyde-based adhesives.

2. Materials and methods

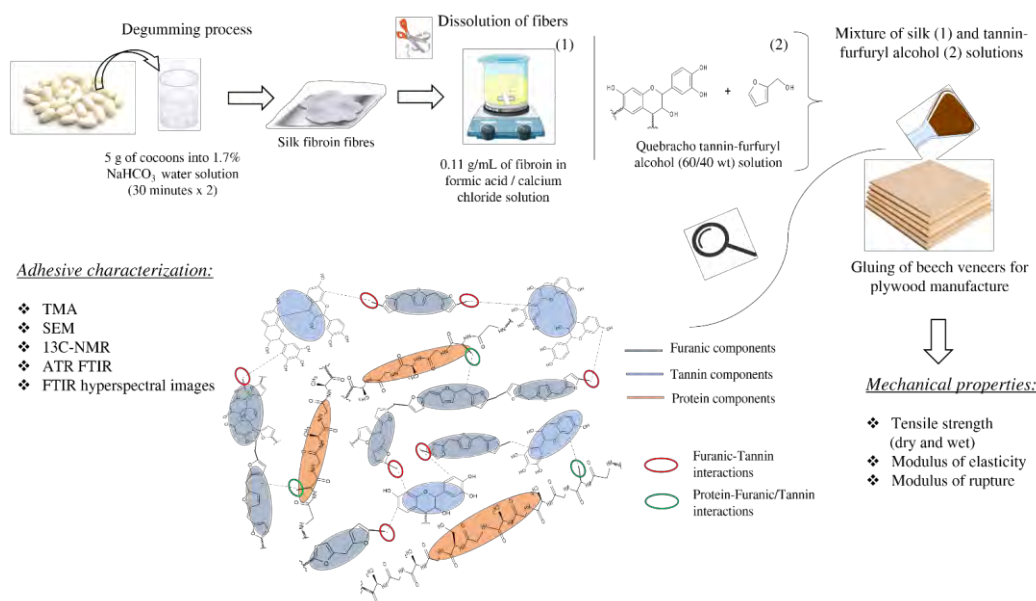
2.1 Materials

Quebracho (*Schinopsis balancae*) tannin extract (Fintan 737B) was kindly provided by the company Silvateam (S. Michele Mondovì, Cuneo, Italy) while furfuryl alcohol (99%) by International Furan Chemical IFC (Rotterdam, The Netherlands). Lowest grade Bombyx mori silk cocoons was provided by a local company (CREA-AA, Padova, Italy). Sodium hydrogen carbonate, calcium chloride, and formic acid were supplied by Alfa Aesar (Thermo Fisher, Waltham, MA, USA). Pre-conditioned (20°C, 65% relative air humidity) rotary cut defect-free beech (*Fagus sylvatica*) veneers, purchased from Europlac (Topolcany, Slovakia), with a nominal thickness of 2.2 mm, density of 0.72 g/cm³ and 12% m.c., were used to prepare the three-layers plywood.

2.2 Methods

The synthesis of different TSF adhesive formulations were obtained maintaining constant the weight ratio (e. g. 60/40) between tannin and FA and varying the SF content from 0wt% to 30wt% and applied for three-layer plywood manufacture according to scheme depicted in figure 1.

Figure 1. Sketch of the research method applied in the development of TFS-based adhesive resins for bonding plywood.

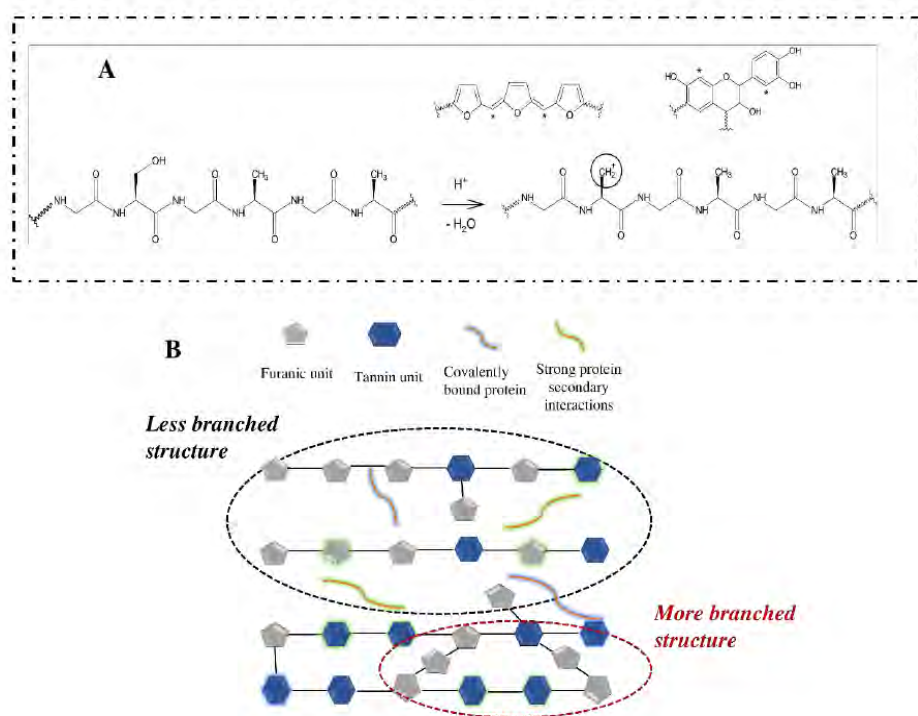


3. Results and discussion

In the production of multilayer panels, one of the key parameters refers to the glue line property, which shall guarantee sufficient adhesion for the final stability of the panel. The most significant physical indicator is the shear strength in both wet and dry conditions. After 24 h of water storage at room temperature, the addition of 20wt% of SF to tannin-furfuryl alcohol matrix reached its highest value (eg 2.8 MPa). These results are compliant for dry condition purposes according to the European standards that set the wet shear strength above 1 MPa [29]. The SF addition affects the mechanical properties (e. g. modulus of rupture (MOR)) registering an increase of the MOR from 128 MPa to 146 MPa when 30wt% of SF was added.

These results can be explained taking into account the acidity of the solution that may lead to the formation of carbocation $-CH^2+$ in the primary alcohol of SF (Scheme 1A). The silk carbocation may interact with nucleophilic centers as polyfurfuryl alcohol (PFA) crosslinked in formic acid linear conjugated system, leading to final three dimensional network represented in Scheme 1B. In support of the proposed mechanism, Chen et al. [22] have recently reported the formation of covalent bonds between PFA and reactive functional groups of gluten protein.

Scheme 1. A) Proposed carbocation formation in a primary alcohol of the silk protein structure and interaction with nucleophilic centers*. B) Representation of the interaction between a tannin-alcohol furfuryl co-polymer and SF.



4. Conclusion

In this study water proof TFS bio-based adhesives with enhanced mechanical properties were produced. This strategy provides a new approach to developing formaldehyde-free bio-based wood adhesive with rapid preparation, excellent performance, and sustainability. It was shown the synergistic effect between vegetal and animal bioresources for the production of wood adhesives. The interaction between silk, tannin and furanics paves the way for other applications in the field of material science with interesting perspectives in bio-plastic.

References

1. Söderholm, P. The Green Economy Transition: The Challenges of Technological Change for Sustainability. *Sustain. Earth* **2020**, 3 (1), 6. <https://doi.org/10.1186/s42055-020-00029-y>.
2. Spierling, S.; Knüpfner, E.; Behnsen, H.; Mudersbach, M.; Krieg, H.; Springer, S.; Albrecht, S.; Herrmann, C.; Endres, H. J. Bio-Based Plastics - A Review of Environmental, Social and Economic Impact Assessments. *J. Clean. Prod.* **2018**, 185, 476–491. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.014>.
3. Rosenboom, J. G.; Langer, R.; Traverso, G. The Hidden Costs of a Plastic Planet. *Nat. Rev. Mater.* **2022**, 7 (2), 117–137. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>.
4. Cesprini, E.; De Iseppi, A.; Giovando, S.; Tarabra, E.; Zanetti, M.; Šket, P.; Marangon, M.; Tondi, G. Chemical Characterization of Cherry (*Prunus Avium*) Extract in Comparison with Commercial

- Mimosa and Chestnut Tannins. *Wood Sci. Technol.* **2022**, *56*, 1455–1473. <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01401-1>.
5. Shirmohammadli, Y.; Efhamisisi, D.; Pizzi, A. Tannins as a Sustainable Raw Material for Green Chemistry: A Review. *Ind. Crops Prod.* **2018**, *126*, 316–332. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.034>.
 6. Eckardt, J.; Neubauer, J.; Sepperer, T.; Donato, S.; Zanetti, M.; Cefarin, N.; Vaccari, L.; Lippert, M.; Wind, M.; Schnabel, T.; Petutschnigg, A.; Tondi, G. Synthesis and Characterization of High-Performing Sulfur-Free Tannin Foams. *Polymers (Basel)*. **2020**, *12* (3), 564. <https://doi.org/10.3390/polym12030564>.
 7. Tondi, G.; Pizzi, A. Tannin-Based Rigid Foams: Characterization and Modification. *Ind. Crops Prod.* **2009**, *29* (2–3), 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.07.003>.
 8. Arbenz, A.; Avérous, L. Chemical Modification of Tannins to Elaborate Aromatic Biobased Macromolecular Architectures. *Green Chem.* **2015**, *17* (5), 2626–2646. <https://doi.org/10.1039/c5gc00282f>.
 9. Sommerauer, L.; Thevenon, M. F.; Petutschnigg, A.; Tondi, G. Effect of Hardening Parameters of Wood Preservatives Based on Tannin Copolymers. *Holzforschung* **2019**, *73* (5), 457–467. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0130>.
 10. Cesprini, E.; Baccini, R.; Urso, T.; Zanetti, M.; Tondi, G. Quebracho-Based Wood Preservatives: Effect of Concentration and Hardener on Timber Properties. *coatings* **2022**, *12*, 568. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/coatings12050568>.
 11. Pizzi, A. Recent Developments in Eco-Efficient Bio-Based Adhesives for Wood Bonding: Opportunities and Issues. *J. Adhes. Sci. Technol.* **2012**, 37–41.
 12. Hemmilä, V.; Adamopoulos, S.; Karlsson, O.; Kumar, A. Development of Sustainable Bio-Adhesives for Engineered Wood Panels-A Review. *RSC Adv.* **2017**, *7* (61), 38604–38630. <https://doi.org/10.1039/c7ra06598a>.
 13. Pizzi, A. Tannins: Prospectives and Actual Industrial Applications. *Biomolecules* **2019**, *9* (8), 344. <https://doi.org/10.3390/biom9080344>.
 14. Tondi, G. Tannin-Based Copolymer Resins: Synthesis and Characterization by Solid State ¹³C NMR and FT-IR Spectroscopy. *Polymers (Basel)*. **2017**, *9* (6), 223. <https://doi.org/10.3390/polym9060223>.
 15. Gandini, A. Polymers from Renewable Resources: A Challenge for the Future of Macromolecular Materials. *Macromolecules* **2008**, *41* (24), 9491–9504. <https://doi.org/10.1021/ma801735u>.
 16. Yao, M.; Yang, Y.; Song, J.; Yu, Y.; Jin, Y. Lignin-Based Catalysts for Chinese Fir Furfurylation to Improve Dimensional Stability and Mechanical Properties. *Ind. Crops Prod.* **2017**, *107*, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.038>.
 17. Falco, G.; Guigo, N.; Vincent, L.; Sbirrazzuoli, N. Opening Furan for Tailoring Properties of Bio-Based Poly(Furfuryl Alcohol) Thermoset. *ChemSusChem* **2018**, *11* (11), 1805–1812. <https://doi.org/10.1002/cssc.201800620>.
 18. Luckeneder, P.; Gavino, J.; Kuchernig, R.; Petutschnigg, A.; Tondi, G. Sustainable Phenolic Fractions as Basis for Furfuryl Alcohol-Based Co-Polymers and Their Use as Wood Adhesives.

- Polymers (Basel)*. **2016**, *8* (11). <https://doi.org/10.3390/polym8110396>.
19. Szczurek, A.; Fierro, V.; Thébault, M.; Pizzi, A.; Celzard, A. Structure and Properties of Poly(Furfuryl Alcohol)-Tannin PolyHIPEs. *Eur. Polym. J.* **2016**, *78*, 195–212. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.03.037>.
 20. Cesprini, E.; Causin, V.; Iseppi, A. De; Zanetti, M.; Marangon, M.; Barbu, M. C.; Tondi, G. Renewable Tannin-Based Adhesive from Quebracho Extract and Furfural for Particleboards. **2022**, 3–5.
 21. Jorda, J.; Cesprini, E.; Barbu, M.-C.; Tondi, G.; Zanetti, M.; Král, P. Quebracho Tannin Bio-Based Adhesives for Plywood. *Polymers (Basel)*. **2022**, *14* (11), 2257. <https://doi.org/10.3390/polym14112257>.
 22. Chen, X.; Yang, Z.; Yang, F.; Pizzi, A.; Essawy, H.; Du, G.; Zhou, X. Development of Easy-Handling, Formaldehyde-Free, High-Bonding Performance Bio-Sourced Wood Adhesives by Co-Reaction of Furfuryl Alcohol and Wheat Gluten Protein. *Chem. Eng. J.* **2022**, *462*, 142161. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4281052>.
 23. Zhao, X.; Liu, T.; Ou, R.; Hao, X.; Fan, Q.; Guo, C.; Sun, L.; Liu, Z.; Wang, Q. Fully Biobased Soy Protein Adhesives with Integrated High-Strength, Waterproof, Mildew-Resistant, and Flame-Retardant Properties. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2022**, *10* (20), 6675–6686.
 24. Cao, Z.; Chen, X.; Yao, J.; Huang, L.; Shao, Z. The Preparation of Regenerated Silk Fibroin Microspheres. *Soft Matter* **2007**, *3* (7), 910–915. <https://doi.org/10.1039/b703139d>.
 25. Ceccarini, M. R.; Palazzi, V.; Salvati, R.; Chiesa, I.; Maria, C. De; Bonafoni, S.; Mezzanotte, P.; Codini, M.; Pacini, L.; Errante, F.; Rovero, P.; Morabito, A.; Beccari, T.; Roselli, L.; Valentini, L. Biomaterial Inks from Peptide-Functionalized Silk Fibers for 3D Printing of Futuristic Wound-Healing and Sensing Materials. *2023*, *24*(2), 947; <https://doi.org/10.3390/ijms24020947>.
 26. Santoni, I.; Pizzo, B. Evaluation of Alternative Vegetable Proteins as Wood Adhesives. *Ind. Crops Prod.* **2013**, *45*, 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.12.016>.
 27. Raydan, N. D. V.; Leroyer, L.; Charrier, B.; Robles, E. Recent Advances on the Development of Protein-Based Adhesives for Wood Composite Materials—a Review. *Molecules* **2021**, *26* (24). <https://doi.org/10.3390/molecules26247617>.
 29. British Standards, E. B. Plywood — Bonding Quality — EN 314-1:2004. **2004**, 3.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Studio preliminare sull'impiego di estratti polifenolici da sottoprodotti dell'industria elaiotecnica applicati alle carni di cinghiale

Caterina Altissimi ^{1,*}, Peter Paulsen ², Rossana Roila ¹, Raffaella Branciarì ¹, David Ranucci ¹

¹ Dipartimento di Medicina Veterinaria, Università degli Studi di Perugia, Via San Costanzo 4, Perugia, 06121, Italia

² Unit of Food Hygiene and Technology, Institute of Food Safety, Food Technology and Veterinary Public Health, University of Veterinary Medicine Vienna, Veterinärplatz 1, 1210 Vienna, Austria

* E-Mail: caterina.altissimi@studenti.unipg.it

Abstract: Diversi fattori di natura biotica e abiotica incidono sull'ambiente. Nel presente lavoro si è voluto valutare la possibilità di ridurre gli impatti ambientali attraverso la gestione di una popolazione animale problematica quale il cinghiale e l'impiego di sottoprodotti derivanti dall'industria alimentare. In particolare, si è voluto investigare l'applicazione di sottoprodotti derivanti dall'industria olearia su carni di cinghiale ottenute dall'attività venatoria con un approccio di economia circolare basato sull'ottimizzazione delle risorse e sulla valorizzazione di prodotti di scarto tramite il reimpiego in altre filiere. La scelta di riutilizzare estratti ottenuti dalle acque di vegetazione derivanti dall'industria olearia è basata sull'ingente quantità generata durante la produzione e l'importante impatto ambientale. Quest'ultimi, tuttavia, sono caratterizzate da composti bioattivi potenzialmente utili in altri settori produttivi per le loro attività antiossidante, antimicrobica e antinfiammatoria. Nel presente studio 36 campioni di carne di cinghiale sono stati divisi in 3 gruppi: due trattati con estratti polifenolici (liquido e micronizzato) e uno di controllo. I risultati hanno evidenziato effetti positivi dei trattamenti sul livello igienico delle carni, con una minore crescita nel tempo dei parametri microbici considerati, quali conta della carica microbica mesofila totale, conta delle *Enterobacteriaceae*, e di *Pseudomonas* spp. Meno evidenti sono stati gli effetti del metodo di applicazione dei trattamenti impiegati (immersione o dipping). Ulteriori studi sono comunque necessari per confermare l'efficacia di queste sostanze nel miglioramento delle caratteristiche igieniche e qualitative delle carni di selvaggina.

Keywords: selvaggina, acque di vegetazione, igiene delle carni, sostenibilità.

1. Introduzione

La filiera produttiva dell'industria elaiotecnica è storicamente radicata nei Paesi che si affacciano sul bacino del Mediterraneo, poiché caratterizzato da condizioni pedo-climatiche ideali per la coltivazione dell'olivo. La produzione di olio d'oliva in questi Paesi risulta essere di fondamentale importanza per il settore primario delle loro economie. Negli ultimi sessanta anni la produzione di olio d'oliva è aumentata in maniera significativa fino a raggiungere circa 3 milioni di tonnellate annue [1]. Il processo produttivo dell'olio d'oliva comporta che vengano generati sottoprodotti in grandi quantità, come ad esempio le acque di vegetazione. Tali sottoprodotti, per le loro caratteristiche chimico-fisiche e in quanto ricchi in composti bioattivi a lenta o difficile degradabilità, come i polifenoli, richiedono il corretto smaltimento [2]. È stata considerata la possibilità di estrarre i polifenoli dalle acque di vegetazione [3,4] da utilizzare come antiossidanti, antibatterici, antivirali e antinfiammatori [5] in diversi settori tra cui anche quello agroalimentare. A tal proposito vari autori ne hanno valutato gli effetti somministrandoli all'interno della dieta degli animali [6–9], o applicandoli direttamente nei prodotti alimentari [10–13]. L'utilizzo di sottoprodotti in altre filiere produttive si inserisce nell'ottica dell'economia circolare e permette di ridurre sia gli impatti ambientali sia i costi di smaltimento.

Negli ultimi anni un'altra criticità riscontrata a livello ambientale riguarda il significativo aumento della fauna selvatica, in particolare la popolazione del cinghiale. Tale incremento è riconducibile allo spopolamento delle aree rurali da parte dell'uomo, ai cambiamenti climatici, all'introduzione di capi a scopo venatorio, alla diminuzione della pressione venatoria in alcuni Paesi e alle caratteristiche intrinseche di questo animale quali l'elevata capacità riproduttiva, l'alta prolificità, e la grande capacità di adattamento a diverse condizioni ambientali [14–17]. L'aumento incontrollato di questa specie sta impattando sempre più a livello ambientale, socio-economico e sanitario. Infatti, l'espansione del cinghiale è causa di ingenti danni in agricoltura e per interi ecosistemi, dell'aumento di incidenti stradali e della possibile diffusione di zoonosi e di patologie per animali da reddito e da compagnia [18–22]. È quindi necessario una corretta gestione e contenimento delle popolazioni di cinghiale che comporterà il conseguente aumento della disponibilità delle sue carni nel mercato; un prodotto di per se a basso impatto ambientale che potrebbe essere ulteriormente valorizzato attraverso l'uso di composti bioattivi derivanti da sottoprodotti dell'industria alimentare.

Questo studio, in linea con i principi dell'economia circolare, ha l'obiettivo di utilizzare estratti polifenolici ottenuti dalle acque di vegetazione derivanti dalla produzione di olio d'oliva su carne di cinghiale in modo da migliorarne le caratteristiche igieniche.

2. Materiali e metodi

2.1 Estratti polifenolici delle acque di vegetazione derivanti dalla produzione dell'olio d'oliva

Sono stati utilizzati due tipologie di estratti polifenolici presenti in commercio derivanti da acque di vegetazione: uno in forma liquida (StymonAgri-Phen) e uno micronizzato in polvere (StymonPhen-50W). Il contenuto in polifenoli dichiarato nelle etichette di entrambi gli estratti è pari a 50000 mg/Kg \pm 10%.

2.2 1 Disegno sperimentale

Dopo un'iniziale valutazione del livello igienico dei campioni di muscolo di cinghiale prelevati in modo sterile a livello della spalla (T0), sono stati aliquotati trentasei campioni di polpa di spalla di cinghiale e suddivisi in tre gruppi sperimentali: un gruppo trattato con estratto liquido alla concentrazione del 25% (L), un gruppo trattato con estratto micronizzato alla concentrazione del 25% (M) e un gruppo di controllo trattato con acqua microfiltrata sterile (C). La scelta della concentrazione impiegata è legata a precedenti studi in vitro sull'efficacia antimicrobica dei singoli estratti su un panel microbico. Per ogni gruppo le soluzioni sperimentali sono state applicate attraverso due metodologie: l'immersione del campione nelle rispettive soluzioni per 1 minuto (Immersione = I) e l'immersione per 10 secondi (Dipping = D).

Dopo il trattamento i campioni sono stati lasciati asciugare per 5 minuti, confezionati sottovuoto, e conservati a temperatura di refrigerazione (4°C) per 7 (T1) e 14 (T2) giorni.

2.3 Analisi microbiologiche

A T0, T1 e T2 sono stati prelevati in modo sterile 25 g di campione e inseriti in busta stomacher con 225 ml di acqua peptonata tamponata (Oxoid Ltd., Basingstoke, UK). In seguito ad omogeneizzazione (Stomacher 400 circulator, Seward Ltd., Norfolk, UK) sono state effettuate le diluizioni decimali per le successive determinazioni microbiologiche. La Carica Microbica Mesofila Totale (CMMT) è stata valutata mediante semina su Plate Count Agar (PCA, Merck, Darmstadt, Germany), e incubazione per 72 ore a 30°C in accordo alla metodica ISO 4833-1 [23]. La conta delle *Enterobacteriaceae* (EB) è stata determinata secondo ISO 21528-2 [24] tramite semina su Violet Red Bile Glucose agar (VRBG, Merck, Darmstadt, Germany) e dopo 24 ore di incubazione a 37°C. La numerazione dei batteri lattici (LAB) è stata effettuata su de Man, Rogosa e Sharp agar (MRS, Oxoid Ltd.) incubato a 30°C per 72 ore, mentre la conta di *Pseudomonas* spp. è stata eseguita su Glutamate Starch Phenol Red Agar (GSP, Merck, Darmstadt, Germany) dopo incubazione di 48 ore a 25°C. Per la conta delle popolazioni microbiche sono state considerate le piastre che contenevano da 30 a 300 Unità Formanti Colonie (UFC). I valori registrati sono stati quindi riferiti a grammo di campione e trasformati in valore logaritmico (Log UFC/g).

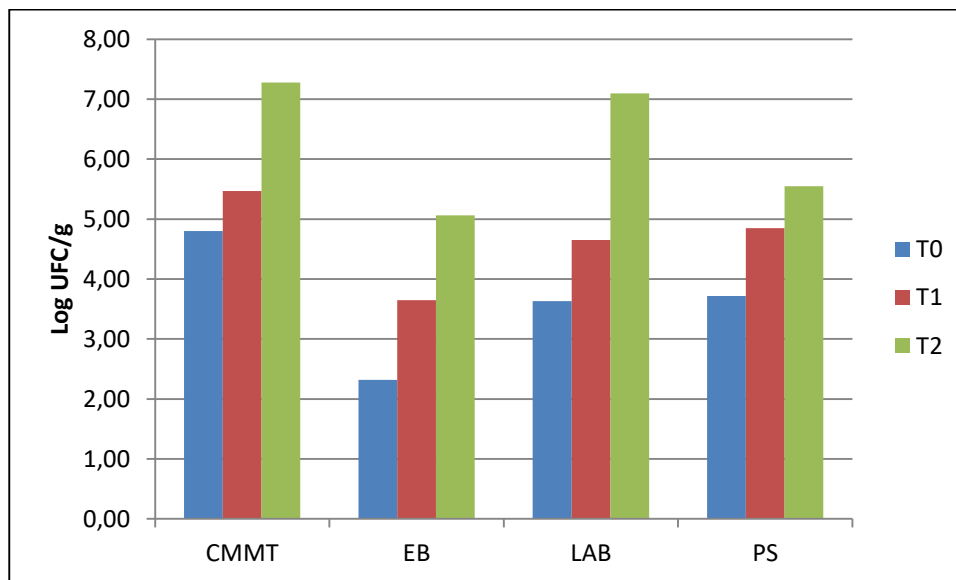
2.4 Analisi Statistica

I dati sono stati analizzati mediante software SAS (procedura GLM). In particolare è stato utilizzato un modello ANOVA con fattori fissi rappresentati dal tipo di estratto (C, L, M), dal trattamento impiegato (I e D) e dal tempo di stoccaggio (T1 e T2). Le differenze riscontrate nei valori medi dei parametri considerati sono stati successivamente analizzate con il test di Tukey e considerate significative con $P < 0.05$.

3. Risultati e discussioni

I risultati ottenuti hanno evidenziato nel tempo un aumento medio di tutte le cariche microbiche considerate (Figura 1).

Figura 1. Sviluppo delle popolazioni microbiche nel tempo



Tale incremento è risultato sia nei campioni trattati sia in quelli controllo.

Come descritto in tabella 1, i campioni trattati rispetto a quelli di controllo hanno mostrato una minore crescita ($P < 0,05$) della CMMT, di *Pseudomonas* spp. e delle *Enterobacteriaceae*. Per quanto concerne la conta dei batteri lattici, invece, non sono state riscontrate differenze significative tra il gruppo controllo e quello trattato con estratto liquido, mentre è risultata significativamente inferiore ($P < 0,05$) in quello trattato con estratto micronizzato.

In merito alle due tipologie di estratti, quello liquido è risultato maggiormente efficace nella riduzione delle conta delle *Enterobacteriaceae*, mentre quello micronizzato per la carica microbica mesofila totale e la conta dei batteri lattici. Non sono state riscontrate, invece, differenze significative tra i due estratti nella conta di *Pseudomonas* spp.

Le diverse metodiche di applicazione degli estratti non sono risultate significativamente differenti ($P > 0,05$), fatta eccezione per la conta delle *Enterobacteriaceae* ($P < 0,05$), dove l'immersione dei campioni per 1 minuto ha determinato una carica inferiore rispetto a quella dei campioni trattati mediante dipping per 10 secondi (tabella 2).

Tabella 1. Effetto del tipo di estratto sul livello dei parametri microbiologici individuati (valori in Log UFC/g)

Parametro microbiologico	Estratto			SEM	Valore di P
	Controllo	Liquido	Micronizzato		
Carica Microbica Mesofila Totale	6,37c	5,97b	5,51a	0,105	<0,001
Conta delle <i>Enterobacteriaceae</i>	4,35c	2,59a	2,74b	0,149	<0,001
Conta dei Batteri Lattici	5,87b	5,79b	5,31a	0,131	0,012
Conta di <i>Pseudomonas</i> spp.	5,19b	3,94a	3,69a	0,150	<0,001

Lettere differenti nella stessa riga corrispondono a valori medi statisticamente differenti ($P < 0,05$)

Tabella 2. Effetto del tipo di trattamento sul livello dei parametri microbiologici individuati (valori in Log UFC/g)

Parametro microbiologico	Trattamento		SEM	Valore di P
	Dipping	Immersione		
Carica Microbica Mesofila Totale	6,05	5,85	0,085	0,106
Conta delle <i>Enterobacteriaceae</i>	3,44b	3,02a	0,122	0,021
Conta dei Batteri Lattici	5,81	5,52	0,107	0,068
Conta di <i>Pseudomonas</i> spp.	4,15	4,39	0,162	0,173

Lettere differenti nella stessa riga corrispondono a valori medi statisticamente differenti ($P < 0,05$)

Considerando le interazioni tra l'effetto estratto e l'effetto tempo si è notata una differenza significativa tra campioni controllo e quelli trattati con gli estratti sia a T1 sia a T2, con minor crescita ai rispettivi tempi di osservazione per i campioni L e M rispetto a C, fatta eccezione per CMMT che è risultata significativa solo a T1.

Ad oggi non sono presenti in letteratura studi riguardanti l'applicazione di estratti polifenolici sulla carne di selvaggina e in particolare quella del cinghiale. Risultati simili sono stati ottenuti da Roila et al. [13] nella carne bovina macinata, i quali utilizzando un estratto polifenolico derivante da acque di vegetazione in quantità di 700 mg/Kg hanno ottenuto un riduzione significativa per CMMT, EB, e PS, mentre, non si sono riscontrate differenze significative per i LAB, come nel presente lavoro. Il rallentamento della crescita delle *Enterobacteriaceae* e di *Pseudomonas* spp. è stato osservato anche da Fasolato et al. [25] su petti di pollo trattati con un analogo estratto polifenolico applicato tramite immersione del campione per 1 minuto e successivamente confezionato sottovuoto. A causa della differenza tra matrici, estratti, concentrazioni e metodi di applicazioni differenti risulta comunque difficile la comparazione con i risultati ottenuti da questi e altri lavori [26–29].

4. Conclusioni

Tale studio preliminare ha evidenziato la potenziale efficacia dell'impiego dei sottoprodotti dell'industria olearia per migliorare le caratteristiche igieniche delle carni di selvaggina. In particolare, estratti polifenolici ricavati dalle acque di vegetazione derivanti dall'estrazione dell'olio d'oliva potrebbero trovare applicazione sulla carne di cinghiale soprattutto per la loro attività batteriostatica, permettendo quindi un aumento della vita commerciale del prodotto e un miglioramento delle caratteristiche igieniche e qualitative. Il prolungamento della shelf-life e il contenimento dello sviluppo di alcune popolazioni microbiche risulta di fondamentale importanza soprattutto in carni come quella del cinghiale, poiché le sue caratteristiche igienico-sanitarie sono influenzate da molteplici fattori come le modalità di ottenimento e i successivi processi di lavorazione. Inoltre, il reimpiego di un sottoprodotto di una filiera in un'altra si inserisce perfettamente nell'ottica dell'economia circolare, approccio economico verso il quale il consumatore moderno pone sempre più attenzione. I risultati di questo studio evidenziano la necessità di ulteriori approfondimenti in questo settore, anche mediante l'applicazione di estratti, concentrazioni e metodologie differenti.

Ringraziamenti

Si ringraziano il dott. Domenico Pettas e Stymon Natural Products IKE (Grecia) per il supporto tecnico, la produzione e la fornitura degli estratti polifenolici da acque di vegetazione derivanti dall'estrazione di olio d'oliva.

Il presente lavoro rientra nel progetto del Ministero dell'Università e della Ricerca - P.O.N. Ricerca e Innovazione 2014-2020 (CCI 2014IT16M2OP005), Azione IV.5. Titolo progetto: Green safety delle carni di selvaggina cacciata.

Bibliografia

1. FAOSTAT Available online: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize> (accessed on 2 April 2023).
2. Salomone, R.; Ioppolo G. Environmental Impacts of Olive Oil Production: A Life Cycle Assessment Case Study in the Province of Messina (Sicily). *Journal of Cleaner Production* **2012**, *28*, 88-100, doi:10.1016/j.jclepro.2011.10.004.
3. De Toffoli, A.; Monteleone, E.; Bucalossi, G.; Veneziani, G.; Fia, G.; Servili, M.; Zanoni, B.; Pagliarini, E.; Gallina Toschi, T.; Dinnella, C. Sensory and chemical profile of a phenolic extract from olive mill waste waters in plant-based food with varied macro-composition. *Food Research International* **2019**, *119*, 236-243, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.02.005>.
4. Tapia-Quirós, P.; Montenegro-Landívar, M.F.; Reig, M.; Vecino, X.; Cortina, J.L.; Saurina, J.; Granados, M. Recovery of Polyphenols from Agri-Food By-Products: The Olive Oil and Winery Industries Cases. *Foods* **2022**, *11*, 362, doi:10.3390/foods11030362.
5. Gorzynik-Debicka, M.; Przychodzen, P.; Cappello, F.; Kuban-Jankowska, A.; Marino Gammazza, A.; Knap, N.; Wozniak, M.; Gorska-Ponikowska, M. Potential Health Benefits of Olive Oil and Plant

- Polyphenols. *International Journal of Molecular Sciences* **2018**, *19*, 686, doi:10.3390/ijms19030686.
6. Gravador, R.S.; Serra, A.; Luciano, G.; Pennisi, P.; Vasta, V.; Mele, M.; Pauselli, M.; Priolo, A. Volatiles in Raw and Cooked Meat from Lambs Fed Olive Cake and Linseed. *Animal* **2015**, *9*, 715–722, doi:10.1017/S1751731114002730.
 7. Branciarri, R.; Galarini, R.; Giusepponi, D.; Trabalza-Marinucci, M.; Forte, C.; Roila, R.; Miraglia, D.; Servili, M.; Acuti, G.; Valiani, A. Oxidative Status and Presence of Bioactive Compounds in Meat from Chickens Fed Polyphenols Extracted from Olive Oil Industry Waste. *Sustainability* **2017**, *9*, 1566, doi:10.3390/su9091566.
 8. Chiofalo, B.; Di Rosa, A.R.; Lo Presti, V.; Chiofalo, V.; Liotta, L. Effect of Supplementation of Herd Diet with Olive Cake on the Composition Profile of Milk and on the Composition, Quality and Sensory Profile of Cheeses Made Therefrom. *Animals* **2020**, *10*, 977, doi:10.3390/ani10060977.
 9. Branciarri, R.; Galarini, R.; Trabalza-Marinucci, M.; Miraglia, D.; Roila, R.; Acuti, G.; Giusepponi, D.; Dal Bosco, A.; Ranucci, D. Effects of Olive Mill Vegetation Water Phenol Metabolites Transferred to Muscle through Animal Diet on Rabbit Meat Microbial Quality. *Sustainability* **2021**, *13*, 4522, doi:10.3390/su13084522.
 10. Miraglia, D.; Esposto, S.; Branciarri, R.; Urbani, S.; Servili, M.; Perucci, S.; Ranucci, D. Effect of a Phenolic Extract from Olive Vegetation Water on Fresh Salmon Steak Quality during Storage. *Italian Journal of Food Safety* **2016**, *5*, 6167, doi:10.4081/ijfs.2016.6167.
 11. Muíño, I.; Díaz, M.T.; Apeleo, E.; Pérez-Santaescolástica, C.; Rivas-Cañedo, A.; Pérez, C.; Cañeque, V.; Lauzurica, S.; Fuente, J. de la Valorisation of an Extract from Olive Oil Waste as a Natural Antioxidant for Reducing Meat Waste Resulting from Oxidative Processes. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *140*, 924–932, doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.175.
 12. Barbieri, S.; Mercatante, D.; Balzan, S.; Esposto, S.; Cardenia, V.; Servili, M.; Novelli, E.; Taticchi, A.; Rodriguez-Estrada, M.T. Improved Oxidative Stability and Sensory Quality of Beef Hamburgers Enriched with a Phenolic Extract from Olive Vegetation Water. *Antioxidants* **2021**, *10*, 1969, doi:10.3390/antiox10121969.
 13. Roila, R.; Sordini, B.; Esposto, S.; Ranucci, D.; Primavilla, S.; Valiani, A.; Taticchi, A.; Branciarri, R.; Servili, M. Effect of the Application of a Green Preservative Strategy on Minced Meat Products: Antimicrobial Efficacy of Olive Mill Wastewater Polyphenolic Extract in Improving Beef Burger Shelf-Life. *Foods* **2022**, *11*, 2447, doi:10.3390/foods11162447.
 14. Bieber, C.; Ruf, T. Population Dynamics in Wild Boar *Sus Scrofa*: Ecology, Elasticity of Growth Rate and Implications for the Management of Pulsed Resource Consumers. *Journal of Applied Ecology* **2005**, *42*, 1203–1213, doi:10.1111/j.1365-2664.2005.01094.x.
 15. Massei, G.; Kindberg, J.; Licoppe, A.; Gačić, D.; Šprem, N.; Kamler, J.; Baubet, E.; Hohmann, U.; Monaco, A.; Ozoliņš, J.; Cellina, S.; Podgórski, T.; Fonseca, C.; Markov, N.; Pokorný, B.; Rosell, C.; Náhlik, A. Wild Boar Populations up, Numbers of Hunters down? A Review of Trends and Implications for Europe: Wild Boar and Hunter Trends in Europe. *Pest Management Science* **2015**, *71*, 492–500, doi:10.1002/ps.3965.

16. Vetter, S.G.; Ruf, T.; Bieber, C.; Arnold, W. What Is a Mild Winter? Regional Differences in Within-Species Responses to Climate Change. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0132178, doi:10.1371/journal.pone.0132178.
17. Johann, F.; Handschuh, M.; Linderoth, P.; Dormann, C.F.; Arnold, J. Adaptation of Wild Boar (*Sus Scrofa*) Activity in a Human-Dominated Landscape. *BMC Ecology* **2020**, *20*, 4, doi:10.1186/s12898-019-0271-7.
18. Ballari, S.A.; Barrios-García, M.N. A Review of Wild Boar *Sus Scrofa* Diet and Factors Affecting Food Selection in Native and Introduced Ranges. *Mammal Review* **2014**, *44*, 124–134, doi:10.1111/mam.12015.
19. Sáenz-de-Santa-María, A.; Tellería, J.L. Wildlife-Vehicle Collisions in Spain. *European Journal of Wildlife Research* **2015**, *61*, 399–406, doi:10.1007/s10344-015-0907-7.
20. Fredriksson-Ahomaa, M. Wild Boar: A Reservoir of Foodborne Zoonoses. *Foodborne Pathogens and Disease* **2019**, *16*, 153–165, doi:10.1089/fpd.2018.2512.
21. Fredriksson-Ahomaa, M.; London, L.; Skrzypczak, T.; Kantala, T.; Laamanen, I.; Biström, M.; Maunula, L.; Gadd, T. Foodborne Zoonoses Common in Hunted Wild Boars. *EcoHealth* **2020**, *17*, 512–522, doi:10.1007/s10393-020-01509-5.
22. Jori, F.; Massei, G.; Licoppe, A.; Ruiz-Fons, F.; Linden, A.; Václavík, P.; Chenais, E.; Rosell, C. 8. Management of Wild Boar Populations in the European Union before and during the ASF Crisis. In *Understanding and combatting African Swine Fever*; Iacolina, L., Penrith, M.-L., Bellini, S., Chenais, E., Jori, F., Montoya, M., Ståhl, K., Gaviera-Widén, D., Eds.; Wageningen Academic Publishers: The Netherlands, 2021; pp. 197–228 ISBN 978-90-8686-357-0.
23. ISO 4833-1:2013(En), Microbiology of the Food Chain — Horizontal Method for the Enumeration of Microorganisms — Part 1: Colony Count at 30 Degrees C by the Pour Plate Technique Available online: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:4833:-1:ed-1:v1:en> (accessed on 3 April 2023).
24. ISO 21528-2:2017(En), Microbiology of the Food Chain — Horizontal Method for the Detection and Enumeration of Enterobacteriaceae — Part 2: Colony-Count Technique Available online: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21528:-2:ed-2:v2:en> (accessed on 3 April 2023).
25. Fasolato, L.; Cardazzo, B.; Balzan, S.; Carraro, L.; Andreani, A.N.; Taticchi, A.; Novelli, E. Using a Concentrate of Phenols Obtained from Olive Vegetation Water to Preserve Chilled Food: Two Case Studies. *Italian Journal of Food Safety* **2016**, *5*, 5651, doi:10.4081/ijfs.2016.5651.
26. Fasolato, L.; Carraro, L.; Facco, P.; Cardazzo, B.; Balzan, S.; Taticchi, A.; Andreani, N.A.; Montemurro, F.; Martino, M.E.; Di Lecce, G.; et al. Agricultural By-Products with Bioactive Effects: A Multivariate Approach to Evaluate Microbial and Physicochemical Changes in a Fresh Pork Sausage Enriched with Phenolic Compounds from Olive Vegetation Water. *International Journal of Food Microbiology* **2016**, *228*, 34–43, doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2016.04.003.
27. Balzan, S.; Taticchi, A.; Cardazzo, B.; Urbani, S.; Servili, M.; Di Lecce, G.; Zabalza, I.B.; Rodríguez-Estrada, M.T.; Novelli, E.; Fasolato, L. Effect of Phenols Extracted from a By-Product of the Oil Mill on the Shelf-Life of Raw and Cooked Fresh Pork Sausages in the Absence of Chemical Additives. *LWT - Food Science and Technology* **2017**, *85*, 89–95, doi:10.1016/j.lwt.2017.07.001.

28. Veneziani, G.; Novelli, E.; Esposito, S.; Taticchi, A.; Servili, M. Chapter 11 - Applications of Recovered Bioactive Compounds in Food Products. In *Olive Mill Waste*; Galanakis, C.M., Ed.; Academic Press, 2017; pp. 231–253 ISBN 978-0-12-805314-0.
29. Galanakis, C.M. Phenols Recovered from Olive Mill Wastewater as Additives in Meat Products. *Trends in Food Science & Technology* **2018**, *79*, 98–105, doi:10.1016/j.tifs.2018.07.010.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Green energy potential strategies combining architectural and plant system regeneration

Carla Balocco ^{1,*}, Lorenzo Leoncini ²

¹ Department of Architecture, University of Florence, via della Mattonaia 8. 50121 Florence (IT)

² Freelance Engineers, Technical Office in Florence, via della Piazzola 31, 50133 Florence (IT)

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: carla.balocco@unifi.it

Abstract: The existing public-school building is one of the sectors that offers great opportunities for energy efficiency, green energy sustainable solutions, application of the existing advanced digital technologies aimed at energy consumption reduction, with consequent positive effects to the environment and CO2 emissions reduction. Our present research identified a method for the school buildings energy assessment, by means of simple input information connected to basic simulations. The main aim was to investigate the green energy potential of different regeneration proposals, combining architectural improvements with plant systems refurbishment and retrofitting. The building chosen as a case study which presents serial and widespread constructive and thermophysical features, allows to extend the validity of results obtained to similar cases and conditions. Results highlighted the importance of developing site-specific strategies and green energy solutions, to optimally adapt any intervention to the architectural, typological and plant characteristics of the school. All this have important social, cultural, economic consequences, as well as on children health and performance. The proposed systemic energy regeneration can be considered prototypal case, because if extended to a large number, it would entail an appreciable optimization of building and plant management and wider system control and organization for stockholders. The idea is that Municipalities and Public Administrations, of which most schools in Italy are holders, can use results as background knowledge for future project oriented to green energy transition, but also can use and apply results and information for specific tailored training.

Keywords: school buildings; energy transition; green sustainable design; energy saving; refurbishment; retrofitting

1. Introduction

The energy issue, the anthropogenic environmental impact and the Global Warming (GW), as well as the need to strongly reduce energy consumption, to push the entire buildings and plants design to comply with the Zero Energy Building requirements (ZEB) and orientate itself to the energy transition (towards all electricity), concerns buildings and especially public-school building sector.

Buildings contribute for 36% to greenhouse gas emissions in European cities. They could allow a regeneration of 15% of existing buildings in class G by 2030 and the possibility of a ban on fossil fuels by 2040. The greenhouse gas emission reduction by 80% for 2050 is the goals of the Paris Agreement. The legislative framework imposes the following issues: Energy performance of buildings (i.e. EPBD, Directive 2018/844 / EU; Directive 2010/31/UE) and Energy efficiency (i.e. Directive 2012/27/UE). In Italy the adaptation to European directives, requires the existing buildings renovation and refurbishment and retrofitting solutions for operation, control, management, inspection and maintenance of all the plant systems to improve their efficiency. The creation of databases on the national building stock is also promoted in order to better define the incentive tools for the energy regeneration. Finally, new obligations are introduced to increase the spread of charging infrastructures for electric vehicles.

In this scenario, there is also the necessity to equip existing schools with dynamic and multipurpose learning environments, connected to the local community and the territory, capable of supporting students' research activities, collaboration, and personalized learning, combining nZEB requirements, with well-being and GW impacts reduction [1-3].

The energy efficiency with a high level of indoor and outdoor comfort for school buildings, is a priority for the EU Government. In particular, the European “Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings” requires that “In each Country member, the public sector should lead the way in the field of the energy performance of buildings” and that “buildings frequently visited by the public should set an example”, among the most promising public building types to serve as exemplary projects are school buildings.

Several EU-funded research projects have focused on energy-saving goals in schools' renovation, often with Italian research projects participation: e.g. Teenergy School (2010-2012); “School of the Future” (2011-2016), VERYSchool (2012-2014), “ZEMedS” (2013-2016), “RENEW SCHOOL” (2014-2017) and “FEEDSCHOOLS project” (2017-2020).

The retrofit and refurbishment of school buildings and their plant systems, in Europe, is currently characterized by engineering technical operations based on a design for sustainability, adaptivity, quality and effectiveness of sustainable operations, and green energy and renewable energies integration [4-10].

In particular, inside the EU 7th Framework Program, the School of the Future project is an important Italian research [4,5]. The main objectives of this research are the following: energy renovation of school buildings, by means of extended and continuous monitoring campaigns, before and after different retrofit operations, aimed at energy sustainability, occupants' comfort and environmental impacts reduction [4,5].

Moreover, the existing, renovated/refurbished buildings and especially the historic ones, do not

always meet the standard requirements, often due to their use changed over time. The national school network has recognized the importance of organizing the physical space with outdoor classrooms and equipment for different activities. Nevertheless, the educational approach should be linked to the environmental awareness acquired through research works on strategies for improving outdoor thermal comfort and adaptation to climate change (the ongoing "Soloclim" EU H2020 research).

In these last years, also the school's physical environment (e.g. indoor space configuration and organization, natural and artificial lighting, air quality etc.), has received renewed attention at international and local policy level, in line with new pedagogical principles and the most updated environmental standards [11,12].

Recent literature on this matter, has highlighted that there is a significant energy-saving potential for the existing school building and connected heating, lighting, ventilation, and air-conditioning (HVAC) system, with consequent benefits for environmental protection, GW reduction, but also indoor environment quality, screening the cost-efficiency of new advanced technologies for different climates and school typologies. [11,13].

The wide research project SchulRen+ has studied many school buildings by means an integrated approach, i.e. considering structural, functional and energy-related factors from a systemic point of view. Results have shown that high performance refurbishment operations can provide 'Nearly Zero Energy' or 'Plus Energy' buildings potential [3].

Some authors have demonstrated that energy saving in primary schools can be achieved by means of the occupant-centric control (OCC) method [14]. They modelled different OCC strategies, especially the counting-based case showing that, both climate and specific code versions, provide important effects on energy savings with OCC strategies.

Others authors have investigated the ventilation air volumes and the connected energy saving in schools, obtained by a demand-controlled displacement ventilation system (DCDV) by means of a comparison with mixed constant air volume system (CAV) [15]. Results obtained by transient simulations, supported with experimental monitoring campaign at real operating conditions of typical classrooms, have demonstrated that a DCDV with CO₂-sensor is the best and more effective solution [15]. A particular research has evaluated how much different open space and classroom design, oriented to indoor comfort conditions, affect energy consumption in an existing refurbished school building by means of a wide experimental measurements campaign and dynamic simulations [13].

Some authors have shown the real difficulties in changing educational modes inside outdated types of school buildings. In addition, their study has shown that crucial factors such as air quality, proper classrooms ventilation, optimal combination between natural and artificial-LED lighting, thermal comfort and acoustic performance have important impact on students' well-being, health, attention, behaviour and learning performance [16].

A recent study has provided a parametric model considering optimal layout for designing primary school classrooms, in order to achieve building-plant system energy efficiency, considering indoor and outdoor variable climatic conditions, sustainable lighting with maximum use of daylighting and thermal comfort [12]. In particular, the authors have implemented a model based on genetic

algorithms, for the best solution identification, that can also guarantee higher learning ability of the students [12].

Some authors have suggested the application of life cycle assessment and environmental performance at educational buildings to develop low cost and effective measures for the energy performance and comfort conditions improvement, reducing carbon emissions [6]. Others, have investigated the optimal combination between grid-tied PV and intelligent water heater control to reduce the energy costs of school buildings, at real dynamic conditions. In particular, they have assessed the use of a grid-tied PV solution, connecting the load shifting with smart scheduling for the energy store of electric water heaters, in order to reduce and control energy usage from the grid, peak loads and the electricity bill of the school studied [8].

Furthermore, energy saving in refurbished school buildings can be achieved by an effective use and integration of digital means and advanced technologies such as IoT, VR and KNX protocol (i.e. Konnex control system) as reported in [7,8]

Some authors have provided a new modelling approach for the energy sustainability assessment of intelligent façades applied to existing educational buildings in Spain. Their particular proposal have combined the multi-criteria decision-making method with the Delphi technique referring to literature evidences, real projects and complex sensitivity analyses. The authors have also demonstrated that the proposed method can be a strong tool for the optimization of economic and environmental effects on any refurbishment scenario [17].

In Italy the school building sector is very far from requirements imposed by the European, and also international standards. This sector presents a great variety of buildings built in different years, with very different original use and sometime opposite, with consequent problems connected to the necessary building-plant retrofitting and refurbishment. The real challenge is pursuing all these objectives through a systemic approach, especially with existing schools retrofitting. From the latest update of the 2018 Italian School Registry, it can be deduced that in Italy, there is a school building heritage consisting of 40151 active buildings, belonging to local authorities; 35730 of these buildings were built before 1991. Most of these schools share similar problems concerning physical/structural decay, performance inadequacy of indoor environments, and functional obsolescence.

In the budget law of the Italian State Law 2020, many measures for the energy efficiency of schools, creation of a national plan of energy efficient interventions, with resources from the Fund for the Financing of Investments and Infrastructural Development, are provided.

The most recent Italian regulatory design guidelines on schools (L.D. 11 April 2013, Italian Law) pursue innovation objectives in learning environments and energy performance. The recent PNNR funded call “Construction of new schools by replacing buildings” (M.D. 2 December 2021, Italian Law) aims at: consumption and polluting emissions reduction; increase in the seismic safety of buildings and the development of green areas; design of school environments by means of the involvement of all the factors positively affecting teaching and student learning; sustainable development of territory and services aimed at community enhancement.

In this context, a method for the school buildings energy assessment, by means of simple input information connected to basic simulations, was developed. The main aim of our research was to

investigate the green energy potential of different regeneration proposals, combining architectural improvements with plant systems refurbishment and retrofitting. As a result of each improvements, the direct assessment of energy consumption reduction for heating (i.e. the energy performance index for winter heating compared with the appropriate limit value) and associated CO₂ emission reduction, was provided.

The school building Don Milani of the Florence Municipality was the case study.

2. The method

With the aim of obtaining an advanced energy efficiency of the building-plant system, the analysis and evaluation method was outlined and structured as follows:

A) Energy analysis and assessment of criticalities for the existing state

- 1) construction of a three-dimensional architectural solid model of the school building
- 2) boundary conditions definition, i.e. type of climatic data used, consideration of the built and surrounding green area
- 3) attribution of thermophysical features on the basis of the current legislation and National Institute of Statistics (ISTAT) census

4) simulation model validation

B) Green energy solutions identification for buildings and plant system revamping (air conditioning and lighting)

1) Multi-scenario analysis

2) energy performance assessment from results obtained with dynamic simulations

3) energy costs and environmental impact analysis

4) comparisons between the existing state and the proposed energy efficiency scenarios

2.1. The case study

The Don Milani primary school was the case studied. It is located in the district of S. Lorenzo in Greve, one of the areas of expansion of the metropolitan area of Florence.

The school (Figure 1) has a whole prefabricated structure. It was built in a period of maximum educational demand for school buildings, around 1971. It has a large glass entrance with four access doors and on the back a large garden connected to an asphalted area and to a particular zone with a lawn and medium-height trees which, however, do not produce any shade on the different building's facades. Currently, the school building has 13 classrooms, distributed on the ground and first floors. The entrance has a large and bright hall, part of which is used as a cafeteria. On the ground floor, there is the main canteen. In the hall at the first floor there is a small stage for shows. In particular, there are specific environments i.e. a classroom dedicated to interactive multimedia whiteboards, a library, a support classroom, a classroom with AV facilities, a classroom/laboratory for mathematical-scientific experiments, one gym with adjoining changing-rooms, a computer room, offices for the school management, rooms for the after-school care.

Figure 1. Photos: some images of the school building at the existing state

The building has important dimensions with a total volume of 14345 m³ and a floor area of 8775 m². In particular, in the ground floor of 7875 m², there are the following thermal zones: classrooms on the east side; gym; locker rooms; offices, entrance and library; classrooms on the west side and corridor (Figure 2). For the first floor of smaller dimensions (i.e. 900 m²), two thermal zones were identified, i.e. the set of classrooms to the South/East, and the set of those to the South/West (Figure 2). There are no lifts, but only a device for adapting architectural barriers between the ground floor and first floor.

Figure 2. On the left, thermal zones at ground floor: gym (gray); changing rooms (yellow); classrooms (green); offices (light blue); hall (blue); classrooms (purple); classrooms (red). On the right, thermal zones at first floor: classrooms (purple; at the top the studied classroom highlighted in yellow); classrooms (red)



The technical offices of the Florence Municipality provided data and information of broad maximum. It was not possible to identify directly the stratigraphy of all the building components (i.e.

walls, ceilings, floors, partitions, roofs, etc.) or the complete the description of the plant systems and their equipment. Therefore, according to the age of construction of the building, which provides information on the type of construction and building materials, a comparison with [18-20] was developed to identify the thermophysical properties of building materials. Considering the plant systems typology installed in the corresponding period, the technical, energy and plant regulations, and therefore, the necessary adaptation and retrofitting operations realized over the years, the limit values imposed by the most recent current standards, were used.

The comparison between data and information, photographic surveys and direct inspections, made it possible to identify the present plant system as a traditional type, consisting of a radiator terminal system. The heating system is powered by a gas boiler, with an intermittent conduction regime, due to the discontinuous use of the building on a daily and weekly basis. The production of Domestic Hot Water (DHW) takes place at the level of the individual service by means of some electric boilers. In particular, the heat generator is a gas-boiler and an electric boiler for domestic hot water. Thermo-physical characteristics of the building components, that were used for simulations, are: 0,58 W/m²K for thermal transmittance of the prefabricated panels making up all the vertical walls and partitions; 1,56 W/m²K for roofs; 3,6 W/m²K for all the windows (single glazed windows with metal frame without thermal break). The artificial lighting system is a discharge type with compact fluorescent lamps and without regulation/control systems or occupancy sensors. In particular, for corridors and toilets, a power per unit area of the specific thermal zone of 10 W/m² was considered, similarly for classrooms, studios/offices and library and canteen of 25-30 W/m².

2.2. *The dynamic simulation model*

A numerical model with a mixed typology, i.e. the combination between the standard energy assessment and the tailored assessment, according to [21] was implemented. It is based on a conventional basic knowledge of indoor and outdoor climate and user behaviours.

It allowed to carry out different series of variables deriving from weather surveys and bill accounting. Furthermore, it implements, for the project scenarios with controlled mechanical ventilation systems, the "post-Covid" adaptation suggested in [22], e.g. using a maximum crowding index of 0.90 m²/person instead of 0.45 m²/person. It was necessary to adapt the parameters to the post-Covid health prevention and protection regime, both as regards the crowding indices according to the intended use of the individual rooms, and as regards the air flow rates per person. The Indoor Air Quality settings used as boundary conditions for simulation, were obtained from the combination of technical standards [23-25] and specific national regulations for the school sector (Ministerial Decree December 18, 1975. Italian Law). The design winter temperature was set at 20 °C, with 50% R.H., and that for summer at 26 °C, and 50% R.H. In the gym temperature values were respectively equal to 18 °C and 24 °C. The building is currently equipped with natural ventilation, through manual movement of the fixtures. Therefore, at present, it is not possible to guarantee the IAQ level required by current legislation for this type of building. This is the reason because it was equipped with Controlled Mechanical Ventilation (CMV) to comply with both the Italian Ministerial Decree 18

December 1975 and the Italian standard [26]. The standard dates back to 1995 and has never been updated.

A monthly calculation step was chosen at semi-stationary state conditions, with different utilization factors for heat gains and dispersions that were deduced from the time constant of building and its thermal inertia. The value of these last parameters are low, as the only capacitive building elements are the inter-floor and basement slabs in reinforced concrete, i.e. elements inside the building. The building envelope, is of the dry stratified light type. This fact constitutes a significant problem in the hypothesis of extending school use all over the year, and therefore of installing an air conditioning system. Using the dynamic thermal parameters provided in [27], an area thermal capacity of the building envelope equal to $115 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ was obtained. The planivolumetry of the building is particularly complex, with a form factor of 0.55 m^{-1} (i.e. the S/V ratio, dispersing surface divided by the air-conditioned volume), that is a building index connected to high dispersions.

The ratio between the transparent surface and the useful surface is similarly high, i.e. 0.15 m^{-1} . The building was modelled by dividing the total volume into nine different thermal zones, thermally decoupled and at the same temperature, linked to the three main functions (classrooms, gym, offices) and taking into account the different exposure and levels at which each zone, that make up the whole building, are located. For each area, specific values of endogenous thermal inputs, crowding index, type of activity/work, and DHW requirement were defined. The simulation model took into account that there are no showers in the changing rooms of the gym and the canteen does not have its own kitchen.

The simulation model validation was carried out by means of two methods, for the assessment and analysis representativeness and for the consistency and reliability of the obtained results.

The first validation method concerns climatic data of the period 2000 – 2010, by means of the comparison between the monthly average climatic values provided in [28] and the average values obtained from hourly climatic data, measured at the Sesto Fiorentino fixed weather station, provided by “Consorzio LAMMA-Laboratory for Meteorology and Environmental Modelling”. The hourly measurements were combined using statistical criteria in compliance with [28] in order to obtain a standard Test Reference Year (TRY). Deviations of a few percentage points were observed, with an incidence lower than the margin of error of the calculation algorithm, certified in $\pm 5\%$ by the Italian Thermotechnical Committee (CTI).

The second validation method concerns gas consumption. It was based on the comparison between the gas quantity recorded at the delivery point (meter) by the network manager and then accounted for in the invoice, and that one calculated by simulation. This step made it possible to calibrate the simulation model, and to adapt the conduction regime of the heating system from continuous to intermittent. The Municipality of Florence provided the monthly and cumulative seasonal gas consumption, recorded during the years 2017 - 2018 - 2019, respectively corresponding to 28972 stm^3 , 34977 stm^3 , 33559 stm^3 . The consumption analysis showed a quite stable user profile over time. However, the marked variations recorded over the three years do not appear to be directly caused by the concomitant climatic variations, but most likely from variations in building usage and user behaviour. It can be seen analysing the climatic data of the fixed weather station of

Sesto Fiorentino, that Winter 2019 was less cold than winter 2017, and winter 2018 was under intermediate conditions.

It was not possible to set a climatic analogy, therefore the average value over the three-year period of cumulative seasonal gas consumption, of 32503 stm^3 , was used as a target for the simulation model calibration. By applying a lower calorific value for methane equal to 8,95 kWh/ stm^3 , an energy consumption of 290 MWh was obtained. The latter, compared with the calculated one by means of the simulation model, i.e. of 315 MWh, shows a deviation of 8%, which was deemed more than acceptable given the complexity of the analysed system.

2.2. Building energy performance at the existing state

At the existing state, obtained results showed a global average heat transfer coefficient of the building of 1.0 W/(m^2K). The thermal energy requirement obtained for heating downstream of the plant was 110 kWh/(m^2 year) while the non-renewable primary energy requirement upstream of the plant was 160 kWh/(m^2 year).

According to the current Italian scale of values, the building Energy Class was F. The building turned out to be, as expected, energy-intensive with onerous management costs also considering the energy market changes. It was never been reconfigured from the time of construction to the present.

The above thermal energy values, transferred from continuous regime to stationary regime, become, respectively, 65 kWh/(m^2 year) and 95 kWh/(m^2 year). The conversion and emission factors for gas and electricity used referring to [29], are provided in Table 1. Today, in Italy, in line with the European average trend, it is estimated that 20% of the electrical energy mix is made up of renewable sources and the remaining one from fossil sources. A photovoltaic system installation was designed because it would provide electricity entirely from renewable sources.

Table. 1 Conversion and emission factors

	$f_{P,nren}$ [-]	$f_{P,ren}$ [-]	$f_{P,tot}$ [-]	f_{CO2eq} [kg/kWh]
gas	1,05	0	1,05	0,21
electricity	1,95	0,47	2,42	0,46

3. Energy regeneration solutions. Multi-scenario analysis

The energy regeneration of the school building by applying the definition of nZEB, as suggested by the Directive 2010/31/EU "EPBD recast" was the main aim of our research. This definition implies, first the reduction of the building energy demand, and then more efficient and effective plant systems implementation powered by renewable sources. As a consequence, compatible, green, reversible, energy sustainable interventions with reduced impact with regular school activities, taking into account the environmental and social costs of a construction site and any movement of people (i.e. teachers, students and school staff, etc.) were identified. The following solutions, that can be realized mainly in the external environment, i.e. at the level of the building envelope and of the thermal plant, were chosen:

- 1) insulation of the external fronts of the building, applying an SEP panelling (Sintered Expanded Polystyrene) with graphite additive and finishing with a paste-dyed cement smoother. The average thermal transmittance of the wall was reduced from $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ to $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. The thermo-hygrometric verification using Glaser Diagram was positive (i.e. no condensation phenomena). This produced the attenuation of the most of thermal bridges;
- 2) complete replacement of the existing fixtures with new ones with thermal break, made up of an aluminum frame with decoupled profiles and 6-16-6 mm double glazing with Argon in the interspace. The average thermal transmittance of the windows was reduced from $3,60 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ to $1.30 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$;
- 3) insulation of the attic floor, applying mineral wool mats with a total thickness of 15 cm, protected by a vapour barrier on the intrados and a waterproof sheath on the extrados. The average thermal transmittance of the floor was reduced from $1,45 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ to $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. The thermo-hygrometric test using Glaser Diagram was positive (i.e. no condensation phenomena).

The basement floor insulation would have been too difficult, because it would have required the reconstruction of screeds and floors for over 70% of the useful floor area, with strong interference with the time profiles of school use. The combination of interventions allowed a significant reduction of gas consumption for heating. The obtained building Energy Class was 'D', corresponding to $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ year})$. The reduction of primary resources use was 25% and the same value for the equivalent CO₂ emissions reduction. The improvement of the environment i.e. indoor thermal comfort, was obtained: it cannot be directly calculated, but estimated by means of PMV and PPD indices in compliance with [30].

The more homogeneous thermal field in the room, and an average radiant temperature close to the set-point temperature, but also the temperature gradients attenuation, especially near the windows, suggested an improvement of the indoor environmental conditions. By way of example, the operating temperature inside a typical classroom unfavourably exposed to solar radiation, was calculated. This classroom, highlighted in yellow in Figure 2, is 7,20 m long and 7,20 m wide (this is a basic modular mesh of the bearing structure of the building with steel pillars and beams).

Therefore, it was obtained that a student placed in the centre of the classroom at the existing conditions, perceives an operating temperature of $17,6 \text{ }^\circ\text{C}$, while in the energy regeneration condition, due to the extreme insulation of building envelope, she/he would perceive $19,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

The cost for carrying out the proposed solutions, in BAU (Building As Usual) and without benefiting from any incentive forms (i.e. as a precautionary choice), was estimated over 1M€. The unit amounts applied to the calculation basis were 170 €/m^2 for external insulation, 600 €/m^2 for the fixtures replacement and 120 €/m^2 for the under-roof attic insulation. It is clear that this latter does not have an economic reason due to a business plan with a convenient payback time: an intervention of this size has no recovery margin over the expected useful life, estimated at 20 years in accordance with EU Delegated Regulation 244/2012. The building is over 50 years old, during which only maintenance interventions were carried out, so that it could be regularly used. Important energy refurbishment

and retrofitting interventions were deemed necessary, regardless of economic reasons, but for purposes of energy quality, environmental quality of the building, health and safety of the occupants. Following the application of passive efficiency measures (i.e. building envelope) it was possible to consider more scenarios of active efficient and effective measures (thermal system), coupled with the integration of sustainable strategies (photovoltaic system).

Three different revamping solutions for the thermal power plant were identified, of which the reference one is similar to the current monovalent gas structure, while the remaining alternatives can be further expanded through the solarisation of the building roof. The scenarios studied and simulated are the following, from A) to E):

- A) the reference scenario assumes that the current single-purpose gas-fired thermal plant will be maintained, subject to replacement of the heat generator (condensing boiler). The device operates with an efficiency of 95% at nominal power, and 105% at reduced load, with reference to the fuel's lower calorific value. A proportional modulating type regulation, with an external climatic sensor for delivery temperature regulation of the heat transfer fluid to the circuit, through a compensation curve, was implemented
- B) alternative scenario n. 1 is based on the installation of a hybrid system, consisting of a gas condensing boiler and an air-water aerothermal electric heat pump. The two generators are activated alternately, according to the bivalent temperature, fixed at 7 °C in consideration of the microclimatic characteristics of the locality. During the mild periods of the winter season the heat pump is activated, while during the cold periods the boiler is activated. The installed power ratio between boiler and heat pump is 3 to 1. The boiler is the same as in scenario A), while the heat pump operates with a seasonal average Coefficient Of Performance (COP) of 3,50.
- C) alternative scenario n. 2 provides for an "all-electric" configuration, with an air-water aerothermal electric heat pump sized to cover the total thermal load. The operation of the device is obviously subjected to defrost cycles, such as to operate with an average seasonal COP of 3,00.
- D) alternative scenario n. 3 is similar to scenario B), with the addition of a photovoltaic system installed on the roof of the building. The modules are in monocrystalline silicon and the total installed peak power is 90 kWp.
- E) alternative scenario n. 4 combines scenario C), with a photovoltaic system installed on the roof of the building; as in scenario D) the modules are in monocrystalline silicon and the total peak power installed is 90 kWp)

Table 2 shows the technical data used for the thermal power plant devices in the above scenarios. In particular, for all the active solutions on the plant system, the Building Automation and Control System (BACS) was implemented. It provided for a centralized regulation, the possibility of operating on the delivery temperature of the heat transfer fluid, and a peripheral regulation for each terminal equipment.

Table 2. Thermal plant configurations for each scenario

Scenario	Pn gas boiler [kW]	Pn Pdc electric [kW]	kWp FV [kWp]
A) existing/reference	480	-	-
B) hybrid	480	160	-
C) all-elettric	-	480	-
D) hybrid + FV	480	160	90
E) all-elettric + FV	-	480	90

4. Results and discussion

A comparative energy-environmental-economic analysis of the five scenarios was carried out using as reference values, respectively the unit requirement of non-renewable primary energy, measured in kWh, the unit emissions of equivalent CO₂, measured in kg CO₂, and the net present value of the sum of investment costs and operating costs, measured in euros (€).

The conversion factors into primary energy and the emission factors into equivalent CO₂ are provided in Table 1. The national values were in agreement with the European average values.

The economic convenience analysis was based on the Life Cycle Cost (LCC) methodology by means of the algorithms implementation suggested in [31]. The calculation period was set at 20 years. In the fifteenth year, the periodic replacement of the central heating devices was envisaged, which have reached the end of their useful life. This fact produced a residual value for 20 years. On the contrary, the expected useful life of the photovoltaic system was estimated to be equal to the calculation period. The gas technology was quoted at 250 €/kW installed, while the heat pump technology varies from 1200 €/kW to 1600 €/kW depending on the device size. The gas tariff was set at 1,00 €/m³ value, while that of electricity from the network at 0,40 €/kWh.

The installation of a large photovoltaic system, such as the one proposed, was due to 2000 €/kWp installed according to a "turnkey" formula. Results provided in Figure 3 show that the shift from fossil fuels (gas) to electricity allowed an important reduction of non-renewable primary energy consumption. This reduction is accentuated by the photovoltaic system installation. It should be noted that all the scenarios are oriented towards energy efficiency and green energy transition.

From this point of view, the alternative between a hybrid thermal plant and an "all-electric" system is equivalent.

Figure 4 shows the direct proportionality between fossil fuel consumption and CO₂ emissions. Considering that at present, the prevailing share of the national electricity mix comes from thermoelectric plants fuelled by fossil fuels (e.g. mainly coal, a resource with high specific emissions), the switch from gas to electricity does not lead to a substantial reduction in CO₂ emissions. But, in the perspective of green energy transition, electricity should be produced from renewable sources and therefore, a total reversal of this trend would be happened. A different result would be obtained

with an energy-mix dominated by nuclear sources, as in France, or totally by renewable sources, as in Sweden.

Figure 3. Multi-scenario analysis of energy efficiency

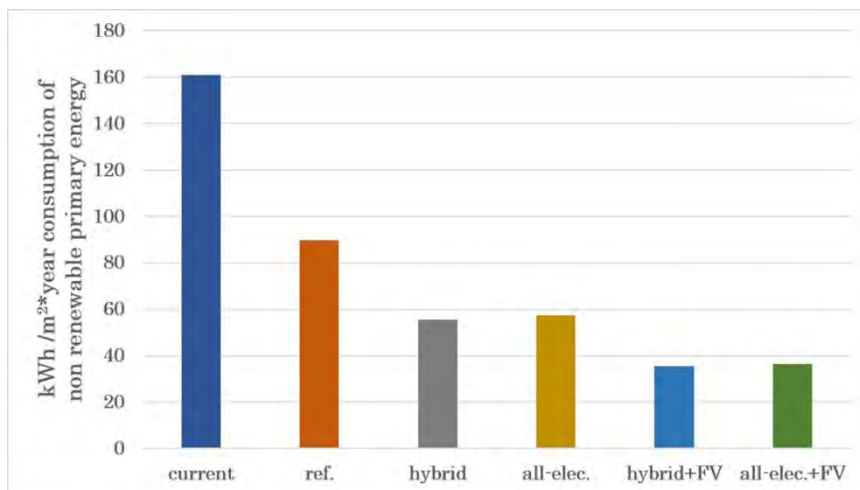
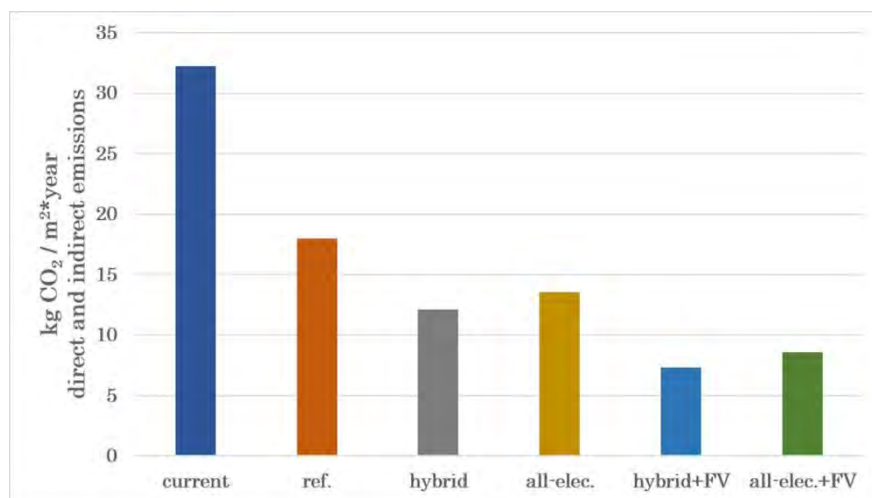


Figure 4. Multi-scenario analysis of environmental impact



In the perspective of green and sustainable energy (green economy), the electricity park of almost all EU countries should be converted to renewable sources, differently divided between hydroelectric, biomass, wind and photovoltaic system.

For the economic analysis and the connected Life Cycle Cost (LCC) interpretation and discussion, the separation of investment costs and operating costs was carried out for all the proposed scenarios.

The respective specific values were transformed into a single Net Present Value (NPV), applying a discount rate of 2% per annum. In particular, applying the NPV calculation method any project solutions was assessed in terms of value obtained over the time needed for its economic return. The payback period was calculated to evaluate the necessary time for recovering the cost of the initial investment and obtaining net gains from the cash flows. Since the NPV establishes that the discount

of the cash flow after the initial investment has been made, and the cash flows was revalued at time zero and at the time the initial investment can be disbursed, the discount rate was used.

Figure 5 highlights the gap between the basic technology of combustion equipment, such as boilers, and the high-tech of thermodynamic devices, such as heat pumps. In particular, at year zero, the photovoltaic system constitutes an increase in all the expenses to be incurred (Figure 5).

Figure 6 shows that operating costs, understood as costs for the purchase of energy products, are complex to interpret. All scenarios are united, to varying degrees, by a significant reduction in bill costs. The electricity tariff, usually more onerous than that of gas, penalizes heat pump systems, unless the photovoltaic feasibility covers a large share.

Figure 5. Multi-scenario investment cost analysis

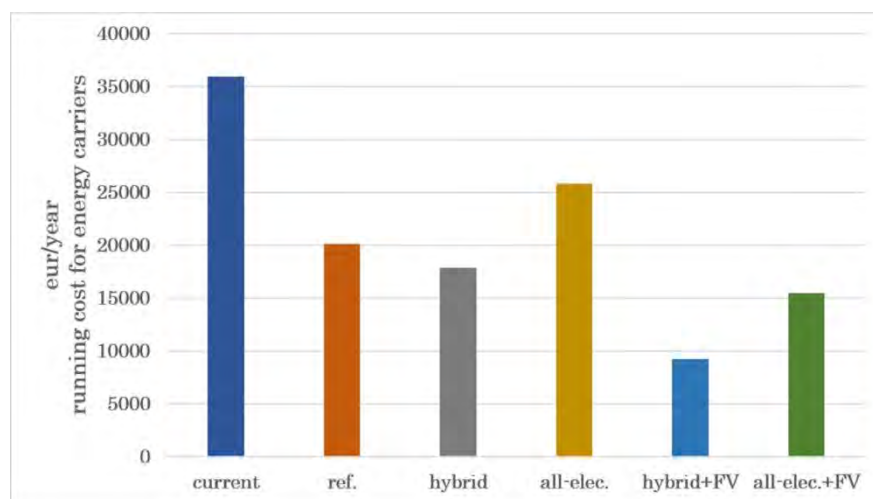
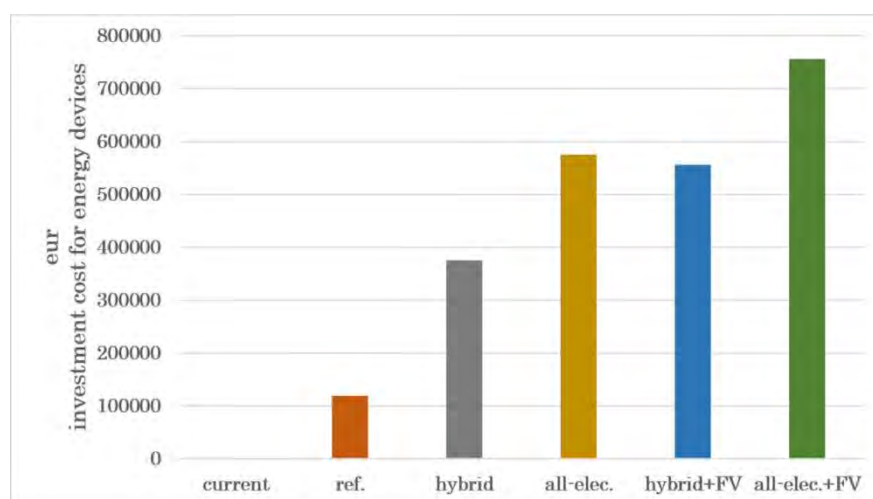


Figure 6. Multi-scenario analysis of operating cost



Today, the electricity tariff is strongly coupled to that of petroleum products and fossil fuels, generally due to the energy mix. An increase in the gas cost due to calamitous events, geopolitical frictions or anything else that could hinder the regular flow, would lead to an increase in electricity at real time.

Since, a divergent result could have been reached by means of the separate reading of investment costs and operating costs, it was necessary to calculate their combination. By means of the implementation of the method suggested in [31], the annual maintenance costs, the periodic replacement costs (e.g. for components with a useful life shorter than the duration of the calculation period), and the residual value (e.g. for components with a useful life greater) were assessed. The calculation period was set at 20 years, as suggested in the EU Delegated Regulation 244/2012 for the cost-optimality calculation of non-residential buildings.

The tariff increase trend was set at 2% per year for electricity and 3% per year for gas, considering a progressive decoupling of the electricity mix from fossil fuels. This condition was in accordance with the most recent Community provisions in the climate-energy sector, and in particular with the "FIT FOR FIT 55" strategy [32]. Table 3 provides the LCC analysis comparison between each scenario.

Table 3. Life Cycle Cost for each scenario

Scenario	Average annual operating costs [k€]	Global investment costs over 20 years [k€]	Discounted Cash Flow-DCF on 20 years - updated [k€]
A)existing/reference	33	162	830
B) hybrid	28	507	1063
C) all-elettric	39	777	1549
D) hybrid + FV	15	687	985
E) all-elettric + FV	23	957	1421

The most competitive scenario from an economic point of view is the reference scenario, but from an energy and environmental point of view it is the least performing. For large-scale plants, the availability of low-cost thermal power allows the investment for a gas-fired monovalent plant to be significantly contained. At the same time a photovoltaic system, even if mainly intended for self-consumption, involves a further increase in expenditure at zero year.

However, the reference scenario does not match the European Union's Energy-Policy, which will probably lead to a ban on the construction of new monovalent thermal plants fuelled by fossil fuels between 2030 and 2040. Therefore, considering the four alternative scenarios, the LCC analysis allowed to solve the choice between hybrid system and all-electric system, and between withdrawal from grid or self-production for the necessary electricity (Table 3).

The resulting Discounted Cash Flow-DCF value indicated that the hybrid system solution powered by photovoltaic solar sources was preferable, because it was also the best compromise between investment costs and operating costs. Therefore, it showed a solution oriented towards renewable sources, providing a large energy autonomy for the school. At the same time, the diversification of the energy supply among multiple carriers, allowed for less constraint from the related cost fluctuations, up to operating the hybrid system on a tariff basis, instead of on the basis of device performance. The current national energy-mix is therefore not ripe for an "all-electric" choice, which

is affected by the cost of purchasing electricity from the grid, despite being the most efficient configuration from a thermodynamic point of view.

5. Conclusions

The energy efficiency of the Don Milani primary school was based on a systemic and compromise approach between energy objectives, economic commitment and the feasibility of each intervention in relation to the school functions performed, i.e. temporal profiles of use of the school and functional and distributive reorganization due to the construction site and the timing of the works.

Aiming for building Class A, or the nZEB target as indicated by the most recent community energy policy, would have implied the renovation of most of the building, with costs comparable to demolition and subsequent reconstruction, and also with a strong logistical impact on pupils, teachers and families, due to the necessary annuities for the construction site.

In addition, the intervention would have entailed to a significant economic burden for the Florence Municipality, also a negative social effect on the performance of activities and movements in the surrounding district, including small businesses and the transport system. This would have been an unsustainable condition for a public administration. If the manager system and administration had been a private individual, e.g. Foundations, non-profit organizations etc., with support from sponsors, this would have been easier and feasible.

The proposed energy regeneration solutions can be implemented without interfering with the regular functionality and use of the school. The external insulation was applied to the building envelope and the plant revamping mainly affected the heating plant. Furthermore, the long summer period (about three months), which characterizes the Italian school calendar, unlike other more northern European countries, and which also affects the school studied, could be used for all the phases of the construction sites. However, the proposed energy refurbishment did not allow interventions on the basement floor, extending over 2500 m² and completely without insulation, just as it did not allow for the widespread implementation of BACS (Building Automation and Control System) systems both on plant terminals and on components technologies such as new window screening systems.

The effectiveness and feasibility of the proposed operational compromise, together with the typology of prefabrication, widely diffused in the Italian school building stock, make the case study a prototype. It can become a repeatable and adaptable methodological approach than can be applied to numerous similar contexts, because it was based on a reliable analysis method, and on implementing solutions with current technologies and materials widely available on the building market.

The important CO₂ emissions reduction from the existing state to the best energy performing scenario is 75%. This result allowed to achieve the "fit for fit 55" condition, i.e. compliance with the European climate law, that makes reaching the EU's climate goal of reducing EU emissions by at least 55% by 2030 a legal obligation [32], and then further on up to "2050 low carbon energy". On the other hand, the EU countries are working on new legislation to achieve this goal and make the EU climate neutral by 2050.

Acknowledgments

The authors thank: Dr. Luca Fibbi of the Centre LAMMA CNR IBIMET of Florence, and Dr. Michele Mazzoni, Director of the Public Works Directorate of the Tuscany Region (former Director of Technical Services of the Municipality of Florence).

References

1. Mørcka, O.C.; Paulsen A.J. Energy saving technology screening within the EU-project “School of the Future”. *Energy Procedia* 48, **2014**. 148-1492. doi: 10.1016/j.egypro.2014.02.168
2. Demanuele, C.; Tweddell, T.; Davies, M. Bridging the gap between predicted and actual energy performance in schools. World Renewable Energy Congress XI, 25-30 September 2010, Abu Dhabi, UAE
3. Österreicher, D.; Geissler, S. Refurbishment in educational buildings – methodological approach for high performance integrated school refurbishment actions. *Energy Procedia* 96, **2016**. 375-385. doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.163
4. Zinzi, M.; Pagliaro, F.; Agnoli, S.; Bisegna, F.; Iatauro, D. On the Built-Environment Quality in Nearly Zero-Energy Renovated Schools: Assessment and Impact of Passive Strategies. *Energies* 14, **2021**. 2799. <https://doi.org/10.3390/en14102799>
5. Zinzi, M.; Battistini, G.; Ragazzini, V. Energy and environmental monitoring of a school building deep energy renovation in Italy. *Energy Procedia* 78, **2015**. 3318-3323. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.744
6. Moazzen, N.; Karagüler, M.E.; Ashrafian, T. Comprehensive parameters for the definition of nearly zero energy and cost optimal levels considering the life cycle energy and thermal comfort of school buildings. *Energy and Buildings* 253, **2021**. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111487>
7. Shao, L.; Yang, Z.; Zhang, W. The Application of Intelligent Device and Method for Detecting Dynamic and Static Human Body in Energy-Saving Control of Schools. *Procedia Engineering* 205, **2017**. 4017–4021. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.871
8. Gerber, S.; Rix, A.J.; Booyesen, M.J. Combining grid-tied PV and intelligent water heater control to reduce the energy costs at schools in South Africa. *Energy for Sustainable Development* 50, **2019**. 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.03.004>
9. Balocco, C.; Leoncini, L. A Study on Retrofitting Proposals for an Historic School Building in the Energy Transition Perspective. *Int. Journal of Heat and Technology* **2022** doi:10.18280/ijht.400406
10. Balocco, C.; Leoncini, L. Energy Cost for Effective Ventilation and Air Quality for Healthy Buildings: Plant Proposals for a Historic Building School Reopening in the Covid-19 Era. *Sustainability Int Journal* **2020**. doi:10.3390/su12208737
11. Tsikra, P.; Andreou, E. Investigation of the Energy Saving Potential in Existing School Buildings in Greece. The role of Shading and Daylight Strategies in Visual Comfort and Energy Saving. *Procedia Environmental Sciences* 38, **2017**. 204-211. doi: 10.1016/j.proenv.2017.03.107

12. Bakmohammadi, P.; Noorzai, E. Optimization of the design of the primary school classrooms in terms of energy and daylight performance considering occupants' thermal and visual comfort. *Energy Reports* 6, **2020**. 1590-1607. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.06.008>
13. Cantón, M.A.; Ganem, C.; Barea, G.; Llano, J.F. Courtyards as a passive strategy in semi dry areas. Assessment of summer energy and thermal conditions in a refurbished school building. *Renewable Energy* 69, **2014**. 437-446. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.065>
14. Yunyang, Ye; Yan, Chen; Jian, Zhang; Zhihong, Pang; Zheng, O'Neill; Bing, Dong; Hwakong, Cheng. Energy-saving potential evaluation for primary schools with occupant-centric controls. *Applied Energy* 293, **2021**. 11685. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116854>
15. Wachenfeldt, B.J.; Mysen, M.; Schild, P.G. Air flow rates and energy saving potential in schools with demand-controlled displacement ventilation. *Energy and Buildings* 39, **2007**. 1073-1079. doi:10.1016/j.enbuild.2006.10.018
16. Barrett, P.; Treves, A.; Shmis, T.; Ambasz, D.; Ustinova, M. (2019), "The Impact of School Infrastructure on Learning: A Synthesis of the Evidence", International Development in Focus, World Bank, Washington/PRIN
17. Habibi, S.; Valladares, O.P.; Pena, D. New sustainability assessment model for Intelligent Façade Layers when applied to refurbish school buildings skins. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 42, **2020**. 100839. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100839>
18. National Institute of Statistics (ISTAT), 15th General Census of Population and Housing, 2011
19. UNI 10351-2021, Building materials – Thermo-hygrometric properties - Procedure for choosing design values
20. UNI EN ISO 10456-2008, Building materials and products - Hygrometric properties - Tabulated design values and procedures for determining the declared and design thermal values
21. UNI EN ISO 52016-1:2018 Energy performance of buildings - Energy demands for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 1: Calculation procedures
22. UNI 10339:1995 Aeraulic systems for well-being. General information, classification and requirements. Rules for the request for quotation, the offer, the order and the delivery.
23. UNI/TS 11300-1:2014 Energy performance of buildings - Part 1: Determination of the building's thermal energy demand for summer and winter air conditioning
24. UNI EN 16798-1:2019 Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor input parameters for the design and assessment of the energy performance of buildings with respect to indoor air quality, thermal environment, lighting and Acoustics - Module M1-6.
25. UNI EN ISO 7730:2006 Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730:2005)
26. UNI EN ISO 13786:2018 Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods
27. UNI 10349-1:2016 Heating and cooling of buildings - Climatic data - Part 1: Monthly averages for the evaluation of the thermal energy performance of the building and methods for distributing

solar irradiance into direct and diffuse fraction and for calculating solar irradiance on an inclined surface.

28. UNI EN ISO 15927-4:2005 Thermo-hygrometric performance of buildings - Calculation and presentation of climate data - Part 4: Hourly data for the evaluation of the annual energy demand for heating and cooling.
29. UNI/TS 11300-5:2016 Energy performance of buildings - Part 5: Calculation of primary energy and the share of energy from renewable sources.
30. UNI EN ISO 7730:2006 Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730:2005)
31. UNI EN 15459-1:2018 Energy performance of buildings - Hydronic heating and cooling systems in buildings - Part 1: Economic evaluation procedure for energy systems in buildings, Module M1-14.
32. EU Council. FIT-FOR-FIT55. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Renewable Energy Community models for internal woodlands areas using biomass, thermal and electric carriers

Luca Brunelli ^{1,*}, Elisa Belloni ², Franco Cotana ² and Ilaria Pigliautile ²

¹ CIRIAF/University of Perugia, Via G. Duranti 67, 06125, Perugia, Italy

² University of Perugia, Engineering Department, Via G. Duranti 67, 06125, Perugia, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: luca.brunelli@studenti.unipg.it

Abstract: In an international context characterized by an energy and environmental crisis, the Renewable Energy Community (REC) is emerging as a key tool to face current emergencies through energy transition. Indeed, a REC aims at sharing among its members the energy locally generated from Renewable Energy Sources (RESs) to maximize environmental, economic, and social benefits for the same community. Nowadays, the REC definition provided by the European Commission concerns only the electrical energy, but the same sharing approach could be extended to the thermal energy, further increasing the benefits for the community. This work presents the design of a REC for a village in an internal woodland area, in central Italy. In this context, the energy sharing project will be crucial also to encourage the repopulation of such land areas thus counteracting the general population trend of last decades. Therefore, the REC design must aim at (i) reducing the current costs of energy carriers, (ii) achieving local renewable energy production targets, (iii) spreading the culture of environmental sustainability, (iv) revitalize local economy and (iv) reducing environmental impact of urban settlements, raising the awareness of the citizens in these aspects. The suggested REC model pursues the above-mentioned benefits taking advantage of local renewable resources (biomasses, running water, and solar energy) for producing both electrical and thermal energy to be shared among the community members. Thus, the vast forest crops of this area can be used as green fuel for a biomass cogeneration plant, placed to serve a district heating network for heat transmission, and to the REC for electricity production. Several scenarios were simulated with specific tools to find the best solutions in terms of maximum shared energy and economic return for the community.

Keywords: Renewable energy communities; renewable energy sources; thermal and electrical carries.

1. Introduction

Following the Paris Agreement [1], the first legally relevant agreement concerning the fight against climate change and adopted at COP 21 in 2015 (Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)) [2], in November 2016 the European Commission presented a set of reforms aimed at confirming the commitment of member states to the reduction of climate-changing gas emissions, the achievement of energy efficiency targets, and the global energy transition.

These reform proposals were published in the Official Journal of the European Union in June 2019 and adopted in the so-called Clean Energy for All European Package [3], also known as the Winter Package or Clean Energy Package.

Within the latter are the European RED II [4] and IEM [5] Directives aimed at developing renewable energy by encouraging the active participation of citizens and end customers.

These directives allow citizens to cooperate in community-shared energy projects for the first time which enable the possibility to build together new renewable power generators and share both energy and benefits deriving from their operation.

In this context, the RED II Directive introduces two aggregation levels, namely the Joint- Acting Renewable Self-Consumers (JARSCs) and the Renewable Energy Communities (RECs). Similarly, the IEM Directive introduces the Active Customers (ACs) and the Citizens Energy Communities (CECs). Even though these entities share some common traits, they aim at quite different objectives. JARSCs are a group of at least two jointly acting renewable self-consumers, which are in the same building or a multi-apartment block. ACs are single or aggregated users that can sell self-generated electricity and participate in flexibility and energy efficiency schemes, among other things. RECs and CECs are more complex schemes: RECs are legal entities that are based on open and voluntary participation, are autonomous and effectively controlled by shareholders or members that are located close to the renewable energy projects, and whose primary purpose is to provide environmental, economic, or social community benefits, rather than financial profits. CECs are legal entities that are based on open and voluntary participation and whose aim is to facilitate access to the electricity generation (also non-renewable), aggregate services provision, and electricity market participation. This second scheme contains no specific incentives.

These directives were initially transposed in Italy in 2019 through Article 42 bis of the "Milleproroghe" Decree [6], which initiated an experimental phase for Renewable Energy Communities. In that phase, a power limit for renewable energy plants was set at 200 kWp and a perimeter of the REC equal to the area below the MV/LV transformer substation.

Subsequently, following the final transposition that took place through the Legislative Decree 199/2021 [7], the maximum plant power was raised at 1 MW, and all the members should be connected to the same AT/MT transformer substation.

Over the past three years, Energy Communities began to spread in Italy, partly thanks to an incentive system on shared energy. Numerous case studies were developed and they were discussed in as case studies in different research papers. These cases mainly concern self-consumption configurations

based on energy systems from non-programmable sources, particularly photovoltaics, and on the exclusive production of electricity.

The aim of this work is to broaden the perspective of using multiple renewable energy sources, through hybrid configurations, in addition to the use of other energy carriers, based additionally on thermal power generation. This approach is implemented for designing a renewable energy community in a village in Central Italy, located in a woodland area.

The choice of such a location is related to the final aims of a REC which include the reduction of energy costs, as well as the rise in renewable energy production taking advantages from local resources. Woodland areas are particularly suitable for the implementation of biomass-fueled cogeneration plant, as proposed in this study. Moreover, the proposed sustainable and self-sufficient community model could also encourage the repopulation of areas that were gradually abandoned over the years.

The paper is structured as follows: after this preliminary introduction, in Section 2 the case study will be introduced through the definition of the settlement type. The energy consumption profile of different users is assumed and facilities are sized accordingly. In Section 3, the assumptions for the installation of renewable source plants to serve the REC are described and environmental and economical benefits, also considering the payback time of the investment.

2. Materials and Methods

2.1. Case Study

The project here presented was conceived for a mountain village in central Italy, at about 600 m above sea level and covering a total area of 250 km². Like many other villages in the area, it is characterized by a predominantly hilly-altitude, partially agricultural terrain, and it is characterized by the presence of widespread settlement forms such as hamlets, clusters, aggregates and scattered houses. The low anthropized zones are very extended and correspond to forested mountain areas that represent the natural heritage of the region (Figure 1).

The last municipal expansions date back to the 1960s and lasted until the late 1980s. Most of the residential buildings, accommodation facilities, artisan production area, and public services date from this period. These are mostly stone masonry buildings with poor energy efficiency.

The residences and activities are powered independently, drawing from the public grid. Fossil fuels are the main energy source in the village.

The village's economy is based mainly on activities related to tradition: from livestock farming and agriculture to the production of typical gastronomic products, handicrafts, and small-scale manufacturing. Most of the industrial activities are related to carpentry and sawmill due to the great interest on woodworking. Other ones are food industries connected to the local products. Despite the gradual decline in population, one of the main sources of livelihood for this type of settlement is historical nature tourism. Furthermore, the region is characterized by some immigration, mainly due to foreign labor attracted by the possibility of seasonal work offered by the food and tourism industries.

The current number of residents has been estimated to be about 5,000.

Figure 1. Central Appennine



2.2. Dataset

The project involves the entire municipal area, including several villages connected to the same primary Medium-High Voltage substation and which can be part of the same Renewable Energy Community (REC).

In order to size the systems serving the REC to be designed, it is necessary to know the electric energy consumption of the residents. Consumption can be divided at a general level between private and public. In the first case, reference is made to utilities related to private citizens and businesses. In the second case, however, we refer to utilities administered by the municipality: city hall, public lighting facilities, schools.

Through the data retrieved through the distribution company for the present case study, it was possible to show the consumption profile for the residents.

Consumption was averaged over five years and categorized into as follows:

- municipal buildings and equipment;
- tertiary sector;
- residential buildings;

- agricultural sector;
- industrial sector;
- public lighting.

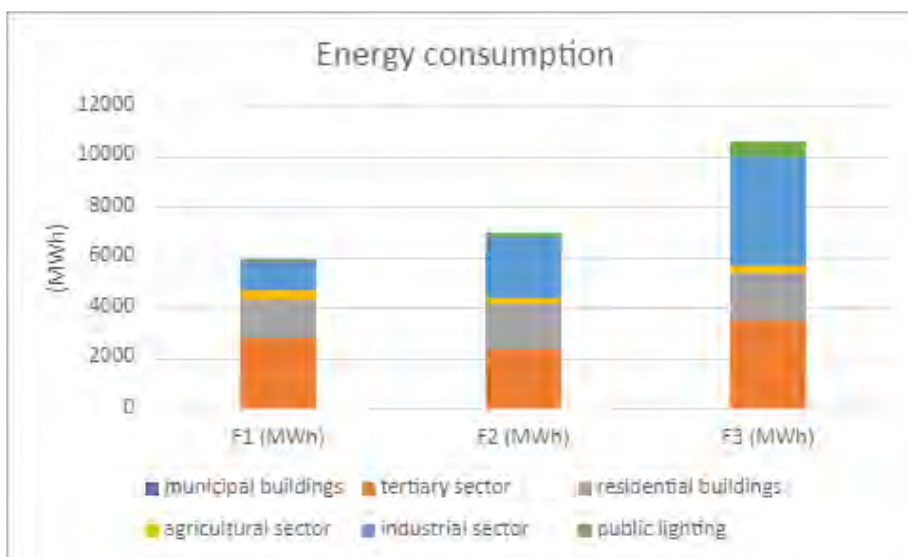
The following table (Table 1) and graph (Figure 2) show the yearly values of these consumptions:

Table 1. Average annual electric consumptions.

Consumer	average annual electric consumption (MWh)
municipal buildings	61
tertiary sector	8607
residential buildings	5165
agricultural sector	973
industrial sector	7796
public lighting	802
Total	23404

The yearly consumptions were detailed thanks to provided electricity bills e to represent electricity consumption profiles in the three time slots identified in the national electricity market: F1 (8 a.m. to 7 p.m. Monday to Friday), F2 (7-8 a.m., 7-11 p.m. Monday to Friday and 7-23 p.m. Saturday), F3 (24-7 and 23-24 Monday through Saturday, Sunday and holidays all hours of the day) (Figure 2).

Figure 2. Average annual electric consumptions



2.3. Scenarios

2.3.1. Renewable source system

The main plant planned for the Energy Community consists of a co-generation plant serving a district heating network for a large catchment area. This solution was chosen as the most important one for

this configuration because a powerful cogeneration system damaged after an earthquake should be reinstated and reconverted.

The new combined heat and power plant will be fueled by biomass, considering the large capacity of the area for its supply. It is a plant that can use the combustion process of organic materials, products, and by-products of wood processing, such as pruning waste, wood chips, sawdust, and shavings.

The biomass is introduced inside the boiler where combustion takes place from which superheated water is obtained through an exchanger and sent to an evaporator, which in turn sends the fluid to the ORC turbine that transforms the heat into electricity.

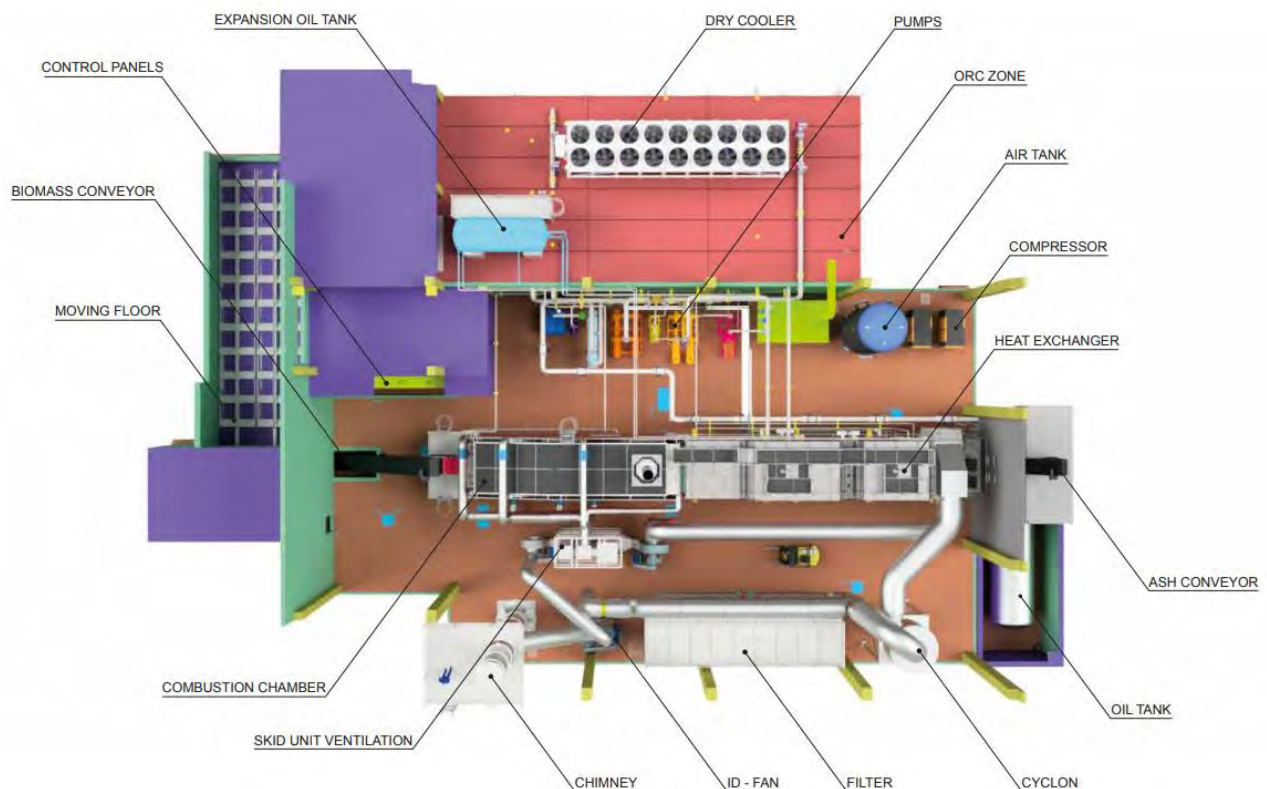
The new cogeneration plant consists of the following parts:

- a movable grate furnace with water cooling of the grate;
- a combustion chamber;
- an oil exchanger completely separated from the furnace;
- a turbine with ORC cycle.

The ORC (Organic Rankin Cycle) cogeneration plant will have a peak power of 999 kWe and 3999 kWt and will be operating for more than 8000 h per year. The biomass feeding the plant is wood chips with an average size of 6 cm from coppice forest in the surrounding area and from waste wood processing (average moisture content 40% and calorific value ca 4000 kcal/kg).

The main components of the new plant are shown in Figure 3.

Figure 3. Main components of the ORC cogeneration plant



Two photovoltaic systems, located on the roofs of two buildings of superficial parts of 80 and 100 square meters, with power of 15 kW (PV1) and 25 kW (PV2), respectively, were assumed to contribute to the production of electricity for the REC.

Using the online open-source software PVGIS [8], it was possible to estimate the respective energy productivities of the two PVs, shown in the following table (Table 2):

Table 2. Technical parameters of PV Systems.

PV System	Installed Power (kW)	Electrical productivity (kWh)
PV1	15	18000
PV2	25	30000
Total		48000

Finally, it is assumed that two hydroelectric plants, with a capacity of 75 kW (HYDR1) and 53 kW (HYDR2), respectively, will be made available to the REC.

The technical parameters of both plants, the powers to be installed, and the calculation of electrical productivity are shown in Table 3.

Table 3. Technical parameters of Hydroelectric plants.

Technical parameters	HYDR1	HYDR2
Total Installed Power	75.00 kWe	52.85 kWe
Total annual Productivity	493000 kWh	348000 kWh

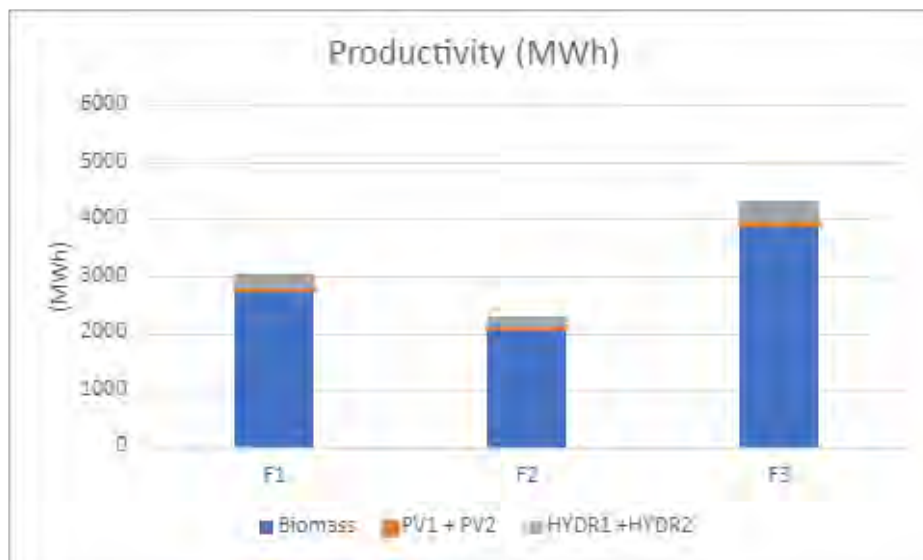
The following is an evaluation of the electrical productivity by means of the plants from renewable sources to be built (Table 4).

Table 4. Total productivity.

New plants		
Systems	Electrical Power (kW)	Annual Electrical Productivity (kWh)
Biomass	999	ca. 8'760'000
PV1	15	18'000
PV2	25	30'000
HYDR1	75	493'000
HYDR2	53	348'000
Total annual production		9650 MWh

Considering for the three mentioned plants respectively 8760 hours of production for biomass, 1200 for photovoltaic and 6570 for hydroelectric plants, it was possible to represent the electric production of them in the three consumption ranges F1, F2 and F3.

This was also possible by considering the annual sunrise and sunset pattern for a city in Central Italy and a seasonal pattern for the hydroelectric plant's producibility.

Figure 4. Productivity in F1, F2, F3.

These data show how the consumptions are higher than the productivity of renewable energy plants. This ensures that the energy shared is maximized in every consumption range of the day, and it can be assumed that the total energy fed into the grid is shared.

To guarantee this condition, the energy consumptions of the village must be ever greater than the productivity of the plants.

Thus, the aim is to establish the minimum number of citizens from the village to join the renewable energy community to have sufficient electric consumption to maximize the shared energy.

Many configurations were analyzed in a specially developed spreadsheet until two scenarios were arrived at. In the first, the condition where consumption is greater than production is met, while in the second, this requirement fails.

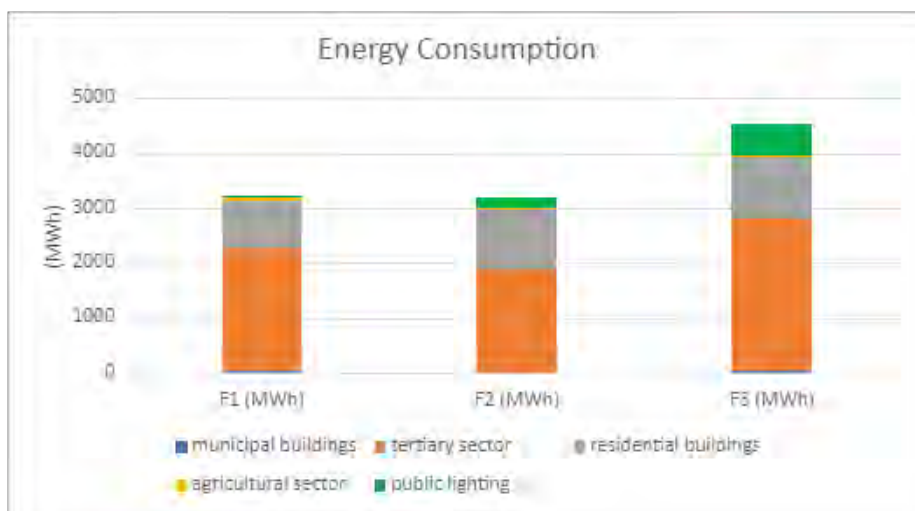
2.3.2. Simulation scenarios

In the first scenario supposed, it was assumed that 60 % of citizens, 80 % of the tertiary sector and 10 % of the agricultural sector participate in the Energy Community, in addition to the municipality through municipal utilities and street lighting (Table 5, Figure 5).

Table 5. Scenario 1: Energy consumption

	F1 (MWh)	F2 (MWh)	F3 (MWh)
municipal buildings	20	15	26
tertiary sector	2247	1866	2773
residential buildings	875	1101	1123
agricultural sector	40	25	33
public lighting	14	203	586
Total	3196	3209	4541

Figure 5. Scenario 1: Energy consumption

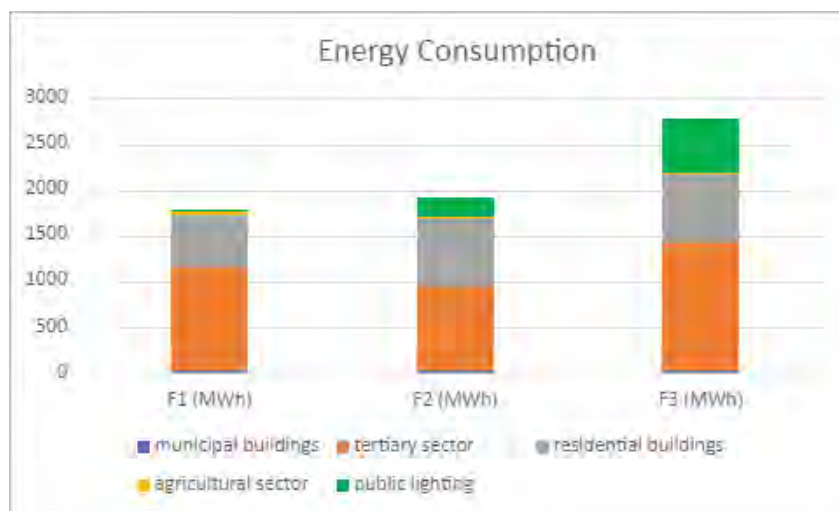


In this scenario the consumption is still higher than the production, so all the energy fed into the grid is shared. In the second scenario, participation in the REC by citizens and the tertiary sector is reduced to 40 % (Table 6, Figure 6).

Table 6. Scenario 2: Energy consumption

	F1 (MWh)	F2 (MWh)	F3 (MWh)
municipal buildings	20	15	26
tertiary sector	1123	933	1386
residential buildings	583	734	749
agricultural sector	40	25	33
public lighting	14	203	586
Total	2139	2133	3073

Figure 6. Scenario 2: Energy consumption



This time, the consumption is lower than energy production, so the shared energy is minor than energy fed into the grid. In the following table is shown the percentage of energy shared for every consumption range.

Table 7. Scenario 2: Shared Energy

	F1	F2	F3
% of shared energy	59	83	64

4. Results and discussions

Considering the feed-in of the energy produced by renewable energy plants and the subsequent sharing of it, the renewable energy community will receive both a subsidy from the "Gestore dei Servizi Energetici (GSE)" for the sale of the energy and an incentive for the shared energy.

In Italy, the sale of energy is regulated through the practice of "Ritiro Dedicato" [9], through which the producer is paid a certain price for each kWh fed into the grid. This price is set nationally through the energy market.

With reference to 29/03/2023, the energy sale price is set at 136.51 €/MWh.

The incentive calculated on shared energy was considered equal to 110 €/MWh (this value could be variable based on the power of the plants but it will be decided following the new Directives were to be published) [10].

In addition, according to the Implementing Decree [11] of Decree 199/2021 of the Italian Ministry of the Environment being published, there will be also a territorial correction factor for this incentive. In the case of Central Italy it is amounting to 4 €/MWh. Finally, this incentive is complemented by a rebate on shared energy of 8 €/MWh from ARERA, the Regulatory Authority for Energy Networks and Environment. Therefore, the following table estimates the REC gains in the first scenario (Table 6).

Table 8. Scenario 1: Gains from REC

Energy fed into the grid (MWh)	Shared Energy (MWh)	Energy sale's gain (€)	Shared Energy's incentive (€)
9649	9649	1317185	1196476

It is assumed that the revenue from the sale of energy to the grid belongs to the municipality, as the owner of the facilities.

Whereas, regarding the shared energy incentive, we assume a breakdown that takes into account consumption from different sectors.

Therefore, in the following table (Table 9), the consumption of each sector is compared to the total and a corresponding incentive contribution directly proportional to this ratio is calculated. This will represent a discount with reference to the annual energy expense.

Table 9. Scenario 1: division of shared energy's incentive

	% consumption to the total	Contribution from shared energy's incentive (€)	annual energy expense (€)	discount %
municipal buildings	1	6668	22021	30
tertiary sector	63	752721	2485701,6	30
residential buildings	28	338777	1118739	30
agricultural sector	1	10637	35125,3	30
public lighting	7	87673	289522	30

In the second scenario, having less shared energy, the corresponding incentive will be lower (Table 10).

Table 10. Scenario 1: Gains from REC

Energy fed into the grid (MWh)	Shared Energy (MWh)	Energy sale's gain (€)	Shared Energy's incentive (€)
9649	7345	1317180	802168

As a result, the incentive contribution of shared energy for each sector will also be lower (Table 11).

Table 11. Scenario 2: division of shared energy's incentive

	% consumption to the total	Division of shared energy's incentive (€)	annual energy expense (€)	discount %
municipal buildings	1	7564	22021	34
tertiary sector	53	426907	2485701,6	17
residential buildings	32	256184	1118739	22
agricultural sector	2	12065	35125,3	34
public lighting	12	99448	289522	34

Thus, the results show that the most convenient scenario is the former.

In fact, it not only results in greater gains from shared energy, but also in a more equitable distribution of benefits across sectors.

5. Conclusions

Renewable Energy Communities are a key tool in the energy transition pathway. In addition to environmental benefits such a self-consumption configuration can provide economic, energy and social benefits to its members, making them key players in decarbonization.

In the case study, a village in central Italy with a small population, located in a forested area, with an economy based mainly on agriculture, small industry and tourism was chosen. In this case, the choice of the renewable source plant was weighted with the goal of enhancing the surrounding area

and the resources it has to offer. Therefore, a wood biomass cogeneration plant was designed, as well as two photovoltaic and two run-of-river hydroelectric plants. Most of the production come from cogeneration plant, which produce electrical and thermal energy for the community. Since the energy consumption for the citizens is greater than the production from renewable plants, it guarantees the maximizing of shared energy.

Two scenario of consumption are supposed to evaluate the better configuration for the REC.

In the first, participation in the renewable energy community is such that the energy produced by renewable energy plants is fully shared.

In contrast, the second scenario involves lower consumption, such that there are lower percentages of energy shared in the three consumption bands than in the previous scenario.

Assuming that the proceeds from the sale of the energy are allocated to the municipality and assuming a split of the incentive among the REC members in proportion to their consumption, it turned out that the first scenario is the most convenient.

In fact, it provides for not only a greater gain due to the greater amount of energy shared, but also a more equitable division of economic benefits among the members of the renewable energy community.

In particular, this analysis shows the importance of involving a large number of residential and tertiary sector users, who are responsible for most of the village's consumption.

References

1. Unfccc, "ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT - Paris Agreement text English".
2. Unfccc, "Un Climate Change Conference UK 2021," 2021.
3. Athir. Nouicer, Leonardo. Meeus, and European University Institute. Robert Schuman Centre for Advanced Studies., The EU Clean Energy Package. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en
4. "DIRETTIVA (UE) 2019/ 944 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO - del 5 giugno 2019 - relativa a norme comuni per il mercato interno dell'energia elettrica e che modifica la direttiva 2012/ 27/ UE", [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/LSU/?uri=CELEX:32019L0944>
5. "DIRETTIVA (UE) 2018/ 2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO - dell'11 dicembre 2018 - sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili", [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32018L2001>
6. "Decreto-legge del 30/12/2019 n. 162," 2019. [Online]. Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/02/29/20A01353/sg>
7. "DECRETO-LEGISLATIVO-8-novembre-2021-n.-199," 2021, [Online]. Available: https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2021-11-30&atto.codiceRedazionale=21G00214&elenco30giorni=true
8. "PVGIS." https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP

9. "Ritiro Dedicato." <https://www.arera.it/it/elettricit /prezziminimi.htm>
10. GSE and Gestore dei Servizi Energetici, Nuove Regole Tecniche per accesso al servizio di valorizzazione e incentivazione energia elettrica condivisa. [Online]. Available: https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Servizi%20per%20te/AUTOCONSUMO/Gruppi%20di%20autoconsumatori%20e%20comunit %20di%20energia%20rinnovabile/Regole%20e%20procedure/Regole%20Tecniche%20per%20accesso%20al%20servizio%20di%20valorizzazione%20e%20incentivazione%20energia%20elettrica%20condivisa.pdf
11. "Attuazione della disciplina per la regolamentazione degli incentivi per la condivisione dell'energia di cui all'articolo 8 del decreto legislativo 8 novembre 2021, n.199." <https://www.mase.gov.it/bandi/consultazione-pubblica-attuazione-della-disciplina-la-regolamentazione-degli-incentivi-la>

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Approccio BIM multi-dominio per edifici a zero emissioni di carbonio. L'esempio di un complesso termale

Simone Forastiere ^{1,*}, Cristina Piselli ¹, Benedetta Pioppi ², Carla Balocco ¹, Fabio Scurpi ¹ e Anna Laura Pisello ²

¹ Dipartimento di Architettura (DIDA), Università degli Studi di Firenze, via della Mattonaia 8, 50121, Firenze, Italia

² Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, via G. Duranti 67, 06125, Perugia, Italia

* Autore di riferimento. E-Mail: simone.forastiere@unifi.it

Abstract: Sostenibilità ambientale degli edifici, efficienza energetica e necessità di abbandonare lo sfruttamento delle fonti fossili sono obiettivi primari a livello mondiale. La progettazione di nuovi edifici ad energia quasi zero è necessaria, ma non sufficiente se non si interviene anche sull'edilizia esistente. In questo studio si propone un approccio BIM (Building Information Modeling) integrato e multi-dominio per valutare l'efficienza energetica di edifici esistenti nell'ottica di massima riduzione dell'impatto energetico e ambientale. Il metodo proposto analizza e confronta interventi di riqualificazione energetica puntando contestualmente all'ottimizzazione di condizioni di comfort, risparmio energetico, abbattimento delle emissioni di CO_{2eq} e costo sociale del carbonio, analizzando anche il ritorno dell'investimento economico. Il metodo è applicato al caso studio di un complesso termale situato nel sud Italia. Le analisi termo-energetiche sono state condotte tramite simulazione dinamica validata con dati reali monitorati. Sono state proposte strategie di efficientamento di tipo passivo e attivo. I risultati mostrano che le strategie attive hanno un impatto non trascurabile sulle prestazioni multi-dominio dell'edificio solo se implementate correttamente con strategie passive. L'implementazione in ambiente BIM dei modelli energetici con le diverse proposte progettuali ha mostrato che alcune combinazioni, come il miglioramento dell'involucro edilizio e un nuovo impianto di climatizzazione, porterebbero a risultati ottimali sui livelli di comfort degli utenti. Solo con la produzione e l'uso di energia rinnovabile si può ottenere un risultato importante sul risparmio energetico e sulla diminuzione dell'impronta di carbonio dell'intero sistema e quindi garantire la sostenibilità ambientale ed energetica dell'efficientamento perseguito.

Keywords: Efficienza energetica degli edifici; approccio multi-dominio; BIM; simulazione energetica; impronta di carbonio; comfort.

1. Introduzione

Più di un terzo dell'energia prodotta annualmente viene destinata al funzionamento degli edifici, e il processo edilizio è responsabile di circa il 36% delle emissioni globali di CO₂. Nell'Unione Europea (UE) gli edifici rappresentano circa il 40% del consumo totale di energia e il 55% se pensiamo alla sola energia elettrica [1]. I paesi dell'UE, tuttavia, si differenziano molto sul consumo energetico, infatti, i paesi meridionali hanno un consumo che va da 60 a 90 kWh/m², mentre i paesi settentrionali e occidentali hanno un consumo che va dai 175 ai 235 kWh/m² [2].

Entro il 2080, a causa del cambiamento climatico è previsto un aumento dei consumi energetici legati al raffrescamento degli edifici. Infatti, come dimostrato in molti studi scientifici, il cambiamento climatico causerà un aumento dei consumi energetici legati al raffreddamento anche in paesi in fasce climatiche più fredde [3]. Le attuali ricerche scientifiche hanno evidenziato l'importanza di una previsione affidabile sull'uso di energia negli edifici, sia esistenti che di nuova edificazione, per migliorarne le prestazioni energetiche e l'impatto ambientale [4] e si è dimostrato che questo è ottenibile mediante la modellazione energetica degli edifici (BEM) [5].

Le diverse strategie di retrofitting per il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici possono essere suddivise in soluzioni attive e passive: le prime riguardano la componente impiantistica; mentre le soluzioni passive mirano a fornire componenti architettoniche più efficienti dal punto di vista energetico (quali involucri e tetti) per ridurre la dipendenza da soluzioni attive [6]. Anche il costo delle diverse soluzioni è differente, infatti, si è dimostrato che le strategie passive avevano un basso costo di investimento [7-8]. Molte linee guida raccomandano l'uso di soluzioni passive per la progettazione verde e sostenibile [9]. Tuttavia, queste hanno applicazioni molto limitate in quanto non sempre le condizioni climatiche permettono di ottimizzare energeticamente l'edificio con soluzioni passive ponendo, a volte, limiti sulla loro applicabilità [10-11]. Al contempo le soluzioni attive necessitano, molte volte, di costi di investimento molto elevati rendendo antieconomica l'opera. Sulla fattibilità economica delle opere di retrofit con soluzioni attive uno studio di Mehdi Tavakolan et al. [12] ha esaminato tre diversi scenari con riferimento alle future politiche di tariffazione dell'energia per valutarne l'effetto sui tempi di ritorno dell'investimento. Anche lo studio condotto da Jan W. Bleyl et al. [13] ha mostrato le implicazioni economiche e finanziarie per la ristrutturazione di un edificio con destinazione d'uso a uffici secondo gli standard della Passive House.

La ricerca di metodi alternativi per fronteggiare il cambiamento climatico e ridurre l'impatto ambientale degli edifici è in crescita, ad oggi, alcune soluzioni di carattere gestionale restano fondamentali per aumentarne l'efficienza energetica, infatti, misure come l'impostazione di temperature minori del sistema di acqua calda sanitaria, la sostituzione di apparecchi elettrici, l'installazione di impianti per la produzione di energia rinnovabile, migliorare la resistenza termica delle pareti vetrate, la sostituzione di impianti di climatizzazione con apparecchiature più efficienti,

ecc. sono comunque soluzioni da mettere in pratica [14].

Uno studio condotto nel Regno Unito ha mostrato di poter ridurre il fabbisogno energetico del 35% con il solo miglioramento dell'isolamento dell'involucro edilizio. Inoltre, sostituendo l'impianto di condizionamento dell'aria con tecnologie maggiormente performanti dal punto di vista energetico, ma sostituendo anche porte e finestre con altre di nuova generazione si ridurrebbe il fabbisogno energetico fino al 50% [15].

La progettazione di strategie di miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici se non legata ad una valutazione dell'impatto ambientale che queste comportano non può essere pienamente efficace. Nel 1992 la ricerca sulle metodologie e le pratiche per lo sviluppo sostenibile hanno condotto ad un metodo sistematico per la quantificazione dell'impatto ambientale dei singoli prodotti durante il loro ciclo di vita [16]. Con questo metodo è anche possibile valutare l'impronta di carbonio dell'edificio.

Nel settore dell'edilizia la sostenibilità ambientale nel processo produttivo dei materiali non è sufficiente, infatti, questa dovrebbe essere perseguita durante l'intero processo con particolare attenzione alla fase di gestione. La fase d'uso di un edificio, data la sua vita utile, svolge un ruolo chiave in termini di impatto ambientale. Dunque, il fabbisogno energetico dovrebbe essere ridotto al minimo e garantito mediante l'uso di energia prodotta da fonti rinnovabili [17].

La Commissione Europea, data la grande quantità di edifici esistenti classificati come molto energivori, si è posta l'obiettivo di ridurre le emissioni di CO₂ del 90% per il settore dell'edilizia entro il 2050. Per questo motivo, la maggior parte delle ricerche scientifiche si concentrano sulla valutazione dell'impronta di carbonio degli edifici. Tale studio prevede anche la valutazione dell'energia incorporata, dell'energia operativa e dell'energia consumata durante la fase di demolizione di un edificio [18].

In questo contesto, l'obiettivo della nostra ricerca è proporre un approccio multi-dominio quantitativo basato su Building Information Modeling (BIM) per valutare soluzioni di retrofit degli edifici ottimizzando la combinazione degli effetti su comfort, risparmio energetico e sostenibilità ambientale, ma valutandone i tempi di ritorno degli investimenti economici. Tra i diversi strumenti parametrici il BIM è ampiamente accettato e raccomandato [19] poiché fornisce una progettazione integrata che ne controlla le fasi e i processi aiutando ad affrontare i principali problemi [20]. Il metodo proposto è stato testato su una particolare tipologia di edificio, ossia un edificio termale situato nel Sud Italia, mai affrontato in letteratura. Nel dettaglio, il raggiungimento di elevate prestazioni in termini di comfort e miglioramento energetico è legato ad un'analisi dell'impronta di carbonio e della sostenibilità economica dell'investimento. L'obiettivo è ottimizzare non solo il comportamento termo-energetico, ma anche la sostenibilità ambientale, sociale ed economica.

2. Metodologia

La metodologia proposta consente di valutare riqualificazioni energetiche su edifici esistenti mirando al risparmio energetico, al miglioramento del comfort e alla riduzione dell'impatto ambientale, valutandone, al contempo, i costi dell'investimento.

In particolare, l'uso dell'analisi energetica con modellazione in regime dinamico consente di

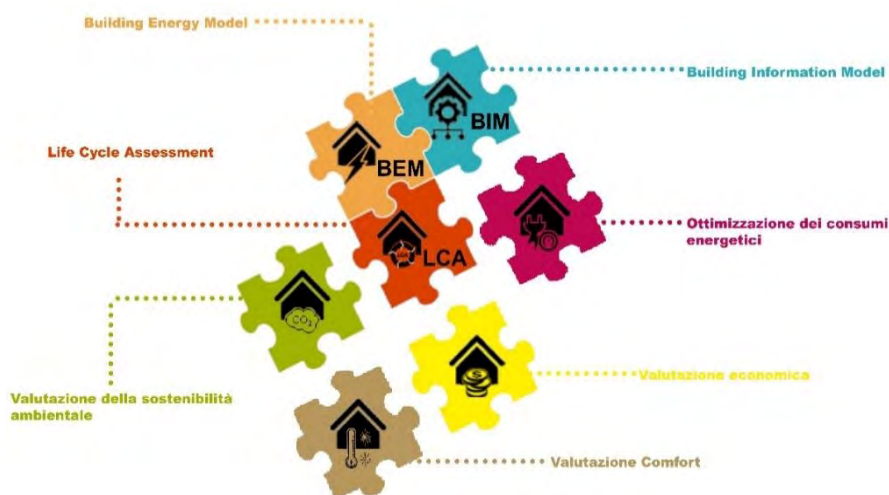
ottenere una conoscenza adeguata sui consumi energetici di un edificio o di un gruppo di edifici aiutando a identificare e quantificare i costi-benefici ottenuti dalle misure messe in atto. Con una corretta analisi energetica dell'edificio è possibile identificare le criticità e le potenziali soluzioni di risparmio energetico. La metodologia studiata nella fase di modellazione energetica segue le indicazioni della norma europea UNI CEI EN 16247-1:2012 [21] che stabilisce i requisiti e fornisce orientamenti per gli audit energetici.

In sintesi, il metodo proposto comprende una diagnosi energetica del sistema esistente edificio-impianto con modellazione energetica in regime dinamico per individuarne le criticità per poi implementare il modello con le strategie di retrofit proposte tramite implementazione BIM e valutarne i miglioramenti ottenibili in termini di multi-dominio, ma tenendo conto dei loro costi.

L'approccio BIM, contestualmente alla diagnosi energetica dell'edificio, consente di avere una tavola sinottica virtuale del sistema edificio-impianto come base fondamentale per i diversi scenari di retrofit. Con l'ausilio dell'interoperabilità del modello BIM è stato possibile progettare soluzioni sostenibili controllando contemporaneamente i seguenti parametri (Figura 1):

- miglioramento dell'efficienza energetica;
- miglioramento del comfort termo-igrometrico;
- valutazione dell'impronta di carbonio con metodologia LCA e riduzione delle emissioni di CO₂eq;
- tempi di ritorno dell'investimento economico.

Figura 1. Schema di flusso del metodo proposto.




2.1. Campagna sperimentale

2.1.1. Monitoraggio microclimatico dell'edificio

Il monitoraggio della temperatura dell'aria interna e l'umidità relativa sono stati necessari alla valutazione delle condizioni di comfort termico oltre che alla calibrazione e validazione del modello energetico dell'edificio. A tal fine, sono stati installati due sensori "Tinytag Plus 2" in due diverse zone termiche per diversi mesi. La Tabella 1 mostra le caratteristiche principali dei sensori. La descrizione della campagna di monitoraggio sperimentale è riportata nella sezione 2.5.

Tabella 1. Caratteristiche tecniche dei sensori “Tinytag Plus 2”.


Specifiche tecniche				
Temperatura		Umidità Relativa		
Range di lettura	Da -25 °C a +85 °C	Range di lettura	Da 0% a 100%	
Tipologia sensore	10K NTC (Sensore interno)	Tipologia di sensore	Capacitivo (Sensore esterno)	
Risoluzione di lettura	0.01 °C	Risoluzione di lettura	0.3%	
Accuratezza	±0.5 °C	Accuratezza	±3 % a 25 °C	

2.1.2. Termografie

La tecnologia delle termografie a infrarossi permette di diagnosticare irregolarità dell’isolamento termico o danneggiamenti delle superfici opache, ponti termici, infiltrazioni e fonti di umidità, quindi, grazie a tale strumento è possibile progettare strategie di intervento che portano a migliorare l’efficienza energetica degli edifici [22-23].

Durante la campagna di monitoraggio è stata condotta un’analisi sull’involucro edilizio mediante l’ausilio di termografie con termocamera "FLIR ONE PRO". Le sue caratteristiche tecniche sono riassunte nella Tabella 2.

Tabella 2. Caratteristiche tecniche della termocamera “FLIR ONE PRO”.

Specifiche tecniche		
Risoluzione	1440 x 1080	
Risoluzione termica	160 x 120	
Intervalli di temperature	Da -20 °C a -120 °C e da 0 °C a 400 °C	
Accuratezza	±3°C o ±5%	
Temperatura operativa	0 °C a 35 °C	
Frequenza dei fotogrammi	8.7 Hz	
HFOV/VFOV	50° ±1° / 43°±1°	

2.2. Sviluppo e validazione del modello energetico

La validazione dei modelli energetici è risultata necessaria ai fini di verifica del comportamento effettivo dell'edificio esistente e per la corretta valutazione degli effetti degli interventi di retrofit proposti. La modellazione energetica dell’edificio (BEM) è stata condotta mediante il software di simulazione EnergyPlus con interfaccia grafica DesignBuilder. Per condurre delle simulazioni energetiche su base oraria e sub-oraria è stata usata la simulazione in regime dinamico.

Il confronto dei valori di temperatura e umidità relativa registrati durante la campagna di monitoraggio e i consumi energetici ottenuti dalle letture dei contatori di energia elettrica e gas naturale, hanno consentito la calibrazione del modello BEM. Tale processo ha quindi permesso di calcolare l’errore medio di polarizzazione (MBE) e l’errore quadratico medio (RMSE). La calibrazione e validazione del modello è stata ottenuta facendo riferimento alla procedura definita dalla linea guida

ASHRAE 14-2004 [24]. Definendo M i dati monitorati, S i risultati della simulazione e N il numero di dati, l'indice MBE è definito nell'eq. (1):

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)}{N} \quad (1)$$

L' 'MBE permette di valutare correttamente la differenza media tra i valori acquisiti su campo mediante registrazioni e monitoraggi e i valori simulati all'interno del modello energetico. Tuttavia, i valori positivi compensano quelli negativi (il cosiddetto effetto di cancellazione). Pertanto, è necessario valutare un'ulteriore misura dell'errore del modello, come nell'eq. (2):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{N}} \quad (2)$$

L'RMSE misura la variabilità dei dati. Il valore dell'RMSE permette di superare la debolezza dell'MBE in quanto considera i valori assoluti di errore [25]. In base ai criteri di convalida specificati nelle linee guida ASHRAE 14-2004 [24], i valori di tolleranza scelti per la calibrazione della temperatura dell'aria interna corrispondevano a 0.5 °C per MBE e a 1 °C per RMSE. La calibrazione dei consumi energetici avvenuta secondo le linee guida ASHRAE 14-2004 [24] e come indicato nello studio condotto in [26] e in [27] si è considerato calibrato il modello energetico quando $RMSE < 30\%$ e $MBE < 10\%$. I risultati del processo di calibrazione del modello sono riassunti nella sezione 3.2.

2.3. Analisi dell'impronta di carbonio

Il computo dell'impronta di carbonio e del costo sociale del carbonio per valutare l'impatto ambientale dell'edificio e delle strategie di intervento proposte è stato sviluppato con metodologia Life Cycle Assessment (LCA). Tale metodologia ha permesso di calcolare le emissioni di gas a effetto serra (GHG) ($\text{KgCO}_{2\text{eq}}$) in riferimento a [28]. Il calcolo dell'impronta di carbonio è stato condotto per unità di superficie (m^2) tenendo conto che la vita utile dell'edificio è di 50 anni. Le emissioni di GHG sono state valutate in base al paniere di gas serra considerati nel Protocollo di Kyoto e in base al loro potenziale effetto sul riscaldamento globale (GWP) per determinare le emissioni totali di gas a effetto serra in termini di $\text{CO}_{2\text{eq}}$ [29]. La Figura 2 mostra le fasi del ciclo vita considerate nello studio.

Figura 2. Fasi del ciclo di vita e condizioni dei confini.



La determinazione dei valori considerati per la valutazione dell'impatto ambientale è stata effettuata con l'ausilio del software OneClick, considerando i database Gabi ed Ecoinvent per vari

scenari di retrofit dell'edificio. Il database Gabi fornisce complete informazioni sul ciclo di vita dei materiali. L'insieme di dati Ecoinvent consente l'accesso a misure unitarie per costruire gli inventari "cradle to gate" e, inoltre, contiene informazioni legate alla fornitura di energia, all'estrazione di beni, ai servizi di trasporto.

Il programma fa riferimento a dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD) secondo gli standard ISO 14040 e EN15804. Pertanto, la valutazione dell'impronta di carbonio del caso studio (CO_{2eq}) ha richiesto la stima dei materiali da costruzione e delle fasi di realizzazione, nonché il numero di ore e il consumo di carburante nelle fasi di trasporto, il consumo di energia e di acqua durante la fase operativa dell'edificio. Tali stime sono state elaborate per lo stato di fatto e per ogni scenario proposto.

Lo studio ha valutato il carbonio incorporato e il costo sociale del carbonio. Quest'ultimo esprime il peso ambientale totale di CO_2 convertito in euro. Con tale valore si monetizza l'impatto che comporta una tonnellata di emissioni di CO_2 . Il costo sociale del carbonio (SCC) è un concetto centrale per comprendere e attuare le politiche sul cambiamento climatico. Questo termine rappresenta il costo economico causato da una tonnellata di emissioni di biossido di carbonio o di un suo equivalente [30].

2.4. Valutazione economica

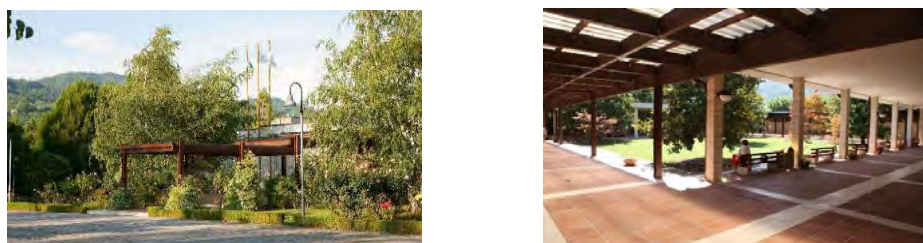
La metodologia proposta prevede la valutazione della fattibilità economica delle opere legata ai benefici che queste comportano in termini di comfort, efficienza energetica e impatto ambientale. È stato pertanto necessario valutare i costi di realizzazione e i flussi economici attesi post-operam.

La teoria del valore attuale netto (VAN) consente di valutare il valore economico e il tempo necessario per il ritorno dell'investimento [31]. A tal fine, il tempo di ritorno dell'investimento è stato calcolato per valutare la fattibilità delle opere in progetto in base al tempo necessario per il recupero dei costi iniziali e, successivamente, per ottenere gli utili di cassa. Tale procedura necessita di valutare i flussi finanziari al tempo zero e al momento dell'erogazione dell'investimento. Pertanto, tenendo conto delle statistiche riportate dalla Banca d'Italia il calcolo è stato condotto con un tasso di interesse pari al 3%.

2.5. Caso di studio

Il caso di studio è un edificio termale denominato "Terme Lucane" e localizzato a Latronico, Italia, ad una latitudine di $40^{\circ}05'20''$ N e longitudine di $16^{\circ}00'34''$ E. La città rientra nella zona climatica E, secondo la classificazione introdotta dal DPR 412/93 [32] e dalla legge 10/91 [33]. Tale zona comprende le aree caratterizzate da Gradi Giorno (GG) tra il 2101 e il 3000. Il valore per Latronico è 2535 GG quindi l'edificio è localizzato in una zona climatica caratterizzata da inverni freddi ed estati miti. L'edificio si sviluppa in diversi corpi di fabbrica uniti da un cortile centrale, per una superficie totale di circa 6500 m^2 di cui 4670 m^2 riscaldati e 1830 m^2 non riscaldati con un volume lordo climatizzato di 14010 m^3 , l'area finestrata è pari a 460 m^2 . La struttura è ospitata all'interno di un parco alberato di circa 7 ettari. Dalla sua edificazione avvenuta tra gli anni '80 e '90 l'edificio, mostrato in Figura 3, non ha mai avuto manutenzione di tipo straordinaria.

Figura 3. (a) Ingresso all'edificio termale; (b) Vista interna del cortile principale dell'edificio.



La struttura è suddivisa in cinque padiglioni: reception, centro diagnostico, padiglione inalazione, padiglione idroponico e padiglione balneoterapia. Un edificio separato ospita gli impianti meccanici.

La struttura portante è realizzata in cemento armato con fondazioni a "T rovescia", mentre la struttura in elevazione è composta da pilastri e travi a spessore. Il tetto piano è realizzato con una lastra del tipo "biblock" con membrana impermeabilizzante (10 mm), un pannello isolante in lana di roccia da 50 mm ($\lambda = 0.033$ W/m K) e una barriera al vapore. La finitura del tetto piano è realizzata con una lastra di cemento in graniglia spazzolata.

L'involucro opaco è realizzato con la tipica parete a "camera vuota" che vede mattoni pieni esternamente e forati a due teste internamente. Inoltre, la finitura delle pareti esterne è realizzata con un rivestimento in lastre di travertino. Solo in prossimità della struttura in elevazione è presente all'interno della parete un pannello di lana di roccia di 30 mm ($\lambda = 0.034$ W/m K).

La pavimentazione è realizzata su massetto isolante in miscela di pomice e cemento con uno spessore superiore a 50 mm (conformemente alla circolare 1769 del 30 aprile 1966 del Ministero dei Lavori pubblici (LL.PP.)). In particolare, i rivestimenti delle unità curative sono protetti da uno strato impermeabilizzante.

La struttura è caratterizzata da finestre a nastro con telaio in PVC e doppio vetro riflettente (3-16-3) con apertura a vasistas tra 45 e 30 gradi.

La tabella 3 riassume le principali caratteristiche tecniche dell'involucro edilizio.

L'impianto termico è composto da una caldaia a gas naturale per soddisfare il riscaldamento dell'acqua prevista a 70 °C e per il riscaldamento degli ambienti. I terminali per il riscaldamento degli ambienti sono radiatori in ghisa, ma sono localizzati nei soli padiglioni balneoterapia e inalazioni. Reception, centro diagnostico e padiglione idroponico non hanno un sistema di riscaldamento.

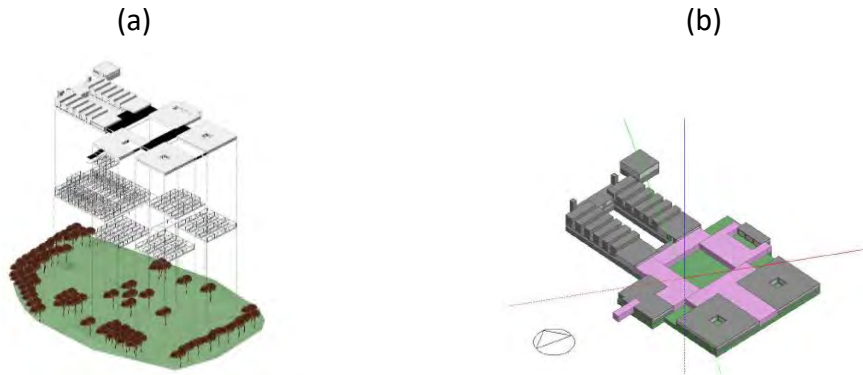
Tabella 3. Caratteristiche tecniche dell'involucro edilizio.

Componente	Stratigrafia	Trasmittanza (U) [W/m ² K]	Fattore solare (g _{gl}) [-]
Parete esterna	Travertino 3mm Mattoni pieni 120mm Camera d'aria 40mm Mattoni forati 240mm Intonaco 3mm	1.020	--
Copertura	Lastre in calcestruzzo 5mm EPDM 10mm Lana di roccia 50mm Calcestruzzo 240mm Intonaco 3mm	0.463	--

Finestra	Telaio in PVC Vetro 3mm Aria 16mm Vetro 3mm	1.960	0.691
----------	--	-------	-------

La Figura 4 mostra i modelli BIM e BEM del caso studio utilizzati per le analisi.

Figura 4. (a) Spaccato assonometrico modello BIM; (b) Vista assonometrica del modello BEM.



I due sensori "Tinytag Plus 2" sono stati settati per condurre misurazioni ad intervalli di 30 minuti e sono stati posizionati uno nella reception e l'altro all'interno del padiglione inalazioni.

Il sensore nella zona reception ha acquisito dati dal 20 ottobre 2021 al 7 aprile 2022, mentre nel padiglione inalazioni si è registrato dal 20 ottobre 2021 al 10 gennaio 2022. I diversi periodi di monitoraggio sono dovuti alla diversa periodicità di funzionamento dei padiglioni monitorati. Infatti, il padiglione inalazioni chiude il 31 dicembre e il padiglione reception è operativo tutto l'anno in quanto ospita gli uffici amministrativi della struttura. Inoltre, si è ritenuto monitorare due padiglioni differenti perché le attività svolte al loro interno comportano lo sviluppo di condizioni microclimatiche dissimili. Il sensore situato all'interno del padiglione inalazioni ha monitorato sia durante i periodi di apertura che di chiusura della struttura, quindi sia con impianto di riscaldamento acceso che spento.

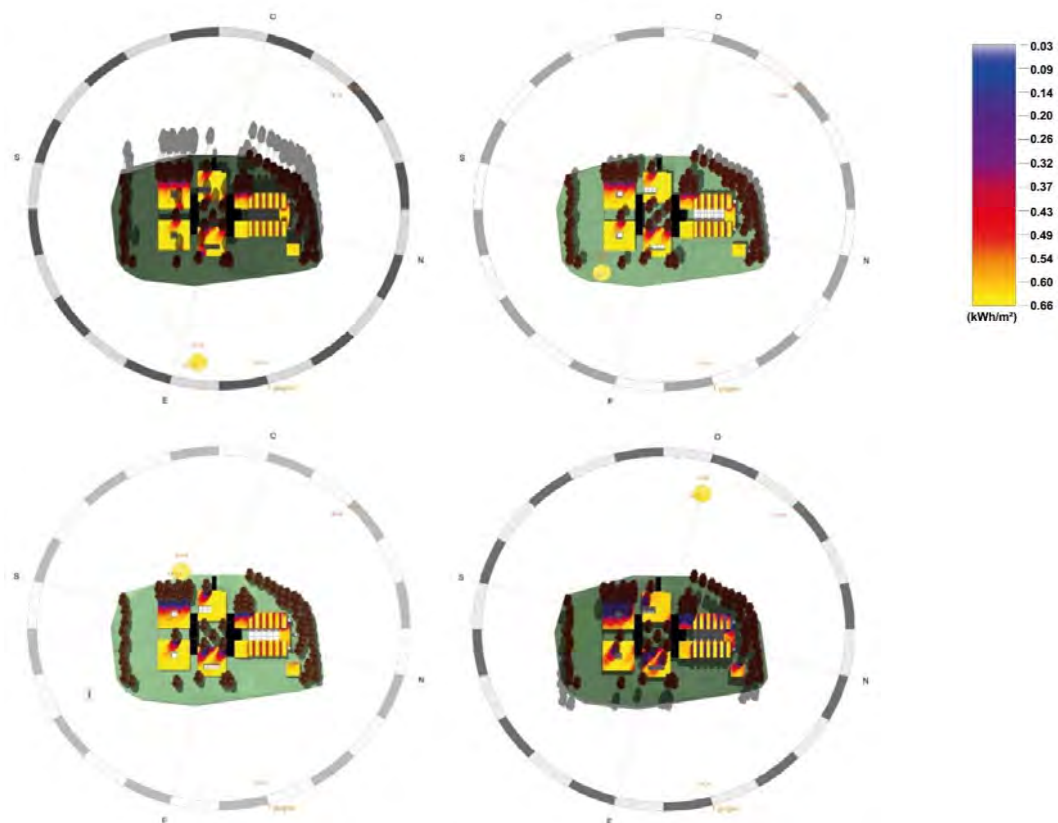
L'edificio è generalmente aperto da maggio a novembre, ma è stato possibile condurre un'analisi anche durante il periodo invernale, poiché durante il 2021 la struttura ha continuato ad essere operativa fino al 31 dicembre.

2.5.1. Scenari di retrofit

L'approccio BIM proposto ha permesso di identificare e analizzare nove scenari di retrofit, descritti come segue e riassunti nella Tabella 4:

1. Scenario 1 (S1): retrofit dell'involucro opaco (strategia passiva): consiste nell'implementazione di isolamento termico esterno. Le pareti esterne hanno attualmente trasmittanza termica di $1.020 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Secondo l'appendice B del DM 26/06/2015 [34] il valore U delle pareti verticali in zona climatica E per i retrofit deve essere $0.23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Pertanto, si è previsto un pannello in EPS con grafite riciclata di conducibilità 0.031 W/m K e uno spessore di 14 cm come sostituto alla finitura in lastre di travertino. Il valore di U ottenibile con tale intervento è di $0.181 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ in pieno rispetto alle indicazioni suggerite in [34].

2. Scenario 2 (S2): finestre e porte di nuova generazione (strategia passiva): prevede la sostituzione delle finestre esistenti con nuove più efficienti dal punto di vista energetico. L'intervento ha previsto finestre in PVC con triplo vetro con camere contenente gas argon. La trasmittanza termica delle finestre passerebbe da $1.960 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ a $0.804 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, quindi rispettante i requisiti per i nuovi edifici e retrofit pari a un massimo di $1.40 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ nella zona climatica E [34].
3. Scenario 3 (S3): nuovo impianto HVAC per il condizionamento degli ambienti (strategia attiva): questo scenario si propone di migliorare le capacità e l'efficienza del sistema HVAC per fornire benefici in termini di risparmio energetico e comfort termico. Il sistema proposto è un sistema tutt'aria con una unità di trattamento aria (UTA) e terminali di diffusione situati nelle zone condizionate. Le caratteristiche dell'unità UTA sono: $5000 \text{ m}^3/\text{h}$ di portata d'aria; 81% di efficienza di recupero; COP 4.15 e EER 3.90; 88 kW di capacità di riscaldamento totale; 57 kW di capacità di raffreddamento totale.
4. Scenario 4 (S4): impianto fotovoltaico (strategia per le energie rinnovabili): in vista della transizione verde è stato aggiunto un sistema fotovoltaico. Il posizionamento dei pannelli fotovoltaici e il loro dimensionamento sono stati possibili studiando l'irraggiamento in copertura mediante tecnologia BIM (Figura 5). Nel caso studio sono state individuate zone idonee per il posizionamento di tali pannelli per un totale di 280 pannelli di dimensione $1.70 \text{ m} \times 1.10 \text{ m}$ con potenza di picco del singolo pannello di 200 W e quindi 56 kWp totali.
5. Scenario 5 (S5): impianto solare termico (strategia delle energie rinnovabili): data la destinazione d'uso dell'edificio, il consumo di gas naturale per il riscaldamento dell'acqua usata per diversi trattamenti è il più alto consumo di energia. Infatti, si richiede una temperatura dell'acqua a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ costantemente garantita. L'impianto solare termico progettato può fare affidamento ad una temperatura iniziale dell'acqua dalle sorgenti termali costantemente a $23 \text{ }^\circ\text{C}$. A tal fine, questo scenario propone la realizzazione di un sistema ibrido con collettori solari supportati da una caldaia a gas naturale per garantire costantemente la temperatura richiesta. L'effettivo funzionamento della struttura concentrato soprattutto nei mesi estivi permette di ottimizzare le prestazioni di questo sistema in quanto il sistema solare termico è sempre in grado di coprire il fabbisogno energetico totale per il riscaldamento dell'acqua grazie alla maggiore disponibilità di radiazione solare durante l'estate. Il sistema solare termico è posizionato sopra l'edificio che ospita il locale tecnico. Per il caso studio in esame sono stati previsti sei impianti con capacità 300lt per un totale di 1800 lt.
6. Scenario 6 (S6): retrofit passivo: combinazione di S1 e S2.
7. Scenario 7 (S7): retrofit passivo e attivo: combinazione di S1, S2 e S3.
8. Scenario 8 (S8): retrofit delle energie rinnovabili: combinazione di S4 e S5.
9. Scenario 9 (S9): retrofit di energia passiva, attiva e rinnovabile: combinazione di tutte le strategie di retrofit, i.e. S1-S5.

Figura 5. Irraggiamento solare in copertura alle 7:00, 10:00, 13:00 e 16:00 del 1 giugno.

Gli scenari di retrofit proposti coinvolgono strategie di efficienza energetica comunemente applicate negli edifici e sono adattabili, reversibili, facilmente installabili e con costi di manutenzione ridotti. Di conseguenza, possono essere adatti per qualsiasi edificio simile.

Tabella 4. Tabella riassuntiva degli scenari di retrofit proposti.

ID	Descrizione	Caratteristiche	Strategia
S1	Retrofit involucro opaco	Involucro edilizio con pannello in EPS con grafite riciclata $\lambda = 0.031 \text{ W/m K}$ e spessore 14 cm	Passiva
S2	Sostituzione di finestre e porte	Sostituzione degli infissi e miglioramento trasmittanza termica da $1.960 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ a $0.804 \text{ W/m}^2 \text{ K}$	Passiva
S3	Nuovo Sistema HVAC per condizionamento dell'aria	Aggiunta di un impianto HVAC per il condizionamento dell'aria con sistema di controllo dell'umidità	Attiva
S4	Impianto fotovoltaico	Impianto fotovoltaico compost da 280 pannelli per un totale di 56 kWp	Energia rinnovabile
S5	Impianto solare termico	Sistema ibrido con collettori solari a support della caldaia a gas naturale per la produzione di acqua calda	Energia rinnovabile
S6	S1 + S2	-	Passiva
S7	S1 + S2 + S3	-	Passiva + Attiva
S8	S4 + S5	-	Energia rinnovabile
S9	S1 + S2 + S3 + S4 + S5	-	Passiva + Attiva + Energia rinnovabile

3. Risultati e discussione

L'obiettivo della metodologia esposta è quello di identificare strategie di retrofit energetico o combinazioni di esse per ottenere comfort termico adeguato, risparmio energetico, riduzione delle emissioni di CO_{2eq} durante l'intero ciclo di vita, riduzione del costo sociale del carbonio valutandone i tempi di ritorno degli investimenti economici. Tale sezione illustra i risultati ottenuti per ogni scenario.

3.1. Diagnosi energetica dell'edificio esistente

Questa sezione riassume la diagnosi dell'edificio alle condizioni esistenti sulla base dei risultati ottenuti dal monitoraggio microclimatico e dalle termografie a infrarossi. La diagnosi ha mostrato prestazioni termo-energetiche basse legate a quattro principali criticità:

- inidoneo isolamento termico dell'involucro edilizio;
- ponti termici causati dalla scorretta installazione degli infissi;
- impianto di riscaldamento non correttamente dimensionato;
- assenza di un impianto di raffreddamento.

Inoltre, il monitoraggio microclimatico ha mostrato livelli di discomfort termico per la maggior parte del tempo sia in inverno, nonostante l'accensione dell'impianto di riscaldamento, che in estate.

Le diverse temperature nelle immagini termiche nella Figura 6 mostrano imperfezioni nel ponte termico riguardanti la giunzione finestra/parete influenzando notevolmente sulle prestazioni energetiche dell'edificio. Inoltre, tali imperfezioni gravano sui livelli di consumo e di comfort interno.

Figura 6. Termografie di alcuni elementi dell'involucro (23/10/2021 alle 18:00).



Le aree luminose intorno alle finestre indicano temperature superficiali più calde rispetto alle zone circostanti suggerendo la presenza di dispersioni termiche.

3.2. Calibrazione del modello energetico

Il monitoraggio delle temperature interne e i consumi reali registrati nell'anno 2021 hanno permesso la calibrazione del modello energetico facendo ottenere previsioni realistiche del comportamento passivo dell'energia termica e dei consumi. A tal fine, è stato necessario un processo

iterativo per adattare il modello BEM alle prestazioni monitorate, sulla base del calcolo degli indici di calibrazione, MBE e RMSE, modificandone i parametri occupazionali e le infiltrazioni. Il processo di calibrazione delle temperature ha portato all'ottenimento di indici MBE e RMSE (Tabella 5) inclusi nell'intervallo di tolleranza secondo la norma di riferimento [24].

Tabella 5. Valori MBE e RMSE prima e dopo il processo di calibrazione.

		MBE [°C]	RMSE [°C]
Modello iniziale	Padiglione inalazioni	-5.21	47.46
	Reception	-1.45	18.87
Modello calibrato	Padiglione inalazioni	0.07	0.61
	Reception	-0.04	0.53
Valori di tolleranza		±0.50	1.00

I consumi energetici dell'anno 2021 hanno mostrato un consumo pari a 72548 kWh di energia elettrica e 31382 Stm³ di gas metano. In primo luogo, il modello energetico restituiva un consumo di 74199 kWh/anno di energia elettrica, con un -2.48% MBE e 18% RMSE e 31279 Stm³/anno di gas naturale, con uno 0.02% di MBE e -0.01% RMSE

Nonostante il valore accettabile per quelli che sono i consumi di energia elettrica annuale, un'analisi accurata sui valori mensili, ha mostrato che l'errore per alcuni mesi era fuori dal range consentito. Per il consumo di gas naturale i valori simulati erano significativamente al di fuori dei limiti di errore consentito e questo era probabilmente dovuto alla non corretta valutazione delle infiltrazioni invernali tenute in considerazione nella modellazione energetica iniziale. Pertanto, il modello è stato calibrato per ottenere consumi energetici vicini ai reali. In particolare, i dati di input il cui aggiornamento ha permesso la calibratura sono stati:

- potenza delle apparecchiature elettroniche;
- schede occupazionali.

La Tabella 6 mostra i valori degli indici MBE E RMSE per il modello calibrato.

Tabella 6. Confronto tra i valori misurati e simulati dei consumi di gas naturale e elettricità.

Mese	Consumi di gas naturale				Consumi elettrici			
	Misurato [Stm ³]	Simulato [Stm ³]	MBE [%]	RMSE [%]	Misurato [kWh]	Simulato [kWh]	MBE [%]	RMSE [%]
Gennaio	0	0	-	-	2526	2570	-	-
Febbraio	0	0	-	-	2168	2283	-	-
Marzo	0	0	-	-	2311	2227	-	-
Aprile	0	0	-	-	2515	2514	-	-
Maggio	56	64	-	-	3388	3447	-	-
Giugno	686	705	-	-	4924	5003	-	-
Luglio	6382	6192	-	-	8568	8943	-	-
Agosto	6382	6309	-	-	9749	10453	-	-
Settembre	6177	6106	-	-	10322	10729	-	-
Ottobre	6655	6519	-	-	9921	9877	-	-
Novembre	1399	1511	-	-	7701	7891	-	-
Dicembre	3645	3874	-	-	8455	8264	-	-
Totale	31382	31279	0.02%	-0.01%	72548	74199	2.48%	18.00%

3.3. Analisi degli scenari di retrofit

Il modello BEM validato è stato utilizzato per analizzare gli scenari di retrofit proposti. In questa sezione vengono presentati e discussi i principali risultati ottenuti per ogni singolo scenario e, inoltre, vengono confrontati i risultati delle prestazioni multi-dominio studiate.

3.3.1. Comfort negli scenari di retrofit

L'analisi del comfort termico è stata condotta con la valutazione dei valori del Voto Medio Previsto (PMV) e della Percentuale Prevista di Insoddisfatti (PPD) su base oraria sia per la stagione estiva (dal 21 giugno al 21 settembre) che per quella invernale (dal 21 dicembre al 21 marzo).

Gli indici PMV e PPD studiati nella teoria di Fanger vengono usati per valutare il comfort interno in "ambienti moderati" [35]. Gli indici sono stati calcolati in riferimento a [36].

La tabella 7 riporta i valori medi stagionali degli indici e ne permette un confronto con quelli della condizione esistente così da valutare correttamente il miglioramento che ogni scenario proposto apporta in termini di comfort interno. I valori PPD sono da considerarsi maggiormente rappresentativi poiché i valori PMV sommano valori positivi e negativi andando ad annullare tra loro rischiando di dare un risultato non del tutto veritiero.

Lo studio del comfort interno è stato eseguito per gli scenari significativi dal punto di vista di miglioramenti sulle condizioni di comfort escludendo quindi gli scenari S4, S5 e S8.

Tabella 7. Confronto dei valori di PMV e PPD ante e post interventi (è evidenziato lo scenario con le performance migliori).

Scenario	PMV estivo [-]	PPD estivo [%]	PMV invernale [-]	PPD invernale [%]
Condizione esistente	-0.27	14.31	-1.96	71.27
S1	-0.24	13.49	-1.31	46.71
S2	-0.26	14.16	-1.43	51.12
S3	-0.11	8.59	-1.20	40.76
S6	-0.25	13.57	-1.32	46.73
S7	-0.09	8.16	-0.81	28.55

Gli scenari S1 e S2 hanno dimostrato avere un grande potenziale sui livelli di comfort interno, sebbene, pur andando a ridurre di molto la percentuale di insoddisfatti non si riuscirebbe comunque ad ottenere accettabili livelli di comfort durante il periodo invernale. Un ancor più significativo aumento dei livelli di comfort durante il periodo invernale è stato ottenuto con l'implementazione di un nuovo impianto HVAC e quindi lo scenario S3, ma il solo scenario S8 mostra effettivi miglioramenti accettabili per le prestazioni di comfort ambientale interno dell'edificio.

3.3.2. Consumi energetici degli scenari di retrofit

Nella Tabella 8 vengono illustrati i consumi annui di energia elettrica (compreso il funzionamento del sistema HVAC, illuminazione e attrezzature) dei vari scenari di retrofit proposti e confrontati con gli attuali consumi energetici.

Lo studio sulla riduzione del consumo di energia elettrica è stato condotto per i soli scenari influenti su tale consumo; pertanto, non è stato preso in considerazione lo scenario S5.

Il solo scenario che permette una importante riduzione dei consumi elettrici è lo scenario S4 e quindi l'installazione dei pannelli fotovoltaici. Infatti, la produzione di energia rinnovabile con tale sistema ha permesso di ottenere una riduzione del 44.91% dei consumi.

Gli scenari S3 e S7 prevedendo un impianto HVAC alimentato ad energia elettrica e quindi hanno mostrato un forte aumento dei consumi, ma questo è accettabile se confrontato con l'attuale sistema impiantistico che ha un funzionamento legato al consumo di gas naturale.

Di conseguenza, lo scenario S9, combinazione di più scenari e tra cui lo scenario S3, ha ottenuto un risparmio energetico minore nonostante la produzione di energia rinnovabile. Tuttavia, lo studio condotto ha mirato ad un potenziale miglioramento in multi-dominio valutando non solo il risparmio energetico, ma anche l'aumento dei livelli di comfort e questo è ottenibile con lo scenario S9.

Tabella 8. Confronto dei consumi elettrici dell'edificio esistente con gli scenari di retrofit proposti (è evidenziato lo scenario con la migliore performance).

Scenario	Consumi [kWh/anno]	Differenza percentuale [%]
Condizione esistente	74199	-
S1	72525	-2.26
S2	74195	-0.01
S3	133823	+80.36
S4	40879	-44.91
S6	72524	-2.26
S7	132386	+78.42
S8	40879	-44.91
S9	81107	-9.31

I consumi di gas naturale di tutti gli scenari e il loro confronto con gli attuali consumi è riassunto nella Tabella 9.

Per massimizzare il risparmio energetico legato al consumo di gas naturale, la combinazione di tutti gli scenari proposti (S9) risulta quella ottimale riducendo del 99.58% il consumo di gas naturale.

Tabella 9. Confronto dei consumi di gas naturale dell'edificio esistente con gli scenari di retrofit proposti (è evidenziato lo scenario con la migliore performance).

Scenario	Consumi [Stm ³ /anno]	Differenza percentuale [%]
Condizione esistente	31279	-
S1	30928	-1.12
S2	30929	-1.12
S3	29013	-7.24
S5	2815	-91.00
S6	30928	-1.12
S7	29013	-7.24
S8	2815	-91.00
S9	132	-99.58

3.3.3. Impronta di carbonio degli scenari di retrofit proposti

La metodologia proposta si concentra nella valutazione degli scenari anche legandoli al loro impatto ambientale facendo riferimento all'impronta di carbonio e quelli che sono gli effetti prodotti dall'implementazione delle strategie proposte. Inizialmente è stato necessario definire l'impronta di carbonio nella condizione esistente. Questo è stato possibile confrontando e analizzando i progetti originali con il progetto presentato in sanatoria nel 2019. La ricostruzione dell'edificio è stato un processo iterativo che ha visto il confronto dei disegni tecnici e delle relazioni di calcolo presenti. Per una corretta valutazione è stato necessario non solo esaminare le quantità e l'uso dei materiali utilizzati, ma anche la loro origine. Non potendo risalire al luogo di origine del materiale, sono state fatte alcune scelte legate ai materiali presenti nel database del programma convergendo sempre sulla scelta di materiali prodotti da località il più vicino possibile alla struttura oggetto di studio

Le ipotesi di modellizzazione sono state adattate alla norma EN 15978:2011 (E) e pertanto sono state considerate trasporti da e verso il cantiere con una media di 200 Km e quindi anche per la presunta produzione media di rifiuti da costruzione è stato ipotizzato 5 kg/m² (GFA), mentre il consumo presunto di energia elettrica è stato di 25 kWh/m² (GFA) e l'uso presunto di gasolio pari a 3,5 l/m² (GFA) in seguito sono stati tenuti in considerazione gli impatti medi europei per un clima temperato secondo la norma EN 15804-ecoinvent.

Una valutazione completa degli scenari di miglioramento proposti richiede anche l'analisi dell'impatto ambientale. Pertanto, la valutazione dell'impronta di carbonio è stata elaborata per ogni scenario.

La tabella 10 riassume e confronta l'impronta di carbonio e il costo sociale del carbonio dell'interno edificio ante e post-operam.

L'aumento dell'impronta di carbonio si evidenzia in tutti gli scenari proposti con minor peso nello scenario S3. Infatti, la sostituzione del sistema HVAC ha portato ad una diminuzione dell'uso del gas naturale e contestualmente ad una diminuzione delle emissioni di CO₂ a lungo termine.

Lo scenario 9, valutato positivamente fino ad ora nella valutazione dei livelli di comfort e nella riduzione dei consumi energetici, evidenzia un piccolo aumento del carbonio incorporato dovuto all'uso dei nuovi materiali per la realizzazione delle opere previste nello scenario di retrofit e per lo smaltimento compreso il trasporto in discarica dei materiali. Tuttavia, la riduzione dell'impatto ambientale durante la fase operativa ha fatto registrare una diminuzione del costo sociale del carbonio. Analogamente, negli scenari S4, S5 e S8 l'uso di energia prodotta da fonti rinnovabili porta ad una significativa diminuzione del costo sociale del carbonio, ma l'uso di nuovi materiali produce l'aumento del carbonio incorporato. Infatti, la produzione e lo stoccaggio dei materiali per la realizzazione di un impianto fotovoltaico o di un impianto solare termico richiedono una notevole quantità di energia e bisogna aggiungere a questa anche la CO₂ prodotta nella fase di trasporto e quella prodotta nella fase di smaltimento. Tuttavia, durante la sua vita, un pannello solare produce molta più energia di quella necessaria per la sua fabbricazione e quindi nel complesso il suo impatto sull'ambiente è risultato positivo.

L'energia rinnovabile è infatti una soluzione che, grazie alla riduzione del consumo energetico, consente di ridurre le emissioni di CO₂ durante la fase operativa, ma l'aumento del carbonio

incorporato nei processi di produzione e smaltimento aumentano impatto ambientale considerando l'intero ciclo di vita. Pertanto, è ancora necessario migliorare queste soluzioni tecnologiche per renderle realmente sostenibili.

Tabella 10. Confronto del carbonio incorporato e del costo sociale del carbonio ante e post interventi di retrofit (è evidenziato lo scenario con la migliore performance).

Scenario	Carbonio incorporato [kgCO _{2eq} /m ²]	Percentuale di differenza di carbonio incorporato [%]	Costo sociale del carbonio [€]
Condizione esistente	1110	-	687092
S1	1131	+1.89%	707855
S2	1119	+0.08%	700536
S3	1062	-4.32%	750353
S4	1138	+2.52%	666614
S5	1113	+0.03%	538794
S6	1140	+2.70%	707961
S7	1092	-1.62%	752036
S8	1147	+3.33%	544755
S9	1122	+1.08%	544755

3.3.4. Costi di investimento

La fattibilità economica delle opere di retrofit proposte, dati gli attuali costi dei materiali da costruzione, se non adeguatamente calcolata potrebbe essere antieconomica. Pertanto, la metodologia proposta ha previsto la valutazione degli investimenti da disporre per la realizzazione degli scenari di retrofit.

Il costo d'investimento per S1, ossia il miglioramento termico dell'involucro opaco, è pari a circa 400 k€, comprensivo sia dei materiali che dei costi di mano d'opera.

Il costo dell'investimento per S2, cioè la sostituzione degli infissi, è pari a circa 300 k€, compresi i materiali ed i costi di mano d'opera. I costi di investimento degli scenari S1 e S2 sono stati valutati sulla base dei prezzi previsti dal prezzario regionale della Regione Basilicata.

Il costo di investimento per S3, nuovo impianto HVAC, è pari a circa 600 k€, comprensivi sia dei materiali che dei costi di intervento. Tale costo deriva da un'analisi di mercato su costi medi standard per un sistema HVAC con le stesse caratteristiche che ha fornito un costo di circa 92 €/m². Il periodo di ritorno degli investimenti per S1, S2, S3 si attesta superiore ai 20 anni.

La valutazione economica dell'impianto fotovoltaico (S4) e dell'impianto solare termico (S5) è stata condotta calcolando il tempo di ritorno dell'investimento in quanto sono scenari con una vita utile minore dei precedenti. Il calcolo dell'investimento iniziale per lo scenario S4 è stato effettuato attraverso una profonda indagine di mercato che ha portato alla stima del costo dell'impianto fotovoltaico di 2400 €/kWp e quindi un investimento iniziale totale (IO) di 128k € per i 56 kWp installati. L'indagine di mercato ha dimostrato che il prezzo dell'elettricità era di 0.25 €/kWh. Secondo il metodo VAN, i flussi di cassa (FC) sono risultati pari a 13432 €. Inoltre, la valutazione economica ha tenuto conto dell'incentivo fiscale del 50% applicato dallo Stato Italiano per le opere di ristrutturazione facendo ottenere un tempo di ritorno di 8 anni quindi piuttosto vantaggioso.

L'impianto solare termico (S5), da un'indagine di mercato è risultato avere un costo pari a 2000 €/kWp e quindi avendo previsto 5.22 kW si è ottenuto un costo iniziale dell'investimento pari a 10444 €. Dato il costo del gas naturale di 0.11 €/kWh e tenendo conto di una riduzione dei consumi del 91%, l'FC calcolato si è attestato pari a 1410 € ottenendo un tempo di ritorno di 6 anni.

3.4. *Discussione*

L'approccio proposto ha permesso di valutare vari scenari e identificare quello più efficace per raggiungere benefici multi-dominio orientati alla sostenibilità e qualità ambientale.

Lo scenario S1 ha portato a un leggero aumento del comfort interno durante l'estate e una minima diminuzione del consumo energetico, ma ottenendo un piccolo aumento del carbonio incorporato.

Lo scenario S2 produce miglioramenti in termini di comfort interno e di riduzione dei consumi energetici trascurabili se non combinato con altre strategie. Per esempio, lo scenario S7, combinazione di S1, S2, e S3, mostra miglioramenti significativi per il comfort interno. Infatti, in un edificio caratterizzato da elevati carichi igrometrici interni, se il retrofit delle finestre non fosse combinato con un sistema di controllo dell'umidità e quindi una corretta ventilazione meccanica, renderebbe necessaria la ventilazione naturale ai fini del raggiungimento della qualità ambientale interna. Questo, però, oltre che annullare i benefici di un migliore isolamento termico delle pareti opache, è sconsigliato dalla normativa vigente.

Lo scenario S3 si è proposto come intervento necessario all'ottenimento di livelli accettabili di comfort interno durante l'intero anno. Pertanto, considerando un'apertura al pubblico estesa a tutto l'anno, è necessaria la realizzazione di un nuovo sistema HVAC correttamente dimensionato e implementato con altre strategie di retrofit passive come illustrato nello scenario S7.

Gli interventi per la produzione di energia rinnovabile (S4 e S5), oltre a diminuire i consumi energetici, consentono di ridurre il costo sociale del carbonio. Lo scenario S8 ha fornito elevata efficienza energetica all'edificio e una riduzione delle emissioni di carbonio del 22%. Ma non ha portato a miglioramenti di comfort. Pertanto, il solo scenario S9 massimizza l'efficienza energetica dell'edificio e il comfort interno estivo e invernale permettendo di ridurre del 9% il consumo di energia elettrica e quasi del 100% il consumo di gas.

Nelle attuali condizioni di apertura (solo nel periodo estivo) dell'edificio lo scenario S8 risulta essere la migliore soluzione di retrofit, massimizzando il risparmio energetico e riducendo l'impatto ambientale, con condizioni di comfort accettabili durante il periodo estivo. Inoltre, tale scenario risulta avere un ottimo tempo di ritorno dell'investimento. Estendendo gli orari di apertura dell'edificio a tutto l'anno, lo scenario S9 si rivela quello ottimale, perché ha permesso di migliorare tutti i parametri considerati. Tuttavia, questo scenario ha costi di investimento e livelli carbonio incorporato più elevati, ma l'estensione della durata operativa dell'edificio durante tutto l'anno aumenterebbe la redditività economica della struttura e dell'intero settore turistico locale.

4. **Conclusioni**

Questo studio ha lo scopo di proporre un approccio utile ad individuare la combinazione ottimale di strategie di retrofit energetico di edifici esistenti, ma con condizioni al contorno simili a quelle del

caso studio, per migliorare equilibratamente il comfort termico interno, il risparmio energetico, le emissioni di CO_{2eq} durante l'intero ciclo di vita, il costo sociale del carbonio, ma controllandone i tempi di ritorno degli investimenti economici. Per raggiungere questo obiettivo è stato valutato lo stato attuale del caso studio e, contestualmente, è stato sviluppato e validato un modello energetico per analizzare diversi scenari di intervento.

I risultati ottenuti dimostrano l'efficacia di un approccio BIM multi-dominio per la valutazione di progetti di retrofit di efficienza energetica supportata dalla progettazione ed analisi delle soluzioni tramite BIM. L'approccio proposto viene testato su un complesso termale evidenziandone l'urgente necessità di retrofit ed efficienza energetica. In particolare, i risultati mostrano che un impianto solare termico per la produzione di acqua calda, date le caratteristiche dell'acqua termale che presenta una temperatura costante a 23°C durante l'intero anno può notevolmente ridurre il consumo di gas naturale. Inoltre, l'inserimento integrato con il sistema solare termico di un impianto fotovoltaico offrirebbe benefici ambientali ed energetici, con la possibilità di ridurre il consumo di elettricità fino al 44.91% e il consumo di gas naturale per la produzione di acqua calda di quasi il 100%, riducendo così le emissioni associate.

Aumentando l'efficienza dell'involucro opaco e trasparente si riducono i consumi dell'impianto di climatizzazione ottenendo ulteriore risparmio energetico, migliorando le condizioni di comfort interno e riducendo al contempo il costo sociale del carbonio associato al funzionamento dell'edificio. Tuttavia, i sistemi di produzione di energia rinnovabile massimizzano il potenziale risparmio energetico diminuendo le spese legate all'acquisto di energia dalla rete e facendo ottenere un ritorno dell'investimento economico in tempi accettabili e, inoltre, riducono le emissioni di CO_{2eq}.

Pertanto, la soluzione ottimale dal punto di vista multi-dominio, viste le attuali condizioni di apertura durante la sola stagione estiva della struttura, sono risultate quelle che prevedono di implementare soluzioni per la produzione di energia rinnovabile. Eppure, tenendo in considerazione di poter ampliare l'apertura al pubblico per tutto l'anno, sarebbe utile realizzare lo scenario S9. Il risultato ottenuto si può applicare anche a edifici simili con funzioni e condizioni al contorno analoghe. In conclusione, l'approccio BIM multi-dominio è uno strumento efficace che permette di valutare retrofit ottimali di efficienza energetica trovando un compromesso tra il risparmio energetico, il comfort interno, la riduzione dell'impatto ambientale e il ritorno economico. I risultati di questo studio evidenziano implicazioni pratiche per la progettazione e la costruzione di edifici a basso consumo energetico nel contesto di una maggiore indipendenza energetica e sostenibilità ambientale.

References

1. Abergel T., Dean B., Dulac J. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector. Global Status Report 2017, Available online: <https://worldgbc.org/article/global-status-report-2017/>.
2. Cao, X., Dai, X., & Liu, J. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. Energy and Buildings 2016, pp. 128.

3. John Zhai, Z., & Michael Helman, J. Implications of climate changes to building energy and design. *Sustainable Cities and Society* 2019, 44, 511-519.
4. González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R., & Yan, D. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports* 2022, 8, 626–637.
5. Schmidt, E. D., Sciarpi, F., Carletti, C., Cellai, G., Pierangioli, L., & Russo, G. The BEM of the Vasari Corridor: A return to its original function and correlated energy consumption for artwork conservation and IAQ. *Science and Technology for the Built Environment* 2021, 27(8), 1104–1126.
6. Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011, 15(8), 3617–3631.
7. Raja, I. A., & Abro, R. S. Solar and wind energy potential and utilization in Pakistan. *Renewable Energy* 1994, 5(1–4), 583–586.
8. Jafari, A., & Haghighi Poshtiri, A. Passive solar cooling of single-storey buildings by an adsorption chiller system combined with a solar chimney. *Journal of Cleaner Production* 2017, 141, 662–682.
9. Kim, C. H.-W. K.-J. A Study on the Guideline Development for Passive Building Design. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design* 2013, 29(6), 93–100.
10. Al-Obaidi, K. M., Ismail, M., & Abdul Rahman, A. M. Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. *Frontiers of Architectural Research* 2014, 3(3), 283–297.
11. Khambadkone, N. K., & Jain, R. A bioclimatic analysis tool for investigation of the potential of passive cooling and heating strategies in a composite Indian climate. *Building and Environment* 2017, 123, 469–493.
12. Tavakolan, M., Mostafazadeh, F., Jalilzadeh Eirdmoussa, S., Safari, A., & Mirzaei, K. A parallel computing simulation-based multi-objective optimization framework for economic analysis of building energy retrofit: A case study in Iran. *Journal of Building Engineering* 2022, 45, 2352–7102.
13. Bleyl, J. W., Bareit, M., Casas, M. A., Chatterjee, S., Coolen, J., Hulshoff, A., ... Üрге-Vorsatz, D. Office building deep energy retrofit: life cycle cost benefit analyses using cash flow analysis and multiple benefits on project level. *Energy Efficiency* 2019, 12(1), 261–279.
14. Holness, G. V. R. Improving energy efficiency in existing buildings. *ASHRAE Journal* 2008, 50(1).
15. Bell, M., & Lowe, R. Energy efficient modernization of housing: A UK case study. *Energy and Buildings* 2000, 32(3), 267–280.
16. Gabathuler, H. LCA History: Centrum voor Milieukunde Leiden (CML) The CML Story How Environmental Sciences Entered the Debate on LCA. Appendix: Reprint Int J LCA 2006, 11(1), 187–194.
17. Simonen, K., Rodriguez, B. X., & De Wolf, C. (2017). Benchmarking the Embodied Carbon of Buildings. *Technology|Architecture + Design*, 2017, 1(2), 208–218.
18. Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., & Culp, C. H. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy*

- Reviews 2012, 16(6), 3730-3743.
19. Gholami, E., Sharples, S., Abrishami Shokoo, J., & Kocaturk, T. Exploiting BIM in Energy Efficient Refurbishment: A paradigm of future opportunities. Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Germany 10-12 September 2013.
 20. Succar, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in Construction 2009, 18(3), 357–375.
 21. Norme EN 16247 (parti: 1,2,3,4,5). Diagnosi energetiche.
 22. Taileb, A., & Dekkiche, H. Infrared Imaging as a Means of Analyzing and Improving Energy Efficiency of Building Envelopes: The case of a LEED Gold Building. Procedia Engineering 2015, 118, 639-646.
 23. Kiritat, A., & Krejcar, O. A review of infrared thermography for the investigation of building envelopes: Advances and prospects. Energy and Buildings 2018, 176, 390–406.
 24. American Society of Heating, Ventilating, And and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Guideline 14-2014 Measurement of Energy and Demand Saving, Atlanta, GA, USA.
 25. Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014, 37, 123–141.
 26. Reinhart, C. F., & Cerezo Davila, C. Urban building energy modeling - A review of a nascent field. Building and Environment 2016, 97, 196–202. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.12.001>
 27. Piselli, C., Romanelli, J., Di Grazia, M., Gavagni, A., Moretti, E., Nicolini, A., ... Pisello, A. L. An Integrated HBIM Simulation Approach for Energy Retrofit of Historical Buildings Implemented in a Case Study of a Medieval Fortress in Italy. Energies 2020, 13, 2601.
 28. UNI EN 15978:2011 - Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance. Retrieved March 15, 2023.
 29. Wright, L. A., Kemp, S., & Williams, I. 'Carbon footprinting': towards a universally accepted definition. Carbon Management, 2011, 2(1), 61-72.
 30. Nordhaus, W. D. Revisiting the social cost of carbon. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2017, 114(7), 1518-1523.
 31. Žižlavský, O. Net present value approach: method for economic assessment of innovation projects. Procedia-Social and Behavioral Sciences 2014, 156, 506-512.
 32. D.P.R. n. 412 del 1993. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.
 33. Legge n. 10 del 1991. Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso nazionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.
 34. D.M 26/06/2015. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.
 35. Fanger, P. O. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering 1970, pp. 244.
 36. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Inquinamento atmosferico, mobilità e salute umana. L'approccio geografico all'analisi della prima fase della pandemia in Italia

Fabio Fatichenti ^{1,*}, Gino Filippo Massetti ¹

¹ Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Lettere - Lingue, Letterature e Civiltà Antiche e Moderne

* Autore di riferimento. E-Mail: fabio.fatichenti@unipg.it

Abstract: Several studies have demonstrated a link between air pollution and the severity of Covid-19 cases. In addition, air pollution may also be a contributing factor to the spread of the virus, increasing its survival time and affecting the transmission distance. In the complex and articulated panorama of international studies and research that have investigated the cause-effect relationship between air pollution and the pandemic, a contribution in Italy also came from the geographical sciences. Immediately after the outbreak of the pandemic, in fact, under the coordination of AGEI (Association of Italian Geographers), the network of Italian cartographic laboratories LabGeoNet produced a synergistic effort resulting in the creation of the *Covid-19 Atlas. Geographies of contagion in Italy*. From this work, related to the first wave of the pandemic in Italy (February-June 2020), it emerges that in some cases it has most affected those territories characterized by high levels of air pollution as well as, at the same time, by the concentration of logistical, commercial and industrial traffic or by a high degree of mobility. In this paper we try to analyse the cause-effect relationship between air pollution and the spread of Covid-19 infections in two Italian regions: Lombardy and Umbria.

Keywords: mobility; air pollution; Covid-19 pandemic; Lombardy; Umbria

1. Introduzione¹

Da tempo, ma con particolare intensità negli ultimi cinque anni, questioni come l'emergenza climatica, l'inquinamento atmosferico e la transizione energetica occupano i primi posti delle agende

¹ Il testo è frutto della collaborazione degli Autori. Di G.F. Massetti sono i paragrafi 1,2,3, di F. Fatichenti i paragrafi 4 e 5.

pubbliche dei Paesi dell'UE e non solo. Le conferenze internazionali sul clima², che si susseguono ogni anno, coinvolgono notoriamente gli Stati nel tentativo di stabilire regole comuni e strategie condivise per evitare, entro il 2050, l'aumento del riscaldamento terrestre sopra la soglia critica di 1,5 °C. Anche l'Italia ha risposto istituzionalmente con riforme e cambiamenti significativi – e non solo a livello formale – quali la nascita del Ministero della Transizione Ecologica³ e in particolare la modifica degli articoli 9 e 41 della Costituzione, rimarcando così in modo inequivocabile non solo la necessità di tutelare il patrimonio paesaggistico e storico-artistico, ma anche “l'ambiente, la biodiversità e gli ecosistemi” (cfr. la legge costituzionale 11 febbraio 2022, n. 1). Una nuova sensibilità si sta dunque affermando, formalmente sancita da decisioni e norme della massima importanza, nonché sostenuta da un ampio ventaglio di politiche inquadrate nell'ampia strategia del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), frutto del cospicuo fondo di finanziamento europeo denominato *Recovery Fund o Next Generation EU*⁴.

Tale strategia di investimenti è stata pensata fundamentalmente in risposta alle conseguenze della pandemia da Covid-19, la quale ha contribuito a ridisegnare approcci sociosanitari, alleanze ed equilibri geopolitici. In questo contesto appare pertanto indispensabile sottolineare lo stretto legame tra scenari pandemici e stato dell'ambiente. La letteratura scientifica ha peraltro sottolineato una evidente correlazione tra zone densamente industrializzate, soggette ad alti tassi di inquinamento atmosferico, e incidenza del contagio: proprio a tale questione è dedicato il presente contributo, nel quale sono illustrati e integrati alcuni risultati delle ricerche di Geografia confluite nell'*Atlante Covid-19. Geografie del contagio in Italia* [1], realizzato dietro impulso dell'AGEI (Associazione dei Geografi Italiani) tramite il LabGeoNet, ovvero la rete dei laboratori cartografici italiani. La metodologia adottata per la realizzazione delle ricerche, poi applicata in tutti i casi di studio regionali, era stata messa a punto in via preliminare dal CST DiathesisLab dell'Università degli studi di Bergamo, i cui ricercatori avevano impostato uno studio preliminare fondato su tre cardini: i dati territoriali posseduti sarebbero stati incrociati con quelli relativi al contagio al fine di mapparli; le caratteristiche spazio-temporali della diffusione del morbo dovevano essere interpretate alla luce delle teorie geografiche; l'applicazione della semiosi cartografica sarebbe risultata preziosa per la costruzione di un mapping riflessivo capace di favorire l'interpretazione del fenomeno [2, 1]. Derivato da tale complesso sforzo, l'*Atlante Covid-19* mediante l'impiego additivo testo-carta prospetta il quadro epidemico della prima ondata della

² L'ultima in ordine di tempo è la COP 27, tenutasi a Sharm el-Sheikh, sotto la presidenza dell'Egitto, dal 6 al 20 novembre 2022. La conferenza ha incorporato la 27^a Conferenza delle Parti dell'UNFCCC (COP27), la 17^a Conferenza delle Parti del Protocollo di Kyoto (CMP17) e la 4^a Conferenza delle Parti dell'Accordo di Parigi (CMA4).

³ Il MiTE, istituito nel 2021, ha assorbito le funzioni in precedenza attribuite al Ministero dell'Ambiente, diventando un dicastero nevralgico per l'attuazione degli obiettivi del PNRR. Si veda al riguardo: www.mite.gov.it/ (ultimo accesso 30.03.2023).

⁴ Per i dettagli operativi e strutturali del PNRR si rinvia al sito <https://italiadomani.gov.it> (ultimo accesso 30.03.2023).

pandemia nel nostro Paese (febbraio-giugno 2020)⁵. Mettendo in luce che i territori del contagio sono risultati anisotropi e hanno reagito in modo differente, la ricerca ha consentito di indagare la diffusione e l'impatto del virus in relazione agli aspetti fisico-ambientali e socio-territoriali di ogni regione. Il caso lombardo, in particolare, in questa sede proposto a confronto con quello umbro, è purtroppo dimostrativo di come il triste primato, in termini di vittime e contagi, delle Province di Bergamo e Brescia e, in particolare, della Val Seriana possa essere ricondotto anche ai tassi di inquinamento atmosferico causati dall'elevata mobilità e dalla concentrazione di funzioni industriali e commerciali.

2. Inquinamento atmosferico e pandemia: uno sguardo alla letteratura scientifica

Il virus Sars-Covid-19, registrato per la prima volta nella metropoli cinese di Wuhan e sviluppatosi rapidamente in tutto il mondo, è stato oggetto di numerosi studi e ricerche da più fronti disciplinari, non poche delle quali dedicate al ruolo svolto dalle elevate concentrazioni di particolato nell'aria (PM) nella diffusione del virus e nell'aggravamento dei suoi effetti sulla salute umana⁶.

I primi studi che hanno tentato di connettere diffusione del virus ed elevati tassi di inquinamento e di concentrazione di polveri sottili risalgono al 2020: secondo gli autori, non è casuale che le aree di maggiore diffusione del virus in Italia coincidano con territori, come la Pianura Padana, particolarmente critici dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico. È noto che l'inquinamento atmosferico accresce il rischio di mortalità e di patologie dell'apparato respiratorio, oltre che di altri organi: un gran numero di studi epidemiologici ha rilevato un'associazione tra i livelli di inquinamento atmosferico e svariati effetti sulla salute sia a breve termine, cioè nei giorni immediatamente successivi ai picchi di inquinamento, sia a lungo termine, ossia negli anni che seguono il perdurare dell'esposizione agli inquinanti atmosferici⁷.

È stato poi appurato come anche una piccola esposizione al particolato fine (PM2.5) abbia prodotto le condizioni per un aumento significativo della mortalità per Covid-19 [12]. Non solo: l'inquinamento

⁵ La comunità dei geografi italiani ha prodotto una apprezzabile quantità di studi e ricerche in ordine al rapporto pandemia-territorio; tra i risultati di più ampio respiro ricordiamo, oltre all'*Atlante Covid-19*, il fascicolo tematico della rivista *Documenti Geografici*, 1/2020, dedicato a una lettura socio-territoriale delle conseguenze post-pandemiche [3].

⁶ Le polveri fini, denominate PM, sono particelle inquinanti, presenti nell'aria, di natura organica o inorganica; possono presentarsi allo stato solido o liquido e sono capaci di assorbire sulla loro superficie diverse sostanze con proprietà tossiche quali solfati, nitrati, metalli e composti volatili. Le polveri fini vengono classificate secondo la loro dimensione, che può determinare un diverso livello di nocività. Infatti, più queste particelle sono piccole più hanno la capacità di penetrare nell'apparato respiratorio. Le PM10 (diametro inferiore a 10 µm) possono essere inalate e penetrare nel tratto superiore dell'apparato respiratorio, dal naso alla laringe. Le PM2.5 (diametro inferiore a 2,5 µm) possono spingersi fino ai bronchi. Le polveri ultrafini (UFP, diametro inferiore ad 0,1 µm) potrebbero essere in grado di penetrare fino agli alveoli e poi persino nel circolo sanguigno e nelle cellule. Cfr. <https://www.arpa.umbria.it/resources/documenti/aria/polveri%20fini.pdf> (ultimo accesso 30.03.2023).

⁷ In proposito la letteratura è davvero ampia e sarebbe arduo realizzarne una rassegna esaustiva. Cfr. comunque almeno i seguenti contributi: [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

atmosferico ha aumentato la gravità e la diffusione del Covid-19 in diversi modi, dall'indebolimento del sistema respiratorio, rendendo le persone più suscettibili alle infezioni respiratorie, all'aumento della penetrazione del recettore ACE2, utilizzato dal virus SARS-CoV-2 come veicolo per introdursi nel sistema respiratorio [13].

È altresì scientificamente acclarato come l'inquinamento atmosferico sia una delle cause principali delle infiammazioni ai polmoni, che possono rendere più difficile per il corpo combattere virus di diversa natura. Per es., l'esposizione agli inquinanti atmosferici altera la funzionalità delle proteine tensioattive (SP), fondamentali nella difesa polmonare contro agenti patogeni, portando l'organismo ad una maggiore vulnerabilità nei confronti delle infezioni da virus respiratorio [7].

A quanto sopra, andrà sommato un ulteriore aspetto: l'inquinamento atmosferico, infatti, può essere un fattore che contribuisce anche alla diffusione del virus, permettendo al morbo di aumentare il tempo di sopravvivenza nell'aria e di influire sulla sua distanza di trasmissione [8].

La letteratura scientifica ha dunque accertato effetti dannosi sull'apparato respiratorio esercitati dal PM atmosferico (un'esposizione continuativa aumenta la possibilità di frequenza dell'insorgere di patologie nella popolazione) e dati in questo senso si riscontrano anche prima dell'avvento della pandemia SARS-Covid-19: già nel 2003, uno studio suggeriva l'importanza della variabilità geografica nel tasso di mortalità per ogni caso di SARS-CoV registrato in Cina in relazione alle numerose concentrazioni di inquinamento atmosferico delle città più popolate [10]. Inoltre, ancora in Cina uno studio condotto in 272 città per il periodo 2013-2015 forniva prove dell'associazione tra l'esposizione a breve termine al PM2.5 e l'aumento della mortalità per varie malattie cardiopolmonari [14].

D'altra parte, lo studio degli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla diffusione di Covid-19 e sulla prognosi dei casi pone problemi metodologici rilevanti in quanto impone di considerare innumerevoli fattori e le loro reciproche relazioni. Nelle valutazioni generali va per es. tenuto in considerazione che, trattandosi di una patologia veicolata per via respiratoria, la prima causa di contagio è data dalla frequenza e dalla vicinanza dei contatti tra le persone; si può quindi supporre che un'area contraddistinta da elevata concentrazione di relazioni e con alto tasso di industrializzazione risulti maggiormente esposta all'insorgenza e alla diffusione dell'epidemia. A ciò andranno sommate le molteplici ripercussioni prodotte dalla cattiva qualità dell'aria. Tali premesse andranno tuttavia bilanciate da alcune variabili di contesto, quali per es. la struttura demografica delle comunità residenti, lo stato di salute delle fasce di popolazione, nonché ovviamente le misure adottate per il contenimento della diffusione del virus.

3. Il caso della Lombardia, epicentro epidemico in Italia

La Lombardia è caratterizzata prevalentemente da due distinti ambiti territoriali, i quali occupano, in parti grosso modo eguali, oltre l'80% del territorio regionale: il contesto montano dell'arco alpino e prealpino e l'ampia pianura che si estende fino al Po. Con oltre 10 milioni di residenti, la Lombardia è la regione più popolosa d'Italia con un territorio che, tra zone residenziali, siti produttivi, infrastrutture e spazi commerciali, presenta il più alto livello di urbanizzazione in Italia. È il principale polo economico,

logistico e relazionale del Paese, grazie alla vivacità del suo tessuto imprenditoriale; è altresì territorio privilegiato per la connessione viaria, aerea e ferroviaria con il resto d'Europa, nonché area di raccordo di tutti i traffici merceologici e commerciali italiani con il sistema internazionale. La regione rappresenta altresì il polo trainante dei comparti produttivo, finanziario e delle comunicazioni, così come di diversi settori che vanno dai servizi ai cittadini alla moda, dallo sport all'industria chimico-farmaceutica. Nel corso degli ultimi decenni, complice un processo di urbanizzazione sempre più marcato, intorno al capoluogo regionale, Milano, si è formata una cintura di numerose piccole e medie città, tra loro collegate: queste svolgono anche la funzione di punti di transito e raccordo tra il capoluogo e varie province strategiche come quelle di Lodi, Bergamo, Brescia, Varese, Como e Monza e Brianza⁸.

Gli studi e le ricerche condotti sulla regione e poi sfociati nell'*Atlante* AGEI hanno tentato, attraverso la tecnica del mapping riflessivo, di delineare le "fragilità" dell'abitare mobile e urbanizzato riconducibili ad aspetti territoriali interconnessi: per es. pratiche di mobilità e pendolarismo, livelli di inquinamento in ordine alle condizioni climatico-morfologiche, natura organizzativa del sistema sanitario [2, 15]. Tali caratteristiche vengono elencate e messe in luce in relazione al particolare indice di contagio che ha colpito queste aree, simbolicamente e tristemente rappresentate dalla Val Seriana⁹.

Riscaldamento domestico ed emissioni dei trasporti determinano notoriamente la concentrazione di particolato atmosferico (PM) e biossido di azoto nell'aria [16].

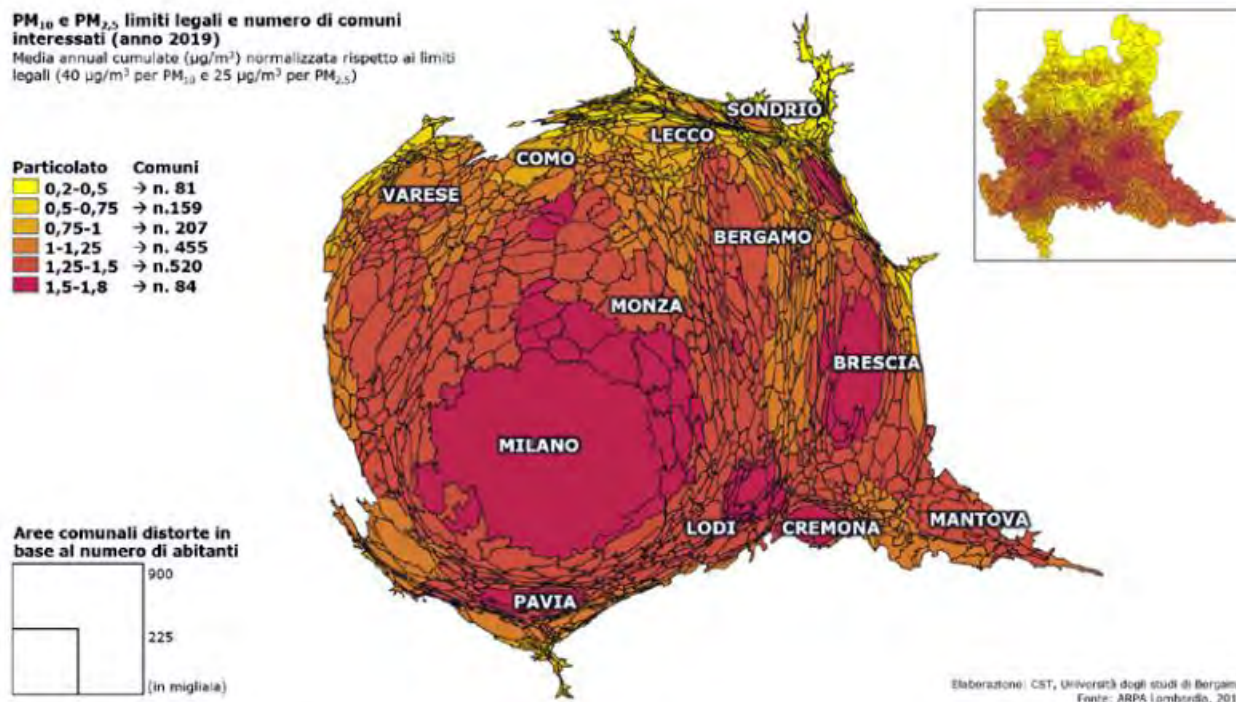
L'analisi dell'inquinamento atmosferico permette di stabilire il nesso fra diffusione territoriale di polveri sottili e biossido di azoto e modalità e intensità del contagio. Saper leggere mutamenti della qualità dell'aria consente poi alcune valutazioni nell'impatto delle restrizioni pandemiche e i loro effetti sull'inquinamento. L'importanza dell'approccio geografico in tale contesto risulta evidente, soprattutto laddove genera una stratificazione di dati la cui coerente contestualizzazione può essere accurata solamente grazie alle chiavi di lettura della lente geografica.

Il rapporto causa-effetto in ordine al binomio inquinamento atmosferico-contagio è stato considerato secondo due ipotesi: la prima assume l'inquinamento come aspetto di fragilità territoriale capace di influire sulla salute delle popolazioni esposte agli agenti inquinanti [11; 6]; la seconda intende l'inquinamento come diffusore del morbo, attribuendo alle polveri sottili sia il ruolo di substrato in sospensione, sia quello di vettore virale [9]. In particolare si individua una proporzionalità diretta tra la concentrazione di PM2.5 e l'indice di contagio del virus [11].

⁸ Sull'esplosione urbanistica delle regioni italiane negli ultimi cinquanta anni, e in particolare della Lombardia, cfr. [18; 19].

⁹ I comuni di Alzano Lombardo e Nembro, in Val Seriana, e di Codogno (Lodi) – luogo del rilevamento del "paziente zero" – rimangono ancora oggi nell'immaginario collettivo identificativi della prima e più acuta fase della pandemia.

Figura 1. Valori medi annui di particolato PM10 e PM2,5 in rapporto ai limiti di legge (2019).



Fonte: [15]

Nel caso della Lombardia, nell'ambito territoriale più esposto a inquinamento – in particolare l'area metropolitana di Milano con le conurbazioni più prossime dei territori delle province di Monza e Brianza, Varese e Como – il livello di saturazione di PM10 e PM2.5 supera di frequente i limiti stabiliti dalla legge. La situazione più critica viene rintracciata nel bresciano, nelle province di Pavia, Cremona e Lodi e soprattutto nell'hinterland metropolitano e nella densa fascia pedemontana a nord di Milano, compreso quel settore di Nord-Est in cui si apre la Val Seriana, epicentro reale e a un tempo simbolico della pandemia in Italia.

Da un punto di vista territoriale, il cosiddetto “focolaio” – termine largamente adoperato dai media [17] – è il luogo in cui si concentrano alcuni casi sintomatici che hanno avuto un medesimo contatto sospetto e che possono causare la diffusione del virus. In Lombardia, i focolai di contagio si sono prevalentemente verificati in centri periferici, comunque inclusi nella conurbazione policentrica e polidirezionale che caratterizza la regione. Mentre la diffusione del virus ha avuto picchi significativi nelle zone industriali dell'area metropolitana di Milano, a Bergamo, Lodi, Brescia, Como e Varese la catena del contagio ha avuto inizio da località periferiche e di piccole e medie dimensioni. Il primo caso di contagio da Covid-19 nel bergamasco è stato accertato il 23 febbraio 2020 all'ospedale di Alzano Lombardo ma già a inizio febbraio centinaia di persone dei territori della bergamasca e del lodigiano sono stati coinvolti in tornei sportivi, relazioni commerciali e fenomeni di pendolarismo. L'origine dei primi focolai va ricercata proprio in tali interconnessioni logistiche e quotidiane, diretta emanazione

della specificità dei luoghi e di dinamiche socio-economiche consolidate a piccola e grande scala. La Val Seriana, in questo senso, rappresenta un territorio prototipico: si snoda a nord-est di Bergamo lungo il corso del fiume Serio, presentando un popolamento e un insediamento diversificati tra l'alta e la bassa valle; la parte bassa accoglie 18 comuni che inglobano il 72% della popolazione dell'intero territorio; al contrario la parte alta accoglie il 28% della popolazione valliva. La Val Seriana, come altre valli del territorio lombardo, è nota per la forte vocazione internazionale delle imprese presenti, con stabili relazioni commerciali per es. con Cina e Germania. È quindi un territorio caratterizzato da un sistema industriale florido con frequenti spostamenti, anche pendolari, in particolare verso Bergamo, Brescia e Milano (per motivi professionali, ma anche di studio, di salute ecc.). La correlazione tra aspetti socio-territoriali, mobilità e diffusione dei contagi appare evidente, laddove i comuni maggiormente colpiti dal Covid-19 sono proprio quelli più coinvolti in questo dinamismo. Le ricerche del gruppo di lavoro lombardo individuano, nella fascia centrale della regione, un vero e proprio "corridoio del contagio", una "dorsale" di significativa diffusione che unisce i due focolai di Lodi e Bergamo [15]. Ciò attesta quanto queste aree, in situazioni pandemiche, possano rivelarsi fragili: densità abitativa e pendolarismo reticolare, ma anche multidirezionale e "rizomatico"¹⁰, hanno costituito il terreno più fertile per l'interazione tra gli individui e per inevitabili assembramenti.

La forte concentrazione di particolato atmosferico ha poi inevitabilmente influito sullo stato di salute degli abitanti rendendoli più vulnerabili di fronte al virus e amplificandone la rapidità di diffusione. Appare evidente come il territorio della Val Seriana presenti tutti gli elementi che possono aver creato le condizioni più favorevoli alla diffusione virale, in particolare conformazione geografica di transito e di passaggio e alta mobilità. A ciò andrà sommata la carenza di un sistema sanitario articolato in piccoli presidi territoriali¹¹. La concomitanza di tali fattori in Val Seriana ha permesso al Covid-19 di aumentare il grado di contagio per reticolarità e per prossimità, facendo scaturire un'intensa propagazione virale capace poi in un secondo momento di investire l'intera regione. Le fragilità della Lombardia emerse dai dati e sottolineate dai tragici eventi della primavera del 2020 si spiegano però anche con la situazione morfo-climatica della regione, che rende possibili e frequenti alti tassi di inquinamento, con il disequilibrio ormai cronico tra strutture assistenziali locali e grandi poli ospedalieri dei centri urbani e, infine, con l'abitare contemporaneo e le sue peculiarità (spostamenti sempre più numerosi e frequenti, ritmi frenetici, congestionamento del traffico veicolare...). Per tutti questi aspetti, il caso lombardo è risultato purtroppo paradigmatico.

¹⁰ In questo caso è trasposto sul piano geografico il concetto mutuato dalla botanica dai filosofi francesi Gilles Deleuze e Félix Guattari alla fine degli anni '70: il termine rizoma indica così strutture orizzontali e diffuse che si contrappongono a quelle gerarchiche, fortemente strutturate e con percorsi prestabiliti. L'aspetto del rizoma è reticolare e qualsiasi punto è connesso agli altri attraverso un'espansione multidirezionale [30].

¹¹ Oltre alla mancanza di una ramificata medicina territoriale e di prossimità, la presenza di grandi strutture come le residenze sanitarie assistenziali ha, da un lato, in parte evitato il proliferare del contagio, dall'altro ha spesso però favorito la costituzione di ampie aree di trasmissibilità.

4. Dinamiche pandemiche in un'area interna: il caso dell'Umbria

Con una superficie territoriale di appena 8.456 km², l'Umbria è stata segnata nella propria storia da numerosi mutamenti sociali, politici e territoriali e, nonostante gli ultimi decenni dedicati al rafforzamento della propria immagine e identità – operazione ben sintetizzata sin dagli anni '80 dal fortunato slogan turistico “Cuore verde d'Italia” –, la regione è risultata a più riprese al centro di un dibattito critico che insiste nel rimarcare l'“artificialità”, ovvero l'essere esito di divisioni e accorpamenti territoriali spesso rivelatisi di ostacolo nella ricomposizione delle sue molteplici contraddizioni e diversità [20, 21].

Anche sul piano morfologico è possibile suddividere in varie subregioni l'Umbria, ciascuna con specifica individualità e particolari caratteristiche: appena il 10% del suo territorio può dirsi pianeggiante, mentre collina e montagna occupano rispettivamente il 60 e il 30%. La morfologia dell'Umbria, quindi, risulta frammentaria e ricca di contrasti, con l'alternanza di catene e rilievi di più o meno spiccata altitudine con conche e pianure di fondovalle.

Come tante altre regioni d'Italia, dalla metà degli anni '70 l'Umbria ha conosciuto un intenso spopolamento, in particolare delle zone di montagna e collina, che ha contribuito a creare la contrapposizione tra due ambiti contraddistinti da differenti caratteri e velocità: quello “forte” o di concentrazione industriale e logistica-commerciale della pianura e quello “debole” della collina e della montagna¹². Lo spopolamento ha conosciuto ondate successive, prima dalle zone appenniniche a quelle collinari; successivamente dalla collina alla pianura, dove si è assistito al rapido proliferare di insediamenti produttivi e residenziali con inevitabili ripercussioni anche sul piano ambientale (si pensi alla sterilizzazione di tanti fertili suoli di pianura dei quali, come si è detto, la regione certo non abbonda) [22].

Negli ultimi cinquanta anni, soprattutto l'Umbria interna ed economicamente marginale ha dovuto ripensarsi – il percorso è solo cominciato – per affrontare le sfide dello spopolamento e della rinascita economica mediante la valorizzazione del proprio patrimonio ambientale e culturale [23].

Le vicende demografiche brevemente descritte si sono intrecciate inevitabilmente anche con l'evoluzione dell'economia regionale che, dalla tradizione fundamentalmente agricolo-rurale ha poi conosciuto, insieme a Toscana, Emilia-Romagna e Marche, la transizione a un sistema economico essenzialmente basato sulla piccola e media impresa (fuorché, come è noto, nel Ternano). Il tessuto produttivo, diversificato e trainato da imprese familiari, si è contraddistinto in una prima fase per buone capacità di marketing ed efficaci innovazione e penetrazione dei mercati internazionali. L'avvento tuttavia della globalizzazione e di un'economia sempre più interconnessa e di mercato da una parte ha consentito – soprattutto alle piccole e medie realtà produttive più dinamiche e strategiche – sinergie fra i distretti industriali e grandi imprese multinazionali, dall'altra ha acuito problematiche e

¹² Come si sa, l'ISTAT non individua in Umbria comuni di pianura, bensì dei 92 comuni della regione 68 sono considerati collinari e altri 24 montani. In questi ultimi, degli 882.015 ab. (al 2019) della regione risiede appena il 15,6%, mentre il restante 84,4% è concentrato in collina, nei fondovalle e nelle conche. Questi dati evidenziano dunque gli esiti del processo di deruralizzazione.

criticità di un tessuto produttivo fragile e composito. La specificità della piccola impresa – tuttora, quasi il 95% delle imprese umbre non supera i 10 addetti – è stata accusata di essere responsabile della stagnazione dell'economia. Ridotta capacità di innovazione, bassa produttività e scarsa mobilità degli addetti hanno finito poi per sommarsi a indicatori economici negativi e a un generalizzato declino del lavoro verso forme di precariato e a basso reddito [24]: tali sono le caratteristiche del sistema produttivo umbro all'affacciarsi della pandemia.

Di conseguenza, la prima fase della pandemia in Umbria ha registrato una diffusione di contagi più per congestionamento e assembramenti nei centri maggiori che per contatti fra persone appartenenti a comuni diversi; un ruolo dunque assai minore andrà attribuito a quel pendolarismo, reticolare e/o rizomatico, che come nell'*Atlante* AGEI si sottolinea è fra le principali chiavi di lettura per comprendere l'impatto del virus in Lombardia¹³.

Nel caso umbro, dunque, hanno notevolmente influito sia la scarsa mobilità, sia le ripetute restrizioni previste dalle autorità regionali e comunali durante le prime e più critiche fasi della pandemia. Tentando una lettura dei dati in relazione alle specificità geografiche della regione possiamo innanzitutto evidenziare il ruolo della densità abitativa: oltre che nei capoluoghi di Provincia (Terni e Perugia), le aree con più numeri assoluti di contagiati sono risultate quelle più popolate dell'Alta Valle del Tevere e della Valle Umbra, là dove le forme dell'abitare e dell'organizzazione lavorativa hanno favorito il congestionamento negli spazi pubblici.

Le elevate concentrazioni di casi di positività nei comuni più popolosi e nelle aree ad essi limitrofe, insieme ai già elevati indici di trasmissibilità del contagio peculiari del Covid-19 e delle sue varianti, caratterizzano la catena del contagio all'avvento della pandemia. Prendendo in considerazione la prima ondata – da marzo a giugno 2020 –, mentre in Italia si osserva un incremento dei casi totali della curva epidemica, seppure con minore intensità dopo il picco di metà aprile 2020, per l'Umbria la curva inizia a decrescere già a partire dal 30 marzo e dai primi giorni di aprile è risultata costante la diminuzione dei pazienti positivi e in isolamento domiciliare. Se poi confrontiamo l'Umbria e l'Italia durante la prima ondata (in ordine a ricoverati con sintomi, pazienti in terapia intensiva, pazienti asintomatici in isolamento domiciliare, totale dei positivi, dimessi e/o guariti e deceduti) si registra in Umbria un andamento complessivo notevolmente meno critico rispetto a quello nazionale: l'Umbria raggiunge il picco della prima ondata il 31 marzo con 176 ricoverati, poi il numero decresce in modo abbastanza repentino. La prima ondata della pandemia in Umbria è risultata tutto sommato contenuta nell'arco del solo mese di marzo [21].

¹³ A ciò andrà aggiunta, nella fase di maggiore emergenza, la tutto sommato efficace risposta del sistema sanitario umbro, oggetto peraltro di recente riorganizzazione: attualmente, due aziende ospedaliere – Santa Maria della Misericordia a Perugia e Santa Maria a Terni – e due aziende sanitarie (USL Umbria 1 per il Nord, USL Umbria 2 per il Sud) rispondono in maniera coordinata e continuativa alle necessità della popolazione. Tutti i punti di forza e debolezza del servizio sanitario umbro sono descritti nel recente Piano Sanitario Regionale 2022-2026, le cui determinazioni risentono inevitabilmente delle conseguenze della pandemia. Cfr. <https://www.regione.umbria.it/documents/18/25430096/PSR+2022-2026.pdf/61cb6a3e-0898-43d5-96d4-3efb72581911> (ultimo accesso 30.03.2023).

La seconda ondata (ottobre 2020-marzo 2021), al contrario, ha colpito il territorio umbro in maniera ben diversa. Durante l'estate del 2020, dopo la riapertura da fine maggio dei confini regionali l'Umbria, in virtù dell'impatto tutto sommato lieve della prima fase, ha cercato di accreditarsi sul fronte turistico, anche sulla base delle sue specificità morfologico-ambientali ed economico-infrastrutturali, come regione del distanziamento e della sicurezza. Ma un vero e proprio *boom* turistico in agosto, unito alle regolari ripartenze delle attività in settembre – lavoro, aziende, scuole, università ecc. – hanno posto le condizioni affinché la recrudescenza del virus mettesse davvero a dura prova la regione e le sue strutture sanitarie. Non si è lontani dal vero affermando che, in Umbria, la vera pandemia è iniziata con la seconda ondata nell'ottobre 2020, piuttosto che con la prima nel marzo dello stesso anno.

Non è difficile intravedere fra le chiavi di lettura della pandemia le condizioni socio-economiche e morfo-territoriali della regione: se l'isolamento e la carenza di catene di valore collegate con le zone epicentro dell'epidemia – Italia settentrionale e Lombardia in particolare – ha in un primo momento contenuto il numero di casi positivi, permettendo nel periodo marzo-giugno di reagire efficacemente alla diffusione della pandemia, la repentina risalita delle curva epidemica a partire dall'estate 2020 andrà attribuita non solo a fattori come la scarsa considerazione del distanziamento sociale e delle precauzioni igienico-sanitarie unita a una maggiore capacità di penetrazione delle varianti del virus, ma anche a quell'intensificazione della mobilità e dei fenomeni di concentrazione verificatisi attraverso la "riscoperta" turistica della regione.

In tale contesto, è lecito domandarsi quale ruolo può aver avuto l'inquinamento dell'aria. Nel capitolo relativo all'Umbria realizzato per l'*Atlante* AGEI la variabile dell'inquinamento atmosferico (in particolare le concentrazioni di PM10 e PM2.5) non era stata considerata, privilegiando altre chiavi di lettura – in particolare economia, socialità e mobilità – nel tentativo di interpretare nella regione la diffusione del virus e l'andamento dei contagi.

Se, come nel caso lombardo, consideriamo in primo luogo l'inquinamento come aspetto di fragilità territoriale capace di influire sulla salute delle popolazioni esposte agli agenti inquinanti, per l'Umbria va premesso che le relazioni sullo stato dell'ambiente¹⁴ non hanno mai rilevato particolari criticità; fa naturalmente eccezione la situazione di Terni, dove la situazione relativa soprattutto alle polveri diffuse dalle acciaierie è da tempo nota a livello nazionale per le notevoli implicazioni sul piano epidemiologico¹⁵.

Se vogliamo invece supporre l'inquinamento come diffusore del morbo, attribuendo alle polveri sottili sia il ruolo di substrato in sospensione sia quello di vettore virale [9], possiamo avvalerci dei dati raccolti dalle stazioni di monitoraggio dell'ARPA Umbria, presenti in cospicuo numero sia nelle aree urbane che in quelle industriali della regione. Il periodo compreso fra febbraio e maggio 2020 è descritto dall'ARPA Umbria in alcuni report [27, 28], dai quali per Perugia non emergono particolari

¹⁴ Si veda per es. l'ultima, anche se ormai datata: [25]

¹⁵ Cfr. il Quinto Rapporto dello Studio Epidemiologico Nazionale dei Territori e degli Insediamenti Esposti a Rischio da Inquinamento (SENTIERI) [26], <https://epiprev.it/pubblicazioni/sentieri-studio-epidemiologico-nazionale-dei-territori-e-degli-insediamenti-esposti-a-rischio-da-inquinamento-quinto-rapporto> (ultimo accesso 30.03.2023).

criticità, mentre il caso di Terni fa invece registrare qualche giorno di superamento dei limiti di legge ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Nel tentativo di analizzare la situazione in un arco di più anni (2019-2022), abbiamo considerato i dati delle stazioni di monitoraggio ubicate in zone tradizionalmente critiche, delle quali spesso anche i mezzi di comunicazione denunciano il precario stato di “salute” atmosferica. Per Perugia si è considerata la stazione collocata a Fontivegge, per Terni quella di Borgo Rivo [28]. Se consideriamo l’andamento annuale delle concentrazioni di PM10 e 2.5 nelle due stazioni sopra dette dei capoluoghi di provincia, le situazioni si differenziano non poco, laddove a Terni, come purtroppo è noto, soprattutto in gennaio, febbraio, novembre e dicembre 2020 i superamenti dei limiti di legge sono molto frequenti. Analogo andamento denotano i valori di PM2.5 – sui quali più insiste la letteratura scientifica in ordine al rapporto causa-effetto tra inquinamento dell’aria e diffusione del virus – i cui limiti, negli stessi mesi, risultano a Terni ripetutamente superati. Il raffronto non evidenzia particolari anomalie fra i vari anni considerati, laddove il livello di concentrazione di PM nelle aree urbane risulta elevato sempre nel periodo autunnale-invernale, cioè quando al traffico veicolare si aggiungono le emissioni di polveri derivanti dall’accensione degli impianti di riscaldamento (in modo particolare quelli alimentati a biomasse legnose).

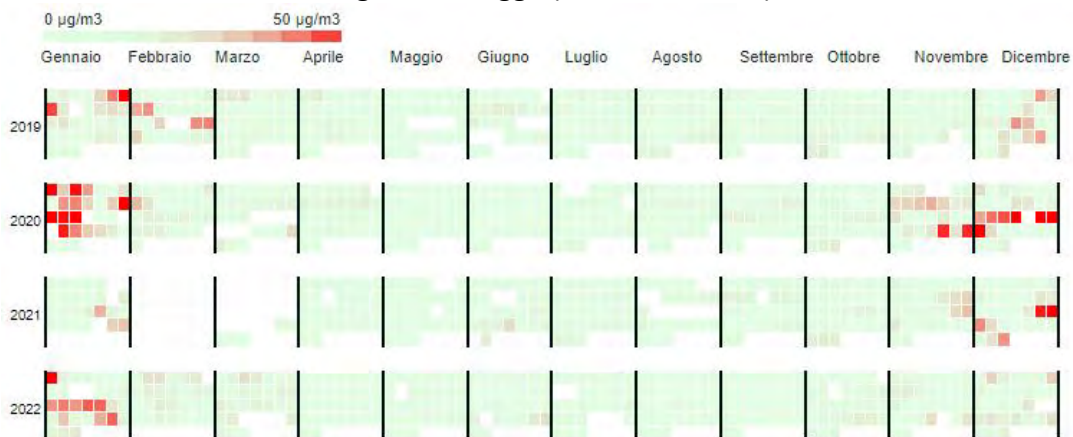
Nel caso di Terni i dati sembrano in definitiva confermare una fragilità territoriale che si esplica sia nell’esposizione degli abitanti agli agenti inquinanti, sia in una forma di inquinamento potenzialmente capace di agevolare la diffusione del morbo.

Figura 2. Andamento mensile dell’inquinamento da PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nella stazione di monitoraggio di Perugia Fontivegge (anni 2019-2022).



Fonte: ARPA Umbria.

Figura 3. Andamento mensile dell'inquinamento da PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nella stazione di monitoraggio di Perugia Fontivegge (anni 2019-2022).



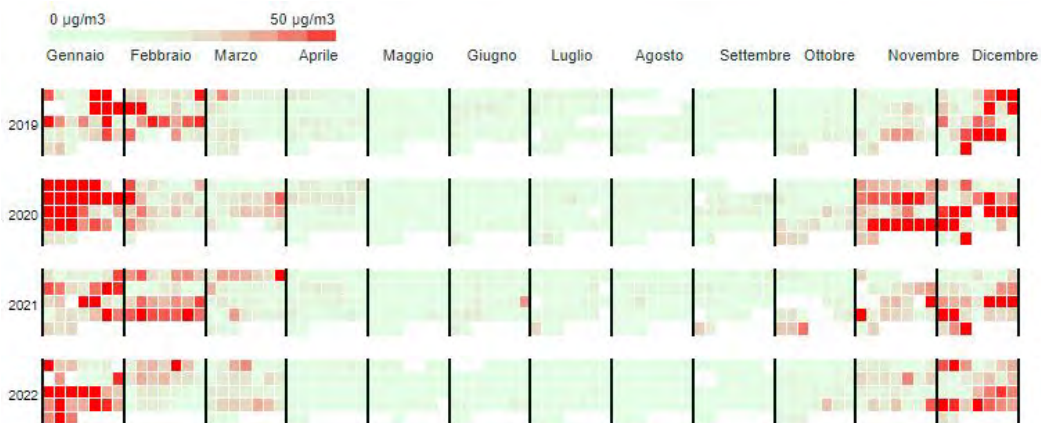
Fonte: ARPA Umbria.

Figura 4. Andamento mensile dell'inquinamento da PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nella stazione di monitoraggio di Terni Borgo Rivo (anni 2019-2022).



Fonte: ARPA Umbria.

Figura 5. Andamento mensile dell'inquinamento da PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nella stazione di monitoraggio di Terni Borgo Rivo (anni 2019-2022).



Fonte: ARPA Umbria.

Come si sa, a partire dalla fine di febbraio 2020, la Regione Umbria ha adottato ordinanze per il contenimento del contagio, riferite principalmente alla scuola, al trasporto pubblico locale e alla gestione dei rifiuti. Dopo l'avvio del lockdown nazionale (9 marzo 2020) si sarebbe dovuta registrare una diminuzione delle emissioni, che però, soprattutto a Terni, è risultata solo in parte (si veda in particolare la fig. 4). Di certo la riduzione del traffico veicolare ha favorito una riduzione delle emissioni; ma complessivamente, come nel caso della Lombardia, le variazioni per PM10 e PM2.5 sono risultate inferiori alle attese; e ciò perché le concentrazioni non sono solo influenzate dalle emissioni di prossimità, ma anche da quelle del bacino di riferimento, da possibili incrementi di alcune sorgenti (per es. la combustione di legna) e da situazioni meteorologiche favorevoli all'accumulo [29]. Pertanto "l'osservazione che drastiche riduzioni di alcune sorgenti non sempre impediscano il superamento dei limiti, pur contribuendo a ridurre l'entità, mostra in modo chiaro la complessità dei fenomeni correlati alla formazione e all'accumulo di particolato atmosferico e la conseguente difficoltà di ridurre in modo drastico i valori presenti in atmosfera in situazioni ordinarie" [29: cfr. p. 498].

5. Conclusioni

Queste note ribadiscono l'importanza delle variabili territoriali, ovvero delle chiavi di lettura geografiche, nel tentativo di analizzare e interpretare le grandi sfide che le società e le economie globalizzate dovranno affrontare nei prossimi decenni. L'approccio geografico alla prima fase della pandemia in Italia e il focus su due casi opposti e simbolici – da una parte la Lombardia epicentro dell'epidemia, dall'altra l'Umbria, in una prima fase regione apparentemente della sicurezza – consente di riconoscere che fattori come morfologia, mobilità e isolamento possono agevolare la comprensione non solo delle complesse dinamiche, ma anche delle fragilità della società contemporanea. A questi fattori andranno poi sommati gli effetti dell'inquinamento atmosferico.

La Lombardia, "locomotiva" d'Italia e tra le maggiori economie d'Europa, è anche regione per gran parte afflitta da una cattiva qualità dell'aria, per motivi di ordine morfologico comunque in stretta relazione con altri fattori come la mobilità degli abitanti, l'elevata densità abitativa, il ruolo in definitiva cruciale di crocevia economico d'Italia e d'Europa.

L'Umbria, al contrario, denota ancora una fisionomia economico-territoriale "interna" e marginale rispetto agli assi infrastrutturali fondamentali della rete nazionale. A parte poche superstrade, il resto del reticolo viario è vincolato dall'orografia e contraddistinto da caratteristiche funzionali di standard modesto: criticità che si traducono, da decenni, nella scarsa accessibilità della regione, la quale da tempo inevitabilmente si riflette sulla competitività del sistema produttivo locale. Isolamento e declino produttivo sembrano motivare un generale buono stato delle componenti ambientali (aria, acqua, suolo), nonostante il caso ternano, come si sa, rappresenti tuttora al riguardo un nodo irrisolto. Proprio le fragilità dunque concorrono – anche nel caso umbro – a spiegare, tra isolamento e interconnessione, l'evoluzione della prima ondata della pandemia.

Riferimenti bibliografici

1. Casti, E.; Riggio A. (a cura di). *Atlante Covid-19. Geografie del contagio in Italia*. AGEI: Roma, 2022.
2. Casti, E.; Adobati, F.; Negri, I. (eds.). *Mapping the Epidemic. A Systemic Geography of COVID-19 in Italy*. Elsevier: Amsterdam, 2021.
3. Bozzato, S. (a cura di). Geografie del Covid-19. *Documenti Geografici*, 2020, 1, DOI: http://dx.doi.org/10.19246/DOCUGEO2281-7549/202001_01
4. Conticini, E.; Frediani, B.; Caro, D. Can Atmospheric Pollution Be Considered a Co-factor in Extremely High Level of SARS-CoV-2 Lethality in Northern Italy? *Environmental Pollution*, 2020, 261, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114465
5. Coker, E.S. *et al.* The Effects of Air Pollution on COVID-19 Related Mortality in Northern Italy. *Environmental and Resource Economics*, 76, 2020, 4, pp. 611-634 <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00486-1>
6. Cori, L; Bianchi, F. Covid-19 and Air Pollution: Communicating the Results of Geographic Correlation Studies. *Epidemiologia & Prevenzione*, 44, 2020, 2-3, pp. 120-123, <https://doi.org/10.19191/EP20.2-3.P120.032>
7. Ciencewicz, J., Jaspers, I. Air Pollution and Respiratory Viral Infection. *Inhalation Toxicology*, Vol. 19, 2007, Issue 14, pp. 1135-1146, <https://doi.org/10.1080/08958370701665434>
8. Setti, L. *et al.* Potential role of Particulate Matter in the Spreading of COVID-19 in Northern Italy: First Observational Study Based on Initial Epidemic Diffusion. *BMJ Open*, 2020, <https://bmjopen.bmj.com/content/10/9/e039338>
9. Urrutia-Pereira, M.; Mello da Silva, C.A.; Solé, D. COVID-19 and Air Pollution: A Dangerous Association? *Allergologia et Immunopathologia*, Vol. 48, 2020, Issue 5, pp. 496-499, DOI: 10.1016/j.aller.2020.05.004
10. Cui, Y. *et al.*, Air Pollution and Case Fatality of SARS in the People's Republic of China: An Ecologic Study. *Environmental Health*, 2, 15, 2003, <https://doi.org/10.1186/1476-069X-2-15>
11. De Angelis, E. *et al.*, COVID-19 Incidence and Mortality in Lombardy, Italy: An Ecological Study on the Role of Air Pollution, Meteorological Factors, Demographic and Socioeconomic Variables. *Environmental Research*, Vol. 195, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110777>
12. Zhu, N. *et al.*, A Novel Coronavirus from Patients with Pneumonia in China, 2019. *The New England Journal of Medicine*, 2020, 382, 8, pp. 727-733, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31978945/>
13. Sagawa, T. *et al.* Exposure to Particulate Matter Upregulates ACE2 and TMPRSS2 Expression in the Murine Lung. *Environmental Research*, 195, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110722>
14. Chen, R. *et al.*, Fine Particulate Air Pollution and Daily Mortality. A Nationwide Analysis in 272 Chinese Cities, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, Vol. 196, 2017, Issue 1, <https://doi.org/10.1164/rccm.201609-1862OC>
15. Adobati, F. *et al.* Epicentro epidemico italiano: la Lombardia. In Casti, E.; Riggio, A. (a cura di), *Atlante Covid-19. Geografie del contagio in Italia*. AGEI: Roma, 2022, pp. 67-82.

16. ISPRA. *XV Rapporto Qualità dell'ambiente urbano. Edizione 2019*, Roma, 2019, <https://www.snpambiente.it/2020/09/10/xv-rapporto-sulla-qualita-dellambiente-urbano-edizione-2019/>
17. Ferrazzoli, M.; Maga, G. *Pandemia e infodemia. Come il virus viaggia con l'informazione*. Zanichelli: Bologna, 2021.
18. Balducci, A.; Fedeli, V.; Curci, F. (a cura di). *Oltre la metropoli. L'urbanizzazione regionale in Italia*. Guerini e Associati: Bologna, 2017.
19. Bolocan Goldstein, M. Città senza confini, territori senza gerarchie. In Dematteis, G. (a cura di), *L'Italia delle città: tra malessere e trasfigurazione*. Rapporto annuale della Società Geografica Italiana. Società Geografica Italiana: Roma, 2008, pp. 23-40.
20. Volpi, R. *Le regioni introvabili. Centralizzazione e regionalizzazione dello Stato pontificio*. Il Mulino: Bologna, 1983.
21. Fatichenti, F.; Melelli, L.; Alvioli, M. Mobilità e connessioni epidemiche tra aree interne e urbane in Umbria. In Casti, E.; Riggio, A. (a cura di), *Atlante Covid-19. Geografie del contagio in Italia*. AGEI: Roma, 2022, pp. 195-211.
22. Melelli, A. Evoluzione recente delle strutture insediative in Umbria. *Boll. Soc. Geogr. Ital.*, suppl. al vol. XI della ser. X, 1982, pp. 183-196.
23. Fatichenti, F. La questione del riassetto territoriale e le prospettive dei centri montani compresi nel cratere sismico. *Umbria Ricerche*, AUR, 2-3, 2022, pp. 41-62.
24. Ferrucci, L. L'Umbria tra declino strutturale, crisi e rinascita economica. *Geotema*, 55, 2017, pp. 45-51.
25. ARPA Umbria. *Relazione sullo stato dell'ambiente in Umbria*. Perugia, 2004.
26. Zona A. et al. SENTIERI. Quinto Rapporto. *Epidemiologia & Prevenzione*, 43, 2019, 2-3, suppl. 1.
27. ARPA Umbria. *Qualità dell'aria e emergenza Covid-19 in Umbria*. Perugia, 2020, <https://www.arpa.umbria.it/MC-API/Risorse/StreamRisorsa.aspx?guid=dfac2a71-83d8-4a60-8f07-ef33107211b8>
28. ARPA Umbria, *Bollettino settimanale della qualità dell'aria*, nn. 7, 8, 9, 10, febbraio-marzo 2020, <https://www.arpa.umbria.it/monitoraggi/aria/contenuto.aspx?idpagina=82>
29. SNPA. *La qualità dell'aria in Italia. Edizione 2020*. Roma, Rapporti, 17/2020.
30. Deleuze, G.; Guattari, F. *Rizoma. Millepiani. Capitalismo e schizofrenia. Sez. 1*. Castelvecchi: Roma, 1997.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Design and performance analysis of a small-scale prototype water condensing system for atmospheric emissions abatement

Franco Cotana¹, Valentina Coccia², Ramoon Barros Lovate Temporim², Leandro Lunghi¹, Andrea Nicolini¹, Anna Magrini³, Daniele Dondi⁴, Dhanalakshmi Vadivel⁴, Marco Cartesegna⁵ and Oleksandra Tryboi⁶.

- ¹ Engineering Department, UNIPG — University of Perugia, Via G. Duranti, 93, 06125 Perugia (PG), Italy, cotana@crbnet.it, leandro.lunghi@unipg.it, andrea.nicolini@unipg.it.
- ² CIRIAF/CRB Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e l'Ambiente "M. Felli", Via G. Duranti, 67, 06125, Perugia (PG), Italy, coccia@crbnet.it, barroslovate@crbnet.it.
- ³ Civil Engineering ad Architecture Dept. UNIPV - University of Pavia, Via Ferrata 3, 27100 Pavia (PV), Italy, magrini@unipv.it.
- ⁴ Chemistry Department UNIPV - University of Pavia, Viale Taramelli 12, 27100 Pavia (PV), Italy, daniele.dondi@unipv.it, dhanalakshmi.vadivel@unipv.it.
- ⁵ Technical consultant, marco.cartesegna@gmail.com.
- ⁶ Bioenergy laboratory, IET NASU - Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Marii Kapnist str., 2a, Kyiv, Ukraine, tryboiov@nas.gov.ua

* Franco Cotana. E-mail: cotana@crbnet.it

Abstract: This article presents the design and performance analysis of a flue gas condensation system coupled to a biomass plant, that is an objective of the national supported PRIN2017 BIOCHEAPER project. The analysed system is composed of a biomass combustion plant fed by wood chips producing flue gases that are condensed by a double heat exchanger system capable of extracting water and heat from the flue gases and consequently reducing the concentrations of CO, CO₂, NO_x, and PM, in addition to releasing the gases at a temperature close to that of the external environment. The biomass plant has a capacity of 100 kW and operates at a steady state regime with a fuel consumption rate of 50 kg of wood chips per hour. The fuel material used is composed of chips of ligno-cellulosic material with a lower heating value of 18.98 MJ/kg. After going through the process of heat exchange and cleaning by the cyclone, the combustion process produced gases in output at 430°C. The central condensing works in two stages of cooling. After passing through the cyclone, the gases produced are sent to a first cooling stage consisting

of a high-temperature tube heat exchanger (combustion gas/air heat exchanger). Gases enter at a rate of approximately 584 m³/h at 430°C. In this phase, sensible heat is recovered and transferred to the heat carrier (air), and the gases enter the second exchanger at a temperature of 65°C. In the second stage, in the second heat exchanger (flue gas/water heat exchanger) the sensible and latent thermal energy is recovered in the heat carrier (water), producing water condensation. The flue gas is released into the atmosphere at about 33°C. During the operation, all the conditions were measured, including temperatures of flue gases, the mass flow of flue gases, the rate of fuel consumption, the temperature of heat carriers, and the rate of water condensation. According to the tests, the condensing system operating under the described conditions was able to condense water from the flue gas at a rate of about 75 g/min at a temperature of 22°C. In addition, it was observed that the condensation system reduced the emission of some pollutants. A reduction in the order of 20% of CO₂, 19% of CO, 30% of NO and 26% of NO_x emerged comparing the gas before and after treatment by the condensation system.

Keywords: Smokes Condensing System; Atmospheric Pollutants Mitigation; Biomass Combustion Plant.

1 Introduction

Implementing alternative energy sources with a high level of sustainability has been adopted as a path for the energy transition in the EU [1, 2]. In this circumstance, the energy obtained through biomass gained prominence, with its great potential as a programmable and sustainable resource for energy production. Furthermore, biomass is referred to as a carbon neutral fuel since there is no net input of carbon dioxide to the environment. The biomasses are divided into two main categories or fractions, lignocellulosic fraction and seeds fraction [1]. Lignocellulosic material can be used directly or indirectly to produce different energy sources, such as chemicals, biofuels, biomaterials, heating, cooling, electricity, etc [3, 4].

Combustion is the most used technology due to its simple implementation. Solid biomass can be burned in ovens or boilers. This process produces heat, which can be used directly in thermal systems [3, 4].

However, the combustion of lignocellulosic biomass fuel as chips or pellets produces a variety of chemical species, including CO₂, CO, NO_x, volatile organic compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons, and particulates that, in high concentrations, may cause problems to a human's health [5, 6].

Strategies for biomass combustion have been investigated to address the problem of pollutant emissions. These strategies are oriented to primary measures such as optimising the combustion process and/or fuel improvement (air supply design, pre-heating primary combustion air, household behaviour, use of alkali compounds). The secondary measures are focused on flue gas cleaning

technologies (electrostatic precipitators, condensing scrubbers, catalytic converters, bag filters, and cyclone separators) [7, 8].

To address the problem of the high PM emissions linked to biomass-based energy plants, a prototype of an innovative system was proposed to reduce pollutant emissions in the atmosphere from flue gases [9].

The proposed system is a prototype plant for condensing flue gases, which operates based on two heat exchangers. The first flue gases/air heat exchanger absorbs the sensible heat of the combustion gases, and the second heat exchanger absorbs the latent heat, condensing the water present in the flue gas and removing a certain amount of polluting substances, in particular PM, SO_x and NO_x.

Therefore, the objective of this research is to present the design and implementation of a retrofitting for lignocellulosic biomass-based combustion plants to control pollutant emissions through the condensation of the flue gases.

2 Material and Methods

2.1 Woodchips

The fuel material used in this study were woodchips produced from chestnut, oak, alder, pine and acacia, as can be seen in Figure 1.

Figure 1. Fuel material – Woodchips.



The raw material was characterised in terms of humidity through a calorimeter (mod. LECO AC-350) [10]; ash content, fixed residue, and volatile solids with a thermogravimetric analyser (LECO, mod. TGA 701) [11]; lower heating value through a calorimeter (LECO, mod. AC-350) [10]; and carbon, hydrogen and nitrogen through a CHN Analyser (LECO, mod. TruSpec CHN) [12].

2.2 Combustion System

The studied system consists of two separate plants: a biomass combustion plant and a flue gas condensation plant. The first plant, the combustion plant, comprises the stages of biomass storage, transport between machinery, combustion, heat exchange with the working fluid, expansion and production of electrical energy in the turbine. The combustion plant is structured, as can be seen in Figure 2.

Figure 2. Combustion Plant.



The raw material arrives and is unloaded from the truck to the hopper (8 m³) employing an overhead crane. The hopper is connected to the combustion chamber through a set of rakes and screw conveyors. At the bottom of the hopper, rakes move the chips by pushing them towards a feed chute where the material is removed, employing a set of screw conveyors towards the combustion chamber.

The combustion chamber comprises a circular steel body filled with refractory cement, a diesel burner, and a set of fans that keep the oxygen supply to maintain combustion under ideal conditions. At the bottom of the chamber, a set of rakes remove the ashes to be stored in a container and further used for fertilising agricultural fields.

The exhaust gases from combustion leave the chamber and pass through the primary heat exchanger. This heat exchanger is made of INOX 430 and a highly efficient AISI 310 tubular beam with

an efficiency of 90%. In this phase, the heat produced from biomass combustion is transferred to the heat transfer fluid (air), which is sent to the expansion in the turbine.

Once the appropriate thermodynamic conditions are reached, the air is deflected to the turbine to be expanded. A high-speed single-shaft Turbec T100 turbine is used. The turbine can produce 100 kW of electric power.

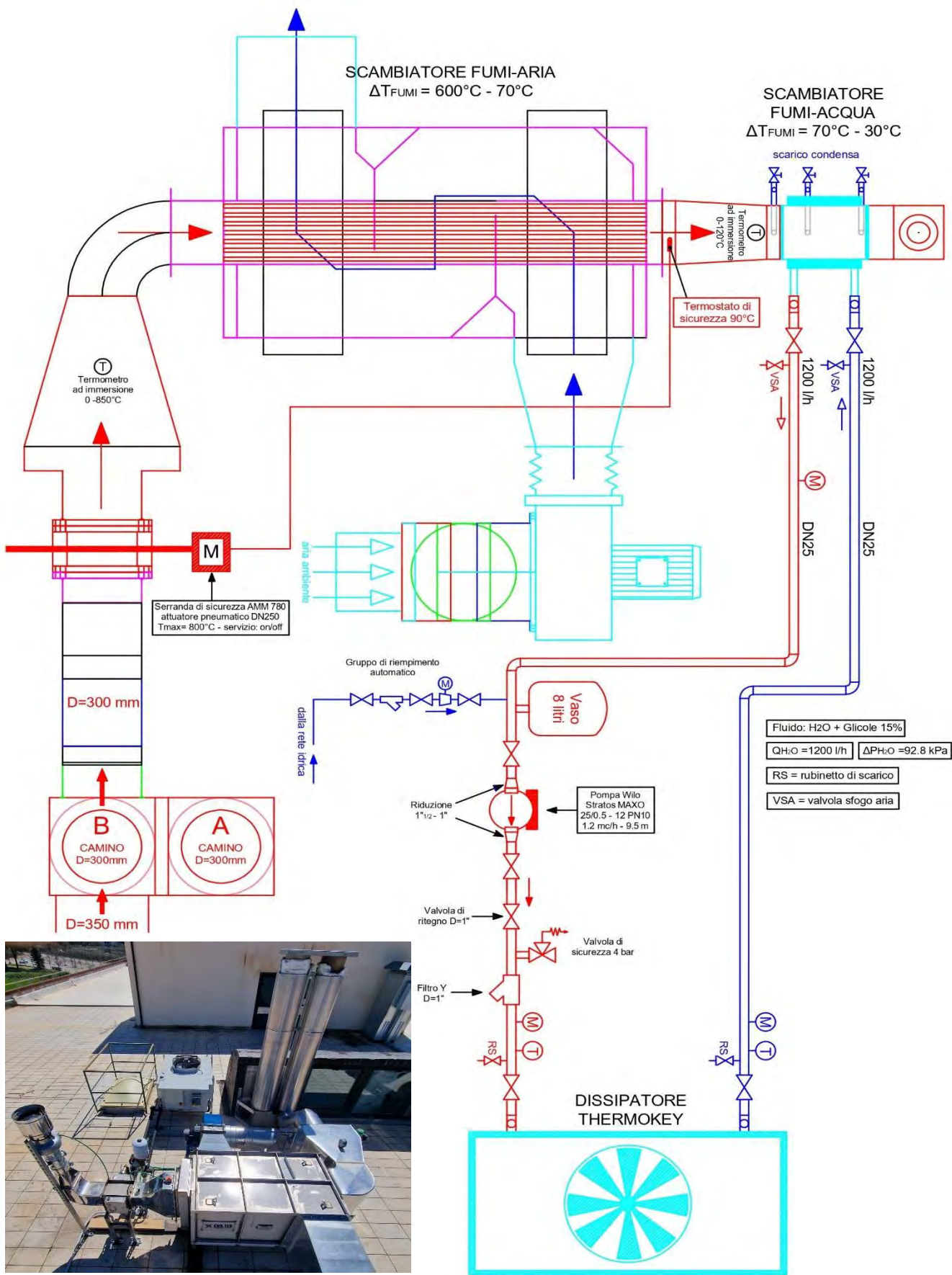
The high-frequency alternating current produced by the generator (500 VAC at 2333 Hz corresponding to of the motor shaft) is initially rectified into direct current and converted into three-phase alternating current (400 VAC at 50 Hz) via a static converter.

The exhaust gases produced by combustion, after passing through the heat exchanger, goes through a cyclone that removes PM10 and fly-ash particulate content, having an efficiency of 90–98% for particles above 10 μm .

2.3 *Condensing System*

The condensing plant is a system for extracting water and heat from the biomass combustion plant flue gases. In practice, based on the operating data of the heat generator (combustion plant), a by-pass system has been designed, which allows the withdrawal of a certain mass flow rate of flue gases. The combustion products, passing through two heat exchangers, cool down to a temperature close to that of the external environment. The design of the condensing plant is presented in Figure 3.

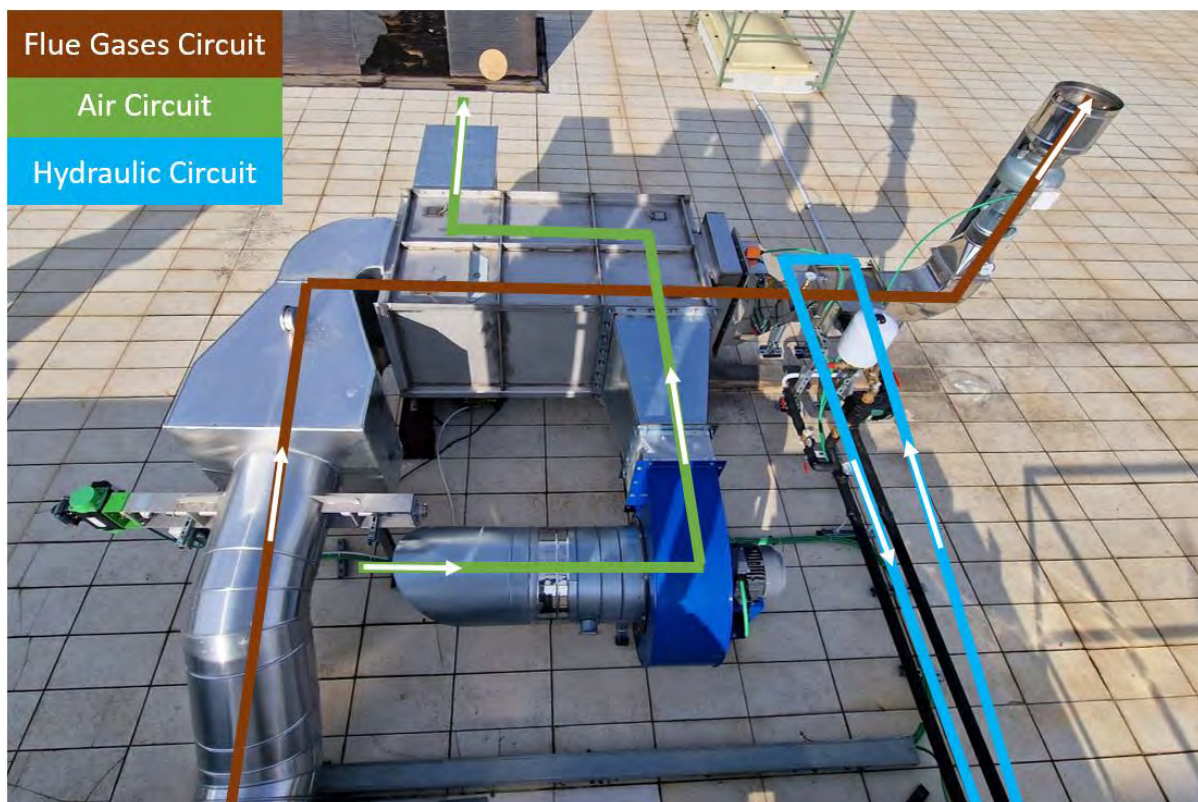
Figure 3. Condensing Plant Design.



The condensing plant allows, on the one hand, the recovery of thermal energy, and on the other, the collection of the condensation water which is produced thanks to the achievement of final temperatures significantly lower than the dew point of the flue gases. Due to the high temperature of the combustion products leaving the combustion plant, the cooling process takes place in two successive steps: in the first stage, thanks to a tube heat exchanger (high temperature flue gases/air heat exchanger), the sensible heat is recovered, while in the next stage, in the second heat exchanger (low-temperature flue gases/water heat exchanger) sensible and latent thermal energy is recovered, producing condensing water.

The plant comprises three different circuits, as seen in Figure 4.

Figure 4. Condensing Plant Circuits.



Flue gases circuit: includes the ducts necessary to bypass the fumes to the heat exchangers.

Air circuit: will include the fan and the ducts necessary to convey the fluid in the shell side high-temperature flue/air exchanger.

The heat exchanger is a tube type in counter current. The flow rate necessary to guarantee the first cooling step will be identified by acting on a manual adjustment damper, also on the basis of the external climatic conditions. Since the circuit is open, the resulting hot air will be expelled into the atmosphere. From the project, it is foreseen that the fumes entering the fumes/air exchanger will enter the system at an average temperature of 600°C with a flow rate of 500 m³/h, and the temperature at the outlet will be 70°C.

Hydraulic circuit: The condenser's inlet section coincides with the high-temperature exchanger's outlet section. It will include the hydraulic components necessary to convey the cooling (water) in the low-temperature fume/water exchanger (condenser).

The hydraulic circuit is a closed type equipped with a circulation pump (Wilo, mod. Stratos MAXO 25/0.5-12) [13], expansion tank, safety valve, Y-filter, check valve, shut-off valves, air vent devices and taps of discharge. The heat removed from the fluid from the flue gases is dissipated into the environment via a single-fan dry-cooler unit (ThermoKey, mod. WH1163.B D/22 QRS) [14]. The water flow necessary to ensure the second cooling step will be managed automatically by an electronic circulator. The temperature of the fumes entering the fumes/water exchanger will be approximately 70°C, leaving at a temperature of 30°C.

2.4 Regime Operations

The system was tested in a steady state regime from 12th to 15th December 2022. Initially, the whole system was verified and cleaned up on the first day. Initially, all the electronic panels and engines were tested to verify the correct operation of machinery. Following the combustion chamber and conveyors were cleaned. The combustion chamber (burner) was cleaned, removing any trace ashes from previous tests, eliminating the possible interference from these residues in the correct combustion of the fuel material, and avoiding emissions associated with the accumulation of ashes in the burner bed.

Then the system was configured to operate at the optimal conditions. In this phase, the parameters necessary for the steady-state operation were configured.

The parameters for achieving the conditions are set and depend on the physio-chemical characteristics of the fuel material (calorific value, size, humidity, hardness), on the temperature of the refractory cement, on the temperature, speed, and humidity of the comburent.

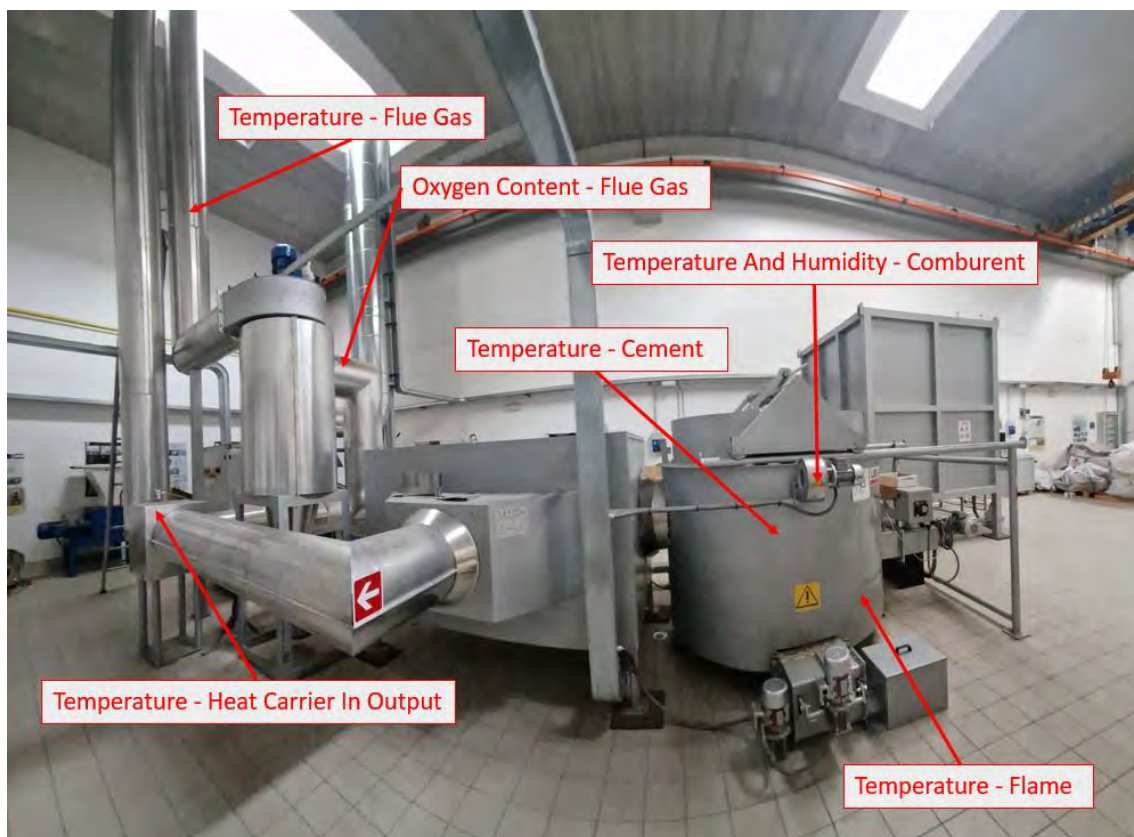
Finally, the shutdown phase takes place when it is believed that the work phase is finished. Its objective is to bring the temperature of the fumes up to a temperature of 100°C, after which the system will be left to cool by natural convection, leaving only the cyclone on so that the fumes are permanently expelled.

2.5 Monitoring and Sampling

2.5.1 Combustion Plant

The monitoring and sampling process was performed by doing three valid runs with a duration of 30 minutes while operating in steady state regime; all the parameters were measured in triplicate. In each run, the conditions of the operation of the combustion and condensing plants were measured.

During the operation of the combustion plant, the temperature of the combustion chamber (temperature of flame, cement and comburent, and humidity of comburent), a heat exchanger (temperature and humidity of heat carrier in input and output), and exhausted flue gas at the cyclone system (temperature of flue gas and oxygen content) were measured. The points of measurement can be seen in Figure 5.

Figure 5. Combustion Plant – Measuring Points.

The temperatures in the combustion chamber, heat exchanger and cyclone were measured using K-type thermocouples. The temperature and humidity of comburent air was measured through a Temperature/Relative Humidity Logger (Gemini, mod. Tinytag TGU 4500) [15] placed close to the three combustor oxygenators.

The values from the built-in thermocouples and oxygen sensor were acquired from the command panel of the combustion plant.

2.5.2 Condensing Plant

The flue gas circuit was monitored in terms of temperature at three different points: in the input of the condensing system (before the heat exchanger flue gas/air), in the intermediate phase of the circuit (after the heat exchanger flue gas/air and before the heat exchanger flue gas/water), and at the end of the system before being released in the atmosphere (after the heat exchange flue gas/water). For the temperature measurement, inert gas filled thermometers anti-vibration (Nuova Firma, mod. TA8) [16] with a range of up to 650°C were employed in the three different points of the plant. In addition, temperatures at the input and output points of the systems were measured by the thermocouple of the gas analyzer used to examine the chemical composition of flue gases.

Still, on the flue gas circuit, the composition and mass flow of the flue gas was measured in input and output of the condensing system. The mass flow was measured with a Digital Stack Gas

Velocity and Flow Meter (TCR Tecora, mod. Flowtest ST) [17]. The flue gas velocity and temperature were done through an S-type Pitot tube and with the thermocouple.

As well as the measurement of the velocity of the gas flow, the measurements for the analysis of the flue gases' chemical composition were done at the same points (input and output of the system). A gas analyser (SEITRON, mod. CHEMIST 600) [18] equipped with electrochemical gas cells was used for the analysis of O₂, CO/H₂, NO, NO₂, CO₂, and H₂. Flue gas sampling was performed by a sampling probe equipped with a thermocouple for gas measurements up to 1200°C.

The input and output air in the heat exchanger flue gas/air was monitored in terms of temperature and humidity using a temperature and relative humidity logger (Gemini, mod. Tinytag Plus 2) [19].

The input and output water in the flue gas/water heat exchanger was monitored in terms of temperature by a thermometer.

The collection and sampling of the condensed material were realized in the section that comprises the flue gas passage before and after the flue gases/water heat exchanger. The condensate collectors were positioned at three points, two drain points between the heat exchanger flue gas/air and flue gas/water, and another one between the heat exchanger flue gas/water and the chimney. During the condensate material collection, the condensate temperature was measured. The points of extraction can be seen in Figure 6.

Figure 6. Condensing draining points.



2.6 Characterisation of Condensate and Ashes

The raw material was characterised at the University of Perugia, in the Biomass Research Centre's laboratories in terms of humidity, energy content, ash content, fixed residue, solid volatiles, carbon, hydrogen, nitrogen, heavy metals, which arsenic, cadmium, chromium, copper, lead, mercury, nickel, and zinc. Similarly, the ashes produced by the combustion process were analysed, except for heat capacity and elemental analyses. The moisture content was measured through a total moisture analyser (Mettler Toledo HB43-S) [20]. The ash content, fixed residue and volatile solids were measured through a thermogravimetric analyser. The energy content (lower heating value) was measured through a calorimeter. The carbon, hydrogen and nitrogen content were measured through a CHN Analyser. Heavy metals, such as arsenic, cadmium, chromium, copper, lead, mercury, nickel, and zinc, were measured through an optical emission spectroscopy (Optima 8000 ICP-OES) [21].

3 Results

3.1 Woodchips and Ashes Characterisation

The fuel material (woodchips) was characterised in terms of humidity, energy content, ash content, fixed residue, solid volatiles, carbon, hydrogen, nitrogen, and heavy metals, which arsenic, cadmium, chromium, copper, lead, mercury, nickel, and zinc. The results can be seen in Table 2.

Table 2. Woodchips Characterization.

Woodchips		
Calorimeter (HHV)		
HHV	cal/g	4536.83
HHV	MJ/kg	18.98
Elemental Analysis (CHN)		
Carbon	%	55.07
Hydrogen	%	6.19
Nitrogen	%	0.59
Thermogravimetric Analysis (TGA)		
Humidity	%	13.62
Dry volatiles	%	79.83
Dry ashes	%	1.07
Dry Fixed Carbon	%	19.12
ICP Analysis (ICP)		
Arsenic (As)	ppm	<0.008
Zinc (Zn)	ppm	4.334

Antimony (Sb)	ppm	<0.1
Lead (Pb)	ppm	0.415
Cadmium (Cd)	ppm	0.051
Nickel (Ni)	ppm	0.717
Mercury (Hg)	ppm	<0.2
Chromium (Cr)	ppm	0.486
Magnesium (Mg)	ppm	215.25
Copper (Cu)	ppm	1.338

The ashes from the combustion process were characterised in terms of humidity, fixed residue, solid volatiles, cadmium, chromium, copper, lead, mercury, nickel, and zinc.

The results can be seen in Table 3.

Table 3. Ashes Characterization.

Ashes		
Thermogravimetric Analysis (TGA)		
Humidity	%	0.26
Dry volatiles	%	19.81
Dry ashes	%	80.65
Dry Fixed Carbon	%	0
ICP Analysis (ICP)		
Arsenic (As)	ppm	69.48
Zinc (Zn)	ppm	<0.002
Antimony (Sb)	ppm	34.619
Lead (Pb)	ppm	<0.008
Cadmium (Cd)	ppm	25.8
Nickel (Ni)	ppm	<0.004
Mercury (Hg)	ppm	<0.2
Chromium (Cr)	ppm	16.772
Magnesium (Mg)	ppm	10798.9
Copper (Cu)	ppm	19.194

3.2 Operational Monitoring Results

The results obtained during the operational campaign are shown below. The results displayed are the average of the measurements performed in triplicate. The measured parameters are shown for each plant (combustion and condensation). The measured parameters include monitoring time, temperatures at various points in the process chain, fuel consumption, mass flows, humidity, condensation rate, and analysis of flue gases before and after the condensation process. The results for each sampling run are shown in Tables 4, 5 and 6.

Table 4. Condensation Plant Monitoring - Run 1.

Date / Time		
Day	Date	14/12/2022
Time start	Hour/min	3:19:00 PM
Time end	Hour/min	3:49:00 PM
Total time of sampling	Min	30
Combustion plant		
Cement - Temperature	°C	404.00
Flue gas - Temperature	°C	428.50
Flame - Temperature	°C	862.00
Heat carrier (air) INPUT - Temperature	°C	20.50
Heat carrier (air) OUTPUT - Temperature	°C	41.50
Burner – Depression	mBar	2.70
Smokes - Oxygen	%	13.30
Oxygenator 1 INPUT - Temperature	°C	20.71
Oxygenator 1 INPUT - Humidity	%HR	48.98
Oxygenator 1 INPUT - Dew point	°C	9.55
Oxygenator 1 INPUT - Mass flow	m ³ /h	455.00
Oxygenator 2 INPUT - Temperature	°C	21.46
Oxygenator 2 INPUT - Humidity	%HR	48.40
Oxygenator 2 INPUT - Dew point	°C	10.08
Oxygenator 2 INPUT - Mass flow	m ³ /h	650.00
Fuel (woodchips) - Mass flow	kg/h	50.00
Condensing System		
Flue gas HE1 INPUT - Temperature	°C	419.80
Flue gas HE2 INPUT - Temperature	°C	49.33
Flue gas HE2 OUTPUT - Temperature	°C	23.67
flue gases INPUT - Mass flow	m ³ /hour	465.68
Air HE1 INPUT - Temperature	°C	15.41
Air HE1 INPUT - Humidity	%RH	70.00
Air HE1 INPUT - Dew point	°C	9.96
Air HE1 OUTPUT - Temperature	°C	18.01
Air HE1 OUTPUT - Humidity	%RH	52.93
Air HE1 OUTPUT - Dew point	°C	8.26
Water HE2 INPUT - Temperature	°C	13.17
Water HE2 OUTPUT - Temperature	°C	17.33
Condensate 1 - Weight	g	2306.50
Condensate 3 - Weight	g	897.40
Condensate 1 - Time rate	g/min	76.88
Condensate 3 - Time rate	g/min	29.91
Condensate total - Time rate	g/min	106.80
Condensate 1 - Temperature	°C	20.20
Condensate 3 - Temperature	°C	15.80

Flue Gas Analysis					
Parameter	Unit	INPUT	OUTPUT	Δ	%
T gas	°C	419.8	30.0	389.80	93%
T air	°C	9.0	9.0	0.00	0%
O ₂	%	13.3	14.9	-1.60	-12%
CO ₂	%	7.5	5.9	1.60	21%
CO	ppm	1093.00	1070.00	23.00	2%
NO	ppm	73.00	55.00	18.00	25%
NO ₂	ppm	0.00	0.00	0.00	-
H ₂	ppm	Upper limit	Upper limit	-	-
Nox	ppm	73.00	55.00	18.00	25%

Table 5. Condensation Plant Monitoring - Run 2.

Date / Time		
Day	Date	14/12/2022
Time start	Hour/min	4:01:00 PM
Time end	Hour/min	4:31:00 PM
Total time of sampling	Min	30
Combustion plant		
Cement - Temperature	°C	413.00
Flue gas - Temperature	°C	416.00
Flame - Temperature	°C	855.00
Heat carrier (air) INPUT - Temperature	°C	22.00
Heat carrier (air) OUTPUT - Temperature	°C	41.00
Burner - Depression	mBar	2.90
Smokes - Oxygen	%	13.40
Oxygenator 1 INPUT - Temperature	°C	21.75
Oxygenator 1 INPUT - Humidity	%HR	45.62
Oxygenator 1 INPUT - Dew point	°C	9.49
Oxygenator 1 INPUT - Mass flow	m ³ /h	455.00
Oxygenator 2 INPUT - Temperature	°C	22.60
Oxygenator 2 INPUT - Humidity	%HR	46.68
Oxygenator 2 INPUT - Dew point	°C	10.60
Oxygenator 2 INPUT - Mass flow	m ³ /h	650.00
Fuel (cippatto) - Mass flow	kg/h	50.00
Condensing System		
Flue gas HE1 INPUT - Temperature	°C	441.50
Flue gas HE2 INPUT - Temperature	°C	74.33
Flue gas HE2 OUTPUT - Temperature	°C	39.67
flue gases INPUT - Mass flow	m ³ /hour	678.16
Air HE1 INPUT - Temperature	°C	9.93
Air HE1 INPUT - Humidity	%RH	82.13
Air HE1 INPUT - Dew point	°C	7.01
Air HE1 OUTPUT - Temperature	°C	39.67
Air HE1 OUTPUT - Humidity	%RH	17.30

Air HE1 OUTPUT - Dew point	°C	10.24
Water HE2 INPUT - Temperature	°C	13.50
Water HE2 OUTPUT - Temperature	°C	25.50
Condensate 1 - Weight	g	15.30
Condensate 3 - Weight	g	1427.00
Condensate 1 - Time rate	g/min	0.51
Condensate 3 - Time rate	g/min	47.57
Condensate total - Time rate	g/min	48.08
Condensate 1 - Temperature	°C	25.00
Condensate 3 - Temperature	°C	25.00

Flue Gas Analysis

Parameter	Unit	INPUT	OUTPUT	Δ	%
T gas	°C	441.50	47.80	393.70	89%
T air	°C	8.60	9.10	-0.50	-6%
O ₂	%	13.50	15.30	-1.80	-13%
CO ₂	%	7.30	5.50	1.80	25%
CO	ppm	1026.00	823.00	203.00	20%
NO	ppm	66.00	45.00	21.00	32%
NO ₂	ppm	0.00	1.00	-1.00	#DIV/0!
H ₂	ppm	Upper limit	1602.00	-	-
Nox	ppm	66.00	51.00	15.00	23%

Table 6. Condensation Plant Monitoring - Run 3.

Date / Time		
Day	Date	15/12/2022
Time start	Hour/min	12:35:00 PM
Time end	Hour/min	1:20:00 PM
Total time of sampling	Min	45
Combustion plant		
Cement - Temperature	°C	290.67
Flue gas - Temperature	°C	451.00
Flame - Temperature	°C	826.67
Heat carrier (air) INPUT - Temperature	°C	23.00
Heat carrier (air) OUTPUT - Temperature	°C	48.00
Burner - Depressione	mBar	2.27
Smokes - Oxygen	%	13.37
Oxygenator 1 INPUT - Temperature	°C	23.28
Oxygenator 1 INPUT - Humidity	%HR	45.70
Oxygenator 1 INPUT - Dew point	°C	10.91
Oxygenator 1 INPUT - Mass flow	m ³ /h	455.00
Oxygenator 2 INPUT - Temperature	°C	22.87
Oxygenator 2 INPUT - Humidity	%HR	47.15
Oxygenator 2 INPUT - Dew point	°C	11.01
Oxygenator 2 INPUT - Mass flow	m ³ /h	650.00
Fuel (cippatto) - Mass flow	kg/h	50.00

Condensing System					
Flue gas HE1 INPUT - Temperature	°C				422.59
Flue gas HE2 INPUT - Temperature	°C				71.98
Flue gas HE2 OUTPUT - Temperature	°C				33.90
flue gases INPUT - Mass flow	m3/hour				609.88
Air HE1 INPUT - Temperature	°C				14.06
Air HE1 INPUT - Humidity	%RH				73.79
Air HE1 INPUT - Dew point	°C				9.43
Air HE1 OUTPUT - Temperature	°C				30.06
Air HE1 OUTPUT - Humidity	%RH				31.81
Air HE1 OUTPUT - Dew point	°C				11.46
Water HE2 INPUT - Temperature	°C				14.00
Water HE2 OUTPUT - Temperature	°C				23.80
Condensate 1 - Weight	g				901.10
Condensate 3 - Weight	g				2218.30
Condensate 1 - Time rate	g/min				20.02
Condensate 3 - Time rate	g/min				49.30
Condensate total - Time rate	g/min				69.32
Condensate 1 - Temperature	°C				21.20
Condensate 3 - Temperature	°C				25.60
Flue Gas Analysis					
Parameter	Unit	INPUT	OUTPUT	Δ	%
T gas	°C	422.59	43.12	379.47	90%
T air	°C	12.78	11.91	0.87	7%
O ₂	%	13.68	14.81	-1.13	-8%
CO ₂	%	7.12	5.99	1.13	16%
CO	ppm	1046.00	862.11	183.89	18%
NO	ppm	69.25	46.78	22.47	32%
NO ₂	ppm	0.00	0.00	0.00	-
H ₂	ppm	1841.00	1764.44	76.56	4%
Nox	ppm	69.25	47.44	21.81	31%

Under the conditions of temperature and mass flow described above, a reduction of the pollutants emitted into the atmosphere was verified, which, CO, CO₂, NO and NO_x. The emission factors which obtained the highest reduction rate were NO and NO_x, reducing respectively on average 30% and 26% with the condensation process. Next, the process was responsible for a reduction of approximately 20% in CO₂ emissions and 19% in CO.

The proposed system, under the conditions described, was able to capture water and pollutants at a rate of about 75 g/min at a temperature of 22°C.

4 Discussion

In this preliminary phase of the research, to find a correlation between experimental data and predictive calculations, the major efforts have been devoted to representing the chemical combustion

reaction of the biomass used in the experimental tests. The input parameters considered were the data relating to the operating conditions of the system and those obtained from the chemical analyses of the biomass and exhaust fumes.

The formulations normally used to represent cellulose (C₆H₁₂O₅) and lignin (C₉H₁₀O₂, C₁₀H₁₂O₃ and C₁₁H₁₄O₄) both in single and coupled form, with the possibility of varying their mass fraction, did not yield satisfactory results, with respect to the percentages of oxygen and carbon dioxide detected in the fumes.

Furthermore, the phenomenon of condensation, due to the high excess air, would occur at too low dew temperatures. For the reasons outlined above, the study was aimed at identifying a representative molecule of the biomass used in the experiments that approximates the results obtained from CHN analysis.

The amount of water collected during the experimental tests does not seem to be easily calculable, due to the complexity of the phenomena that occur especially at the first heat exchanger (high temperature), with condensation formation (due to contact with cold surfaces) even though the temperature of the fumes is higher than the dew temperature. A preliminary analysis, conducted by assimilating the fumes to humid air, leads to some results only with reference to the total amount of condensate collected during the tests and considering the arithmetic mean temperature between those of the fluids exiting the second heat exchanger (low temperature).

Table 7 reports some of the experimental parameters that are compared with the results of the calculations.

Table 7. Comparison between some experimental and calculated data.

	Parameter	Unit	Experimental	Calculated	Δ [%]	
Input data	Gchip [kg/h]	kg/h	50	50	-	
	XH ₂ O [%]	%	13.62	13.62	-	
	XMA [%]	%	86.38	86.38	-	
Test N°1	Qair_st [m ³ /h]	m ³ /h	-	235.2	-	
	Qair [m ³ /h]	m ³ /h	-	638	-	
	Results	XE [%]	%	-	171.3	-
		XCO ₂ [%]	%	7.5	7.36	-1.87
		XO ₂ [%]	%	13.30	13.31	0
		MCOND [g]	g	3204	2814.9	- 12.1
	Parameter	Unit	Experimental	Calculated	Δ [%]	
Test N°2	Gchip [kg/h]	kg/h	50	50	-	
	XH ₂ O [%]	%	13.62	13.62	-	
	XMA [%]	%	86.38	86.38	-	
Results	Qair_st [m ³ /h]	m ³ /h	-	236.0	-	

	Qair [m ³ /h]	m ³ /h	-	657	-
	XE [%]	%	-	178.5	-
	XCO2 [%]	%	7.30	7.17	-1.78
	XO2 [%]	%	13.50	13.51	0
	MCOND [g]	g	1442	1114.5	- 22.7
	Parameter	Unit	Experimental	Calculated	Δ [%]
	Gchip [kg/h]	kg/h	50	50	-
Input data	XH2O [%]	%	13.62	13.62	-
	XMA [%]	%	86.38	86.38	-
Test	Qair_st [m ³ /h]	m ³ /h	-	235.2	-
N°3	Qair [m ³ /h]	m ³ /h	-	671	-
Results	XE [%]	%	-	185.3	-
	XCO2 [%]	%	7.12	7.00	-1.69
	XO2 [%]	%	13.68	13.69	0
	MCOND [g]	g	3119	2767.0	- 11.3

Based on the observation of the data in Table 7, the following observations can be made:

- (1) The stoichiometric air flows are slightly different from one test to another, because the air density varies from test to test. They were calculated using the temperatures measured during the tests with reference to the oxygenator at 650 m³/h.
- (2) The calculated excess air takes into account the percentages of O₂ and CO₂, experimentally measured, which vary from test to test.
- (3) The specific humidity was calculated by substituting the numerical coefficient (18/29) with the ratio between the molecular mass of water vapour and flue gas (18/29.7).
- (4) Referring to tests 2 and 3, near the calculation temperatures, for variations of a few tenths of a degree, significant variations in the quantity of condensate are recorded. For example, by reducing the calculation temperatures by 0.3°C, the errors decrease in different ways:
 - Test 1: from 12.1% to 11.1%
 - Test 2: from 22.7% to 16.5%
 - Test 3: from 11.3% to 5.8%

Where the saturation curve is steeper, small variations (or errors) in temperature result in large variations in the amount of condensed water.

- (5) The theoretical/experimental analysis lends itself to interesting developments regarding both the characterization of biomass and the recovery of thermal energy and water. Furthermore, a greater reduction in pollutants is expected as the flow of condensed water (flue gas washing) increases.

5 Conclusion

The proposed article focused on the study of a system for reducing emissions of atmospheric pollutants through the condensation of flue gases. The main objective was to drive and evaluate the operating performance of a set of two plants, one for biomass combustion coupled to a combustion gas condensation plant. For this purpose, the condensation rates of the gases were measured, in addition to several emission factors, such as CO, CO₂, SO_x and NO_x. As a result, it was observed that the implementation of the condensation system was able to collect a rate of 75g of condensate per min and reduce CO, CO₂, NO and NO_x emissions by respectively 30%, 26%, 20% and 19%.

6 References

1. Mehmood, M.A.; I.M.; R.U.; N.M.; A.S.; H.A.; G.M. Biomass Production for Bioenergy Using Marginal Lands. *Sustain Prod Consum* **2017**, *9*, 3–21.
2. Osman, A.I.; Mehta, N.; Elgarahy, A.M.; Al-Hinai, A.; Al-Muhtaseb, A.H.; Rooney, D.W. Conversion of Biomass to Biofuels and Life Cycle Assessment: A Review. *Environ Chem Lett* **2021**, *19*, 4075–4118, doi:10.1007/s10311-021-01273-0.
3. Haq, I.; Qaisar, K.; Nawaz, A.; Akram, F.; Mukhtar, H.; Zohu, X.; Xu, Y.; Mumtaz, M.; Rashid, U.; Ghani, W.; et al. Advances in Valorization of Lignocellulosic Biomass towards Energy Generation. *Catalysts* **2021**, *11*, 309, doi:10.3390/catal11030309.
4. Paraschiv, L.S.; Serban, A.; Paraschiv, S. Calculation of Combustion Air Required for Burning Solid Fuels (Coal / Biomass / Solid Waste) and Analysis of Flue Gas Composition. *Energy Reports* **2020**, *6*, 36–45, doi:10.1016/j.egy.2019.10.016.
5. Aste, N.; Adhikari, R.S.; Compostella, J.; Pero, C. Del Energy and Environmental Impact of Domestic Heating in Italy: Evaluation of National NO_x Emissions. *Energy Policy* **2013**, *53*, 353–360, doi:10.1016/j.enpol.2012.10.064.
6. EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2013; 2013. Available on: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>. (Accessed on 20th January 2023).
7. Lim, M.T.; Phan, A.; Roddy, D.; Harvey, A. Technologies for Measurement and Mitigation of Particulate Emissions from Domestic Combustion of Biomass: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2015**, *49*, 574–584, doi:10.1016/j.rser.2015.04.090.
8. Vicente, E.D.; Alves, C.A. An Overview of Particulate Emissions from Residential Biomass Combustion. *Atmos Res* **2018**, *199*, 159–185, doi:10.1016/j.atmosres.2017.08.027.
9. Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della R. PRIN (BIO-CHEAPER) Project - Research Projects of Relevant National Interest - Biomasses Circular Holistic Economy Approach to Energy Equipment .
10. LECO Instruments Calorimeter AC-350. Available on: <http://www.zycon.com/literature/128173/62890/ac-350%20flyer%20203-968.pdf>. (Accessed on 20th January 2023).

11. LECO Instruments Thermogravimetric Analyzer TGA701. Available on: [Http://Lecoperu.Com/Wp-Content/Uploads/2018/05/TGA701-ESPECIFICACIONES-ENG-28052018.Pdf](http://Lecoperu.Com/Wp-Content/Uploads/2018/05/TGA701-ESPECIFICACIONES-ENG-28052018.Pdf). (Accessed on 20th January).
12. LECO Instruments LECO Instruments Calorimeter TruSpec CHN. Available on: [Https://It.Leco.Com/Product/Truspec-Micro](https://It.Leco.Com/Product/Truspec-Micro). (Accessed on 20th January 2023).
13. WILO Pump MAXO. Available on: [Https://Wilo.Com/It/It/Prodotti-e-Competenze/It/Prodotti-Ed-Expertise/Wilo-Stratos-Maxo/Stratos-Maxo-25-0-5-12-Pn10-R7](https://Wilo.Com/It/It/Prodotti-e-Competenze/It/Prodotti-Ed-Expertise/Wilo-Stratos-Maxo/Stratos-Maxo-25-0-5-12-Pn10-R7). (Accessed on 28th March 2023).
14. ThermoKey WH1163.B D/22 QRS. Available on: Thermokey.Com/En. (Accessed on 28th March 2023).
15. Gemini Tinytag TGU 4500. Available on: [Https://Www.Geminidataloggers.Com/Data-Loggers/Tinytag-Ultra-2/Tgu-4500#:~:Text=Product%20description,Protection%20such%20a%20Stevenson%20Screen](https://Www.Geminidataloggers.Com/Data-Loggers/Tinytag-Ultra-2/Tgu-4500#:~:Text=Product%20description,Protection%20such%20a%20Stevenson%20Screen). (Accessed on: 28th March 2023)).
16. Nuova Firma TA8. Available on: [Https://Www.Nuovafima.Com/En/Prodotti/Ta8-En/](https://Www.Nuovafima.Com/En/Prodotti/Ta8-En/). (Accessed on: 28th March 2023)).
17. TRC Tecora Flowtest ST. Available on: [Https://Tcr-Tecora.Com/En/Industrial-Emissions/Flowtest/](https://Tcr-Tecora.Com/En/Industrial-Emissions/Flowtest/). (Accessed on: 28th March 2023)).
18. Seitron Chemist 600. Available on: [Https://Seitron.Com/En/Chemist-600-Emissions-Analyzer.Html](https://Seitron.Com/En/Chemist-600-Emissions-Analyzer.Html). (Accessed on: 28th March 2023)).
19. Gemini Tinytag Plus 2. Available on: [Https://Www.Geminidataloggers.Com/Data-Loggers/Tinytag-plus-2](https://Www.Geminidataloggers.Com/Data-Loggers/Tinytag-plus-2). (Accessed on: 28th March 2023)).
20. Mettler Toledo Instruments—Moisture Analyzer HB43-S. Available Online: [Https://Www.Mt.Com/Dam/P5/Labtec/05_Moisture_Analyzer/02_Advanced_Line/03_Documents/03_Operating_Instructions/HB43-S_OI_en.Pdf](https://Www.Mt.Com/Dam/P5/Labtec/05_Moisture_Analyzer/02_Advanced_Line/03_Documents/03_Operating_Instructions/HB43-S_OI_en.Pdf) (Accessed on 5 November 2020).
21. Optima 8000 ICO-OES: Monochromator Optical System. Available on: [Https://Resources.Perkinelmer.Com/Corporate/Cmsresources/Images/44-130616tch_optima8000doublemonochromator.Pdf](https://Resources.Perkinelmer.Com/Corporate/Cmsresources/Images/44-130616tch_optima8000doublemonochromator.Pdf). (Accessed on 20th January 2023).

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Relationship among energy system capacity, energy system efficiency and annual gas consumptions for boiler heating systems modelled in RETScreen using simulation data from TRNSYS

Leone Maria Barbaro ^{1,*}, Gabriele Battista ¹, Emanuele de Lieto Vollaro ² and Roberto de Lieto Vollaro ¹

¹ Roma TRE University, Department of Industrial, Electronic and Mechanical Engineering, Via Vito Volterra 62, 00146, Rome Italy

² Roma TRE University, Department of Architecture, Largo Giovanni Battista Marzi 10, 00154, Rome, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: leonemaria.barbaro@uniroma3.it

Abstract: The advent of renewable energy and more efficient technologies has led to an increase in new energy systems for building. Consequently, in the last years new specialized energy software tools have been developed to analyze these systems. The software energy simulations provide the ability to predict the performance of the designed building. Several energy softwares have a steady-state simulation approach. One of this is RETScreen. It can be used to evaluate various types of energy efficiency measures in buildings and factories. Despite its flexibility, it doesn't evaluate some fundamental aspects such as the capacity of the energy system and the energy efficiency of distribution, emission, and thermal control system. Starting from this, a heating energy system was modelled in TRNSYS: a typical boiler with radiator. TRNSYS, dynamic tool based on hourly climate data, enables detailed technical simulation of energy systems. In that case TRNSYS represents the reference model. The aim of this work is to find a relationship among energy system capacity, energy system efficiency and annual gas consumptions for a boiler heating system using simulation data from TRNSYS in order to determinate a best practice to simulate these kind of energy systems in RETScreen.

Keywords: RETScreen; TRNSYS; Energy Efficiency; Building Energy Simulation.

1. Introduction

It is well-known that the civil sector is the largest category of energy consumer in the world. A wide use of energy is in the heating, cooling and lighting of buildings [1]. So, it's essential to improve energy efficiency measures in buildings without compromising indoor thermal conditions [2]. Numerous approaches allow us to save energy.

Building's energy software can help hugely engineers to take decision about the best energy measures to apply. Various solutions can be modeled. The main inputs are the site's climatic data, the building envelope's shape and materials and energy equipment. Based on this information, mathematical equations are solved. The output indicates the interior environmental conditions and energy demands over time[3]. Energy software can be categorized in steady-state and dynamic simulation tools. The first are less accurate because they use monthly climatic data to calculate the energy flow outputs. Instead, dynamic methods are based on hourly timesteps. The results from a comparative case study have shown remarkable discrepancies between dynamic and steady-state simulation processes for the same building[4].

In the follow study two software are used: TRNSYS and RETScreen.

TRNSYS is a tool for energy dynamic simulation. It simulates the behavior of transient systems. It allows to create multi-zone building modelling with TRNBuild and Type56. For each zones the user can assign different heating, cooling, humidification, operating schedules, gains and much more [5].

RETScreen Clean Energy Project Analysis Software named RETScreen Expert 8 is a tool for energy steady-state simulation of energy system. It is well-known that it can investigate the viability of energy efficiency improvements in any building. The software can be used to assess projects incorporating a variety of energy efficiency measures[6].

Despite its flexibility it doesn't evaluate some fundamental aspects such as the capacity of the energy system and the energy efficiency of distribution, emission, and thermal control system. The only system input is the seasonal efficiency. So, it works with a one implicit hypothesis: the energy system satisfies the whole energy demand of the building. Thus, it doesn't allow to study an energy system whole capacity doesn't fully satisfy the energy demand of the building.

Starting from this, the aim of this study is to find a relationship among energy system capacity, energy system efficiency and annual gas consumptions for a standard boiler heating system located in Italy, using simulation data from TRNSYS. This one will be able to estimate the annual gas consumptions for a boiler at full load in Italy in order to simulate in RETScreen a standard boiler with a lower capacity than needed by the building.

2. Materials and Methods

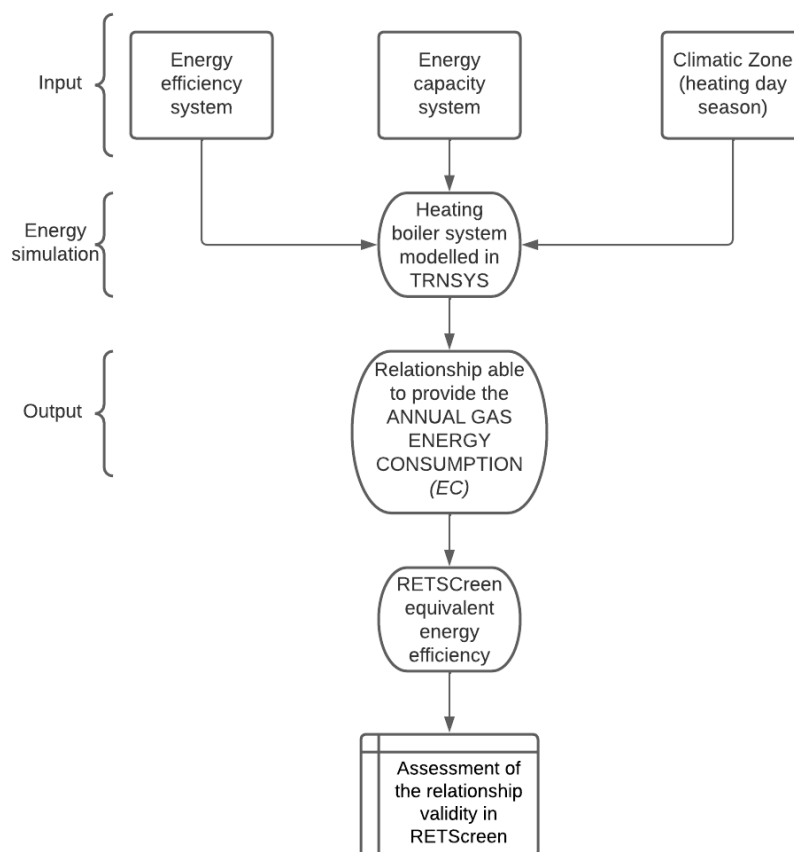
2.1. Methodology

The stages that make up the applicable approach are shown in Figure 1 and are the following:

1. Development of a numerical model of a residential building and a boiler heating system thought TRNSYS tool;

2. Performing simulations of the system varying the boiler heating performances and the heating day season of the building;
3. Evaluation of the annual heating consumption;
4. Data numerical interpolation to carry out a relationship able to provide the gas annual consumption of a standard boiler which depends on the system energy efficiency, heating capacity and heating day season;
5. Use of the relationships in a steady-state simulation tool, in that case RETScreen: it was obtained an equivalent efficiency able to simulate any standard boiler in RETScreen.
6. Validation of the interpolated equation in RETScreen tool and evaluation of the error compared with TRNSYS.

Figure 1. Flowchart of the methodology.



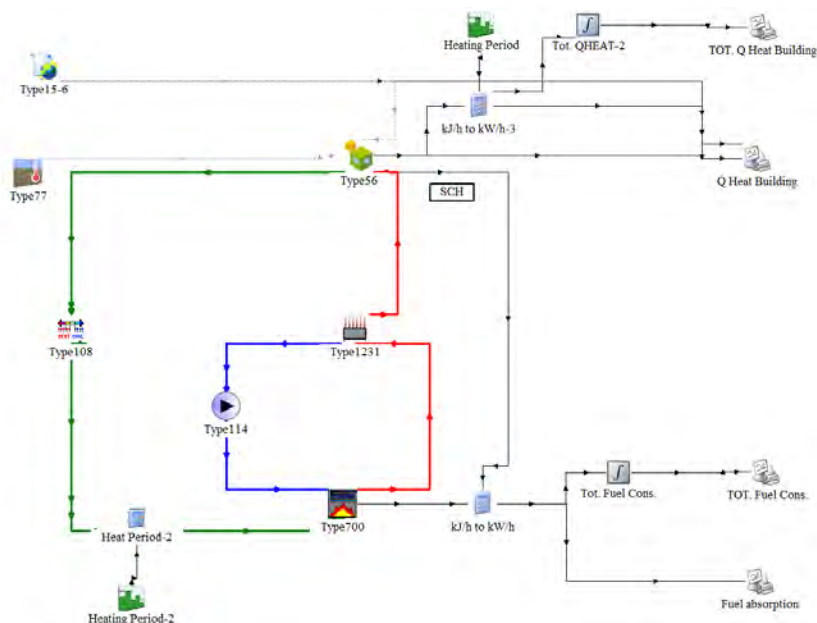
2.2. Boundary conditions

The study started out modeling the boiler heating system in TRNSYS. The heating equipment simulated consisted of a boiler heating system.

It was generated a regular building through Type 56. It described a building with single thermal zones. This one represented an “infinity thermal capacity” to work always at full load. This one also can be considered as Energy Community. It was verified that the building thermal load was at least double of the single energy system capacity tested. The default setting for the heating in TYPE56 is OFF and the heating systems was modelled as internal gain.

The heating system was composed by a single fluid boiler and radiators. It produces hot water using a gas. The energy performance of a boiler heating system depends on many factors such as the type of fuel, the boiler capacity, the seasonal efficiency and the outlet and inlet temperature. So, the boiler was modelled with Type 700 and it was entered its efficiency and capacity. The desired temperature of the fluid exiting the device was set at 85° C. The radiators were modelled with Type 1231 and it was entered only their energy capacity and water inlet temperature. Figure 2 shows the graphical representation of the energy plant in the TRNSYS interface.

Figure 2. Heating energy system implemented in TRNSYS.



The location of the building is a main parameter in determining of the energy behavior of the building. The software requires meteorological data representative of the local environment climatic conditions, to obtain the energy demand of the building. The heating degree day (HDD) index is a simple index that it’s used as indicators of the expected energy requirements for a given building in different climates. Italy was divided in six different climatic zones, according to their heating degree days (HDD) ranges: A, B, C, D, E and F [7].

The last plan for the Containment of Natural Gas Consumption (D.M. 383 06/10/2022) published by the Italian Minister for Ecological Transition has established the heating day season for each climatic zone. Detailed information about the heating period is in Table 1.

Table 1. Heating Italy day season for each zone.

Climatic zones	Heating hours daily	Switching on heating	Switching off heating	Heating day season (HSD)
A	5	8st December	7th March	89
B	7	8th December	23rd March	105
C	9	22nd November	23rd March	122
D	11	8th November	7th April	151
E	13	22nd October	7th April	168
F	-	-	-	no restrictions

Thus, it was chosen four different Italian cities belong to four different climatic zones: Palermo (B), Naples (C), Rome (D) and Milan (E). It wasn't considered two zones: zone F because it has no restrictions and zone A because it represents a very small portion of the Italian territory. It was created in TRNSYS two different schedules for every climatic zone in order to simulate the heating periods: a hour schedule which contains the total heating hours daily and a day schedule which contains the heating day season.

3. Results and Discussions

3.1. Processing data from TRNSYS

For each city nine simulations were carried out varying the energy efficiency (η) and capacity (P). The energy efficiencies tested were 10 kW, 30 kW, 60 kW and the energy capacities tested were 70%, 80%, 90%. These are typical boiler values of residential buildings. The annual gas energy consumption was measured in standard cubic meter. All data are reported in Table from 2 to 5.

All energy consumption obtained was interpolated linearly. It was constructed new data points within the range of a discrete set of known data points using linear polynomials. In Table 6 are reported the interpolation for every climatic zone as a function of the energy efficiency (η) and the energy capacity (P) measured in kW. They allow to have a first estimate about the annual gas energy consumption of a boiler EC measured in smc.

Table 2. Annual gas consumption (scm) simulated in zone B (Palermo).

Energy Efficiency	Energy Capacity 10 kW	Energy Capacity 30 kW	Energy Capacity 60 kW
70%	10500	31500	62486
80%	9187	27562	54675
90%	8176	24500	48600

Table 3. Annual gas consumption (scm) simulated in zone C (Naples).

Energy Efficiency	Energy Capacity 10 kW	Energy Capacity 30 kW	Energy Capacity 60 kW
70%	15557	46671	93000
80%	13612	40837	81375
90%	12100	36300	72333

Table 4. Annual gas consumption (scm) simulated in zone D (Rome).

Energy Efficiency	Energy Capacity 10 kW	Energy Capacity 30 kW	Energy Capacity 60 kW
70%	23571	70714	136371
80%	20625	61875	119325
90%	18333	55000	106067

Table 5. Annual gas consumption (scm) simulated in zone E (Milan).

Energy Efficiency	Energy Capacity 10 kW	Energy Capacity 30 kW	Energy Capacity 60 kW
70%	30943	93043	179829
80%	27137	81412	157350
90%	24122	72367	139867

Table 6. Annual gas consumption (scm) simulated in all climatic zones.

Climatic zones	Energy consumption (scm)
B	$EC = (-1157.3 \cdot \eta + 1846.7) \cdot P + (-75 \cdot \eta) + 137$ (1)
C	$EC = (-1722 \cdot \eta + 2748.2) \cdot P + (-62.5 \cdot \eta) + 100.4$ (2)
D	$EC = (-2525.5 \cdot \eta + 4030.2) \cdot P + (-936.6 \cdot \eta) + 1494.5$ (3)
E	$EC = (-3333 \cdot \eta + 5316.8) \cdot P + (-1006.4 \cdot \eta) + 1717$ (4)

To generalize the relationship above the whole Italy peninsula, the previous relationships were interpolated again in function of the total heating season daily (HSD). The final relationship is the follow:

$$EC = ((-33.3 \cdot HSD) + 2366.6) \cdot \eta + 53.2 \cdot HSD - 3773.5 \cdot P + ((-17.4 \cdot HSD) + 1864.1) \cdot \eta + 29.1 \cdot HSD - 3109.9 \quad (5)$$

The relationship leads to maximum annual gas energy consumption for a standard boiler heating system in Italy.

In order to extend the result in RETScreen, from the annual gas energy consumption (EC) it was obtained the equivalent efficiency (η_{eq}):

$$\eta_{eq} = \frac{ED}{EC} \quad (6)$$

Where EN is the annual heating energy demand, measured in kWh, calculated in RETScreen. The equivalent efficiency allows to simulate in RETScreen a boiler with a lower capacity than needed by the building. So, it represents an effective tool to estimate the energy behavior of any boiler system in RETScreen.

3.2. Validation of the interpolated equation in RETScreen

It is well-known that the software hasn't as input the energy system capacity and the proposed equation can help the users to refine the energy system model in RETScreen.

To confirm the approach validity, it was tested the use of the relationship in a simple case-study in RETScreen and then the result was compared in TRNSYS.

Energy simulation was performed for a simple and regular building located in Rome (zone D) characterized by a square plan, walls with a surface area of 736 m² and window with a surface of 104 m². Envelope U-value were chosen according to the last Italian requirements. Detailed information about thermal properties is listed in Table 7.

Table 7. Thermal envelope properties.

Components	U-Value (W/m ² K)
Wall	0.51
Window	1.40
Roof	0.31
Floor	0.32

The heating temperature set point was set at 20°C. The infiltration was set to 0.35 1/h. The heating boiler system tested had as energy input: 20 kW and 90%. The energy performances results, using the equivalent efficiency (η_{eq}), are reported in Table 8.

Table 8. Results of energy performance in RETScreen.

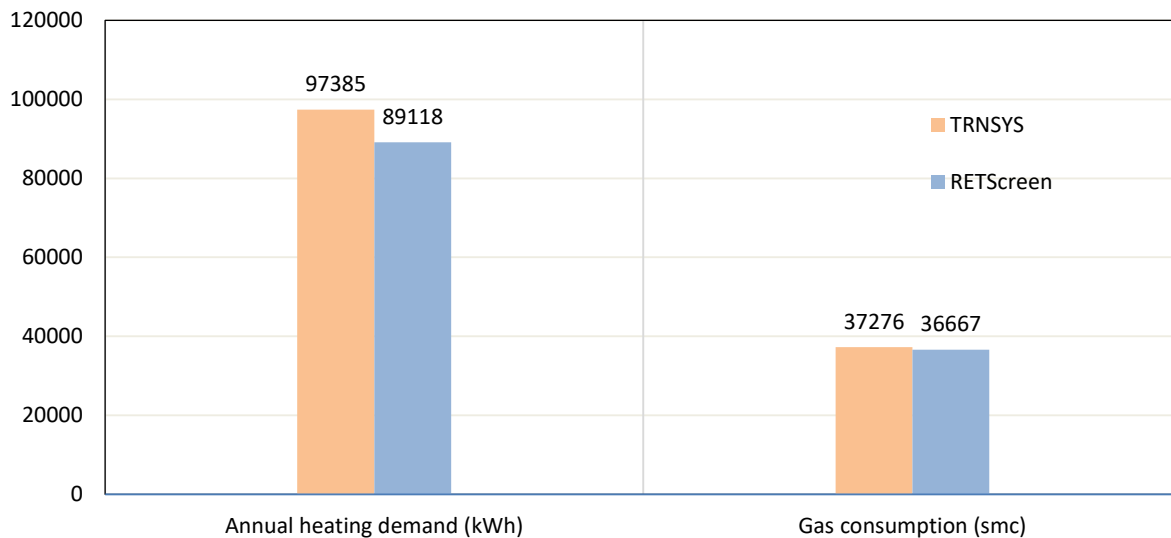
Heating energy demand (ED) (kWh)	89118
Annual gas energy consumption (EC) (scm)	37276
Annual gas energy consumption (EC) (kWh)	365262
η_{eq}	24%

In order to verify the validity of proposed relationships, it was simulated the same building and plant in TRNSYS. It was generated the regular building through Type 56. The heating system was composed by a single fluid boiler and radiators. Energy simulation was performance for the same values and the results are reported in Table 9.

Table 9. Results of energy performance in TRNSYS.

Heating energy demand (ED) (kWh)	97385
Annual gas energy consumption (EC) (scm)	36667
Annual gas energy consumption (EC) (kWh)	359288

In Figure 3 are shown the comparison of the results simulated in RETScreen and TRNSYS tool in terms of heating energy demand and gas consumption. It is possible to notice that, with the methodology adopted, there are a slightly difference from the two simulations. In particular the RETScreen underestimate the simulation on TRNSYS with a percentage difference equal to 1.09 % for the annual heating demand, and 1.01% for the annual gas consumption. These results confirm the goodness of the methodology.

Figure 3. Comparison results between RETScreen and TRNSYS.

4. Conclusion

Nowadays energy simulation software tools are a fundamental support used for engineers to save energy in buildings. They allow to provide the energy performance of a building so as to support designers to take decisions about the best energy efficiency measures to apply for any building to build or already existent.

The software TRNSYS allows to perform a dynamic and accurate analysis of the energy behavior of a building during the course of the year, whereas the software RETScreen permits a preliminary and flexible energy steady-state assessment without considering some fundamental aspects such as the capacity of the energy system.

Thus, thanks to the TRNSYS data processing, this study proposes a new relationship able to:

- simulate in RETScreen a standard boiler which capacity is lower than needed by the building.
- estimate the annual gas energy consumption of a standard boiler which works at full load in Italy.

Future development of the present work will be to carry out relationships for other heating and cooling energy systems such as heat pump.

Furthermore, future study will can evaluate the goodness of the methodology adopted in the present work focusing the attention into the numerical model errors achieved.

References

1. Zhang, S.; Ocoń, P.; Klemeš, J.J.; Michorczyk, P.; Pielichowska, K.; Pielichowski, K. Renewable Energy Systems for Building Heating, Cooling and Electricity Production with Thermal Energy Storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2022**, *165*, 112560, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112560>.

2. Nematchoua, M.K.; Marie-Reine Nishimwe, A.; Reiter, S. Towards Nearly Zero-Energy Residential Neighbourhoods in the European Union: A Case Study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2021**, *135*, 110198, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110198>.
3. Harish, V.S.K.V.; Kumar, A. A Review on Modeling and Simulation of Building Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2016**, *56*, 1272–1292, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>.
4. Kotarela, F.; Kyritsis, A.; Agathokleous, R.; Papanikolaou, N. On the Exploitation of Dynamic Simulations for the Design of Buildings Energy Systems. *Energy* **2023**, *271*, 127002, doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127002>.
5. Rashad, M.; Żabnieńska-Góra, A.; Norman, L.; Jouhara, H. Analysis of Energy Demand in a Residential Building Using TRNSYS. *Energy* **2022**, *254*, 124357, doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124357>.
6. Battista, G.; Vollaro, E.; Ocloń, P.; De Lieto Vollaro, R. Retrofit Analysis of a Historical Building in an Architectural Constrained Area: A Case Study in Rome, Italy. *Applied Sciences* **2022**, *12*, 12305, doi:[10.3390/app122312305](https://doi.org/10.3390/app122312305).
7. Harvey, L.D.D. Using Modified Multiple Heating-Degree-Day (HDD) and Cooling-Degree-Day (CDD) Indices to Estimate Building Heating and Cooling Loads. *Energy Build* **2020**, *229*, 110475, doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110475>.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Acoustic characterisation and quality assessment of Cremona's Ponchielli theatre in the post-epidemic period.

Ruoran Yan ¹, Antonella Bevilacqua ², Lamberto Tronchin ^{1,*}

¹ DA, Department of Architecture, University of Bologna, 47521 Cesena, Italy.

² DIA, Department of Engineering and Architecture, University of Parma, 43121 Parma, Italy.

* Lamberto Tronchin: lamberto.tronchin@unibo.it

Abstract: After a fire destroyed the previous wooden building in Cremona, the Ponchielli theatre was constructed there in 1808. The shape of the interior design, architecture and floor plan is reminiscent of the famous Teatro alla Scala, a masterpiece by architect Piermarini. The Ponchielli theatre captures the typical attributes of an Italian opera theatre from the nineteenth century. In this research, acoustic measurements were conducted for the full hall and a few chosen boxes in accordance with the ISO 3382-1 standard. In-depth comparisons between the primary acoustic parameters obtained from the measurements and acoustic simulations of a three-dimensional model depicting the performing arts space have been made. The study of the Ponchielli theatre's acoustic behaviour is the focus of this paper. Furthermore, how the number of audiences in the post-Covid-19 period affects the quality of musical performances in the theatre is discussed. The simulation results indicate that the number of audiences has no impact on the acoustic characteristics of the theatre. The Ponchielli theatre's acoustic quality, while not excellent, can still be regarded as a competitive venue for the performance of speech and music, according to a comparison with four other theatres that have satisfactory acoustic quality.

Keywords: cultural heritage; acoustic simulations; Opera theater; Ponchielli theater; acoustic quality assessment.

1. Introduction

Music, drama, and opera can be found all over Europe. They are a component of both global and European civilisations. As a specific venue for the sensation of sound, the theatre structure is a lasting

embodiment of this type of art. Each theatre venue provides details about the time it was built, the creators' intentions, the interaction between audience and performer, the cross-cultural collaboration of artists, and the development of society. Furthermore, in the 17th century, the modern architectural shape emerged in Italy and spread throughout Europe. The theatre represents one of the very few distinctly European building types. But performing arts and musical pursuits were significantly impacted by the global economic crisis. The Italianate-style opera houses and traditional theatres among these were especially hard hit by the plague. The growth of these theatre structures in the post-epidemic era, as well as the documentation and preservation of their architectural and acoustic features, are therefore important and worthwhile studies.

Two major areas of theatre acoustics research are currently being investigated: theatrical acoustic simulations, such as the influential work of L. Tronchin et al. [1], and the investigation of the acoustic evolution of the theatre, as done, for instance, by K. Chourmouziadou et al. [2] and Gino Iannace et al. [3]. In the article by Tsung-Chi Cheng [4], the focus of recent research on audience attendance has been on identifying the factors that influence attendance. Additionally, a collection of academics focuses on modern forms of attendance, such as online attendance. (Daniela Mueser [5]). The acoustic quality of theatre attendance has received little study, and relevant results are reviewed in the work of L. Tronchin and B. Antonella [6].

The current Ponchielli theatre in Cremona is the product of a two-century-long process of reconstruction, rebuilding, maintenance, and renovation. The Ponchielli theatre, which dates back to the nineteenth century, was purchased from the town in 1986 and has been completely renovated, adapted, and upgraded since 1989 [7]. It has been managed by the Foundation since 2003. (Comune di Cremona). This ancient, typically Italian theatre is regarded as one of the most beautiful in Cremona and continues to support the rich cultural life of the local people.

Impulse responses (IRs) were recorded at various locations throughout the seating area by employing acoustic measurements in accordance with ISO 3382-1 [8]. The acoustic characteristics of the Ponchielli theatre are discussed in this paper after the model has been calibrated for three different crowd-size scenarios. The results show that the acoustic characteristics of the theatre are unaffected by audience occupancy and that, despite the EDT value, it is considerably higher than the other two occupancy states in the absence of an audience. Even if the theatre's occupancy remains affected by the post-Covid-19 period, the audience continues to enjoy the best opera performances. Given that this style of construction is designed for theatrical events, the Ponchielli theatre's acoustic response is appropriate for lectures and music performances [9]. However, when the outcomes of the acoustic quality assessment of the Ponchielli theatre are compared to the results of other theatres with high-quality acoustic characteristics, it is clear that the Ponchielli theatre leaves much to be desired. This analysis should be regarded as preliminary research before further acoustic modelling in various scenarios, particularly to investigate the adaptation of the historic theatre to new forms of musical performance in a new era.

2. History and Architectural Features of the Ponchielli Theatre of Cremona

2.1. History of the Ponchielli Theatre

The Ponchielli theatre of Cremona, originally a wooden structure constructed in the 18th century, suffered destruction by fire. In 1747, a consortium of nobles resolved to erect a new public theatre in lieu of the previous aristocratic theatres. The responsibility for designing the new theatre was conferred upon Giovanni Battista Zaist, a Cremonese architect. In 1785, the theatre was named after Nazari, the marquis who had commissioned its construction. However, in 1806, another fire destroyed the building [7]. The students of the renowned drama architect L. Canonica, who had studied under Piermarini, were entrusted with reconstructing the theatre.

The theatre was completed in 1808 and named the Concordia theatre. In the early 19th century, Ponchielli arrived at the theatre and undertook extensive renovations, enlarging the stage and improving the architecture. Unfortunately, the theatre suffered partial destruction by fire in 1824. It was restored to its current appearance by F. Rodi and L. Voghera. In the early 20th century, the theatre was named in memory of the celebrated Cremonese opera composer A. Ponchielli. The theatre was purchased by the municipal real estate in 1986, and since 1989, it has undergone extensive renovations and technical upgrades [7].

The theatre's wooden beam structure from the 1800s is still intact and meticulously maintained. The horseshoe-shaped hall, with four balconies and a top gallery, embodies the typical characteristics of Italian Opera houses of the 19th century. Figure 1 illustrates the contemporary interior design of the theatre.

Figure 1. The interior view of the Ponchielli theatre [7].

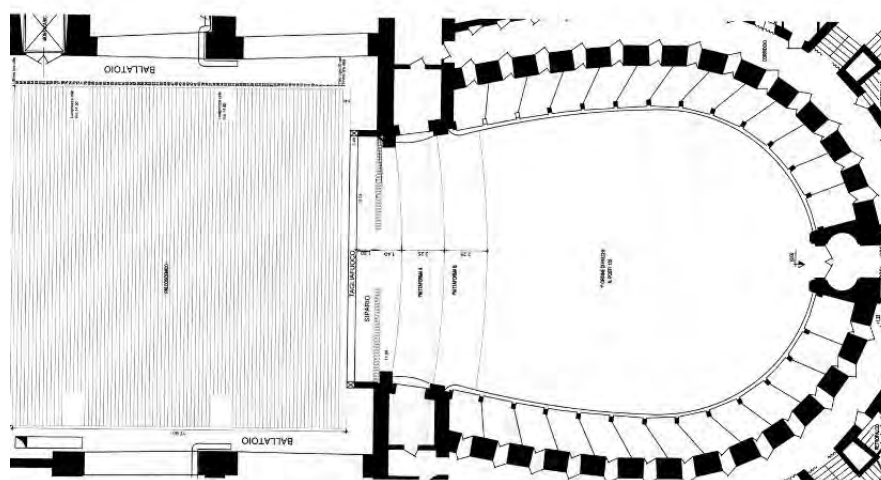


2.2. Architectural Features of the Ponchielli Theatre

The Ponchielli theatre in Cremona boasts a rich history spanning over 250 years and is considered one of the premier theatres of its era. The theatre's horseshoe-shaped hall, depicted in Figure 2, is crowned by four tiers of balconies and a gallery, providing a seating capacity of 780. The theatre's

unique design and expansive seating arrangement make it a notable cultural landmark within the region.

Figure 2. The plan layout of the Ponchielli theatre of Cremona.



The theatre preserves the original wooden frame structure. The framework is 20 × 20 × 16 m (L, W, H). Table 1 provides a comprehensive summary of the essential characteristics of the Ponchielli theatre by comparing its seating capacity against the recommended range. According to the literature [10], a minimum of 10 m³/seat is the usual preference, although for opera theatres, the optimal range is 7-9 m³/seat, and for drama theatres, it is 4 m³/seat. The Ponchielli Theatre, with a main hall volume of 3600 m³ and a seating capacity of 800, has a calculated ratio of 4.5 m³/seat. This outcome falls in the moderate range, considering that the 18th and 19th-century opera houses were historically significant venues suited for a broad range of theatrical and musical performances, including symphonies and operas.

Table 1. The architectural characteristics of the Ponchielli theatre.

	Category	Values
Main Hall (A)	Total capacity (No. of seats)	Up to 800
	Major axis (m)	21
	Minor axis (m)	16
	Hight (m)	13.8
	Volume (m ³)	3600
	Length (m)	32
	Width (m)	25
Scenic Building (B)	Hieght up to the grid (m)	15
	Volume (m ³)	12,000
A + B	Volume (m ³)	15,600

The Ponchielli Theatre holds a significant place in the history of Italian theatre, being one of the first to incorporate electric lighting. The magnificent chandelier, featuring up to 80 lights, is carefully maintained using specialised techniques. The lobby's design incorporates subtle tones of gold, creating an atmospheric ambience. The Rizzi curtain, painted in oil on fabric by the esteemed artist Antonio Rizzi in 1891, is used for all performances throughout the musical season. These curtains enhance the performance space's absorption factor and minimise reverberation time, contributing to an immersive auditory experience. Figure 3 provides details of the theatre's main hall, showcasing its unique features.

Figure 3. Details of the main hall.



3. Measurements

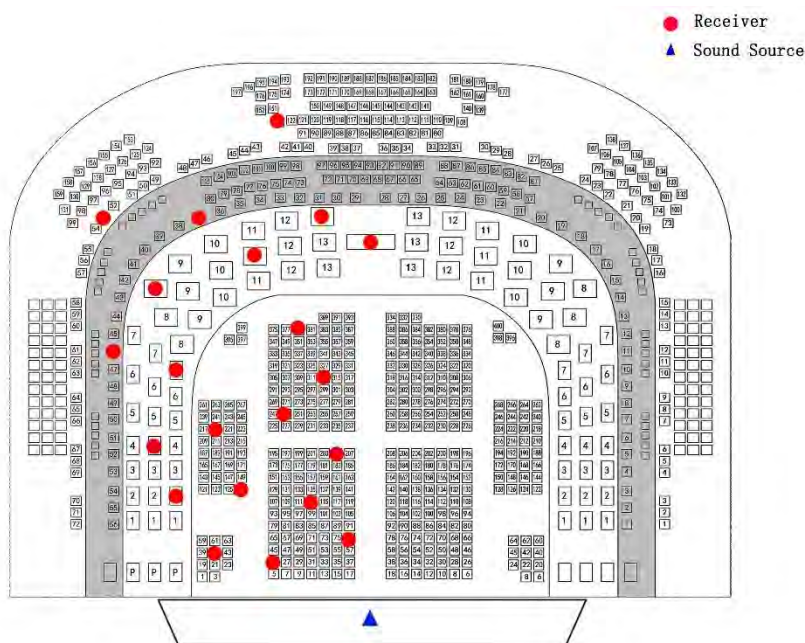
To comprehensively study the acoustic characteristics of the Ponchielli theatre, impulse responses (IR) were measured at different locations, including the stalls and selected boxes. Multiple acoustic metrics were computed and compared based on the collected data. The ultimate aim was to better understand the theatre's acoustical properties. After calibration of the model, the influence of simulated audience occupancy variances on the theatre's acoustic properties was studied in post-processing. This approach enabled a more detailed analysis of the theatre's acoustical characteristics and provided insights into how the simulated audience can affect the overall sound quality.

3.1. Measurements Points

The measurement setup for the acoustic analysis of the Ponchielli theatre involved placing the

sound source 1.4 m above the finished floor while the receivers were systematically moved across the stalls and selected boxes. A total of 10 measurement points were identified in the stall and 11 points on the balconies, considered adequate for comprehending the acoustic response of the hall due to its axial symmetry. The measurements were conducted under unoccupied conditions with the stage left empty, as documented in [11]. Figure 4 presents an overview of the instrumentation positions during the survey, providing valuable insights into the measurement setup.

Figure 4. Scheme of the equipment location during the acoustic survey.



3.2. Measurements Techniques and Equipment

For the measuring session at the Ponchielli theatre, a setup comprising a dummy head, a b-format microphone, an omnidirectional microphone, and a dodecahedral speaker was utilised to reproduce the Exponential Sine Sweep (ESS) from 20 Hz to 20 kHz, covering all the frequencies in the human audible range. Signals from each microphone were recorded using a Zoom F8 audio interface wirelessly controlled by an Apple iPad Mini. Thermo-hygrometric conditions were taken into account during the survey [12]. For each measurement point, three ESS signals were successively recorded. The b-format microphone was positioned horizontally above the dummy head, while the omnidirectional microphone was positioned vertically in front of the dummy head, centred on its nose, as shown in Figure 5. To simulate the sound source, a dodecahedron speaker was mounted on a 1.4 m high pedestal, as shown in Figure 6. The measurements were conducted in unoccupied conditions with the stage empty. Given the axial symmetry of the volume, eight measurement points were taken in the stalls and ten measurement points on the balconies, which were considered sufficient to understand the acoustic response of the hall.

Figure 5. Complete set up including B-Format microphone, an omnidirectional microphone and a dummy head.



Figure 6. Dodecahedron speaker on stage.



The omnidirectional dodecahedron speaker is a portable yet effective sound source for acoustic measurements in rooms and structures. It is made up of twelve specially developed dynamic drivers that ensure equal acoustic test signal emission.

The acoustic parameters involved in this investigation are the reverberation time (T_{60}). In practice, however, obtaining an SNR high enough to allow for a 60dB decline is problematic. Consequently, the T_{30} or the T_{20} are typically employed (30dB and 20dB of decay, respectively); the Early Decay Time (EDT). If the sound system is increasing information transmission from source to listener, it may be

seen from the comparison of the T_{60} and the EDT; the clarity indexes, the musical performance hall size indicated by the subscript "80" (C_{80}) is; the subscript "50" (C_{50}) is used when evaluating the clarity of spoken performances; the definition (D_{50}). The omnidirectional microphone, the ECM8000 by Behringer, which is excellent for room equalisation and high-quality studio recording and live applications, is used to calculate all of the aforementioned parameters.

A professional dummy head made by Neumann, the KU100, is used. It has a very low self-noise and can handle high sound pressure levels of up to 135 dB without sound distortion. The "Ambeo" B-Format microphone from Sennheiser was used to capture 360° spatial audio. A new set of 4-channel, Ambisonics B-Formats must be created from the Sennheiser Ambeo capsule's raw 4-channel A-Format. The sound field around the microphone is represented by W, X, Y, and Z in B-Format. W is the total of all four capsules, whereas X, Y, and Z are three virtual bi-directional microphone patterns that indicate front/back, left/right, and up/down.

The Zoom F8 audio interface is used to record microphone signals. Seven audio channels were used in the recording; channels 1 through 4 were used for Ambeo microphones, channels 5 and 6 were utilised to record dummy heads binaurally, and the final channel was applied to record omnidirectional microphones in mono.

3.3. Acoustic Parameters Calculation

Different software was used to post-process the obtained data. Automatic extraction of two stereo files (Binaural and WY, W and Y signals to compute LF, LFC and LE.) and one mono file (Mono) from the 7-channel audio files (1-2 channel WY, 5-6 channel Binaural, seven-channel Mono) captured during the measurements using a custom MATLAB script.

In the post-processing analysis, the IRs are obtained by convolving the recorded signal with the inverse filter. Once the IRs have been obtained, the values of the main acoustic parameters can be calculated using the Aurora plugin in Audition 3.0 [13]. Aurora is a plugin suite created by Angelo Farina to measure and control room acoustical impulse responses, perform acoustical parameter analysis, and auralization. Three Aurora plug-ins were used, involving convolution, the "Convolve with clipboard v4.4b" plugin; acoustic parameters, Acoustical Parameters 4.3" plugin; and STI (Speech Transmission Index) calculations, "STI & Octave Band Analysis v 4.4" plugin.

3.4. Acoustic Simulation

Acoustic simulations have been carried out using Ramsete software, which is based on the principle of raytracing acoustics and considers a triangular base pyramid propagation of the sound rays [6]. Compared to other software, Ramsete is not affected by the calculation time of up to 4000 receivers in the model due to its constant time for computing the values [14]. Ramsete was configured with the parameters listed in Table 2 for the simulations.

Table 2. Parameters set by Ramsete.

Subdivision Level	Time	Values Time Resolution	Humidity	Temperature
10	2s	0.01s	50%	20°C

4. Acoustic Simulations

4.1. Acoustic Calibration

The 3D model was simplified from the complex architectural features, as shown in Figure 7, before simulating the effect of the difference in audience occupancy on the acoustic characteristics of the theatre. The hall is 5,000 m³ in size and contains cushioned seating. The theatre currently has 400 seats in the stall, 200 in the loggione, 92 in the boxes on the balconies and 105 seats in the gallery on the top.

The JND (Just Significant Difference) is taken into consideration to compare the adjusted simulation results to the values obtained from field measurements. The JND value is the smallest variation in that parameter that can be detected by the human ear for each acoustic parameter. Hence differences between measurements below JND are absolutely negligible because humans would not be able to hear them.

Figure 7. A digital model of the Ponchielli theatre of Cremona: whole building (a), perspectival view of the main hall (b).

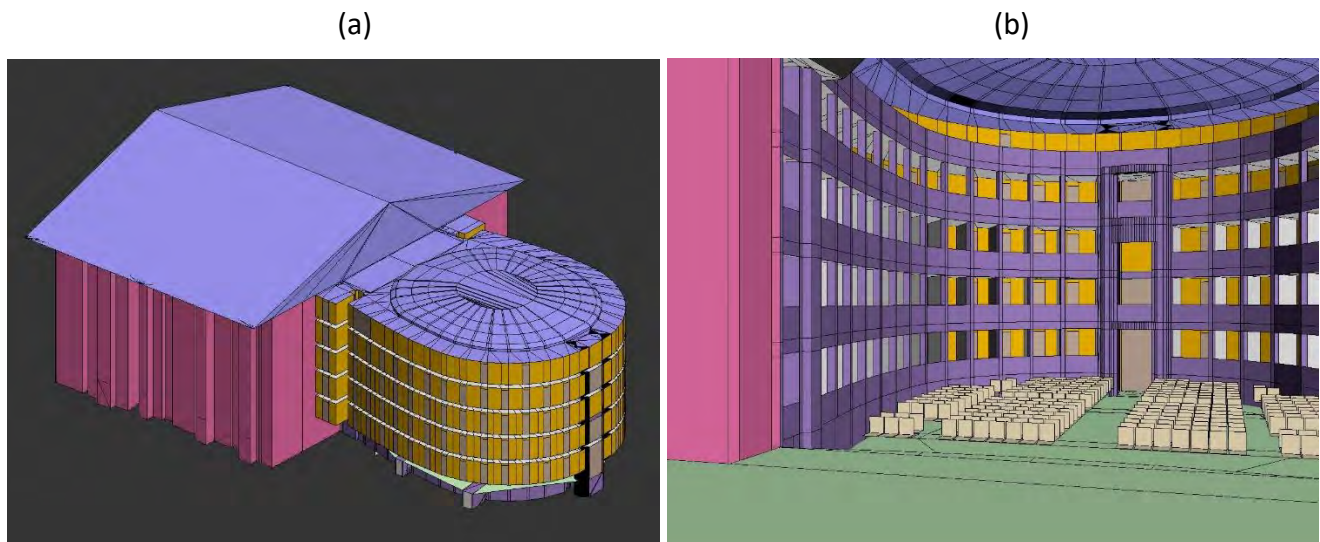


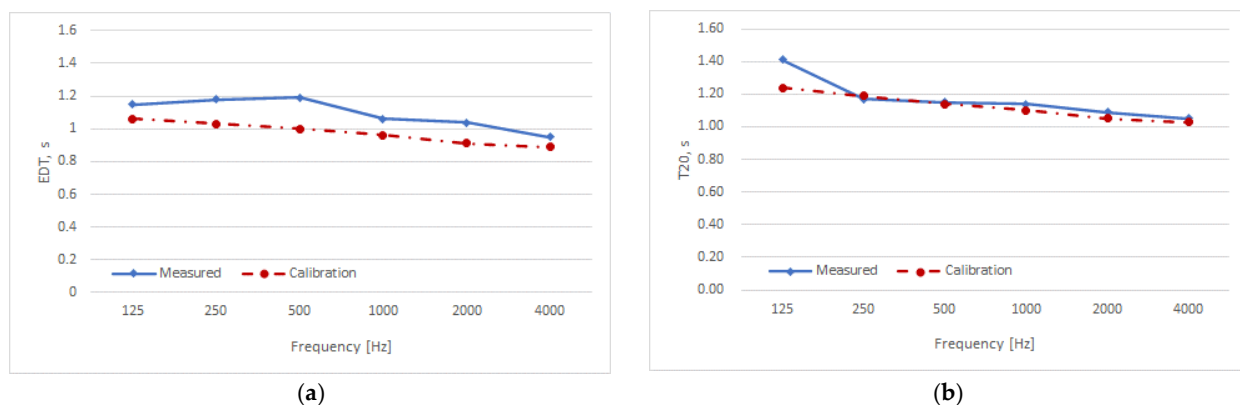
Table 3 displays the absorption and scattering coefficients for all the materials, obtained from the calibration process and previous acoustic simulations conducted in other opera houses [15-16]. The coefficients serve as valuable indicators for the sound transmission properties of the materials under investigation. The calibration process was performed meticulously to ensure accurate measurements and reliable data. The acoustic simulations were carried out using state-of-the-art techniques, providing a comprehensive understanding of the sound behaviour of the materials. The coefficients presented in Table 3 are expected to aid in the optimization of acoustic design for opera houses and other similar venues.

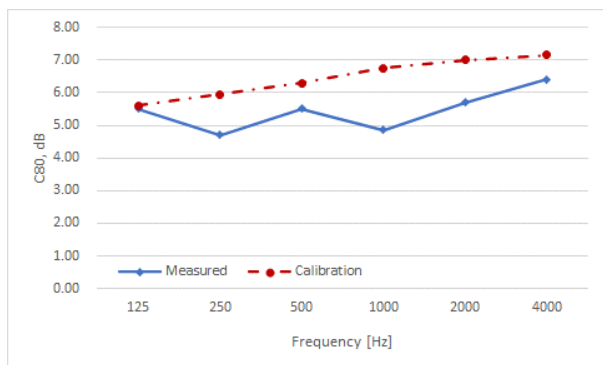
Table 3. Absorption coefficients (ac) and scattering coefficients (sc) for the materials.

Materials	Octave Frequency Bands (Hz)											
	125		250		500		1000		2000		4000	
	ac	sc	ac	sc	ac	sc	ac	sc	ac	sc	ac	sc
Floating floor—Stalls	0.33	0.25	0.37	0.20	0.42	0.15	0.45	0.10	0.55	0.05	0.58	0.05
Floating floor—Stage	0.43	0.20	0.47	0.15	0.52	0.10	0.55	0.05	0.65	0.05	0.65	0.05
Timber wood—Boxes floor	0.41	0.55	0.42	0.50	0.44	0.40	0.46	0.30	0.47	0.20	0.42	0.15
wood—Boxes perimetral walls	0.43	0.55	0.46	0.50	0.50	0.40	0.54	0.30	0.50	0.20	0.55	0.15
Light Wood—Ceiling	0.73	0.20	0.68	0.15	0.61	0.10	0.51	0.05	0.48	0.05	0.42	0.05
Upholstery—Seats	0.51	0.40	0.64	0.30	0.71	0.25	0.73	0.20	0.76	0.15	0.80	0.15
Doors	0.31	0.10	0.12	0.08	0.32	0.05	0.32	0.05	0.32	0.05	0.30	0.05
Bricks—External walls of fly tower	0.08	0.60	0.07	0.53	0.05	0.42	0.04	0.35	0.06	0.28	0.04	0.17

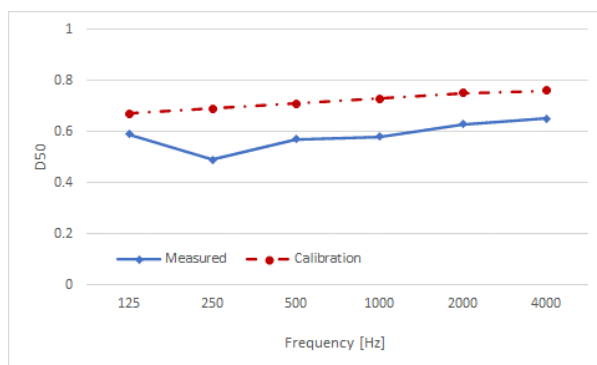
The calibration process was conducted on the acoustic parameters of EDT, T_{20} , C_{80} , and D_{50} , as illustrated in Figure 8. The results indicate that some degree of deviation between the measured and calibrated values was observed across all parameters, which can be attributed to environmental factors such as humidity and air absorption during field measurements. The observed drift values were found to be within 5% for all octave ranges of reverberation time and EDT. However, the parameters of the clarity index and definition exhibited a higher degree of sensitivity to the exact location of the field measurements. The values have been averaged over all the receivers. The bandwidth considered is between 125 Hz and 4000 Hz, by the regulation [17]. The noise level in the hall is below the 20 dB standard [18].

Figure 8. Model calibration based on main acoustic parameters: early decay time (a), reverberation time (b), clarity index (c), and definition (d).





(c)



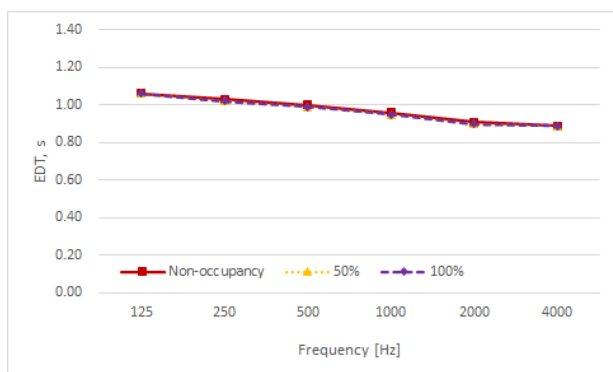
(d)

4.2. Simulated Results

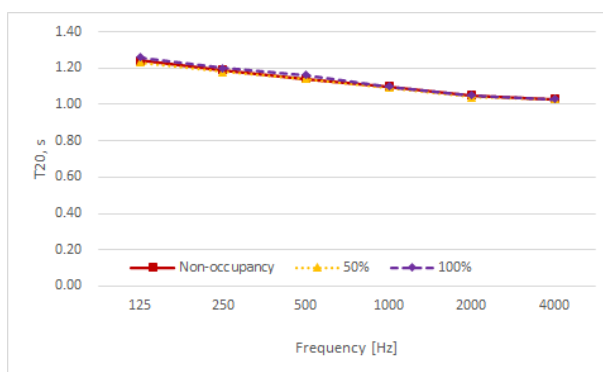
The recorded ESS signals have been processed by using the plugin Aurora suitable for Audition 3.0. Different acoustic parameters defined by the international standards ISO 3382-1 [13] have been analysed and commented on, including the Early Decay Time (EDT), Reverberation time (T_{20}), Clarity indexes (C_{80} and C_{50}), and Definition (D_{50}). The main acoustic parameters are reported in the octave bands between 125 Hz and 4 kHz.

Figure 9 shows the graphs of the simulated results of the main acoustic parameters. A comparison of the simulated results is related to three scenarios: no audience, with the audience at 50% and 100% occupancy. These variations in occupancy will be modelled by increasing the absorption factor of the seats, and this increment will be approximated using the bibliography [19].

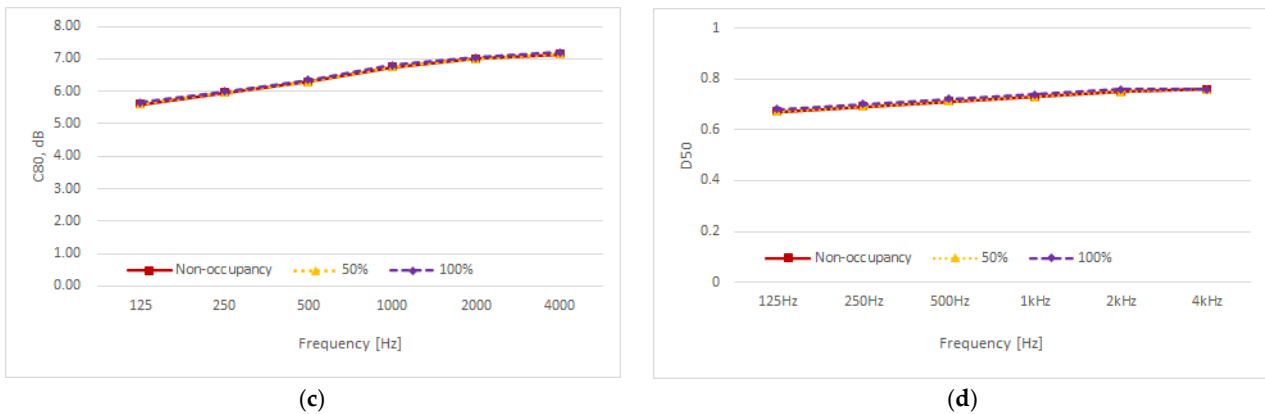
Figure 9. Simulated results of main acoustic parameters: early decay time (a), reverberation time (b), clarity index of music (c), and definition (d).



(a)



(b)

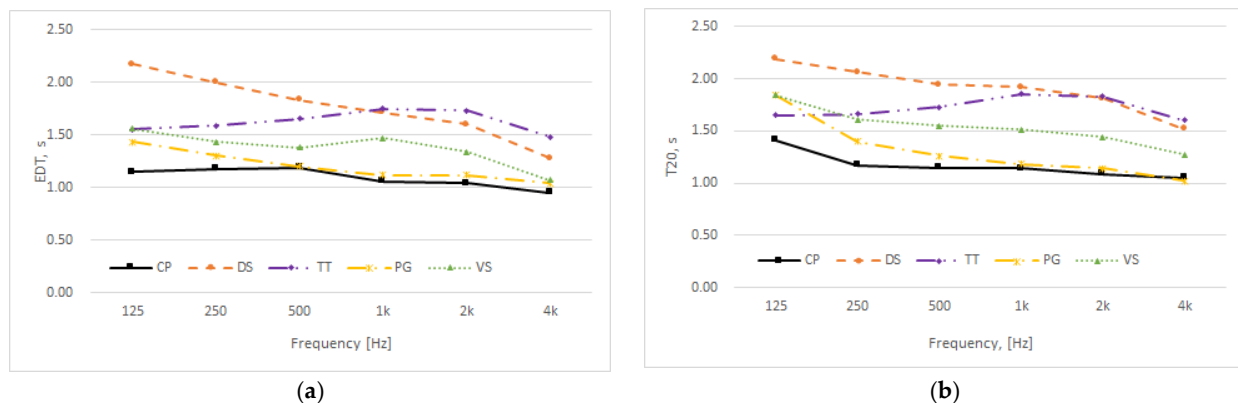


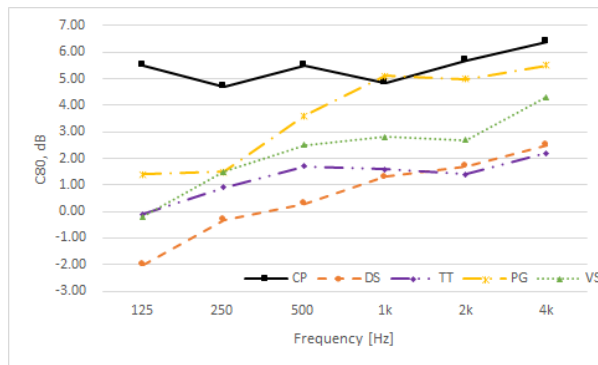
The graphs in Figure 9 indicate the presence of audiences does not affect the acoustics of the Ponchielli theatre, demonstrating that the acoustics of the Ponchielli theatre do not change based on the degree of occupation [20]. This outcome is advantageous, particularly for musicians and actors who do not need to adjust their performance style between public rehearsals and live performances [16]. Additionally, even when attendance is inadequate, the audience recognises hearing the best performances. Due to the high absorption coefficient of the seats, which is very comparable to that of the human body, the difference between 50% and 100% occupancy is negligible.

5. Acoustic Quality Comparison with the Other Opera Theatres

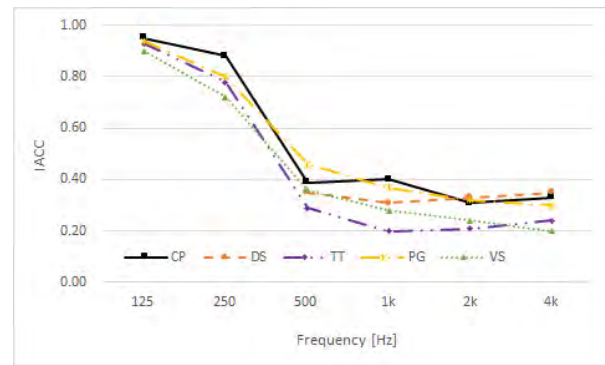
Four theatres throughout the world with objective measures, similar in size to the Cremona, Ponchelli theatre (CP), and good acoustic quality ratings were selected [19]: Dresden, Semperoper (DS), Tokyo, New National Theatre (TT), Paris, Opera Garnier (PG), Vienna, Staatsoper (VS). DS and TT were rated as having excellent acoustic quality, while the other two theatres were rated as good. All measurements were carried out without audiences. The comparison between the measured results of the selected theatres is given in Figure 10.

Figure 10. Comparison with the other four opera house measurements: EDT (a), T_{20} (b), C_{80} (c) and IAAC (d).





(c)



(d)

The results presented in Figure 9 (a), reveal that the Ponchelli theatre exhibits a shorter early decay time (EDT) across the frequency range when compared to the Semperoper of Dresden and the New National Theatre of Tokyo, which are regarded as having exceptional acoustic quality. While the Ponchelli theatre's EDT values are found to be comparable to those of the Opera Garnier of Paris and the Staatsoper of Vienna, with an overall fluctuation of approximately 1.2 s. This outcome is considered a favourable result for both speech and music perception [19-21].

The graph (b) in Figure 9 demonstrates that the values of reverberation time (T_{20}) is noticeably higher in the full frequency band of Semperoper of Dresden and the middle and high-frequency bands of New National Theatre of Tokyo than in the other three theatres, with Ponchelli theatre, Opera Garnier of Paris and Staatsoper of Vienna having similarities in that the values in the middle and high frequencies fluctuate between 1.1 s and 1.5 s, making these theatres more suitable for traditional opera performances [22], for speech as well as for music.

Regarding the music clarity index (C_{80}), Figure 9 (c) shows slightly higher than ideal values for Ponchelli theatre and Opera Garnier of Paris compared to the other three opera theatres [19], particularly in the higher frequency bands. However, this is an identity shared by many traditional opera theatres with comparable characteristics.

The trend in the interaural cross correlation (IACC) of Figure 9 (d) has been found to be very similar for all the theatres. As lower values of IACC are better [19], these four theatres have a better performance in the mid and high-frequency bands, with fluctuations between 0.2 and 0.4.

6. Discussion

The acoustic survey carried out inside the Ponchielli theatre is the baseline for the analysis of the acoustic behaviour of this heritage building. The geometrical description, as well as the details of the interior design, are important for the analysis of the results obtained from the acoustic simulations. The values of the reverberation time and early decay time are somewhat short in both the mid and high frequencies. Although the shorter reverberation time is suitable for theatres, it allows the lead singer to hear every note of the accompaniment. However, recent performances at the Ponchielli theatre have been of orchestral and symphonic music, such as *Flavien Boy*, which requires longer reverberation times to avoid them being perceived as too 'dry'. This can be achieved by reducing the

size of the acoustic curtains or changing the material of the seats, for example, by replacing cotton upholstery with leather upholstery.

There is no significant impact on the acoustic characteristics of the theatre, regardless of the size of the audience. This suggests that although attendance at the theatre will drop significantly after Covid-19, audiences will still be able to hear the best musical performances that the theatre has to offer. On the other hand, better audience attendance will provide incentives for artists and generate more income for the ongoing maintenance of the theatre. Both sides should put in the effort. Society and relevant practitioners should work to encourage the preservation and protection of collections of cultural works, both tangible and intangible.

The results of the comparison with the other four theatres with a quality acoustic environment indicate that the acoustic quality of the Ponchelli theatre, while not yet at the level of a top venue, is still satisfactory for a wide range of performances.

Future research will focus on the acoustic simulation of different types of scenes, including those realised with modern materials, to highlight the adaptability of the old theatre space to modern performances.

References

1. Tronchin, L.; Merli, F.; Dolci M. Acoustic reconstruction of eszterháza opera house following new archival research. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 8817. Author 1, A.B.; Author 2, C.D. Title of the cited article. *Journal Title* **2007**, *6*, 100–110
2. Chourmouziadou, K.; Kang, J. Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres. *Appl. Acoustics* **2008**, *69*, 514-529.
3. Iannace, G.; Trematerra, A.; Masullo, M. The large theatre of Pompeii: Acoustic evolution. *Building Acoustics* **2013**, *20*, 215-227.
4. Cheng, T.C.; Wen, W.J. Determinants of performing arts attendance in Taiwan: a multivariate probit analysis. *Applied Eco-nomics Letters* **2011**, *18*, 1437-1442.
5. Mueser, D.; Vlachos, P. Almost like being there? A conceptualisation of live-streaming theatre. *International Journal of Event and Festival Management* **2018**, *9*, 183-203.
6. Tronchin, L.; Antonella, B. How much dose the variety of scenery and the different percentages of audience occupancy affect the indoor acoustics at the national theater of Zagreb? *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 6500.
7. Official Theatre Website. Available online: <https://www.teatroponchielli.it> (accessed on 31st August 2022).
8. ISO 3382-1; *Acoustics — Measurement of Room Acoustic Parameters*; Part 1: Performance Spaces.; ISO: Geneva, Switzerland, 2009.
9. Farina, A. Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. 122nd; *AES Convention* **2007**, *3*, 1626-1646.
10. Barron, M. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, 2nd ed.; Spon Press: New York, NY, USA, 2009.
11. Farina, A.; Tronchin, L. Measurements and reproduction of spatial sound characteristics of

- auditoria. *Acoust. Sci. Technol* **2005**, *26*, 193-199.
12. Tronchin, L. Variability of room acoustic parameters with thermo-hygrometric conditions. *Appl. Acoustics* **2021**, *177*, 107-933.
 13. Farina, A. Aurora listens to the traces of pyramid power. *Noise Vib. World* **1995**, *26*, 6-9.
 14. Farina, A. Verification of the accuracy of the Pyramid Tracing algorithm by comparison with experimental measurements by objective parameters. International Conference on Acoustics. 1995.
 15. Tronchin, L.; Bevilacqua, A. Acoustic study of different sceneries at the São Carlos national theatre of Lisbon. *Appl. Acoustics* **2021**, *180*, 108-102.
 16. Cox, T.J.; D'Antonio, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*, 3rd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2004.
 17. Tronchin, L.; Bevilacqua, A.; Yan, R. Acoustic Characterization and Quality Assessment of Cremona's Ponchielli Theater. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 4057.
 18. Gomez-Agustina, L.; Bernard, J. Practical and technical suitability perceptions of sound sources and test signals used in room acoustic testing. In Proceedings of the Inter-Noise 2019, Madrid, Spain, 16-19 June 2019.
 19. Beranek, L.L. *Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture*, 2nd ed.; Springer Press: New York, NY, USA, 2004.
 20. Beranek, L.L.; Hidaka, T. Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces. *J. Acoust. Soc. Am.* **1998**, *104*, 3169-3177.
 21. Barron, M.; Lee, L.J. Energy relations in concert auditoriums. *The Journal of the Acoustical Society of America* **1988**, *84*, 618-628.
 22. Fausti, P.; Farina, A. Acoustic measurements in opera houses: comparison between different techniques and equipment. *Sound and Vibration* **2000**, *232*, 213-229.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Analisi e validazione di sistemi GNSS basati su sensori a basso costo per applicazioni navigazionali

Laura Marconi ^{1,*}, Fabio Radicioni ¹, Aurelio Stoppini ¹

¹ Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti 93, 06125 Perugia, Italy

* Autore di riferimento. E-Mail: laura.marconi@unipg.it

Abstract: Nell'ambito delle politiche e delle strategie per contrastare il cambiamento climatico il settore dei trasporti in Italia, nonostante alcuni progressi conseguiti negli anni più recenti, risulta ancora caratterizzato da forti criticità soprattutto in termini di sostenibilità. È necessario che il concetto comune di mobilità venga modificato; automazione, elettrificazione e condivisione devono segnare trasformazioni verso sistemi sempre più sostenibili che portino alla riduzione e limitazione dei veicoli circolanti, favorendo trasporti più efficienti, trasporti multimodali, soluzioni intelligenti di gestione del traffico e molto altro ancora. In tale contesto soluzioni tecnologiche come quelle che caratterizzano il campo del posizionamento satellitare possono contribuire in modo efficiente ai fini di una mobilità intelligente, producendo cambiamenti e trasferendo innovazione in diversi settori; oltre ad essere utilizzata nei sistemi relativi alla guida connessa e automatizzata, la tecnologia GNSS può contribuire alla riduzione di consumo di carburante (con conseguente diminuzione delle emissioni inquinanti) supportando percorsi ottimali nei sistemi di monitoraggio flotte, soluzioni di gestione del traffico e sistemi IoT per un trasporto pubblico urbano efficiente. Recentemente l'evoluzione tecnologica ha portato all'ampia diffusione di sensori a basso costo con prestazioni sempre migliori e nuove opportunità di utilizzo in numerosi campi; lo studio di sistemi GNSS per applicazioni di posizionamento e navigazione è attualmente al centro di numerose ricerche con nuove sfide sia per i ricercatori che per i fornitori di dispositivi. Il presente lavoro si inserisce in questo contesto e ha come fine quello di testare le effettive prestazioni di sensori di ultima generazione con l'obiettivo di valutarne la possibilità di applicazione nell'ambito della navigazione. Sono stati condotti test in modalità quasi statica con spostamenti lenti imposti attraverso una slitta micrometrica e test cinematici in tempo reale installando a bordo di un veicolo due sensori a basso costo (uno dei quali dotato di unità di misura inerziale

integrata) e un ricevitore geodetico ad alta precisione. I tracciati sono stati acquisiti in contesti urbani caratterizzati da numerose ostruzioni con l'intento di valutare il comportamento dei dispositivi impiegati con particolare attenzione rivolta al sensore provvisto di piattaforma IMU. I dati e le soluzioni del ricevitore geodetico hanno fornito il benchmark per valutare l'accuratezza del posizionamento dei dispositivi a basso costo testati. Nell'ambito del progetto "Fi.L.O. Filiera, Logistica, Organizzazione" (Programma di Sviluppo Rurale per l'Umbria 2014-2020) il Laboratorio di Topografia e Fotogrammetria dell'Università degli Studi di Perugia ha seguito lo sviluppo di un sistema di tracciamento GNSS per flotte di trasporto basato su sensoristica low cost installata sui mezzi e integrato a un software di gestione web-based.

Keywords: GNSS; GNSS/INS; sensori low-cost; navigazione; monitoraggio dei trasporti.

1. Introduzione

È noto come la mobilità sia oggi al centro del dibattito sulle trasformazioni verso sistemi sempre più sostenibili, se si considerano i crescenti problemi legati alla congestione e all'inquinamento, a loro volta connessi alle tematiche del cambiamento climatico e del riscaldamento globale che stanno fortemente modificando e compromettendo il nostro ambiente, la nostra società e la nostra economia.

Politiche e normative adeguate e strategiche sono necessarie per ridurre gli effetti a lungo termine e prevenire tali problematiche soprattutto in quei settori, come i trasporti, che sono responsabili di un costante incremento del contributo delle emissioni di gas a effetto serra come emerge dal rapporto pubblicato da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) nel 2022 [1-2]. Considerato che, nell'ambito del Piano europeo di azione per il clima, la strategia di decarbonizzazione prevede la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra entro il 2030 e la neutralità climatica entro il 2050 [3], è ovvio che il settore dei trasporti deve essere protagonista di una vera e propria rivoluzione che modifichi il concetto di mobilità verso sistemi sempre più multimodali, automatizzati e connessi in grado di ridurre traffico e inquinamento.

Negli ultimi decenni l'avvento del GNSS (Global Navigation Satellite Systems) insieme alla sua continua evoluzione ha rivoluzionato numerosi ambiti di attività, contribuendo in modo efficiente a trasferimenti di innovazione in vari settori tra cui trasporto su strada, smart city, agricoltura di precisione e molti altri [4-8]; in particolare, soluzioni tecnologiche come quelle che caratterizzano il campo del posizionamento satellitare diventano strumenti efficienti per una mobilità intelligente intervenendo, ad esempio, in soluzioni di gestione del traffico o sistemi relativi alla guida connessa ed automatizzata contribuendo all'Internet of Things (IoT) in modo da supportare trasporti pubblici urbani sempre più sostenibili e favorire la riduzione del consumo di carburante attraverso la definizione di percorsi ottimali (nel caso del monitoraggio di flotte) [9]. Oltre che nel campo del posizionamento di precisione, la tecnologia GNSS costituisce dunque uno strumento utile e fondamentale per applicazioni

legate alla navigazione e alla localizzazione. Negli ultimi anni la possibilità di utilizzare più costellazioni globali interoperabili tra loro, il crescente numero di stazioni permanenti e il progresso tecnologico di strumentazione, algoritmi di calcolo e prodotti GNSS sta segnando in modo importante l'evoluzione delle diverse tecniche di rilievo satellitare e la diffusione di tecnologie *mass-market* caratterizzate da dimensioni e costi ridotti e da prestazioni sempre migliori [10-15].

Attualmente lo studio di sistemi GNSS a basso costo per applicazioni di navigazione basate su sensori integrati è oggetto di numerose ricerche e ha assunto importanza sempre crescente in numerosi settori tra cui quello dell'industria, dell'automotive, dei trasporti pubblici, dell'infomobilità, e molto altro ancora [16-23]. In questo contesto si inserisce l'attività del presente lavoro che si propone di testare sensori GNSS a basso costo di ultima generazione, multifrequenza e multiconstellazione con l'obiettivo di valutarne la possibile applicazione per la navigazione.

Nei diversi test condotti sono stati utilizzati due ricevitori di fascia bassa (le schede C099-F9P e C102-F9R dell'azienda U-blox con costo compreso tra i 300€ e i 400€) ed un ricevitore geodetico ad alta precisione (Hiper HR Topcon) i cui dati sono stati presi come riferimento per il confronto delle diverse soluzioni ottenute. La sperimentazione ha previsto l'utilizzo di tecniche differenziate in diverse modalità e condizioni e si divide in due fasi: la prima relativa a posizionamenti di tipo "quasi-statico", cioè con movimenti lenti imposti attraverso l'uso di una slitta micrometrica sia in post-processamento sia in tempo reale (NRTK); la seconda rivolta a test cinematici condotti installando su un veicolo contemporaneamente il ricevitore geodetico di alta precisione e i due sensori a basso costo (di cui uno caratterizzato da piattaforma inerziale).

Per i test in modalità differenziale è stata utilizzata la Rete multi-costellazione di Stazioni Permanenti GPS-Umbria (composta di 13 SP ben distribuite su tutto il territorio regionale) ricevendo correzioni multi-costellazione (MSM) in modo da valutare gli effetti dell'uso di tutte le costellazioni (che si traduce nella disponibilità di un numero maggiore di satelliti e segnali) [24].

L'articolo descrive le modalità di esecuzione dei test sperimentali condotti con i tre diversi dispositivi, descrivendo le operazioni eseguite, gli strumenti utilizzati e presentando i risultati ottenuti.

Infine, si riporta brevemente l'attività che è stata condotta nell'ambito del progetto "*Fi.L.O. Filiera, Logistica, Organizzazione*" (Programma di Sviluppo Rurale per l'Umbria 2014-2020) di cui il Laboratorio di Topografia e Cartografia dell'Università degli Studi di Perugia ha preso parte in qualità di partner nel Gruppo Operativo. Il progetto è rivolto alla logistica dei trasporti con l'obiettivo di trasferimento di innovazione all'interno della filiera agroalimentare attraverso lo sviluppo di un sistema di gestione e tracciamento GNSS per flotte di trasporto.

2. Strumentazione e software

I dispositivi low-cost impiegati nei test sono le schede applicative C099-F9P e C102-F9R, entrambe prodotte dall'azienda svizzera U-blox, fornitore globale di tecnologie di posizionamento e comunicazione wireless che sviluppa chip e moduli in grado di supportare i diversi sistemi globali di navigazione satellitare (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou e QZSS). Entrambi i moduli integrati ad alta precisione (ZED-F9P e ZED-F9R rispettivamente per la scheda C099-F9P e la scheda C102-F9R)

forniscono posizionamento GNSS multibanda e sono dotati di tecnologia RTK integrata riuscendo a garantire una precisione centimetrica. Il modulo ZED-F9R include inoltre un'unità di misura inerziale (IMU) ed è basato su tecnologia HPS (High Precision Sensor Fusion); i sofisticati algoritmi integrati fondono i dati IMU, le misurazioni GNSS, le informazioni relative ai giri delle ruote, i dati di correzione e un modello dinamico del veicolo per fornire una precisione di posizionamento ottimale in situazioni in cui il solo GNSS fallirebbe. Il sensore è costituito da un microcontrollore per interfacciarsi direttamente al CAN Bus del veicolo attraverso un file di configurazione.

Il ricevitore geodetico integrato ad alta precisione è un Hiper HR della Topcon Positioning, caratterizzato da dimensioni ridotte, piattaforma inerziale (IMU) a 9 assi e bussola elettronica (eCompass) a 3 assi.

Per interfacciarsi con i moduli GNSS a basso costo è stato utilizzato il software *U-CENTER* sviluppato da u-blox che permette di comunicare con i ricevitori che utilizzano la tecnologia di posizionamento u-blox attraverso il protocollo UBX o il protocollo standard NMEA-0183 consentendo la visualizzazione, la gestione, l'analisi delle prestazioni e la configurazione dei dispositivi. I dati ottenuti sono stati visualizzati e trasformati nei formati necessari attraverso il software open-source RTKLIB in grado di riconoscere i file proprietari dei ricevitori u-blox. Il software commerciale *MAGNET TOOLS*, sviluppato da Topcon, ha permesso di elaborare i dati acquisiti dai tre ricevitori nei diversi test in modalità relativa post-processata (attraverso algoritmi alle doppie differenze) al fine di ottenere stime di riferimento per la valutazione degli scostamenti rispetto ai tracciati ottenuti dalle acquisizioni in tempo reale.

Tra i programmi utilizzati vi sono inoltre il software (di libero uso) *Ferens+*, sviluppato dal Laboratorio di Topografia dell'Università degli Studi di Perugia per la Regione Umbria che permette di eseguire trasformazioni di coordinate fra i principali sistemi di riferimento, e il software open source *QGIS* utilizzato nella gestione dei dati cartografici territoriali quale Sistema di Informazione Geografica e necessario, nel caso in esame, per la visualizzazione, analisi ed elaborazione dei dati provenienti dalle diverse modalità di rilievo effettuate.

3. Test “quasi statici”

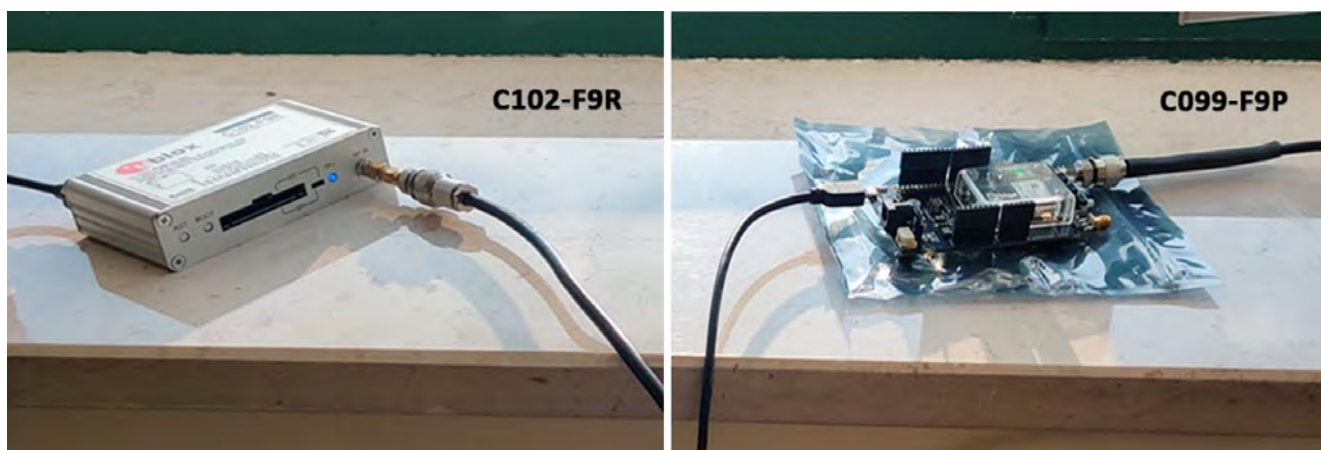
La prima attività si è basata su una acquisizione in tempo reale (NRTK) con l'utilizzo di una slitta micrometrica in acciaio (caratterizzata da graduazione millimetrica con nonio al decimo di millimetro) a cui sono stati imposti spostamenti noti. Il fine è stato quello di acquisire le posizioni dei quattro vertici di un quadrato costruito spostando l'antenna con traslazioni ortogonali di 4 cm, agendo sulle viti alla base della slitta; considerando che gli spostamenti lungo i lati sono avvenuti molto lentamente il rilievo può essere definito “quasi statico”.

La slitta, sulla quale sono stati montati in maniera alternata il ricevitore geodetico (che dispone di antenna integrata) e un'antenna Topcon Legant2, è stata fissata a una basetta precedentemente ancorata in modo stabile a un blocco di forato (Figura 1). Il test è stato condotto imponendo alla slitta il percorso prefissato di note caratteristiche geometriche e collegando alternativamente all'antenna i due sensori a basso costo (C099-F9P e C102-F9R) opportunamente collegati a due computer e interfacciati attraverso il software U-center (Figura 2).

Figura 1. Slitta micrometrica con Hiper HR (a sinistra) e antenna Topcon Legant2 (a destra).



Figura 2. Ricevitori low-cost utilizzati: scheda C102-F9R (a sinistra), scheda C099-F9P (a destra).



Per ogni dispositivo l'intervallo di campionamento è stato fissato ad 1 secondo e ad ogni spostamento di 1 cm l'antenna è stata lasciata ferma in acquisizione per circa tre minuti fino a completare il tracciato corrispondente ai lati del quadrato. Le coordinate ricavate dalle misure sono state confrontate tra loro e con quelle deducibili dalla conoscenza geometrica del percorso imposto. Le correzioni differenziali NRTK multicostellazione (mountpoint VRS) sono state erogate dalla rete GPSUMBRIA con messaggi RTCM mediante rete Internet (protocollo Ntrip).

Al fine di fornire una base di confronto per le stime NRTK, i dati acquisiti sono stati elaborati anche in modalità relativa post-processata con algoritmi alle doppie differenze (DD) utilizzando la stazione permanente di Perugia UNPG come punto a coordinate note. La Figura 3 rappresenta le posizioni ottenute per i tre ricevitori sia in post processamento che in tempo reale; si evidenziano i piccoli cluster in corrispondenza dei punti in cui l'antenna è stata mantenuta fissa. La Figura 4 riporta il tipo di soluzione ottenuta (in percentuale) relativa a ciascuna posizione stimata nelle due diverse elaborazioni.

Una prima analisi ha riguardato le qualità dei dati e ha confermato un numero elevato di satelliti tracciati (numero massimo circa 40) e valori di DOP comparabili e buoni per tutti i ricevitori (compresi tra un minimo di 0,5 e un massimo di 0,9). Le schede C099-F9P e C102-F9R hanno dimostrato buone soluzioni sia in tempo reale che in post processamento: nel primo caso la scheda C099-F9P ha riportato i risultati migliori con il 98,1% di soluzioni *Fixed* (superiori anche all’Hiper HR) contro l’80,9% del sensore C102-F9R, il quale ha ottenuto il 9,8% di soluzioni *Code* e il 9,3% di soluzioni *Failed* (a causa di una disconnessione momentanea del servizio di invio delle correzioni dovuto probabilmente ad un temporaneo malfunzionamento della rete internet).

Figura 3. Stima delle posizioni in modalità relativa post processata (DD) e in tempo reale (NRTK).

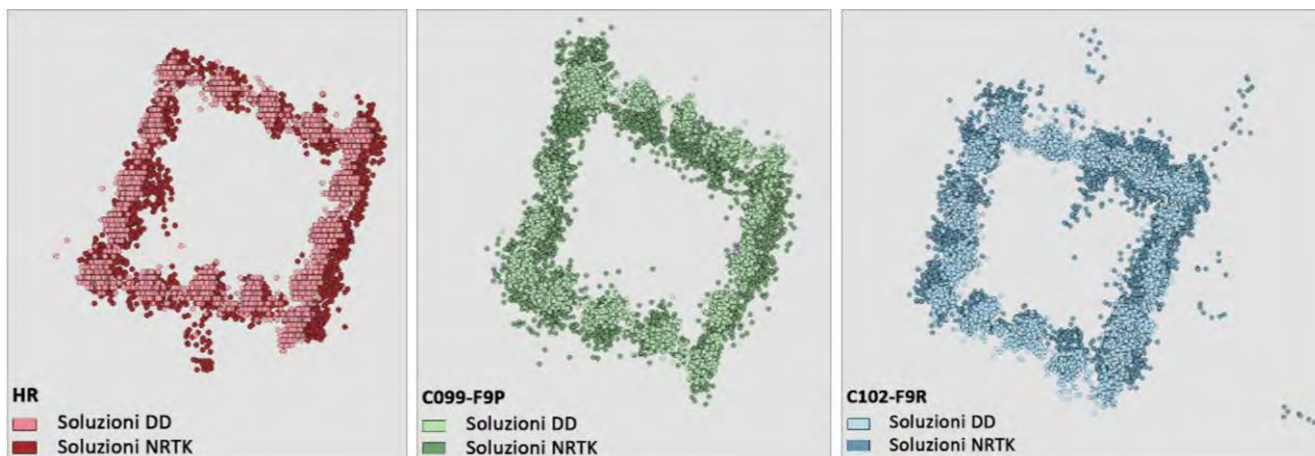
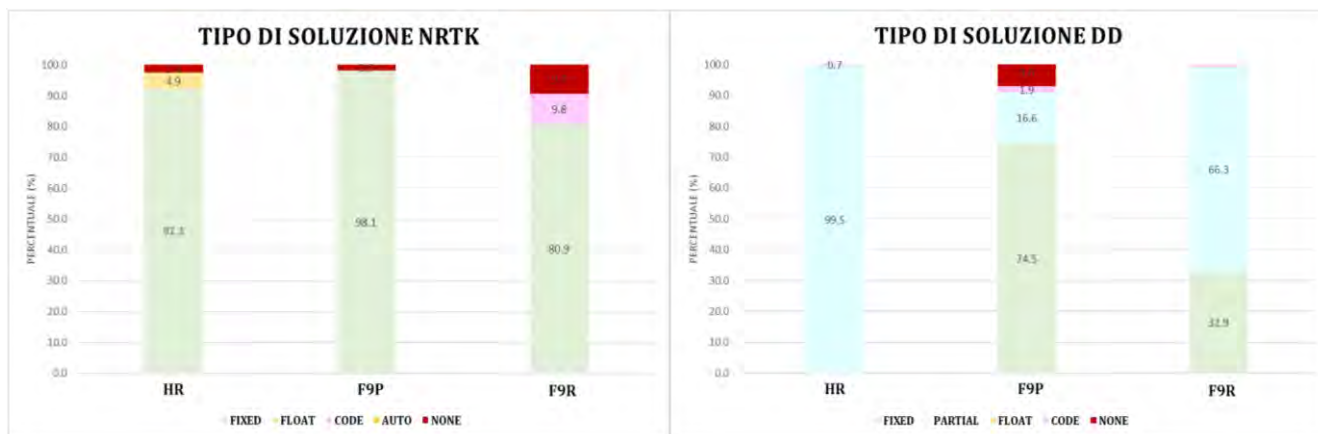


Figura 4. Tipo di soluzioni ottenute (NRTK a sinistra, DD a destra).



In una prima analisi i tre sensori sono stati valutati in modo indipendente considerando gli scostamenti tra le soluzioni in post-processamento con quelle in tempo reale per ogni epoca corrispondente (sono stati presi in considerazione solo scostamenti planimetrici ed esclusivamente quelli riferiti a soluzioni fixed); i risultati (gli scostamenti massimi, minimi, medi e le rispettive deviazioni standard) sono riportati in Tabella 1. Le soluzioni si possono ritenere comparabili per tutti i casi, ad eccezione di deviazioni standard maggiori per la componente verticale relativa al C102-F9R.

Tabella 1. Scostamenti tra soluzioni DD e soluzioni NRTK.

Ricevitore	HR			C099-F9P			C102-F9R		
	ΔN (m)	ΔE (m)	ΔH (m)	ΔN (m)	ΔE (m)	ΔH (m)	ΔN (m)	ΔE (m)	ΔH (m)
MAX (m)	0.009	0.001	0.011	0.003	0.004	0.004	0.042	0.012	0.114
MIN (m)	-0.009	-0.003	-0.001	-0.007	-0.005	-0.012	-0.042	-0.054	-0.092
MEDIA (m)	-0.001	-0.001	0.005	-0.001	-0.001	-0.004	-0.001	0.000	0.000
SD (m)	0.002	0.001	0.003	0.002	0.002	0.004	0.004	0.004	0.011

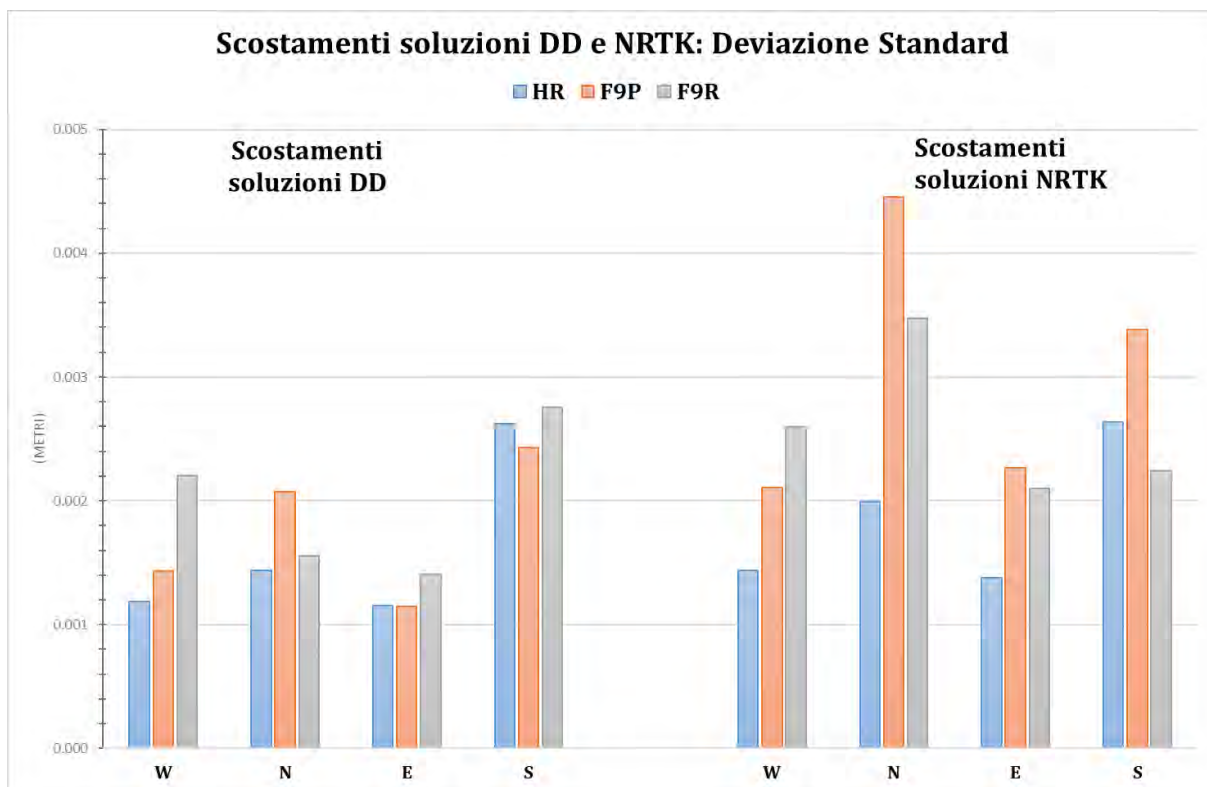
Per valutare gli scostamenti rispetto ai lati del tracciato si è operata una rotazione delle posizioni acquisite in modo da ottenere un orientamento nord-sud del quadrato corrispondente al percorso preimposto. Sono stati determinati gli scostamenti (in direzione nord-sud ed est-ovest) relativi ai quattro lati (denominati W, N, E, S) per entrambe le stime (post-processamento e tempo reale); le posizioni scelte come riferimento sono state definite sulla base delle medie delle coordinate dei vertici del quadrato determinate utilizzando i dati acquisiti dal ricevitore geodetico in posizionamento relativo post processato. La Tabella 2 riporta i risultati (gli scostamenti massimi, minimi, medi e le rispettive deviazioni standard) relativi ad ogni lato e divisi per tipo di elaborazione e ricevitore.

Le medie delle deviazioni dei quattro lati relative al calcolo post-processato risultano minori rispetto alle soluzioni NRTK (Figura 5); quest'ultime sono comunque caratterizzate da valori medi bassi che oscillano tra gli 0,002 m (per l'Hiper HR) e gli 0,003 m (per C102-F9R). Anche per quanto riguarda le medie degli scostamenti (considerando le medie di tutti i lati) i valori nel caso NRTK sono di poco superiori ed oscillano tra 0,001 m (per Hiper HR e C099-F9P) e 0,003 m (per C102-F9R).

Tabella 2. Scostamenti tra soluzioni DD e soluzioni NRTK rispetto al tracciato imposto (lati W, N, E, S).

LATO	HR SCOSTAMENTI SOLUZIONI DD				HR SCOSTAMENTI SOLUZIONI NRTK			
	W	N	E	S	W	N	E	S
MAX (m)	0.008	0.006	0.005	0.006	0.004	0.007	0.004	0.007
MIN (m)	-0.005	-0.005	-0.003	-0.009	-0.008	-0.007	-0.008	-0.008
MEDIA (m)	-0.001	0.001	0.001	-0.001	-0.002	0.000	-0.001	-0.002
SD (m)	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.002	0.001	0.003
LATO	F9P SCOSTAMENTI SOLUZIONI DD				F9P SCOSTAMENTI SOLUZIONI NRTK			
	W	N	E	S	W	N	E	S
MAX (m)	0.009	0.004	0.007	0.007	0.010	0.017	0.008	0.013
MIN (m)	-0.002	-0.010	-0.002	-0.008	-0.007	-0.014	-0.006	-0.012
MEDIA (m)	0.002	-0.001	0.003	-0.001	0.002	0.000	0.001	0.000
SD (m)	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002	0.003
LATO	F9R SCOSTAMENTI SOLUZIONI DD				F9R SCOSTAMENTI SOLUZIONI NRTK			
	W	N	E	S	W	N	E	S
MAX (m)	0.009	0.005	0.010	0.009	0.014	0.014	0.015	0.005
MIN (m)	-0.003	-0.010	-0.003	-0.008	-0.005	-0.012	-0.013	-0.020
MEDIA (m)	0.003	-0.001	0.004	-0.001	0.004	-0.001	0.003	-0.003
SD (m)	0.002	0.002	0.001	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002

Figure 5. Deviazioni standard degli scostamenti rispetto ai quattro lati (W, N, E, S): soluzioni DD (a sinistra) e soluzioni NRTK (a destra).



La frequenza relativa degli scostamenti per i diversi ricevitori è riportata negli istogrammi di Figura 6 e Figura 7 che si riferiscono a classi di intervalli pari a 0,001 m (da -0,015 m a 0,015 m).

Figure 6. Frequenza relativa degli scostamenti per soluzioni NRTK.

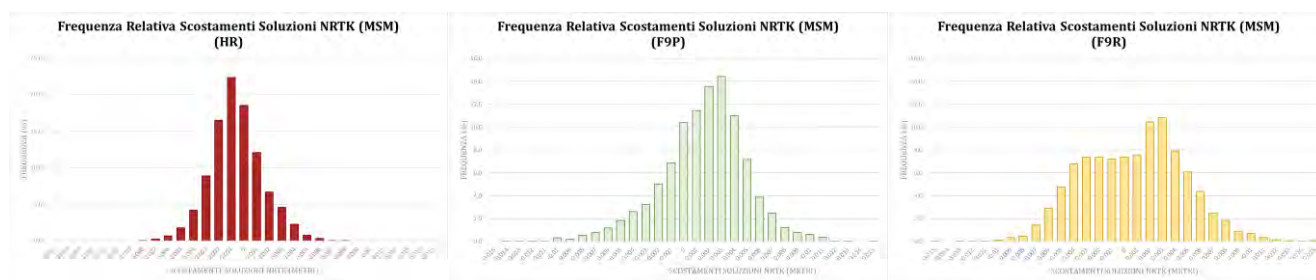
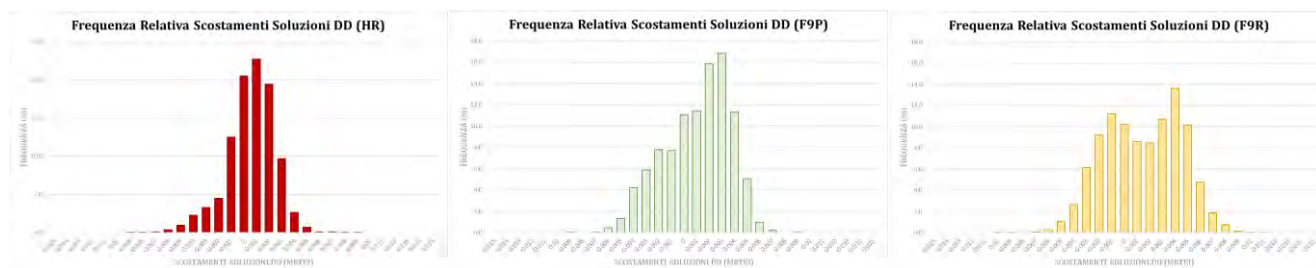


Figure 7. Frequenza relativa degli scostamenti per soluzioni DD.



3. Test cinematici

Dopo la prima fase di sperimentazione necessaria per studiare in via preliminare il comportamento dei sensori a basso costo, la seconda parte dell'attività ha riguardato il tracciamento cinematico della traiettoria di un veicolo, con particolare attenzione rivolta alle prestazioni del sensore integrato C102-F9R.

I due dispositivi u-blox sono stati installati a bordo di un veicolo, alimentati con un pc portatile, interfacciati mediante il software U-center e collegati ciascuno ad un'antenna u-blox ANN-MB-00 multiconstellazione fissata all'esterno del veicolo grazie alla parte inferiore magnetica. I tracciati cinematici acquisiti in tempo reale (in modalità NRTK - mountpoint VRS) sono stati confrontati con quelli ottenuti dal ricevitore geodetico Hiper HR posto in acquisizione parallela indipendente e installato mediante l'uso di una piastra magnetica dotata di filettatura a 5/8".

In fase di montaggio, le due antenne e l'Hiper HR sono stati disposti cercando di rispettare un allineamento longitudinale senza offset trasversali; per il confronto tra le tre serie di dati sono state tenute in considerazione le misure delle distanze tra i centri delle antenne in direzione longitudinale. In fase di predisposizione ai test, il sensore C102-F9R è stato fissato al cruscotto dell'automobile in modo da garantire una corretta configurazione dell'IMU attraverso la stima automatica degli angoli di disallineamento (angoli di rollio, beccheggio e imbardata) (Figura 8).

Sono stati ripetuti più test eseguiti in zone urbane fortemente antropizzate caratterizzate da numerose ostruzioni quali viali alberati, edifici e gallerie al fine di studiare il comportamento dei sensori nelle diverse situazioni.

Figura 8. Strumentazione utilizzata nei test cinematici.



I primi due test sono stati ripetuti seguendo lo stesso percorso per valutare la ripetibilità della qualità delle soluzioni; considerati i risultati estremamente comparabili, i grafici e le tabelle riportate si riferiscono a solo una delle prove effettuate. Le coordinate dei punti stimati sono state inserite in ambiente GIS e sovrapposte alla cartografia satellitare per ottenere una visualizzazione immediata delle stime ottenute ed effettuare una prima analisi delle qualità delle soluzioni (Figura 9). In particolare, i punti in blu si riferiscono a soluzioni *Autonomous* cioè in posizionamento assoluto (dovute probabilmente ad una momentanea disconnessione del servizio dati per le correzioni), i punti in rosa

sono relativi a soluzioni *DGNSS* e corrispondono a zone densamente edificate e/o caratterizzate da presenza di folta vegetazione, in viola sono rappresentate le soluzioni *DR* (Dead Reckoning) che coincidono con il tracciato di una galleria (lunga circa 500 metri). Si evince dalle immagini come il sensore C102-F9R grazie all'integrazione dei dati provenienti dall'IMU riesca a garantire la continuità della soluzione senza evidenti fenomeni di deriva in entrambe le prove. La Figura 10 mostra le percentuali delle diverse soluzioni ottenute.

Figura 9. Tracciati soluzioni NRTK (Fixed in verde, Float in giallo, DGNSS in rosa, Autonomous in blu, DR in viola).

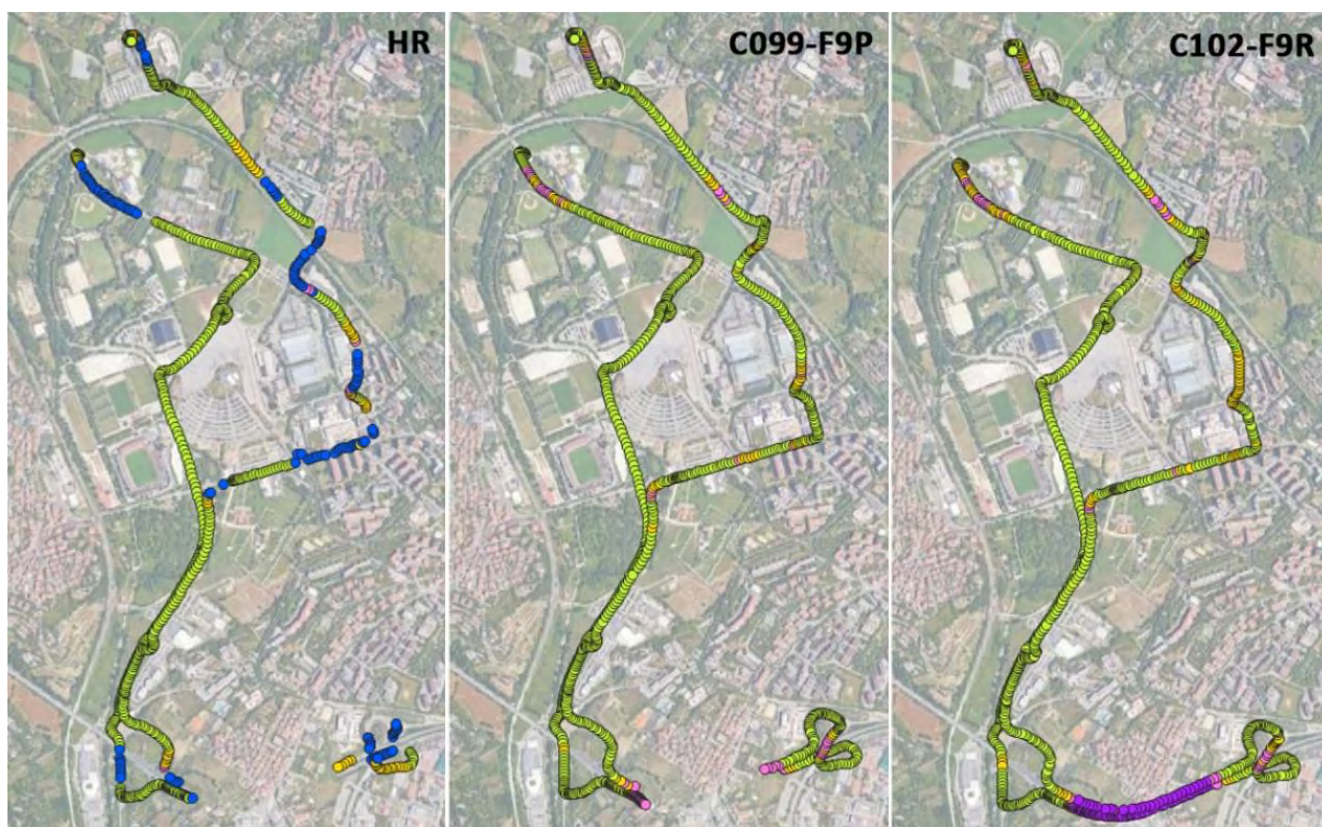
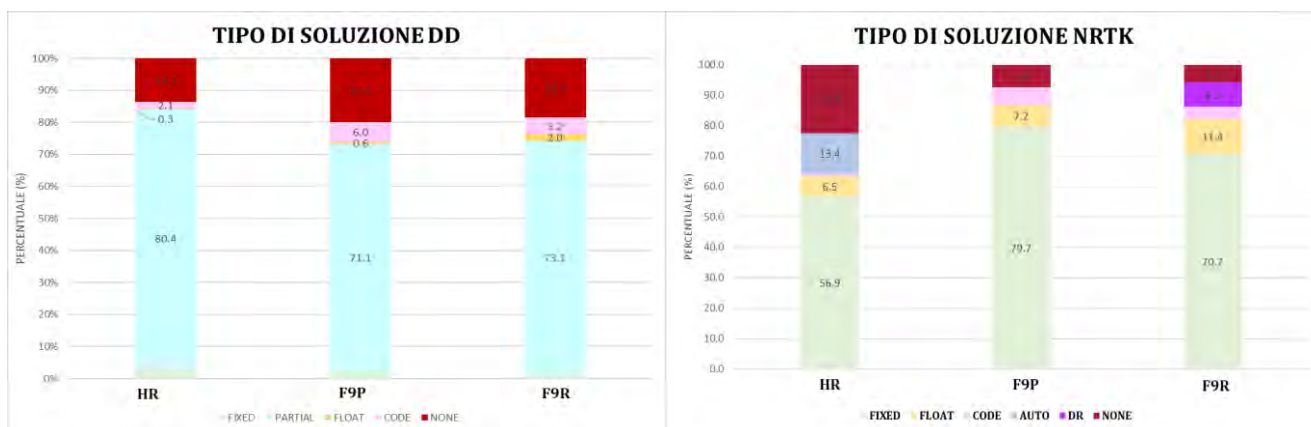


Figura 10. Frequenze del tipo di soluzioni ottenute (DD a sinistra, NRTK a destra).



La Tabella 3 riporta le deviazioni standard ottenute per i tre ricevitori nel calcolo post-processato, mentre la Tabella 4 riporta gli scostamenti tra le posizioni (il tracciato dell'Hiper HR è stato preso come riferimento). Per la valutazione degli scostamenti sono stati considerati confronti relativi alle sole soluzioni fixed (Figura 11).

Ad eccezione di zone singolari in cui le differenze tra le posizioni si discostano in modo evidente dalla tendenza generale delle soluzioni con valori di gran lunga superiori alla media (che spesso corrispondono a zone con più ostruzioni e ad epoche successive alle soluzioni float, code o autonomous scartate), i dati mostrano un comportamento piuttosto omogeneo con deviazioni dell'ordine di 0,050 m nel caso si consideri il tracciato Hiper HR post-processato, mentre valori inferiori si ottengono riferendosi alle stime NRTK sempre relative all'Hiper HR (deviazioni standard comprese tra 0,015 m e 0,020 m).

Si riportano le frequenze relative degli scostamenti per i diversi ricevitori con classi di intervalli pari a 0,010 m (da -0,010 m a 0,010 m) (Figura 12, Figura 13).

Tabella 3. Deviazioni standard relative al calcolo cinematico post-processato.

HR	SD N	SD E	SD H	SD HZ
MAX (m)	0.245	0.025	0.229	0.245
MIN (m)	0.014	0.005	0.014	0.016
MEDIA (m)	0.020	0.011	0.020	0.023
C099-F9P				
SD N	SD E	SD H	SD HZ	
MAX (m)	0.408	0.086	0.392	0.408
MIN (m)	0.016	0.007	0.016	0.018
MEDIA (m)	0.024	0.012	0.023	0.027
C102-F9R				
SD N	SD E	SD H	SD HZ	
MAX (m)	0.123	0.025	0.115	0.123
MIN (m)	0.016	0.008	0.016	0.019
MEDIA (m)	0.021	0.011	0.020	0.024

Tabella 4. Scostamenti delle soluzioni (C099-F9P e C102-F9R) rispetto al tracciato Hiper HR.

Δ	NRTK HR - NRTK F9P	NRTK HR - NRTK F9R	DD HR - NRTK F9P	DD HR - NRTK F9R
MAX (m)	0.050	0.068	0.417	0.314
MIN (m)	-0.172	-0.099	-0.214	-0.103
MEDIA (m)	-0.021	-0.018	-0.012	0.000
SD (m)	0.021	0.016	0.054	0.054

Figura 11. Scostamenti rispetto al tracciato Hiper DD e NRTK.

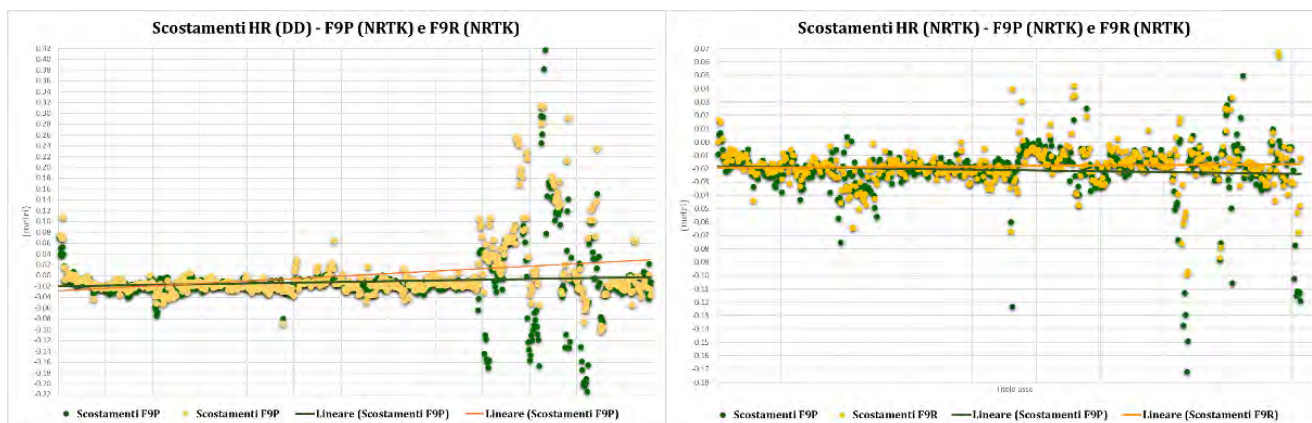


Figura 12. Frequenza relativa degli scostamenti tra le soluzioni HR(DD) e F9P/F9R (NRTK).

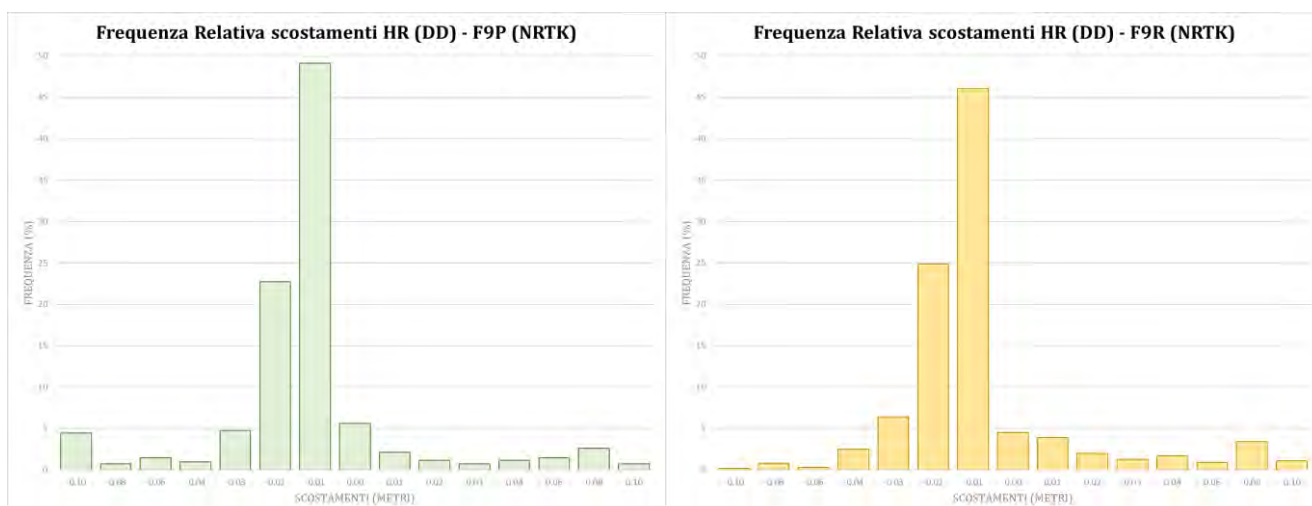
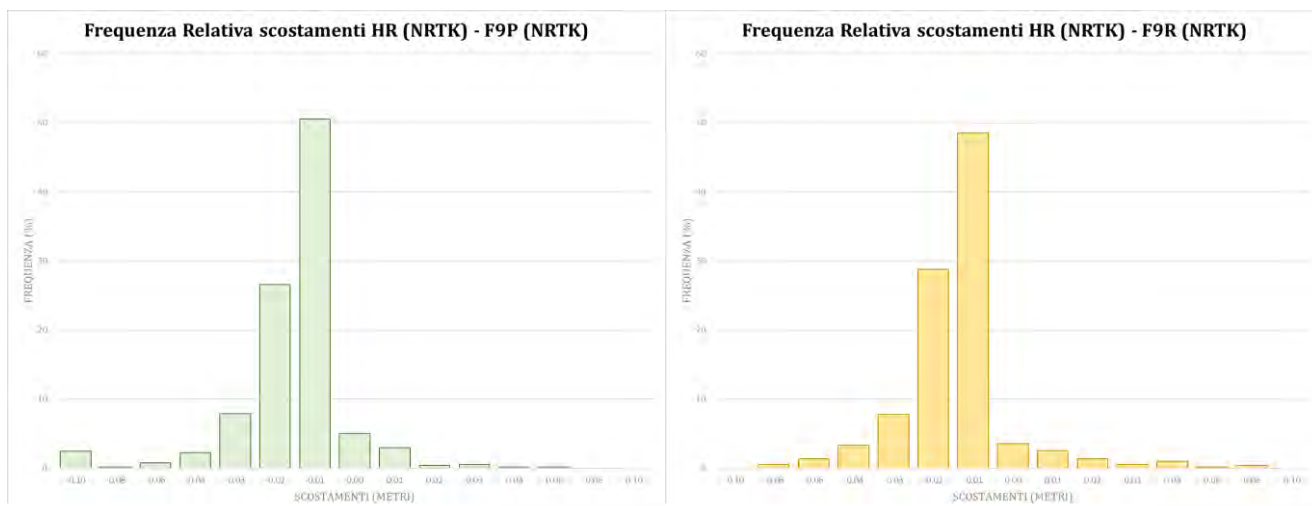


Figura 13. Frequenza relativa degli scostamenti tra le soluzioni HR(NRTK) e F9P/F9R (NRTK).



Un ulteriore test ha interessato un differente percorso, più lungo dei precedenti e caratterizzato dalla presenza di quattro gallerie consecutive di diversa lunghezza al fine di valutare la ripetitività delle soluzioni con particolare riferimento alla scheda C102-F9R.

La Figura 14 mostra il tracciato in tempo reale della scheda C102-F9R caratterizzato da tre tipologie di soluzione: la prima parte (in ciano) è relativa a dati derivanti da sole correzioni NRTK e corrisponde alla fase di inizializzazione della piattaforma IMU; i punti in giallo si riferiscono alla fusione INS/GNSS, mentre quelli in viola coincidono con la posizione delle gallerie e rappresentano soluzioni DR (Dead Reckoning). Anche in questo caso, il sensore mostra buone prestazioni riuscendo a mantenere il tracciato senza fenomeni di deriva e recuperando la soluzione INS/GNSS in modo immediato ad ogni uscita delle gallerie. I dati sono stati elaborati con le stesse modalità del caso precedente e cioè confrontando sia le soluzioni post processate sia quelle in tempo reale prendendo come riferimento il tracciato compiuto dall’Hiper HR e calcolando le differenze in planimetria. La Tabella 5 riassume i risultati mentre i grafici (Figura 15, Figura 16, Figura 17) li rappresentano. Le deviazioni standard degli scostamenti ottenuti nei diversi test risultano paragonabili per ogni tipo di confronto considerato (cioè tra tracciati post-processati e/o tracciati in tempo reale); gli errori inferiori si hanno sempre nel caso di differenze tra tracciati in tempo reale con dispersioni di 0,011 m e 0,013 m.

Questo terzo test ha dunque confermato le soluzioni ottenute nelle prime due prove dimostrando coerenza tra le misure stimate dai due sensori a basso costo.

Figura 14. Tracciato in tempo reale della scheda C102-F9R: tipo di soluzioni.

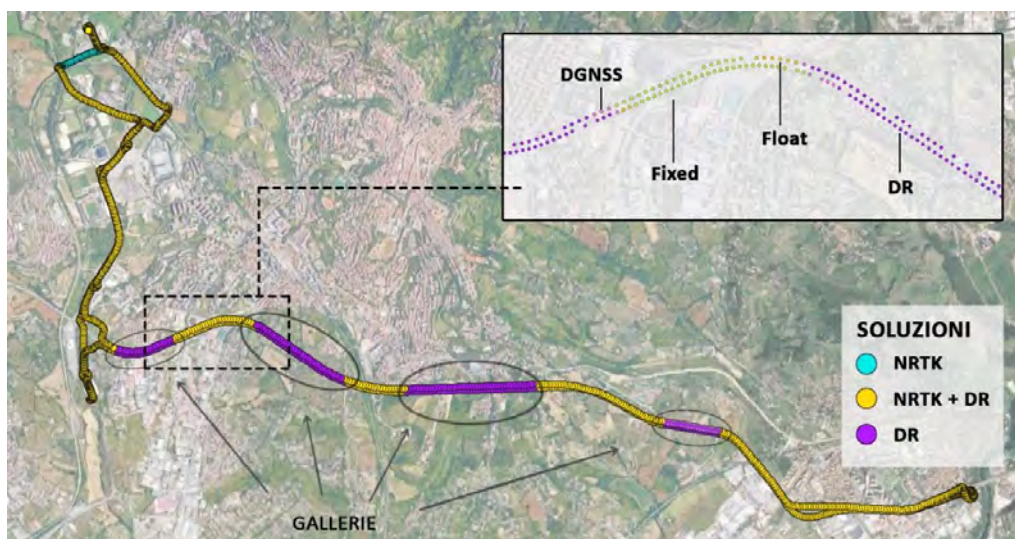


Tabella 5. Scostamenti delle soluzioni (C099-F9P e C102-F9R) rispetto al tracciato Hiper HR.

Δ	DD HR - DD F9P	DD HR - DD F9R	DD HR - NRTK F9P	DD HR - NRTK F9R	NRTK HR - NRTK F9P	NRTK HR - NRTK F9R
MAX (m)	0.781	2.403	0.332	0.323	0.126	0.089
MIN (m)	-0.133	-0.296	-0.095	-0.184	-0.070	-0.051
MEDIA (m)	0.017	0.044	0.025	0.015	0.008	0.002
SD (m)	0.072	0.195	0.068	0.066	0.013	0.011

Figure 15. Frequenza relativa degli scostamenti tra le soluzioni HR(DD) e F9P/F9R (DD).

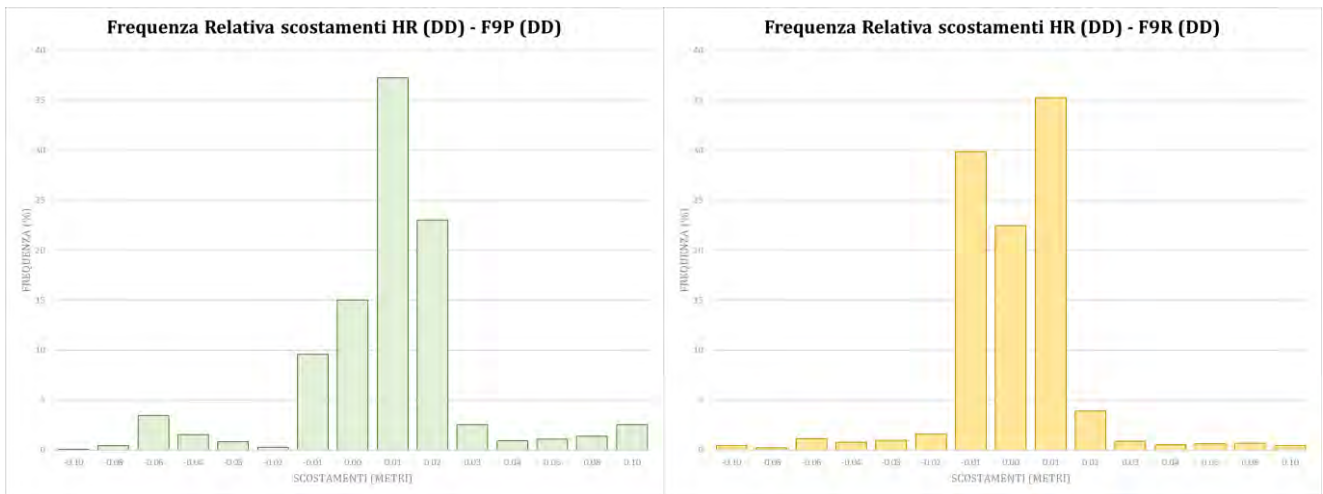


Figure 16. Frequenza relativa degli scostamenti tra le soluzioni HR(DD) e F9P/F9R (NRTK).

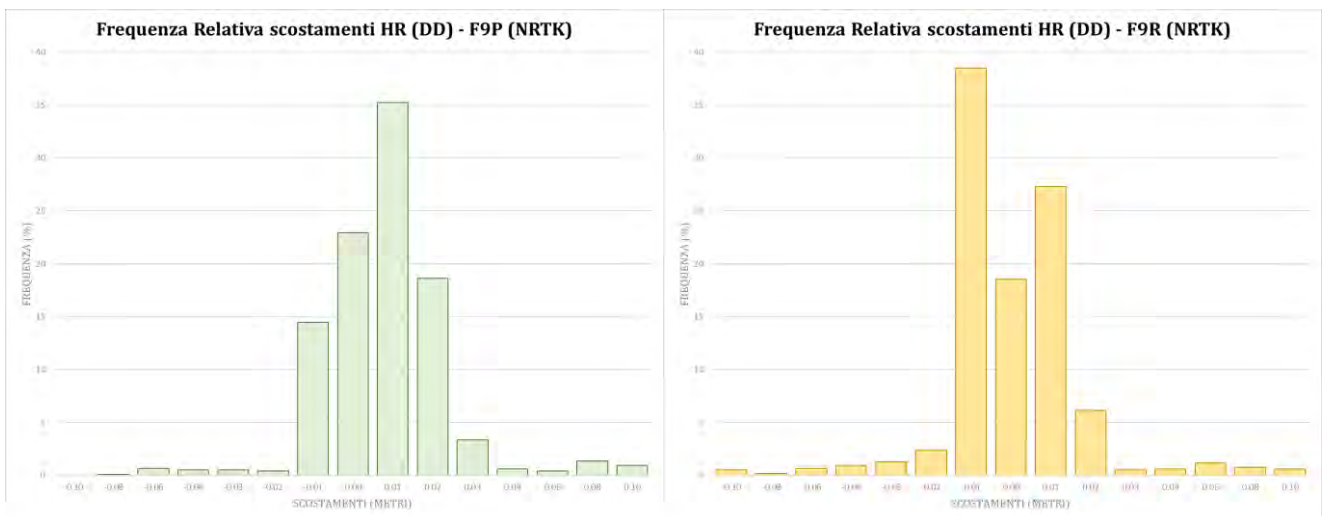
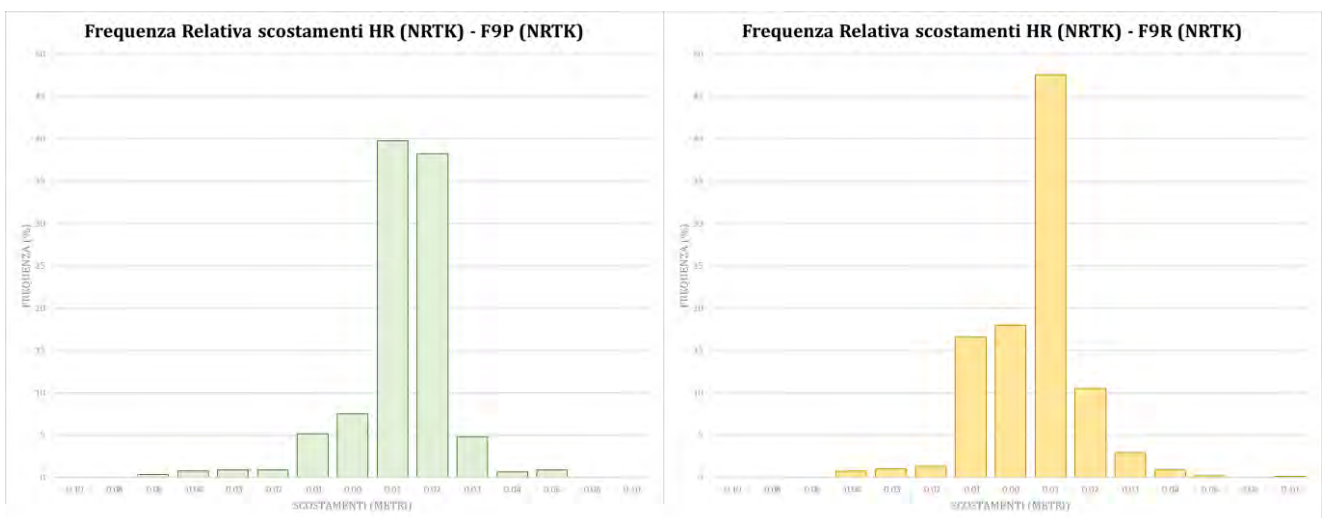


Figure 17. Frequenza relativa degli scostamenti tra le soluzioni HR(NRTK) e F9P/F9R (NRTK).



4. Il progetto “Fi.L.O.”

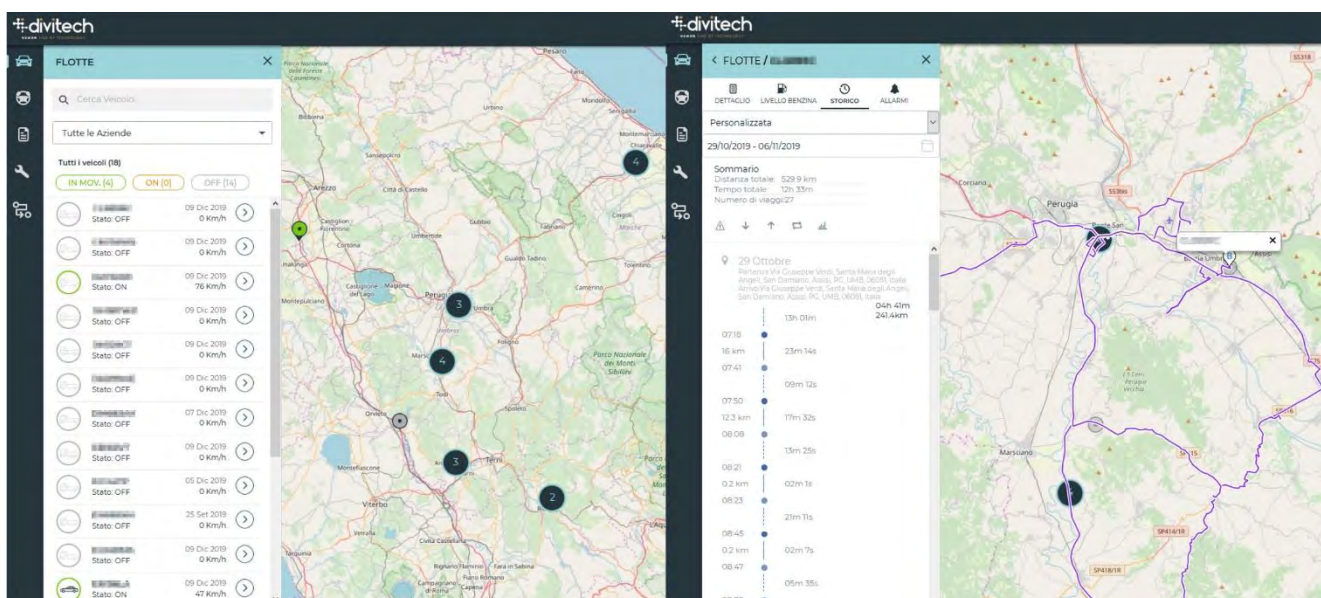
Il progetto “Fi.L.O. Filiera, Logistica, Organizzazione”, condotto nell'ambito del Piano di Sviluppo Rurale promosso dalla Giunta Regionale dell'Umbria e finanziato dall'UE (Programma di Sviluppo Rurale per l'Umbria 2014-2020), si fonda sul concetto di trasferimento di innovazione organizzativa (e di processo) applicato alla filiera agroalimentare del territorio umbro. L'attività che ha riguardato il settore della Geomatica ha avuto come obiettivo l'efficiamento dei trasporti da perseguire sia a livello aziendale che di filiera attraverso il monitoraggio e la mappatura dei percorsi nelle attività di tentata vendita (ed in minor misura in quelle di distribuzione interna) al fine di ottimizzare i percorsi, aumentando la capillarità delle forniture e la quantità delle stesse per giro di consegna.

Il lavoro si è concentrato sullo sviluppo di un sistema di monitoraggio GNSS delle flotte di veicoli per il trasporto, basato su una sensoristica integrata ad un software di gestione web-based con l'obiettivo di produrre dati ed informazioni per la modellazione matematica delle dinamiche in oggetto e lo sviluppo di strumenti in grado di individuare adeguate politiche di gestione.

A seguito della valutazione delle esigenze e l'individuazione della flotta campione, sono state definite le prestazioni del sistema: il dispositivo installato a bordo della flotta campione (composta da circa 30 mezzi appartenenti alle diverse aziende coinvolte nel progetto e di diverse tipologie – furgoni e autocarri di piccole o grandi dimensioni) è ingegnerizzato e prodotto dalla ditta Divitech Spa di Torino ed è di tipo mobile e caratterizzato da un tablet Android di tipo “rugged” resistente ad un uso intensivo.

I moduli installati sui mezzi comunicano con un centro di controllo permettendo un monitoraggio dei percorsi sia in tempo reale (per una localizzazione immediata della flotta), sia a posteriori, attraverso un sistema di archiviazione utile per le analisi delle criticità e lo studio dell'ottimizzazione dei percorsi giornalieri (Figura 18 - le targhe dei mezzi sono state oscurate per motivi di privacy).

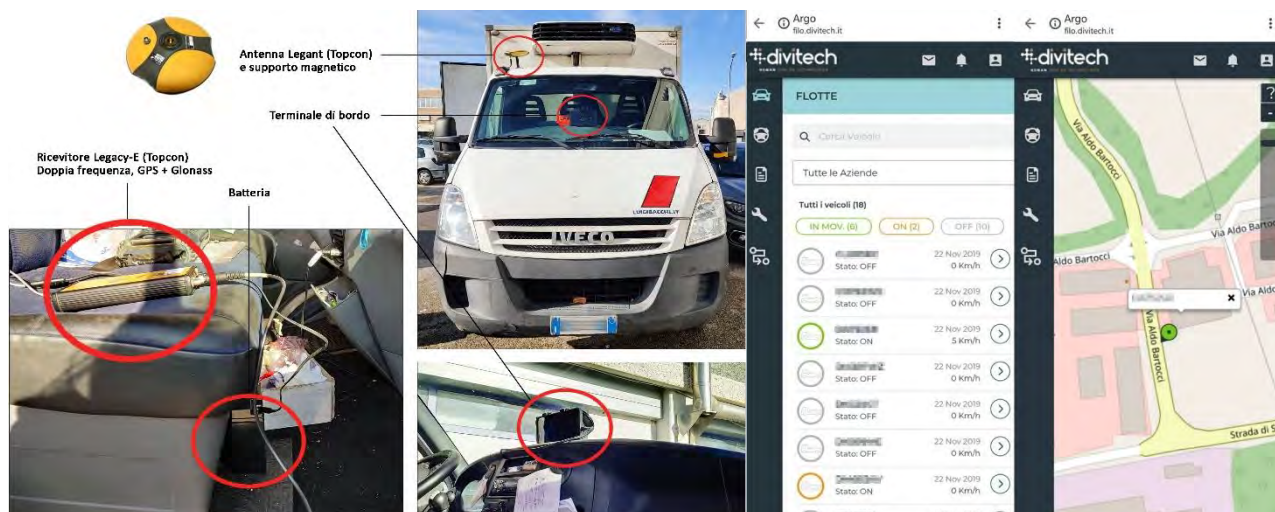
Figura 18. Sistema di monitoraggio flotte: visualizzazione della piattaforma di gestione web-based.



Attraverso il monitoraggio della piattaforma online e la condivisione dei tracciati sono state verificate e validate le corrette funzionalità del sistema sotto diversi aspetti, tra cui accuratezza, fruibilità e consistenza dei dati. In particolare, attraverso l'uso di software GIS sono state adottate due strategie di analisi definendo due diversi modelli di elaborazione dei dati: uno per l'individuazione delle zone di sovrapposizione dei tracciati, al fine di supportare l'attività relativa alla gestione delle scorte, l'altro rivolto all'analisi delle fermate dei vari veicoli per giro di consegna, fornendo materiale necessario allo sviluppo di algoritmi per soluzioni nell'ambito della logistica interna.

Ulteriori analisi hanno consentito di censire e valutare vari aspetti dell'attività (tra cui la durata delle fermate, le velocità tenute e gli eccessi di velocità incorsi) puntando ad interventi di minimizzazione degli sprechi. Sono stati inoltre effettuati test mediante acquisizione dei dati in parallelo a quelli del sistema installato, con strumentazione e software diversi e indipendenti da esso al fine di verificarne e validarne le corrette funzionalità. Il test ha previsto un rilievo cinematico post-processato; la strumentazione utilizzata, di proprietà del Laboratorio di Topografia dell'Università di Perugia, consiste in un ricevitore Topcon Legacy – E doppia frequenza multicostellazione (GPS, Glonass), una antenna Topcon Legant ed una batteria (Figura 19). I risultati ottenuti sono stati messi a confronto; i dati acquisiti dal ricevitore geodetico sono stati presi come riferimento per varie analisi tra cui l'estrapolazione di una matrice delle distanze relative alle posizioni in tempo reale. Il comportamento è in linea con quanto atteso da ricevitori di solo codice di fascia medio-bassa, con uno scarto medio dell'ordine di 2-3 metri. Le differenze più alte si ottengono in corrispondenza di zone con maggiori ostruzioni, principalmente edifici e vegetazioni.

Figura 19. Strumentazione del mezzo (a sinistra) e visualizzazione piattaforma web-based (a destra).



L'utilizzo del sistema in itinere ha consentito la verifica delle funzionalità previste dagli obiettivi del progetto; la gestione della flotta di veicoli attraverso il monitoraggio basato su sensori GNSS ha fornito i dati necessari per elaborare un modello di ottimizzazione, efficientamento e minimizzazione degli sprechi, ottenendo da un lato un risparmio di tempo e carburante, e dall'altro una riduzione delle emissioni inquinanti a favore dell'ambiente.

4. Conclusioni

Se fino ad alcuni anni fa l'applicazione di tecniche di posizionamento satellitare era legata all'impiego di ricevitori di classe geodetica e software di elaborazione complessi, recentemente l'introduzione di sistemi a basso costo con prestazioni sempre migliori sta creando nuove opportunità in numerosi campi. Tra questi vi è quello della mobilità in cui le tecnologie GNSS trovano applicazione contribuendo alla definizione di sistemi e soluzioni sempre più intelligenti, efficienti e dunque sostenibili.

Al fine di valutare la possibilità di applicazione di sensori a basso costo di ultima generazione nell'ambito della navigazione, sono stati condotti test con differenti modalità operative. I risultati ottenuti mostrano in generale un comportamento omogeneo nelle diverse situazioni e per i diversi sensori impiegati con valori comparabili sia in relazione agli scostamenti che alle deviazioni standard.

L'analisi della qualità dei dati nelle diverse prove ha confermato il vantaggio nell'uso della multicosstellazione (più sistemi satellitari interoperabili tra loro) mostrando un numero elevato di satelliti tracciati, valori di DOP buoni, errori dovuti al multipath contenuti e un buon rapporto segnale rumore (SNR) con valori paragonabili per tutti i ricevitori testati.

L'applicazione delle tecniche NRTK basate su correzioni multicosstellazione provenienti dalla rete GPS Umbria ha garantito stabilità delle soluzioni fornendo risposte soddisfacenti con distribuzioni di frequenza omogenee e confrontabili nei vari casi. Se la rete GPS Umbria, in grado di erogare servizi in modo completamente gratuito, si è dimostrata un'infrastruttura geodetica essenziale per supportare diversi tipi di attività sul territorio regionale, più in generale l'utilizzo di modalità NRTK insieme a software di rete che consentono stime sempre più affidabili dell'ambiguità di fase in tempo reale apportano benefici significativi sia in termini di economicità (temporale e strumentale) che di accuratezza, consentendo di ampliare il campo di applicazione delle tecniche GNSS con particolare riferimento alla possibilità di adozione di sistemi a basso costo.

Tenendo presente la buona qualità dei segnali tracciati da tutte le costellazioni e multifrequenza, i test condotti dimostrano in generale ripetibilità e coerenza delle misure per i due sensori low-cost che hanno dimostrato buone sensibilità e affidabilità con un soddisfacente livello di attendibilità tanto da essere caratterizzati nella maggior parte dei casi da prestazioni confrontabili con ricevitori di classe geodetica.

Va inoltre tenuto in considerazione il fatto che le buone prestazioni del sensore u-blox C102-F9R sono state indagate solamente facendo riferimento alle soluzioni integrate (INS/GNSS) mediante utilizzo di piattaforma IMU. In realtà esso offre la possibilità di disporre di maggiori informazioni (come direzione, velocità e contachilometri) in grado di migliorare l'affidabilità delle soluzioni attraverso un microcontrollore che permette di interfacciarsi direttamente al CAN-bus del mezzo.

I risultati esposti nel presente elaborato non sono in ogni caso da considerarsi definitivi; ulteriori test e relative analisi andranno svolti (considerando anche situazioni critiche e condizioni differenti) allo scopo di ampliare la quantità di dati ed elaborazioni a disposizione per una maggior completezza nelle valutazioni e nelle considerazioni relative all'impiego di sensori low-cost in ambiti tecnici.

Bibliografia

1. ISPRA. Le emissioni di gas serra in Italia alla fine del secondo periodo del Protocollo di Kyoto: obiettivi di riduzione ed efficienza energetica. *ISPRA Rapporti 362/2022*.
2. ISPRA. Indicatori di efficienza e decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e del settore elettrico. *ISPRA Rapporti 363/2022*.
3. European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. COM(2019) 640 final, 2019.
4. European Union Agency for the Space Programme. EUSPA EO and GNSS. *Market Report 2022/ISSUE1*, 2022, doi: 10.2878/94903, ISBN 978-92-9206-059-6. Available online: <http://www.euspa.europa.eu>.
5. De Tarso Setti Júnior, P.; Menezes da Silva, C.; de Oliveira Júnior, P.S.; Barroca Marra Alves, D. & Galera Monico, J.F. Multi-GNSS positioning. *Revista Brasileira de Cartografia* **2020**, ISSN 1808-0936, 72, 1200-1224.
6. Caporale, M. Lo sviluppo del programma Galileo: sue traversie, lezioni e considerazioni. *GEOmedia*, 2017, 21(1). Disponibile online: <https://www.mediageo.it/ojs/index.php/GEOmedia/article/view/1387>
7. Cefalo, R.; Tarantino, E.; Novelli, A.; Sluga, T.; Tommasi, A. & Capra, A. Primi test cinematici con ricevitori GNSS multi-costellazione e dati GALILEO – analisi delle prestazioni. *Atti Conferenza Nazionale Asita, Salerno, Italia, 2017*; pp. 231-238.
8. Radicioni, F.; Stoppini, A.; Tosi, G.; & Marconi, L. Multi-constellation Network RTK for Automatic Guidance in Precision Agriculture. *Proceedings of 2022 IEEE Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, Perugia, Italy, 2022; pp. 260-265, doi: 10.1109/MetroAgriFor55389.2022.9965046.
9. Fastellini, G.; Radicioni, F.; Stoppini, A. Field tests on GNSS and inertial systems for transport fleet monitoring in urban environment. *Italian Journal of Remote Sensing* **2011**, 43, 2.
10. Antonini, M. Evoluzione del GNSS ed i nuovi mercati. *GEOmedia*, 2017, 21(1). Disponibile online: <https://mediageo.it/ojs/index.php/GEOmedia/article/view/1392>.
11. Gao, Y. Precise GNSS Positioning for Mass-Market Applications. *Coordinates*, April 2019, XV, 4, (10-14), ISSN 0973-2136. Available online: <https://mycoordinates.org/>.
12. Cina, A.; Manzino, A.M. & Piras, M. Il posizionamento satellitare: prospettive nel campo della geomatica con ricevitori GNSS basso costo. In *Geomatica. Le radici del futuro*, 2011.
13. Odijk, D.; Wanninger, L. Differential Positioning. *Springer handbook of global navigation satellite systems*; Teunissen PJG, Montenbruck O.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017; pp. 753-780.
14. Manzino A.M.; Dabove, P. Quality control of the NRTK positioning with mass-market receivers. In *Global positioning systems*; Ya-Hui Hsueh; Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, 2013; pp. 17-40, ISBN 978-1-62808-022-3.

15. Lachapelle, G.; Petovello, M.; Gao, Y. & Garin, L.J. Precise point positioning and its challenges, aided-gnss and signal tracking. *Inside GNSS*, 2006, (16-21). Available online: <https://insidegnss.com>.
16. De Angelis, G.; Fastellini, G.; Radicioni, F. & Stoppini, A. Kinematic survey with low cost integrated sensors for vehicle tracking. *Proceeding of European Navigation Conference*, 2010.
17. Manzino, A.; Cina, A.; Roggero, M. & Tornatore, V. Impiego delle reti GNSS per la Infomobilità. In *Lo sviluppo delle tecnologie per le reti geodetiche*; CISIS, 2009; Capitolo 3, pp. 157-174, ISBN 978-88-904629-0-0.
18. Piras, M.; Cina, A.; & Lingua; A. Low cost mobile mapping systems: An Italian experience. *Proceedings of IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, USA 2008.
19. Cina, A.; De Agostino, M. & Piras, M. A full-state low-cost GNSS/INS system for mobile mapping applications. *Proceedings of 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, Presidente Prudente, São Paulo, Brazil, July 21-24 2009.
20. Croci, A.; De Agostino, M. & Manzino, A.M. Studio del sistema di posizionamento GNSS/INS con strumentazione di basso costo. *Atti Conferenza Nazionale Asita*, Parma, Italia, 2011; pp. 799-807
21. De Agostino, M.; Manzino, A.M. & Piras, M. Problemi e soluzioni legati all'impiego di sensori GNSS ed INS di basso costo per la navigazione geodetica. *Atti Conferenza Nazionale Asita*, Brescia, Italia, 2010; pp. 793-798.
22. Dabove, P. The usability of GNSS mass-market receivers for cadastral surveys considering RTK and NRTK techniques. *Geodesy and Geodynamics* **2019**, 10, 4, 282-289.
23. Groves, P.D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. GNSS technology and applications series; Artech House, 2008. ISBN: 9781580532556.
24. Radicioni, F.; Stoppini, A. La nuova rete GNSS multicostellazione dell'Umbria. *GEOmedia*, 2019, 23(4), 6-11.

Didascalie figure

1. Slitta micrometrica con Hiper HR (a sinistra) e antenna Topcon Legant2 (a destra).
2. Ricevitori low-cost utilizzati: scheda C102-F9R (a sinistra), scheda C099-F9P (a destra).
3. Stima delle posizioni in modalità relativa post processata (DD) e in tempo reale (NRTK).
4. Tipo di soluzioni ottenute (NRTK a sinistra, DD a destra).
5. Deviazioni standard degli scostamenti rispetto ai quattro lati (W, N, E, S): soluzioni DD (a sinistra) e soluzioni NRTK (a destra).
6. Frequenza relativa degli scostamenti per soluzioni NRTK.
7. Frequenza relativa degli scostamenti per soluzioni DD.
8. Strumentazione utilizzata nei test cinematici.
9. Tracciati soluzioni NRTK (Fixed in verde, Float in giallo, DGNS in rosa, Autonomous in blu, DR in viola).
10. Frequenze del tipo di soluzioni ottenute (DD a sinistra, NRTK a destra).

11. Scostamenti rispetto al tracciato Hiper DD e NRTK.
12. Frequenza relativa degli scostamenti tra le soluzioni HR(DD) e F9P/F9R (NRTK).
13. Frequenza relativa degli scostamenti tra le soluzioni HR(NRTK) e F9P/F9R (NRTK).
14. Tracciato in tempo reale della scheda C102-F9R: tipo di soluzioni.
15. Frequenza relativa degli scostamenti tra le soluzioni HR(DD) e F9P/F9R (DD).
16. Frequenza relativa degli scostamenti tra le soluzioni HR(DD) e F9P/F9R (NRTK).
17. Frequenza relativa degli scostamenti tra le soluzioni HR(NRTK) e F9P/F9R (NRTK).
18. Sistema di monitoraggio flotte: visualizzazione della piattaforma di gestione web-based.
19. Strumentazione del mezzo (a sinistra) e visualizzazione piattaforma web-based (a destra).

Didascalie tabelle

1. Scostamenti tra soluzioni DD e soluzioni NRTK.
2. Scostamenti tra soluzioni DD e soluzioni NRTK rispetto al tracciato imposto (lati W, N, E, S).
3. Deviazioni standard relative al calcolo cinematico post-processato.
4. Scostamenti delle soluzioni (C099-F9P e C102-F9R) rispetto al tracciato Hiper HR.
5. Scostamenti delle soluzioni (C099-F9P e C102-F9R) rispetto al tracciato Hiper HR.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Valutazione della sostenibilità in riferimento ad Agenda 2030 per i paesi dell'Unione Europea attraverso un approccio integrato GIS-Analisi multicriteri.

Elena Ricciolini ^{1,2,3*}, Arianna Tiralti ¹, Luisa Paolotti ¹, Lucia Rocchi ¹, Antonio Boggia ¹

¹ Department of Agricultural, Food and Environmental Science, University of Perugia, Perugia, Italy;

² Programma di Dottorato di ricerca in Energia e Sviluppo Sostenibile, Fondazione del CRB, CIRIAF

³ Programa de Doctorado en Economía y Empresa, Department of Business and Economy, University of Malaga, 29016 Malaga, Spain

* Autore di riferimento. E-Mail: elena.ricciolini@studenti.unipg.it

Abstract: L'importanza del concetto di sviluppo sostenibile è ormai largamente riconosciuta e l'interesse sul tema di tutta la comunità, scientifica e non, negli anni è aumentato notevolmente. In questo contesto si inseriscono l'Agenda 2030 e gli Obiettivi di sviluppo sostenibile (Sustainable Development Goals – SDGs), adottati dalle Nazioni Unite nel 2015 come appello universale all'azione per porre fine alla povertà, proteggere il pianeta e garantire che entro il 2030 tutte le persone godano di pace e prosperità. Gli SDGs sono di fondamentale importanza per il raggiungimento della sostenibilità, ma per riuscire a rendere possibile una reale transizione è fondamentale che gli obiettivi possano essere misurati. Lo scopo di questo lavoro è la valutazione dei risultati conseguiti dai Paesi dell'Unione Europea nel raggiungimento dello sviluppo sostenibile in relazione agli indicatori di Agenda 2030 per l'anno 2020, attraverso un'analisi multicriteri. Tale metodologia, trattando generalmente problemi multidimensionali, è un approccio adatto a dare un vero e proprio supporto ai decisori pubblici nella definizione di linee politiche che vadano nella direzione della sostenibilità. Questo studio si concentra sull'applicazione dello Spatial Sustainability Assessment Model (SSAM), che permette l'integrazione tra l'analisi multicriteri e lo strumento geografico QuantumGIS. Attraverso i risultati di tale studio è possibile avere un ranking dei paesi UE in riferimento alle quattro dimensioni fondamentali della sostenibilità (sociale, economica, ambientale ed istituzionale). I risultati sono mostrati in maniera intuitiva e possono essere di grande supporto per i decision makers nella determinazione delle politiche da attuare.

Keywords: Obiettivi di sviluppo sostenibile; Analisi multicriteri; Agenda 2030; Paesi UE; GIS.

1. Introduzione

L'impulso dell'Unione Europea e degli Stati membri è stato fondamentale nel sostenere un'agenda integrata ed universale che continuasse a concentrarsi sugli Obiettivi di Sviluppo del Millennio (OSM) precedentemente definiti, sull'eliminazione della povertà estrema in tutte le sue forme e che integrasse anche questioni di sostenibilità ambientale, inclusione sociale, sviluppo economico e governance [1].

Agenda 2030, è un piano d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità adottato da tutti gli stati membri delle Nazioni Unite nel 2015 i quali, agendo in collaborazione, lo stanno tuttora portando avanti [2].

In questo contesto i 17 obiettivi di sviluppo sostenibile che costituiscono l'Agenda hanno acquisito un ruolo chiave nella letteratura scientifica e molti studi si sono concentrati sulla misurazione dei progressi su varia scala in termini di raggiungimento degli obiettivi stessi.

Infatti, gli studi sulla valutazione del livello di sostenibilità sono di fondamentale importanza, in quanto consentono ai decisori di compiere scelte ponderate, di essere efficaci in termini di azioni e politiche e di porre la necessaria attenzione alle misure a favore della sostenibilità. La comprensione dei diversi fattori, sociali, ambientali ed economici, che influenzano la sostenibilità permette ai responsabili politici di identificare le aree dove intervenire e le relative strategie da implementare laddove ce n'è più bisogno [3].

Trattandosi di un concetto multidimensionale, la misurazione della sostenibilità risulta complessa, in quanto riguarda questioni sociali, ambientali, economiche ed anche la sfera istituzionale. Gli indicatori composti o aggregati sembrano essere in tale contesto un valido strumento per questa tipologia di analisi, in quanto riuniscono un insieme di indicatori scelti per esprimere il maggior numero possibile di caratteristiche e aspetti di un fenomeno complesso [4].

Un approccio basato su indicatori composti per la valutazione della sostenibilità dei paesi dell'UE è quello proposto da Lafuente-Lechuga et al. [5]. La metodologia utilizzata presenta un indicatore composto che utilizza una media lineare ponderata nel primo livello di aggregazione tra gli indicatori, dove si ottengono 17 indici per ciascuno degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, e una media geometrica nel secondo livello di aggregazione che produce l'Indice di Sostenibilità (SI). Il database utilizzato è quello dell'Eurostat e il periodo di riferimento riguarda gli anni 2010, 2015 e 2020. Per la ponderazione degli indicatori, gli autori hanno seguito il metodo oggettivo che fa uso del paradigma MCDM "closeness-to-an-ideal"; le stesse procedure di normalizzazione e ponderazione sono state utilizzate per gli anni in esame, in modo da poter confrontare i punteggi ottenuti nel tempo.

Ricciolini et al. [6] nel loro studio hanno applicato la metodologia Multiple Reference Point Weak-Strong Composite Indicator (MRP-WSCI) e la sua versione parzialmente compensativa (MRP-PCI) per la valutazione della sostenibilità dei 28 membri dell'Unione Europea (pre-Brexit) nel quadro dell'Agenda 2030. I Paesi sono stati analizzati e confrontati in base alle loro condizioni e ai loro progressi rispetto ai 17 Obiettivi di sviluppo sostenibile, considerando tre anni di riferimento: 2007, 2012 e 2017. I livelli di aggregazione in quest'analisi sono stati tre: il primo è avvenuto tra gli indicatori all'interno dei 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, il secondo tra le tre dimensioni dello sviluppo sostenibile (economica,

sociale, ambientale) e l'ultimo per la creazione di un indicatore di sostenibilità globale. Per ogni livello si sono ottenuti due indicatori composti, uno risultante dalla compensazione completa tra le alternative e l'altro senza nessuna compensazione.

Il presente studio si differenzia dai precedenti principalmente per la metodologia utilizzata che prevede l'uso di uno strumento in cui si integra il metodo di analisi multicriteri TOPSIS all'interno di un sistema geografico. Inoltre, nei tre livelli di aggregazione che si realizzano tra indicatori, sottodimensioni, dimensioni e indice globale, si inserisce anche la sfera istituzionale che si aggiunge alle più classiche dimensioni della sostenibilità (ambientale, economica, sociale) apportando una maggiore completezza nella presentazione dei risultati, dovuta anche al set di indicatori più ampio ed aggiornato. L'obiettivo di questo lavoro è quello di effettuare una valutazione della sostenibilità raggiunta dai 27 Stati Membri dell'UE attraverso un set di 77 indicatori che tengono conto degli aspetti ambientali, economici, sociali ed istituzionali dei differenti paesi, in riferimento agli obiettivi di sostenibilità dell'Agenda 2030. Attraverso lo strumento di valutazione Spatial Sustainability Assessment Model (SSAM), è possibile eseguire analisi multicriteri a livello territoriale permettendo un'agevole rielaborazione e presentazione dei risultati ottenuti, utile ai fini del sostegno alla programmazione delle politiche territoriali nell'ottica dello sviluppo sostenibile.

2. Materiali e metodi

La metodologia su cui si basa lo studio è quella dell'analisi multicriteri attraverso cui è possibile effettuare valutazioni basate su più aspetti contemporaneamente, i quali possono poi essere integrati e messi insieme tra loro. Questa caratteristica è ideale per la valutazione dello sviluppo sostenibile poiché, trattandosi di un concetto multidimensionale, esso integra al suo interno molteplici aspetti che afferiscono a differenti aree. In questo caso, le dimensioni oggetto di analisi sono quelle relative alla sfera ambientale, economica, sociale e istituzionale. All'interno di ciascuna dimensione ci sono indicatori molto diversi tra di loro che devono essere combinati per esprimere aspetti e situazioni variegati, per questo sono stati suddivisi e aggregati anche in sottodimensioni a seconda del tema di riferimento.

2.1. Indicatori

Il quadro degli indicatori per gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile è complesso e il problema della disponibilità dei dati è a livello mondiale; tuttavia, è importante sottolineare l'importanza di avere un quadro di indicatori di riferimento per poter aiutare i Paesi e la comunità globale nel raggiungimento della sostenibilità. Si tratta infatti di uno strumento fondamentale per monitorare i progressi dei Paesi, evidenziando eventuali criticità e potendo così dare priorità a determinati interventi e allocare le risorse dove ce n'è più bisogno per seguire un percorso che sia sostenibile [7].

In questo studio, per valutare i risultati dello sviluppo sostenibile degli stati membri dell'Unione Europea, sono stati selezionati gli indicatori dal database dell'Eurostat, l'ufficio statistico dell'Unione Europea.

Il set di indicatori SDGs dell'UE¹ include gli indicatori rilevanti per il contesto europeo e consente quindi il monitoraggio dei progressi verso gli obiettivi nel contesto delle politiche UE a lungo termine. Tale set è allineato con l'elenco di indicatori globali delle Nazioni Unite, ma non è del tutto identico, poiché è importante concentrarsi in maniera specifica su fenomeni particolarmente rilevanti nel contesto europeo [8].

I dati si riferiscono all'anno 2020 e sono stati scaricati a Marzo 2022.

I criteri di selezione degli indicatori sono stati:

- la disponibilità di dati per i 27 paesi considerati;
- la disponibilità di dati per gli anni presi in esame;
- evitare la presenza di indicatori ridondanti o sovrapposti;
- la rappresentatività del tema della dimensione di riferimento.

Per alcuni indicatori i dati non erano disponibili per il 2020, quindi sono stati selezionati quelli del 2019, l'anno disponibile più vicino; lo stesso procedimento è stato utilizzato anche per i singoli stati in cui mancava il dato di uno specifico indicatore.

Per gli indicatori "Superficie dei siti marini designati dalla rete Natura 2000 (14_1)" e "Acque marine colpite da eutrofizzazione (14_6)", non erano disponibili i dati di Repubblica Ceca, Lussemburgo, Ungheria, Austria e Slovacchia, in quanto questi paesi non sono bagnati dalle acque del mare. Si è deciso di considerare comunque tali indicatori per non penalizzare la sottodimensione "Acqua" che sarebbe stata altrimenti rappresentata da un singolo indicatore, e in virtù del fatto che per la maggior parte degli stati membri il dato è rappresentativo.

Per l'imputazione dei valori da attribuire ai due indicatori mancanti per questi cinque paesi, sono state effettuate più analisi. Inizialmente si è realizzato il calcolo dell'indicatore composto della sottodimensione "Acqua" senza includere i cinque paesi, poi si è passati a ricalcolarlo impuntando ai 5 stati senza dati il valore minimo, i percentili 25, 50, 75, il valore massimo e il valore medio raggiunto dagli altri paesi per quell'indicatore, calcolando ogni volta la deviazione standard tra i risultati con i differenti valori.

Dalla tabella 1 si nota come lo scostamento minore si ottiene imputando il valore medio agli indicatori mancanti per i cinque Paesi. Perciò questa imputazione non produce cambiamenti o distorsioni nei risultati finali.

Tabella 1. Valori deviazione standard

Valori Imputati	DEV. STANDARD
Min	0.03580
p25	0.00087
p50	0.00152
p75	0.00272
Max	0.34906
Media	0.00081

¹ <https://ec.europa.eu/eurostat/web/sdi/database>

Il totale degli indicatori selezionati è 77, divisi nelle 4 dimensioni della sostenibilità e a loro volta nelle sottodimensioni, come mostrato nella Tabella 2. La dimensione sociale include 37 indicatori, l'economica 10, l'ambientale 21 e l'istituzionale 9.

Tabella 2. Indicatori e divisione in sottodimensioni e dimensioni

DIMENSIONE SOCIALE
POVERTÀ
Persone a rischio povertà o esclusione sociale (1_10)
Persone a rischio di riduzione del reddito dopo i trasferimenti sociali (1_2)
Persone con gravi deprivazioni materiali (1_3)
Persone che vivono in famiglie con un'intensità lavorativa molto bassa (1_4)
Popolazione che vive in una abitazione con tetti che perdono, muri, pavimenti o fondamenta umidi o marciame nei telai delle finestre o del pavimento (1_6)
Popolazione che non riesce a mantenere la casa adeguatamente calda (7_6)
Lavoratori a rischio di povertà (1_41)
Popolazione che non ha né un bagno, né una doccia, né uno scarico interno nella propria abitazione (6_10)
EDUCAZIONE
Abbandono precoce dell'istruzione e della formazione (4_10)
Livello di istruzione terziaria (4_20)
Partecipazione all'istruzione della prima infanzia (bambini di 3 anni ed oltre) (4_31)
Partecipazione degli adulti all'apprendimento (4_6)
Percentuale di individui con competenze digitali di base (4_7)
Giovani non occupati né inseriti in percorsi di istruzione e formazione (né-né) (8_2)
Spesa interna lorda in R&S (settore dell'istruzione superiore) (9_1)
Personale impiegato in R&S nel settore dell'istruzione superiore (9_3)
LAVORO
Persone decedute in incidenti sul lavoro (8_6)
Tasso di occupazione (8_3)
Tasso di disoccupazione di lunga durata (8_4)
SALUTE E BENESSERE
Anni di vita in buona salute dalla nascita (3_11)
Quota di persone con una percezione della salute buona o molto buona (3_2)
Tasso di fumatori (3_3)
Bisogno non soddisfatto di visite e cure mediche (3_6)
Tasso di obesità in base all'indice di massa corporea (IMC) (2_1)
Tasso di sovraffollamento (11_10)
Popolazione che vive in famiglie che ritengono di soffrire di inquinamento acustico (11_2)
UGUAGLIANZA
Divario retributivo di genere in forma non adeguata (5_2)
Divario occupazionale di genere (5_3)
Posizioni ricoperte da donne in ruoli dirigenziali (5_6)
Seggi detenute dalle donne nei parlamenti e nei governi nazionali (5_5)
Popolazione inattiva a causa di impegni assistenziali (5_4)
Differenza di rischio di povertà relativa alla popolazione media (10_3)

Distribuzione dei redditi (10_41)
Richieste di asilo (10_6)
SERVIZI
Copertura di Internet ad alta velocità, per tipo di area (17_6)
SICUREZZA
Morti per incidenti stradali, per tipo di strada (11_4)
Popolazione che segnala la presenza di crimini, violenza o vandalismo nella propria area (16_2)
DIMENSIONE ECONOMICA
AGRICOLTURA
Reddito dei fattori agricoli per unità di lavoro annuo (ULA) (2_2)
Sostegno pubblico alla ricerca e allo sviluppo agricolo (2_3)
PRODUTTIVITÀ E REDDITO
PIL reale pro capite (8_1)
Quota di investimenti del PIL dei settori istituzionali (8_11)
Percentuale di reddito del 40 % inferiore della popolazione (10_5)
Reddito lordo disponibile delle famiglie pro capite rettificato (10_2)
Produttività energetica (7_3)
R&S (Ricerca e Sviluppo)
Spesa interna lorda in R&S per settore (9_10)
Personale addetto alla R&S per settore (9_3)
Richieste di brevetto all'Ufficio europeo dei brevetti (9_4)
DIMENSIONE AMBIENTALE
SUOLO
Superficie coltivata con agricoltura biologica (2_4)
Indicatore di rischio standardizzato per i pesticidi (HRI1), per gruppi di sostanze attive (2_51)
Superficie dei siti terrestri designati dalla rete Natura 2000 (15_2)
CLIMA
Emissioni di ammoniaca dal settore agricolo (2_6)
Esposizione all'inquinamento atmosferico da polveri sottili (11_5)
Emissioni medie di CO2 per km delle autovetture nuove (12_3)
Emissioni di gas a effetto serra per settore di provenienza (13_1)
Intensità delle emissioni di gas serra del consumo energetico (13_2)
ENERGIA
Consumo primario di energia (7_1)
Consumo finale di energia (7_11)
Quota di energia rinnovabile nel consumo finale lordo di energia per settore (7_4)
ECONOMIA CIRCOLARE
Tasso di riciclaggio dei rifiuti urbani (11_6)
Produttività delle risorse e consumo interno di materiali (DMC) (12_2)
Tasso di utilizzo di materiali circolari (12_41)
MOBILITÀ
Quota di autobus e treni sul totale del trasporto di passeggeri (9_5)
POLICY
Contributo all'impegno internazionale di 100 miliardi di dollari per le spese legate al clima (13_5)
Popolazione coperta dai firmatari del Patto dei sindaci per il clima e l'energia (13_6)
Quota di tasse ambientali sul totale delle imposte fiscali (17_5)

ACQUA
Superficie dei siti marini designati dalla rete Natura 2000 (14_1)
Siti balneari con acque (interne) di qualità eccellente per località (14_4)
Acque marine colpite da eutrofizzazione (14_6)
DIMENSIONE ISTITUZIONALE
FIDUCIA NELLE ISTITUZIONI
Indipendenza percepita del sistema giudiziario (16_4)
Indice di percezione della corruzione (16_5)
Popolazione con fiducia nelle istituzioni dell'UE per istituzione (16_6)
SPESE E DEBITI
Spesa totale delle amministrazioni pubbliche per i tribunali (16_3)
Debito lordo delle amministrazioni pubbliche (17_4)
Quota di investimenti sul PIL per settori istituzionali (investimenti del governo) (8_11)
Spesa interna lorda in R&S del settore governativo (9_10)
Personale addetto alla R&S del settore governativo (9_3)
COOPERAZIONE
Aiuto pubblico allo sviluppo come quota del reddito nazionale lordo (17_1)

2.2. *Pesatura*

Nei processi decisionali multicriteri, la determinazione dei pesi è un passo centrale nell'elaborazione delle preferenze del decisore. In effetti, tutti gli approcci al processo decisionale multi-attributo fanno uso del concetto di importanza relativa dei criteri, cioè dei pesi dei criteri o degli attributi [9].

In questo studio si è applicato un sistema di ponderazione con esperti, selezionati sulla base della loro esperienza sul campo e al loro curriculum. Per ognuna delle 4 dimensioni della sostenibilità considerate (sociale, economica, ambientale e istituzionale) sono stati selezionati tre esperti, a cui è stato chiesto di compilare un apposito questionario che permetteva di valutare l'importanza di ogni sottodimensione all'interno di ogni dimensione e di ogni indicatore all'interno di ogni sottodimensione usando una scala Likert tra 0 e 5 (0 non importante; 5 estremamente importante). Per ogni dimensione, quindi, si sono ottenuti i pesi di 3 diversi esperti.

Come sottolineato in precedenza, la maggior parte dei problemi decisionali presenta una natura multicriteri, in quanto devono essere considerati contemporaneamente diversi criteri e indicatori multidisciplinari. La maggior parte delle tecniche multicriteri richiede un giudizio di valore, per determinare l'importanza relativa dei criteri, da parte del decisore in merito a diversi aspetti (come pesi per i criteri, confronti a coppie tra criteri o alternative, tassi di trade-off tra funzioni obiettivo, valori target, benchmark o valori di riferimento). Inoltre, c'è un'ulteriore complicazione che sorge quando si devono prendere in considerazione contemporaneamente le opinioni di diversi gruppi sociali, con prospettive diverse su questi giudizi. Questo problema è generalmente noto come problema decisionale di gruppo [10].

Anche in questo caso si può riscontrare il problema del processo decisionale di gruppo, poiché i giudizi dei vari esperti con idee diverse devono essere presi in considerazione contemporaneamente e stabilire un valore comune. Per risolvere questo problema di aggregazione delle preferenze, abbiamo

utilizzato l'approccio della programmazione meta-obiettivo proposto da Benítez-Fernández & Ruiz [10]. L'obiettivo della metodologia è proprio quello di aggregare i giudizi di valore individuali su diversi elementi preferenziali da parte di più individui (DM, stakeholder, ecc.) coinvolti in un determinato processo decisionale per ottenere giudizi di valore sociali (di gruppo), utilizzando la Meta-GP (Meta Goal Programming). Tale metodo è stato utilizzato per computare i pesi per ciascun indicatore e per ogni sottodimensione. Si è deciso invece di usare il metodo oggettivo, quello del peso medio [11], così da dare la stessa importanza alle diverse sfere, in accordo con il principio della sostenibilità forte.

2.3. *Spatial Sustainability Assessment Model (SSAM)*

Il modello di valutazione utilizzato è SSAM (*Spatial Sustainability Assessment Model*), uno strumento che, grazie agli aggiornamenti che ha subito nel tempo [3-12], permette oggi di eseguire analisi di sostenibilità territoriale attraverso la perfetta integrazione dell'analisi multicriteri con la dimensione geografica. La procedura di valutazione tramite SSAM si realizza infatti all'interno di un ambiente GIS open source molto diffuso chiamato QuantumGIS o QGIS², configurandosi di fatto come un *plugin*³. Rispetto alle versioni precedenti dove potevano essere analizzati solo i tre principali pilastri della sostenibilità (economico, sociale e ambientale), l'ultimo aggiornamento del 2021 permette la personalizzazione del numero di dimensioni che possono essere incluse, utile e necessario anche in questo studio per poter includere la dimensione istituzionale e per poter effettuare l'analisi in riferimento alle diverse sottodimensioni.

SSAM presenta al suo interno due algoritmi multicriteri: TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Design*) e somma ponderata. Attraverso TOPSIS è possibile aggregare i diversi criteri di ciascuna dimensione costruendo degli indici composti, uno per ciascuna dimensione. Gli indici composti ottenuti possono essere ulteriormente aggregati per ottenere un indice globale, questa volta mediante la somma ponderata, utile per avere un quadro sintetico del livello di sostenibilità. In questo studio si è scelto di non utilizzare la somma ponderata, ma di utilizzare sempre l'algoritmo TOPSIS, in modo da limitare la perdita di informazioni nei tre livelli di aggregazione. Per tanto ogni indice successivo al primo livello di aggregazione è stato computato utilizzando l'output del livello aggregativo precedente come input.

Dopo il processo di aggregazione, i risultati vengono presentati per la lettura e l'interpretazione, sotto forma di valori numerici e in formato grafico (mappe, cartogrammi e grafici). Gli output numerici possono essere riorganizzati ed elaborati anche direttamente in QGIS, fornendo risultati più personalizzati. SSAM è dotato inoltre di una procedura detta "*back analysis*", in grado di ripercorrere i passaggi che hanno portato al risultato finale, rivelando quali indicatori e/o passaggi procedurali hanno influito maggiormente sui risultati ottenuti. Attraverso l'uso di questo algoritmo, vengono estratte alcune "regole decisionali", al fine di garantire trasparenza e tracciare i risultati, risalendo dal punteggio finale ai dati di input.

² GIS Development Team, 2017. QGIS Geographic Information System Open Source Geospatial Foundation Project (2017) <http://www.qgis.org/>

³ Il *plugin* è un programma non autonomo che interagisce con un altro programma per ampliarne o estenderne le funzionalità originarie, permettendo l'utilizzo di nuove funzioni, non presenti nel software principale.

2.4. L'algoritmo multicriteri TOPSIS

La fase di aggregazione di diversi indicatori in un'unica misura sintetica, implica in generale sempre una certa perdita di informazioni. L'aggregazione deve quindi essere il più possibile informativa, in modo che i risultati ottenuti possano essere interpretati facilmente ed efficacemente [13-14].

In questo studio i livelli di aggregazione sono tre: il primo è quello tra i 77 indicatori selezionati all'interno delle sottodimensioni, il secondo riguarda quest'ultime nelle quattro dimensioni dello sviluppo sostenibile (economica, sociale, ambientale ed istituzionale) e l'ultimo è il livello in cui si è andato a creare l'indicatore globale di sostenibilità per ognuno dei 27 stati presi in esame.

L'algoritmo multicriteri utilizzato per tutti i livelli di aggregazione è il Metodo TOPSIS o metodo del Punto Ideale (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Design*) [15], che permette di valutare un insieme di alternative sulla base della distanza di queste dal punto ideale. In particolare, il metodo esegue un ordinamento sulla base di più criteri, impostando un obiettivo a cui tendere (*ideal point*) ed uno da cui allontanarsi (*worst point*) per ciascun criterio di valutazione. Il punto ideale rappresenta quindi un'ipotetica alternativa che ottimizza il valore di ogni criterio, e può trovarsi all'interno del range degli indicatori proposto o al di fuori di esso: il plugin permette infatti assoluta personalizzazione. Per questo lavoro l'alternativa migliore e quella peggiore sono rappresentate dal valore massimo e minimo di ciascun indicatore, rispettivamente, o viceversa, a seconda che si tratti di un indicatore da massimizzare o minimizzare.

La formulazione matematica del metodo nelle sue fasi principali è riportata di seguito.

- **Fase 0:** Dato un problema decisionale, in cui esistono n alternative e k attributi, può essere costruita una "matrice decisionale" correlata:

Alternative	Attributi			
	y_1	y_2	...	y_k
a_1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1k}
a_2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2k}
...
a_n	y_{n1}	y_{n2}	...	y_{nk}

in cui y_{ij} è il valore dell'attributo y_j per l'alternativa a_i ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, k$).

- **Fase 1:** deve essere definita la matrice decisionale normalizzata, i cui elementi sono:

$$z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n y_{ij}^2}}; \quad i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k. \quad (1)$$

- **Fase 2:** viene successivamente definita la matrice decisionale normalizzata ponderata, i cui elementi sono:

$$x_{ij} = w_j z_{ij}; \quad i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k. \quad (2)$$

dove w_j è il peso del j -esimo attributo.

- **Fase 3:** un punto ideale a^* e un punto peggiore a^- (nadir) sono definiti come segue:

$$a^* = \{(\max_i x_{ij} \mid j \in J), (\min_i x_{ij} \mid j \in J^{\wedge}) \mid i = 1, \dots, n\} = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*\} \quad (3)$$

$$a^- = \{(\min_i x_{ij} \mid j \in J), (\max_i x_{ij} \mid j \in J^{\wedge}) \mid i = 1, \dots, n\} = \{x_1^-, x_2^-, \dots, x_k^-\} \quad (4)$$

dove J è l'insieme degli indici da massimizzare (ad esempio benefici) mentre J^{\wedge} è l'insieme degli indici da minimizzare (ad esempio costi).

- **Fase 4:** la distanza dell'alternativa dal punto ideale a^* (ad esempio un'alternativa perfetta o ideale) è calcolata come segue:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^k (x_{ij} - x_j^*)^2}, \quad i = 1, \dots, n; \quad (5)$$

e anche la distanza dal punto peggiore a^- viene calcolata:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^k (x_{ij} - x_j^-)^2}, \quad i = 1, \dots, n; \quad (6)$$

- **Fase 5:** viene calcolata la "relativa vicinanza" dal punto ideale:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (7)$$

- **Fase 6:** Infine, ordinando le alternative secondo C_i^* , si ottiene il loro *ranking* dal migliore al peggiore; infatti, se $C_i^* > C_j^*$ allora a_i "supera in grado" a_j .

4. Risultati

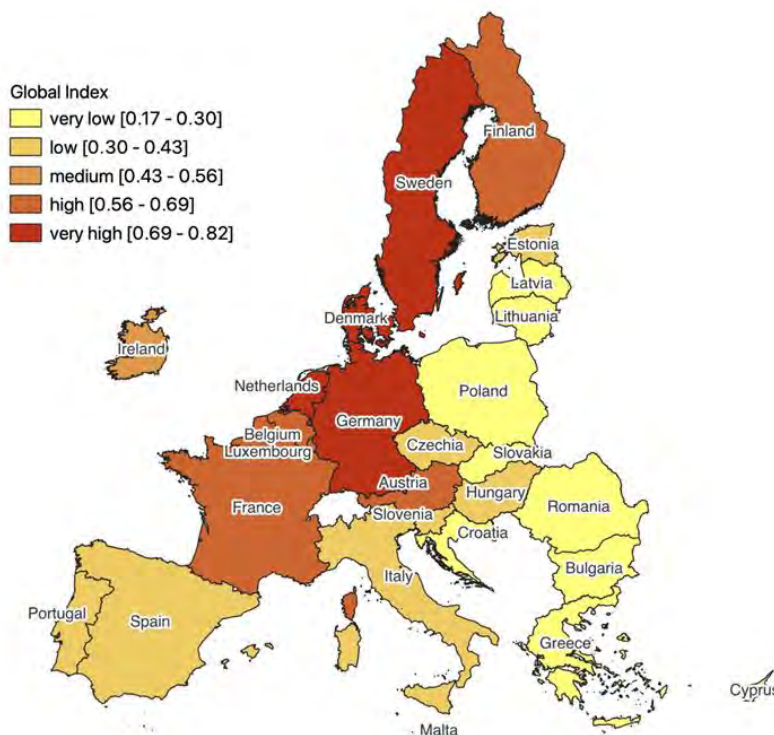
Gli output ottenuti tramite il modello di valutazione sono stati rielaborati e utilizzati per fornire un quadro chiaro ed esaustivo delle performance di sostenibilità ottenute dai 27 paesi analizzati.

Uno dei principali output di SSAM è rappresentato dalle mappe. Quella presentata in Figura 1 mostra la distribuzione geografica dell'indice di sostenibilità globale tra i paesi dell'UE, senza specificare quale andamento seguano le dimensioni che compongono l'indice globale per ciascuno Stato.

All'interno della mappa i paesi si distribuiscono, tramite una gradazione di colore, in una scala di cinque classi che va da valori molto bassi a molto alti dell'indice e con un intervallo per ogni classe definito sulla base di una funzione di QGIS, ovvero l'algoritmo degli intervalli uguali.

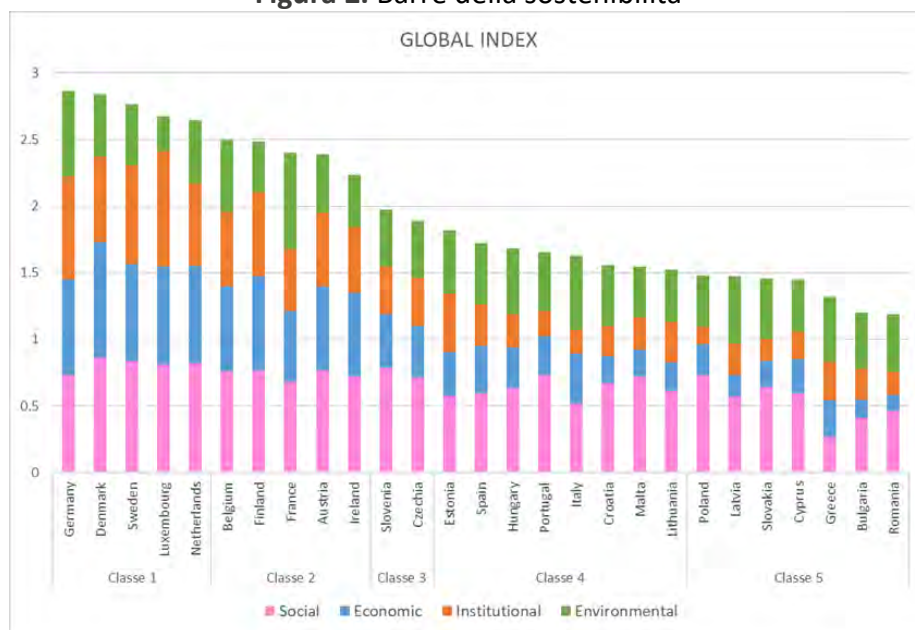
I Paesi con i migliori risultati sono quelli appartenenti alla classe molto alta, rappresentati dal colore più scuro mentre i Paesi con i peggiori risultati sono quelli appartenenti alla classe molto bassa, rappresentati dal colore più chiaro. In questo caso si evince chiaramente che i paesi con una migliore sostenibilità globale sono quelli del centro-ovest e nord Europa.

Figura 1. Mappa indice sostenibilità globale



Dal grafico mostrato nella Figura 2, si può osservare come il livello dell'indice globale di ciascun Paese sia frutto dei 4 indici di sostenibilità che lo compongono (sociale, economica, istituzionale e ambientale). Dallo stesso si individua la suddivisione dei paesi nelle 5 classi e l'andamento decrescente della performance di sostenibilità passando dalla prima all'ultima classe.

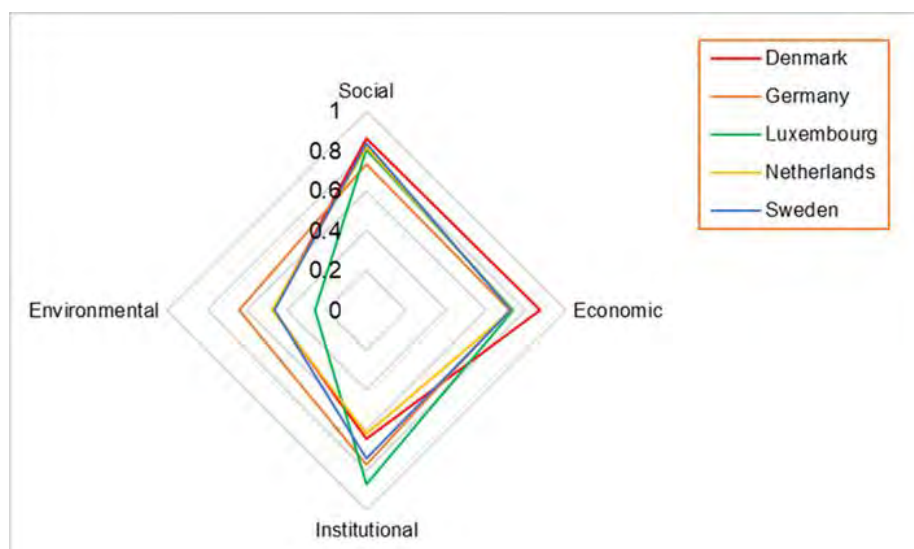
Figura 2. Barre della sostenibilità



La classe 1 comprende i paesi con i migliori valori per l'indice globale che sono compresi tra 0.69 e 0.82. In particolare ne fanno parte Danimarca, Germania, Lussemburgo, Olanda e Svezia.

Questi stati, a livello sociale ed economico, raggiungono un livello molto alto (Figura 3) ed anche per la sfera istituzionale i valori sono buoni, infatti hanno tutti un valore più alto di 0.6. I risultati peggiori sono raggiunti dalla dimensione ambientale, in cui i valori sono per tutti gli stati minori di 0.6, tranne per la Germania che comunque riesce a superare il valore solo di poco; il Lussemburgo è quello con il valore più basso. Il livello molto basso di sostenibilità ambientale del Lussemburgo è dovuto principalmente al valore nullo nella sottodimensione "Policy". In particolare, tramite la *back analysis*, è stato possibile individuare lo specifico indicatore che ha influito maggiormente sul risultato ottenuto, ed è l'indicatore "Popolazione coperta dai firmatari del Patto dei sindaci per il clima e l'energia 13_60".

Figura 3. Distribuzione valori dimensioni classe 1

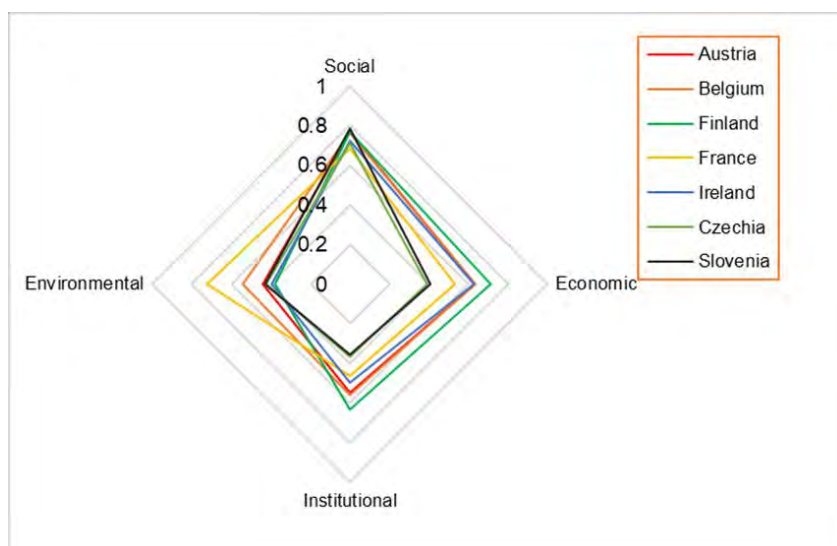


Nella classe 2, con valori alti (da 0.56 a 0.68), troviamo Austria, Belgio, Finlandia, Francia e Irlanda. Nella terza classe i cui valori sono medi (da 0.43 a 0.55) sono presenti solo due paesi, Repubblica Ceca e Slovenia.

Per l'analisi della distribuzione delle dimensioni abbiamo considerato le due classi insieme (Figura 4) e si nota come per la dimensione sociale i valori siano alti per tutti gli stati, raggiungendo un valore vicino a 0.7 ed in molti casi superandolo. Nella sfera economica non si nota un comportamento simile tra i diversi stati, infatti Repubblica ceca e Slovenia hanno dei valori bassi (minori di 0.5), al contrario la Finlandia riesce ad avere un valore alto (0.7).

Per la sfera istituzionale ed ambientale i valori si collocano in un range più basso (inferiore a 0.6), a parte qualche eccezione, come la Finlandia per la sfera Istituzionale con un valore di 0.63 e la Francia per la sfera ambientale con un valore di 0.72, che coincide con il miglior valore tra tutti i paesi dell'UE. Questo ottimo risultato della Francia è conseguenza dei valori alti che raggiunge in tutte le sottodimensioni ambientali, in particolare spicca nella sottodimensione "Policy" poiché, tra gli indicatori che la compongono, ha un valore molto alto per "Contributo all'impegno internazionale di 100 miliardi di dollari per le spese legate al clima (13_5)".

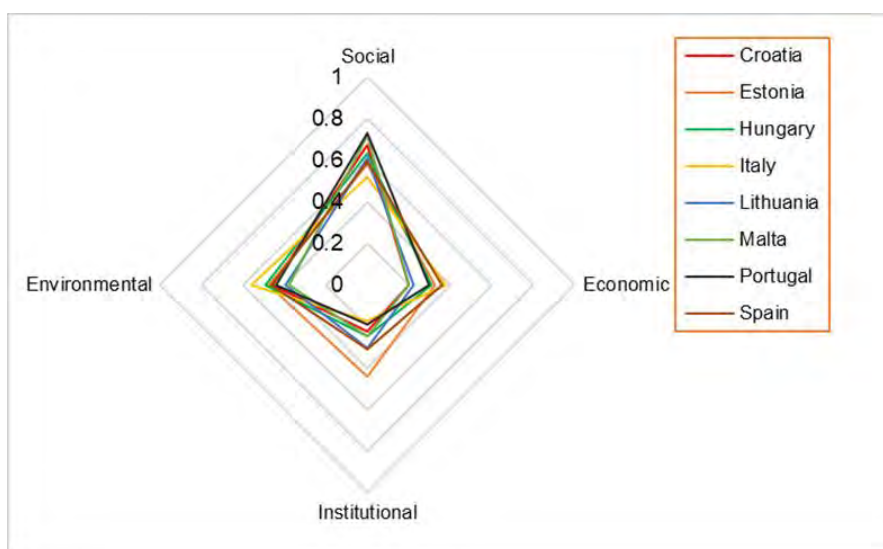
Figura 4. Distribuzione valori dimensioni classi 2 e 3



Nella quarta classe si collocano Croazia, Estonia, Ungheria, Italia, Lituania, Malta, Portogallo, Spagna con un valore dell’indice globale che varia da 0.30 a 0.43. Per gli stati in esame si nota una drastica riduzione dei valori della sfera economica ed istituzionale (Figura 5). In quest’ultima dimensione Portogallo ed Italia hanno i valori peggiori, inferiori al valore di 0.2. Entrambi gli stati hanno dei valori non buoni in tutte le sottodimensioni che la compongono; più nello specifico per il Portogallo questa posizione è causata soprattutto dal basso valore della sottodimensione “Spese e debiti”, ed in particolare nell’indicatore “Debito lordo delle amministrazioni pubbliche (17_4)”. Per l’Italia invece i maggiori problemi si riscontrano nella sottodimensione “Fiducia nelle istituzioni” con livelli molto bassi degli indicatori “Indipendenza percepita del sistema giudiziario (16_4)” e “Popolazione con fiducia nelle istituzioni dell’UE per istituzione (16_6)”.

I risultati sociali rimangono su un livello medio alto per tutti i paesi all’interno di questa classe ed i valori ambientali sono in linea con quelli delle classi superiori analizzate precedentemente.

Figura 5. Distribuzione valori dimensioni classe 4

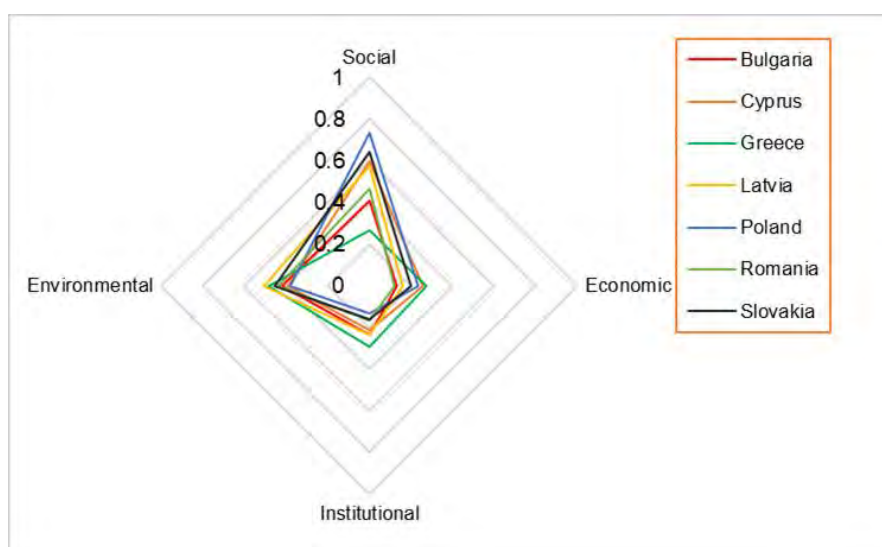


La classe con il livello di sostenibilità globale peggiore è la quinta, i cui valori variano da 0,17 a 0,30 e in cui sono presenti Bulgaria, Cipro, Grecia, Lettonia, Polonia, Romania, Slovacchia. Per questi paesi il trend è molto simile alla classe 4, ma si nota una riduzione ulteriore dei valori delle dimensioni economica e sociale da parte di diversi stati (Figura 6). Però i risultati della dimensione sociale sono disomogenei tra i vari paesi, infatti vediamo come la Polonia raggiunga un valore molto alto (0,73), dovuto soprattutto ad un buon livello degli indicatori che compongono le sottodimensioni *“Povertà”*, *“Lavoro”* e *“Sicurezza”*. Il peggior risultato della sfera sociale è invece raggiunto dalla Grecia. Tale posizione è imputabile alle sottodimensioni *“Servizi”* (dove l'indicatore relativo a Internet è estremamente basso, *“Copertura di Internet ad alta velocità, per tipo di area (17_6)”*), *“Lavoro”* (dove incide in maniera rilevante l'alto livello di disoccupazione, *“Tasso di disoccupazione di lunga durata (8_4)”*) e *“Sicurezza”* (dove si registra un alto tasso di criminalità, *“Popolazione che segnala la presenza di crimini, violenza o vandalismo nella propria area (16_2)”*).

La Romania e la Bulgaria si trovano nella peggior posizione per la dimensione economica. La Romania ha come peggior sottodimensione *“Ricerca e Sviluppo”* in cui ha un valore pari a 0 poiché risulta la peggiore in tutti e tre gli indicatori che la compongono: *“Spesa interna lorda in R&S per settore (9_10)”*, *“Personale addetto alla R&S per settore (9_3)”* e *“Richieste di brevetto presso l'Ufficio europeo dei brevetti (9_4)”*. Per la Bulgaria invece la sottodimensione che ha cattivi risultati è *“Produttività e Reddito”*, a causa dell'ultima posizione negli indicatori *“PIL reale pro capite (8_1)”*, *“Percentuale di reddito del 40 % inferiore della popolazione (10_5)”* e *“Reddito lordo disponibile delle famiglie pro capite rettificato (10_2)”*.

Per la sfera ambientale invece i valori degli stati presenti in questa classe rimangono stabili e non si notano diminuzioni significative rispetto ai paesi delle classi più alte.

Figura 6. Distribuzione valori dimensioni classe 5



Dalle analisi effettuate si deduce come un indice di sostenibilità globale alto (classe 1) sia dovuto principalmente a buone performance nella sfera economica, sociale ed istituzionale poiché quelle della sfera ambientale hanno un livello più basso.

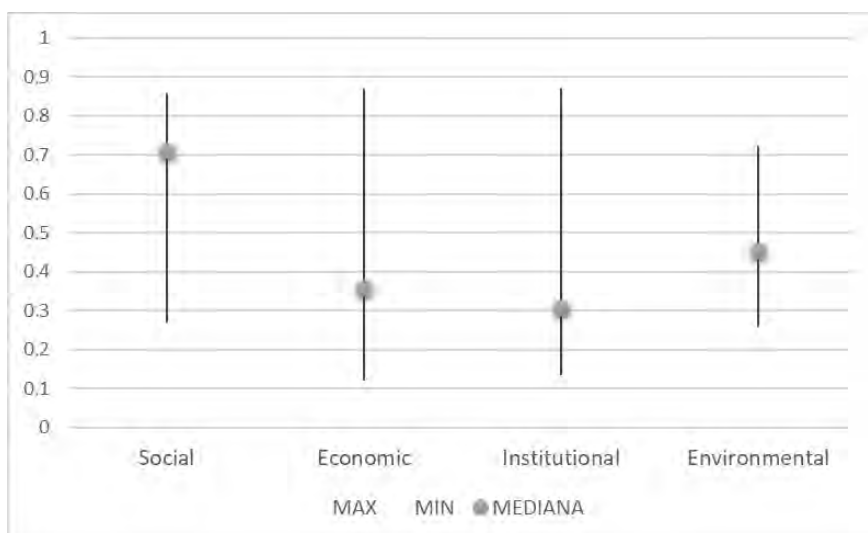
Per i paesi delle classi inferiori, i risultati sono da imputare principalmente ai bassi valori delle dimensioni economica ed istituzionale. La sfera ambientale invece non subisce grandi variazioni tra le diverse classi.

Le performance dei paesi nella dimensione sociale rimangono su livelli medio-buoni per la maggior parte degli stati. Come si nota dalla Figura 7, il valore della mediana della sfera sociale è alto e ciò indica che più della metà degli stati raggiunge un valore superiore a 0.71. Il massimo valore raggiunto in questa dimensione è quello della Danimarca ed è pari a 0.86, non troppo distante dal valore della mediana. Anche i risultati degli stati peggiori sono mediamente buoni con valori sempre maggiori di 0.4 ad eccezione della Grecia, che presenta il valore più basso (0.27).

Per le dimensioni economica ed istituzionale invece il valore della mediana è più basso, rispettivamente 0.36 e 0.31. Inoltre, il range di valori è più ampio ed evidenzia una grande variabilità tra i 27 stati.

Nella sfera ambientale il range di valori è più contratto ed infatti, come visto in precedenza, i valori raggiunti dai diversi paesi nelle 5 classi hanno una minore variabilità e la mediana (0.45) si avvicina al valore medio.

Figura 7. Range dei valori e mediana degli indici dimensionali



5. Discussione e Conclusioni

Questo studio propone una valutazione della sostenibilità sociale, economica, istituzionale, ambientale e globale dei 27 Paesi dell'UE nell'ottica degli obiettivi dell'Agenda 2030. Per fare questo è stato proposto un set di 77 indicatori estratti dalla banca dati dell'Eurostat e suddivisi nelle dimensioni e sottodimensioni a cui afferiscono. Attraverso l'algoritmo multicriteri TOPSIS integrato in ambiente geografico sono stati eseguiti tre livelli di aggregazione che hanno portato ad ottenere un indice di sostenibilità globale e gli indici di sostenibilità sociale, economica, istituzionale, ambientale e globale per ciascuno degli stati europei, consentendo inoltre di analizzare quali sottodimensioni e in particolare quali indicatori hanno portato a determinati risultati.

Considerando come anno di riferimento il 2020, i risultati presentano una situazione variegata che vede generalmente i paesi nord-europei come i più avanzati in termini di sostenibilità globale, mostrando buone performance in tutte le dimensioni eccetto in quella ambientale, mentre i paesi appartenenti all'ex blocco sovietico insieme ai paesi del mediterraneo sono risultati più indietro dal punto di vista della sostenibilità, mostrando importanti carenze soprattutto per le dimensioni economica ed istituzionale.

Questa tendenza generale rispecchia quella già osservata nel lavoro di Rocchi et al. [12], in cui sono stati valutati i risultati ottenuti dai Paesi dell'UE nel raggiungimento degli SDGs per l'anno 2019 attraverso l'SDGs Achievement Index (SDG-AI), un indice composto basato su più criteri che comprende sei diverse dimensioni. Tuttavia si osservano alcune differenze con questa analisi, soprattutto nella classificazione dei singoli paesi, dovute alle differenze in termini di anno di riferimento, di indicatori selezionati e algoritmo di aggregazione tra le dimensioni, in quanto nel secondo livello di aggregazione è stata utilizzata una somma ponderata invece che TOPSIS.

L'andamento delle singole dimensioni mostra come generalmente quella ambientale e quella sociale siano le più "resilienti", mostrando un comportamento più stabile tra i paesi e soprattutto, escluse rare eccezioni, ottenendo degli indici medio-buoni anche nei paesi che generalmente sono più indietro in termini di sostenibilità globale. Tuttavia, i paesi con un livello di sostenibilità più elevato hanno mostrato performance ambientali peggiori.

Le dimensioni economica ed istituzionale invece seguono la tendenza opposta, che spazia da valori molto alti per i paesi più avanzati in termini di sostenibilità globale e decresce in maniera consistente fino a raggiungere livelli minimi nei paesi con un indice globale più basso.

Come già evidenziato, i risultati di questo studio, mostrati in maniera intuitiva attraverso la rappresentazione di grafici e mappe, potrebbero essere di grande supporto per i Decision Makers nella determinazione delle politiche da attuare nella direzione della sostenibilità.

References

1. Council of the European Union. (2015). *Council Conclusion: A New Global Partnership for Poverty Eradication and Sustainable Development after 2015*. 2015(May), 1–23.
2. Baeyens, A., & Goffin, T. (2015). European Court of Justice. *European Journal of Health Law*, 22(5), 508–516. <https://doi.org/10.1163/15718093-12341375>.
3. Boggia, A., Massei, G., Pace, E., Rocchi, L., Paolotti, L., & Attard, M. (2018). Spatial multicriteria analysis for sustainability assessment: A new model for decision making. *Land Use Policy*, 71(December 2017), 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.11.036>.
4. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>
5. Lafuente-Lechuga, M., Faura-Martínez, Ú., & Carrillo, M. (2022). Measuring Progress towards Sustainability in the European Union within the 2030 Agenda Framework. *Mathematics 2022, Vol. 10, Page 2095, 10(12)*, 2095. <https://doi.org/10.3390/MATH10122095>.

6. Ricciolini, E., Rocchi, L., Cardinali, M., Paolotti, L., Ruiz, F., Cabello, J. M., & Boggia, A. (2022). Assessing Progress Towards SDGs Implementation Using Multiple Reference Point Based Multicriteria Methods: The Case Study of the European Countries. *Social Indicators Research*, 162(3), 1233–1260. <https://doi.org/10.1007/s11205-022-02886-w>.
7. Campagnolo, L., Eboli, F., Farnia, L., & Carraro, C. (2018). Supporting the UN SDGs transition: Methodology for sustainability assessment and current worldwide ranking. *Economics*, 12, 1–31. <https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2018-10>.
8. Humphreys, M. (2017). Sustainable Development in the European Union. In *Sustainable Development in the European Union*. <https://doi.org/10.9774/gleaf.9781315611471>.
9. Weber, M., & Borchering, K. (1993). Behavioral influences on weight judgments in multiattribute decision making. *European Journal of Operational Research*, 67(1), 1–12. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90318-H](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90318-H).
10. Benítez-Fernández, A., & Ruiz, F. (2020). A Meta-Goal Programming approach to cardinal preferences aggregation in multicriteria problems. *Omega (United Kingdom)*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.03.003>.
11. Deng, H., Yeh, C., Willis, R., 2000. Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights. *Computers & Operations Research*, 27(10), pp.963-973.
- .
12. Rocchi L., Ricciolini E., Massei G., Paolotti L., Boggia A. (2022). Towards the 2030 Agenda: Measuring the Progress of the European Union Countries through the SDGs Achievement Index. *Sustainability (Switzerland) Open Access* 14(6), Article Number 3563. DOI: 10.3390/su14063563.
13. Ruiz, F., El Gibari, S., Cabello, J. M., & Gómez, T. (2020). MRP-WSCI: Multiple reference point based weak and strong composite indicators. *Omega (United Kingdom)*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.04.003>.
14. El Gibari, S., Cabello, J. M., Gómez, T., & Ruiz, F. (2021). Composite indicators as decision making tools: The joint use of compensatory and non-compensatory schemes. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 20(3), 847–879.
15. Hwang C.L., Yoon K. (1981), *Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications, A State-of-the-Art Survey*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 186.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Environmental benefits of Renewable Energy Communities: the role of demand flexibility

Elena Tarpani ^{1,*}, Ilaria Pigliautile ^{1,2}, Benedetta Pioppi ³, Elisa Moretti ^{1,2}, Anna Laura Pisello ^{1,2}

¹ CIRIAF – Interuniversity Research Centre of Pollution and Environment Mauro Felli, University of Perugia, via G. Duranti 67, Perugia, Italy

² Department of Engineering, University of Perugia, via G. Duranti 93, Perugia, Italy

³ EValTech (R&D department of Elettrica Valeri srl), via Somigni snc, 06035, Gualdo Cattaneo, Perugia, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: elena.tarpani@studenti.unipg.it

Abstract: The urgent need to combat climate change requires decarbonizing the energy sector. Renewable Energy Communities (RECs), introduced in European legislation in 2019, offer environmental, economic, and social benefits that promote the transition to clean energy. This research analyzes two case studies of RECs in Perugia, Italy: one established with four members and a 10kW photovoltaic plant, and one in the process of being established with three residential units, one owning a 13.2 kW PV system and a 23.2 kWh storage system for the REC. The study aims to evaluate the role of demand flexibility in maximizing the environmental benefits of locally generated renewable energy consumption. Validated energy simulation models of both case studies are used to simulate alternative scenarios, considering real building constraints. The research quantifies CO₂ emissions reduction and highlights the importance of citizen awareness in promoting clean energy behaviors. Results indicate that while mixed-functional RECs achieve greater environmental benefits, residential units offer more demand flexibility and potential for improvement. The study contributes to safeguarding outdoor conditions, reducing environmental risks for vulnerable groups, and promoting the clean energy transition. Future analysis will explore integrating additional renewables and new members into the energy community. This study is original as it examines two different RECs, quantifies environmental benefits, and highlights the importance of citizen awareness in promoting clean energy.

Keywords: Renewable Energy Community; Renewables; Photovoltaic; Storage system; Demand flexibility; Environmental benefits; CO₂.

1. Introduction and research background

During last years, the idea of the Energy Community (EC) has represented one of the main tools to foster the energy transition. The climate crisis is recognized worldwide, and several international deals are signed to develop sustainable solutions and green transition from traditional sources to renewables [1]. Indeed, the Paris Agreement established the urgency to act against the effects of the climate change, increase the air quality and reduce the gas emissions in the atmosphere [2]. Furthermore, the agenda 2030 promotes a sustainable development in order to balance the economic, social, and environmental aspects [3]. In particular, the goal 7 is focused on the energy field and it establishes an ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all countries, fostering the development of renewable systems and the improvement of energy efficiency [4]. Simultaneously, the goal 13 is based on the actions against the climate change and its impact, in order to combat its effects related to gas emissions, enhance of global temperatures, and extreme natural events such as sea level rise, droughts and reduction of the coral reefs [5]. Finally, the goal 11 is related to the need to realize sustainable communities and cities [6]. The usage of renewable sources inside the communities and the buildings could motivate the transition to cleaner and more sustainable energy production [7]. In this view, an energy transition is fundamental to promote the renewable sources and reduce the usage of traditional fuels inside the energy systems. The idea of Renewable Energy Community (REC) represents a valuable strategies for optimizing the share and self-consumption of renewable energies, locally available, and empowering the communities through sustainable development systems [8]. By fostering renewables installation, RECs diffusion will contribute to reducing the carbon emission in the atmosphere.

European Commission is acting a considerable campaign in order to foster the energy transition of its Member States. Indeed, the European regulatory framework is based on the European Union Directive 2018/2001/EU (revised Renewable Energy Directive – RED II) [9], more deeply described in the rules embedded into the Internal Electricity Market Directive 2019/944/UE (IEMD) [10], that is entered into force as part of the Clean Energy for all Europeans Package [11]. The previous European directive includes the promotion of the use of energy from renewable sources and the energy production and sharing inside the ECs. Moreover, it indicates the common rules for the internal market for electricity and the different schemes of collective self-consumption and energy communities. Indeed, several European projects about the ECs developed in the past years. The Horizon 2020 (H2020) project NRG2peers [12] aims to support the uptake of the next generation of European energy communities through a gamified platform to be tested in different European case studies. Furthermore, other initiatives were established in order to find solutions for the energy transition and enhance the sustainability within the communities [13].

In general, the RECs are based on two different types of users, namely prosumer, and consumer: the former actively participates in the energy production phases and it has an active role within the community, the latter is a passive user that only consumes the energy. Furthermore, the prosumer owns one or more renewable energy systems and there could be more than one within the energy community.

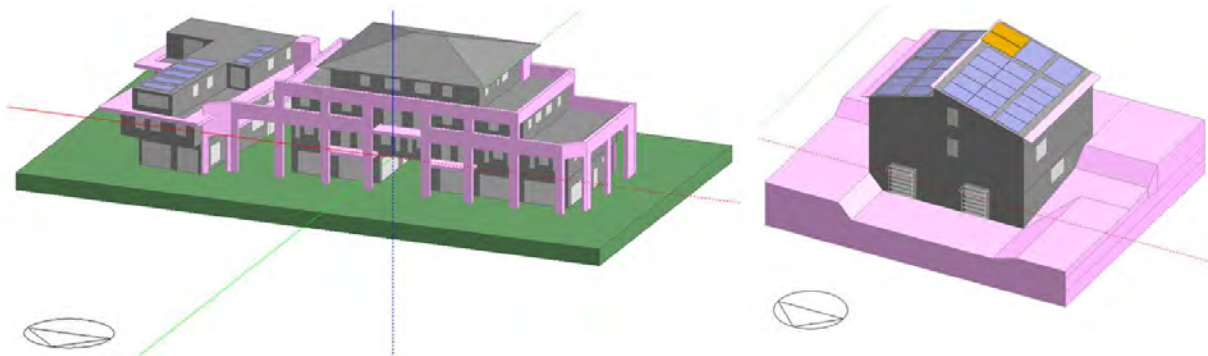
Due to the fact that this new energy management system is based on open and voluntary participation, the type, and the number of members within the EC is variable; for this reason, each case study is different from the others in terms of energy consumptions and production, renewable systems, and energy demand from the members.

In this view, this study focuses on the environmental benefits achievable through behavioral changes in two RECs located in the same region (central Italy), relying on the same renewable source, but characterized by different members' composition. In particular, the first one is an established REC with four members (i.e., a dairy, a medical centre, an engineering studio, and a residential unit), while the second case is in the process of being established and accounts for three members that are all residential units. Both of them are equipped with a PV system on the roof of one of the buildings; the latter also presents an electricity storage. The research aim is to study what are the achievable environmental benefits by only nudging changes in electricity consumption profiles of the RECs members so to (i) maximize the consumption of the locally generated energy, (ii) limit the electricity intake from the national grid during hours related to peaks in CO₂ emissions. The flexibility in their energy consumption could represent a hypothetical way to maximize the environmental benefits of self-consuming using renewable energy. Several alternative scenarios analyzed through energy simulation models will be presented in the following sections, considering the energy demand and consumptions and the constraints due to the different function of the selected buildings. Moreover, the related quantification of the CO₂ emissions is calculated, and the results of different scenarios are compared each other in order to analyze how different aspects (i.e., citizens' behavior, energy demand) could influence the environmental benefits and reduce the emissions in the atmosphere and the risks for the human health. The approach of the proposed study included the environmental and social aspects by integrating renewables generation and consumers' behavior nudging, in order to promote the energy transition and enhance citizens' awareness on the topic.

2. Methodology

The study aims to analyze how the citizens' behavior and electricity consumption profiles influence the CO₂ emissions in the atmosphere, particularly referring to a REC context. In detail, the methodology follows two main steps: (i) the energy model validation of both the case studies according with present conditions, and (ii) the study of different scenarios, modifying the operation schedules of different members of the RECs and analyzing the achievable reduction in annual CO₂ emissions due to the clusters' energy demand. The software used for the energy dynamic simulation was DesignBuilder [14], a user-friendly modelling environment that provides environmental performance data such as energy consumption, carbon emissions, comfort conditions, and other characteristics related to buildings [15]. Figure 1 shows the two models developed in the DesignBuilder software.

Figure 1. The two models within the DesignBuilder software.



As can be seen, the interface of the software is very clear and basic; the buildings are modeled as simple block and each feature is added in each specific tab. In particular, the two models were developed setting the activity, constructions layers (i.e., roof, external walls, internal partitions, ground floor, and internal floor/ceiling), openings, lighting, and HVAC characteristics. Moreover, the renewable system is modeled in accordance with the datasheet inputs. All these previous parameters represented the inputs for the model and the outputs (i.e., electricity consumptions, energy production, cooling and heating loads) are calculated through the energy dynamic simulation within the software. The validation procedure consisted in comparing model outcomes with current energy consumption of the modelled units provided on a monthly basis through bills. Along with consumption, the installed renewable generation plants and electricity storage units were modelled as well. Given the validated electricity consumptions hourly profiles and the hourly electrical energy generation profile, the related values of the CO₂ emissions in the atmosphere were computed considering the marginal CO₂ factor, that is referred to the emitted CO₂ from the most pollutant technology that feed into the national grid at each hour. This approach allowed to obtain a significant impact by shifting the loads from the high CO₂ marginal factor hours (when contribution from fossil fuels is prevalent) to hours with CO₂ marginal factor value near zero (due to renewables contribution in the energy mix). The CO₂ values were combined with the data of energy production by the renewable sources, and it was possible to calculate the real energy consumption due to the members demand and the annual CO₂ emissions in the atmosphere. The second step was to analyze specific outcomes from the models in terms of electricity consumptions (i.e., room electricity, lighting, cooling, and heating demand) and try to propose changes in members electricity consumptions schedule to minimize the generated CO₂ emissions in the atmosphere and highlight the role of citizen awareness in changing user behavior. In this view, the study proposes two scenarios alternative to the validated baseline for each case study, focusing on the flexibility in energy demand of REC members to maximize the environmental benefits. Details on the three performed simulations are given in the following section which presents the two case studies in detail.

3. Case studies

The study focuses on two different RECs in terms of energy demand and consumption, in order to maximize the consumption of the locally generated energy and reduce the electricity intake from the

national grid during hours that present the peaks in CO₂ emissions. The two case studies are detailed in the following subsections, where are described the renewable sources, the assets and the operation of the community, the ECs members' composition, and the three different scenarios simulated for each case study.

3.1 Mixed-use model - Marsciano community

Marsciano community is the first case study analyzed for the current study and it represents one of the first renewable energy community established as a legal entity in Italy [16]. It is located in an industrial area of a small city, called Marsciano, that is about 25 km south of Perugia [17], in central Italy. The community was established in July 2022 accounting for four members, that are located in two adjacent buildings [18]. The members present different end-uses and various energy demand due to the type of their activity. In particular, the four clusters are a dairy, an engineering studio, a medical centre, and a residential unit: the first two clusters are located in one building, while the last two are situated in the adjacent building. Figure 2 shows an overview of the Marsciano community where the photovoltaic panels are all located on top of the roof of one building.

Figure 2. An overview of the Marsciano community.



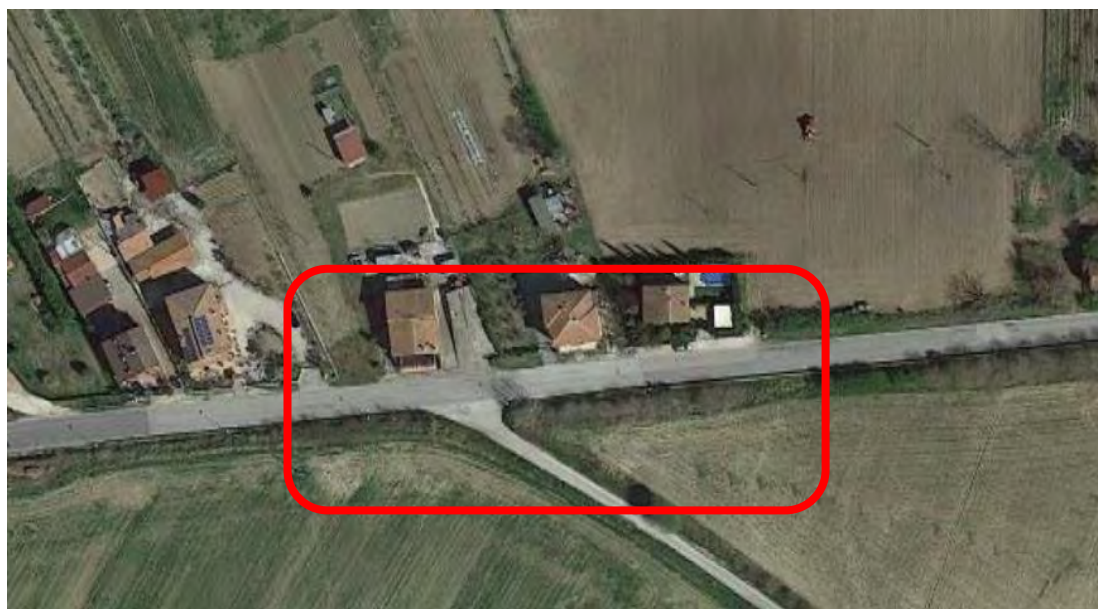
The household represents the only “prosumer” within the EC; indeed, it owns a shared photovoltaic panels installed on the roof of one of the building for a total of 10 kWp. Moreover, the owner of the residential unit is also the owner of the buildings where all the other members are located. For this reason, the other clusters of the Marsciano Community are only “consumers”.

3.2 Residential unit - Bastardo community

Bastardo community is the second case study analyzed and it represents an example of the community that is in the process of being established. It is located in a small fraction in the countryside

called Bastardo, that is about 28 km south of Perugia, in the central part of Italy [19]. The community includes three clusters that are all dwellings; they are located in a neighborhood that has an extension of around 600 m and represent the typical Italian residential situation since the 60% of residential units are detached houses (both double – and single – family houses). One of the members represents the “prosumer” and it owns a shared photovoltaic panels for a total of 15 kWp and a storage battery installation of 23.2 kWh. Moreover, there is a controllable electric vehicle charging poles. Figure 3 shows an overview of the Bastardo community.

Figure 3. An overview of the Bastardo community.



3.3 Dynamic thermal-energy simulation modeling of the case studies

As mentioned in the previous section, the study simulated three different scenarios for each case study, in order to analyze the impact of the user behavior in CO₂ emissions reduction.

Table 1 summarized the different scenarios simulated for each case study.

Table 1. Simulated scenarios for the two case studies.

Case study	Baseline	Scenario 1 (S1)	Scenario 2 (S2)
Mixed-use REC	Current energy consumptions (the model is validated with the real bills).	The non-residential members schedules are modified during summer anticipating their related electrical loads by an hour.	The non-residential members schedules are modified during July anticipating their related electrical loads by an hour.
Residential REC	Current energy consumptions (the model is validated with the real bills).	Two residential units present the consumption profile of the Baseline scenario, while the third is modified (in terms of the equipment and lighting loads and the energy consumption were reduced).	Only one residential unit presents the consumption profile of the Baseline scenario, while two members presented a modified consumptions (in terms of the equipment and lighting loads and the energy consumption were reduced).

In both the case studies the simulation provided different outcomes, in terms of energy consumption and energy production through the renewable systems. In detail, the specific outcomes were:

- Energy consumption, summarizes electricity consumptions for all the EC members in terms of room electricity, cooling and heating loads, lighting consumptions.
- Energy production: provides the generated electricity from the installed renewable systems.

The outcomes are used to calculate the CO₂ emissions related to the whole EC consumptions due to electricity demand. The calculation was based on the hourly values of marginal CO₂ emissions in the Italian energy mix [20].

4. Results

The following subsections present the outcomes of the energy dynamic simulation models within the DesignBuilder software. In particular, three scenarios are presented for each case study and the values of the reduction of CO₂ emissions are analyzed and maximized with changes in energy demand and request of the members.

4.1 Marsciano community

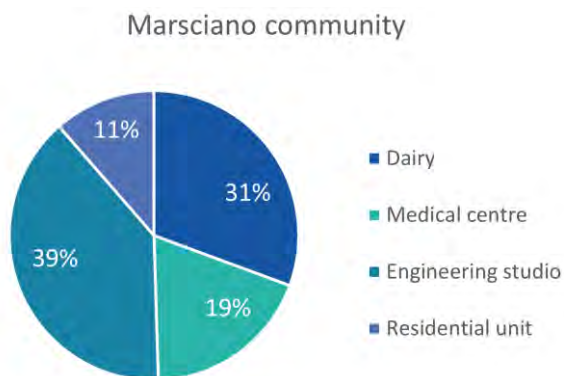
As previously described, the study simulated three different scenarios for the Marsciano community. The differences are due to the energy consumptions of the members of the community and the related CO₂ emissions in the atmosphere. Table 2 summarizes the values obtained through the energy dynamic simulation and it is referred to the annual energy consumption of the single member in terms of room electricity, lighting, auxiliary energy, cooling and heating, and Domestic Hot Water (DHW) demand, for the three scenarios.

Table 2. Annual energy consumption values for the Marsciano community.

REC Members	Baseline scenario [kWh]	S1 [kWh]	S2 [kWh]
Dairy	10624.97	10591.54	10601.46
Engineering studio	13557.78	13543.18	13546.23
Medical centre	6561.61	6539.93	6542.74
Residential unit	3960.40	3960.40	3960.40
TOTAL	34704.76	34635.05	34650.83

The total annual energy consumption of the four members into the Marsciano community were similar in the three different scenarios; hence, the little differences are related to members schedules that are modified anticipating the electrical loads by an hour during summer (S1) and just on July (S2), respectively. Figure 4 shows the member's contribution to the total annual energy demand.

Figure 4. Members’ percentage contribution to the energy demand.



As can be seen, the 39% of the energy consumption of the Marsciano community is due to the engineering studio, followed by 31% due to the dairy, 19% from the medical studio and 11% from the residential unit. These results are related to the type of the member and to their activity in terms of energy demand during the entire day, and the percentages were equal in the three scenarios due to the low differences in the total energy consumption values.

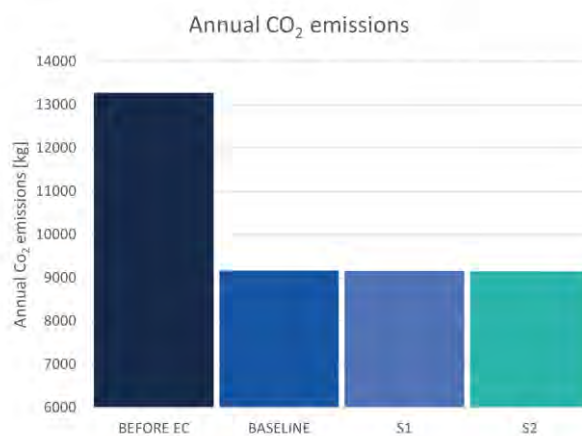
The next step was to analyze the CO₂ emissions related to the total annual energy consumption values. Table 3 presents the hourly CO₂ extremes, the average and the total annual CO₂ emissions released into the atmosphere for each scenario.

Table 3. Hourly and annual CO₂ emissions for different scenarios.

Scenario	min. hourly CO ₂ emission [kg]	ave. hourly CO ₂ emission [kg]	max. hourly CO ₂ emission [kg]	Total CO ₂ emission [kg]
Before EC	0	1.516	17.683	13277.86
Baseline	0	1.047	13.732	9171.06
S1	0	1.045	14.996	9155.83
S2	0	1.045	13.732	9152.77

As can be shown in Table 3, the three scenarios described in section 2 are improved by a fourth scenario, that is related to CO₂ emissions without any renewable system (in this case without any photovoltaic panels).

Figure 5. Annual CO₂ emissions for each scenario.



As clearly reported in Figure 5, the value of total CO₂ emission in the *Before EC* scenario was the highest, while the other three values were similar. The same condition is registered for the average hourly values, while for the max hourly values the data were quite different: the *Before EC* scenario had the highest value, the *Baseline* and the *S2* scenarios had the same value, while the *S1* scenario presents the lowest value, even if the value of the total CO₂ emission was similar. This results suggest that there are days with an important peak of CO₂ emissions in the *S1* scenario, while in the others (i.e., *Baseline* and *S2* scenario) the CO₂ emissions are lower into the atmosphere. The percentage of reduction in the CO₂ emissions was equal to 0.16% for the *S1* and 0.20% for the *S2*, respectively.

4.2 Bastardo community

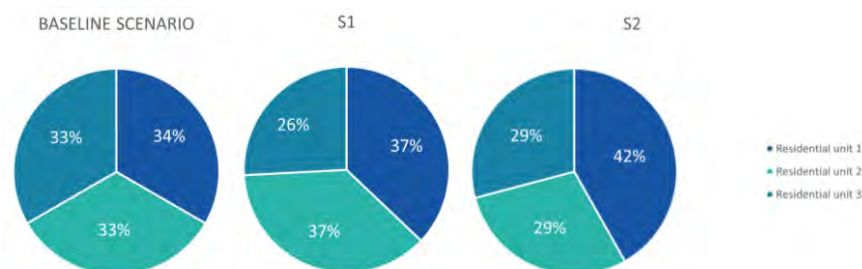
As described in section 2, the current study analyzed three alternative scenarios for the Bastardo community. The differences are registered in the energy consumptions of the three members of the community in order to analyze the CO₂ emissions and provide several variations to reduce the levels of CO₂ into the atmosphere. Table 4 reports the annual energy consumption provided by the energy dynamic simulation.

Table 4. Annual energy consumption values for the Bastardo community.

REC Members	Baseline scenario [kWh]	S1 [kWh]	S2 [kWh]
Residential unit 1	6439.25	6439.25	6439.25
Residential unit 2	6439.25	6439.25	4485.80
Residential unit 3	6439.25	4485.80	4485.80
TOTAL	19317.75	17364.30	15410.85

In detail, the previous table is based on the annual electricity demand of the three members of the community in terms of room electricity, lighting, auxiliary energy, cooling and heating loads, and DHW demand. The total annual energy consumption were more variable compared to the previous case study of Marsciano; indeed, the percentage of reduction between the *Baseline* and the *S2* scenario was equal to 20%. Figure 6 shows the different influence of each member, even if they are all residential units.

Figure 6. Members' percentage contribution to the energy demand.



The differences are due to the variable energy demand set on the simulation models for each member of the Bastardo community and to the different energy schedules. Despite these previous discrepancies, the percentage contribution of the residential to the energy demand was between 26% to 42%.

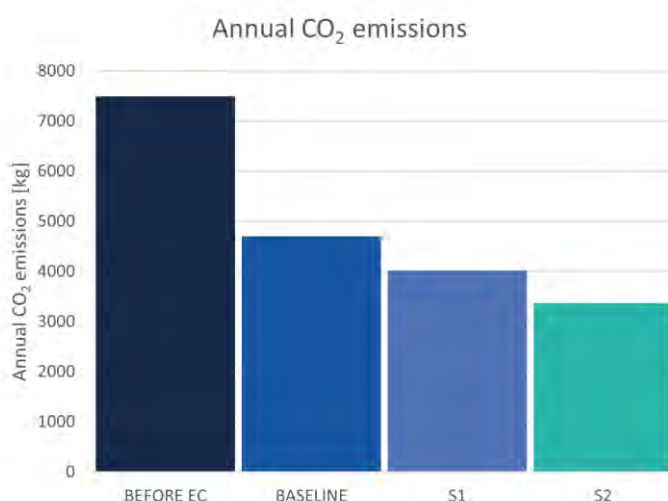
After the calculations for the annual energy demand, the CO₂ emissions are calculated for each scenario. As the previous case study, the values of CO₂ emissions are obtained from the hourly values, that were available for each country. Table 5 shows the hourly CO₂ extremes, the average and the total annual CO₂ emissions released into the atmosphere for each scenario.

Table 5. Hourly and annual CO₂ emissions for different scenarios.

Scenario	min. hourly CO ₂ emission [kg]	ave. hourly CO ₂ emission [kg]	max. hourly CO ₂ emission [kg]	Total CO ₂ emission [kg]
Before EC	0	0.855	8.230	7490.15
Baseline	0	0.536	6.713	4698.84
S1	0	0.459	5.859	4016.04
S2	0	0.384	5.401	3366.73

As can be shown in Table 5, the three scenarios described in section 2 are improved by a fourth scenario, that is related to CO₂ emissions without any renewable system (in this case without any photovoltaic panels and storage battery).

Figure 7. Annual CO₂ emissions for each scenario.

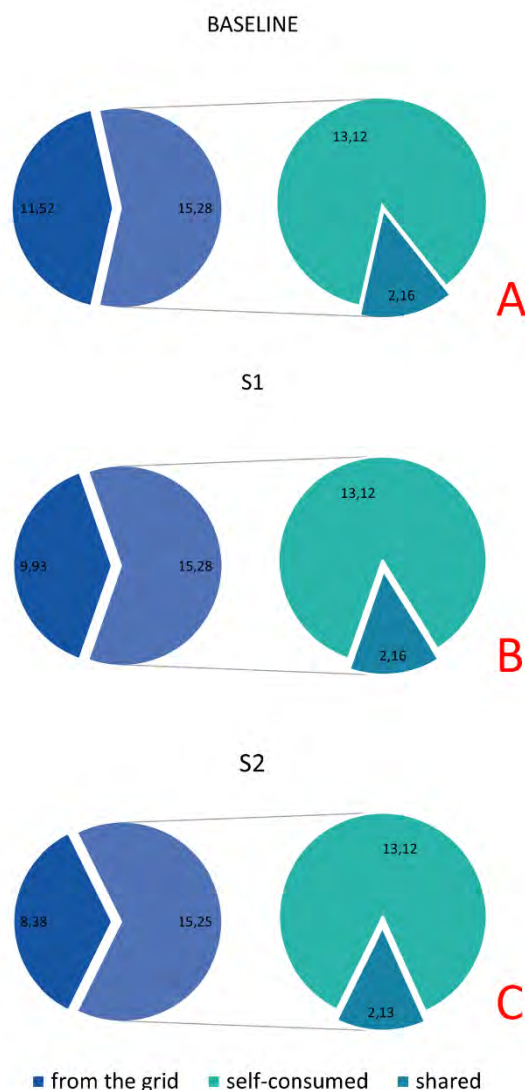


As clearly reported in Figure 7, the value of total CO₂ emission in the *Before EC* scenario was the highest, while the other three values were lower. The same condition is registered for the average and max hourly values. These outcomes suggest that the flexibility in energy demand set on the simulation models maximized the environmental benefits with the reduction of CO₂ emissions up to 55% compared to the scenario without renewable sources. The percentage of reduction in the CO₂ emissions for the S1 and S2 scenario was equal to 14% and 28%, respectively, compared to the *Baseline*

scenario. Moreover, this important reduction was also due to the greater demand flexibility of the residential unit, that offered a wider margin of improvement.

Further analyses were conducted in accordance with the previous data in order to quantify the shared and self-consumed energy within the community, and how much energy was supplied by the national grid. In detail, Figure 8 shows the annual electricity balance for the three scenarios.

Figure 8. Annual electricity balance for each scenario.



As shown in Figure 8, the annual electricity balance shows several differences among the three scenarios. In detail, the sum of self-consumed and shared energy was similar while electricity intake from the national grid was reduced. Indeed, the values related to the energy from the grid were equal to 11.52 MWh for the *Baseline* scenario (Figure 8A), 9.93 MWh for the *S1* scenario (Figure 8B), and 8.38 MWh for the *S2* scenario (Figure 8C), respectively. Accordingly, CO₂ emissions related to the generation of the consumed energy decreased.

5. Conclusions and future developments

This work presents potentialities of RECs deployment as a strategy to decarbonize the energy sector and reduce the human contribution to climate change. Validated dynamic simulation models of two RECs were used to analyze the impact of behavioral changes on CO₂ emissions into the atmosphere. Two case studies were analyzed and modeled, in order to study their different energy demand and CO₂ emissions values during the whole day: the Marsciano community is considered as the heterogeneous community, with different type of members (e.g., dairy, engineering studio, medical centre, and residential unit), while the Bastardo community is considered as the residential community, with three residential units. In detail, the research aims to study the flexibility of the energy demand of the members. After the simulation of the two models considering the *Baseline* scenario as the reality, the study validated the models and gathered the energy demand values and consumptions in terms of room electricity, lighting, cooling, and heating loads, and DHW. The study also considered other two scenario (i.e., *S1* and *S2*), that are based on the variable energy schedule and on the different flexibility in energy demand. While for the Marsciano community the reduction of CO₂ emissions were equal to 0.16% for the *S1* scenario and 0.20% for the *S2* scenario, the Bastardo community is registered a percentage of 14% and 28%, respectively. These outcomes provided that the residential units have greater demand flexibility, offering a wider margin of improvement. At the contrary, the mixed-functional REC achieved higher environmental benefits. Furthermore, the *S1* and *S2* scenarios provided a reduction of CO₂ emissions related to the energy use from the grid compared to the Baseline scenario: the latter registered a 11.52 MWh for the annual energy from the grid, while for the other two scenarios the values were equal to 9.93 MWh and 8.38 MWh, respectively.

In this current work the renewables considered for both the communities were only photovoltaic systems and, in the second case study of Bastardo, even the storage battery. Therefore, future analysis will include integrating additional renewables, such as geothermal systems or wind turbines, in order to enhance the reduction of CO₂ emissions into the atmosphere. Moreover, the additional members in the community, in particular as prosumers, could represent another significant strategy to enhance the energy production from renewable sources and reduce the usage of fossil fuels. The improvement of the existing renewable systems within the community could be the main tool for enhancing the development of the renewable systems among the citizens.

Acknowledgements

Part of this work has received funding from the European Union's H2020 research and innovation program under the NRG2peers project (g.a. 890345). The authors also would like to thank the Techne Srl company for data collection on Marsciano Community.

References

1. Planete energies International Efforts to Combat Climate Change Available online: <https://www.planete-energies.com/en/media/article/international-efforts-combat-climate->

- change (accessed on 23 March 2023).
2. United Nations, D. of E. and S.A. The Paris Agreement. *Nature* **2016**, doi:10.1126/science.ns-2.26.131.
 3. United Nations, D. of E. and S.A. Agenda 2030 Available online: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (accessed on 23 March 2023).
 4. United Nations, D. of E. and S.A. Goal 7 - Agenda 2030 Available online: <https://sdgs.un.org/goals/goal7> (accessed on 23 March 2023).
 5. United Nations, D. of E. and S.A. Goal 13 - Agenda 2030 Available online: <https://sdgs.un.org/goals/goal13> (accessed on 23 March 2023).
 6. United Nations, D. of E. and S.A. Goal 11 - Agenda 2030 Available online: <https://sdgs.un.org/goals/goal11> (accessed on 23 March 2023).
 7. Dóci, G.; Vasileiadou, E.; Petersen, A.C. Exploring the Transition Potential of Renewable Energy Communities. *Futures* **2015**, *66*, 85–95, doi:10.1016/j.futures.2015.01.002.
 8. Di Silvestre, M.L.; Ippolito, M.G.; Sanseverino, E.R.; Sciumè, G.; Vasile, A. Energy Self-Consumers and Renewable Energy Communities in Italy: New Actors of the Electric Power Systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *151*, doi:10.1016/j.rser.2021.111565.
 9. EU Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources (Recast). *Off. J. Eur. Union* **2018**, *2018*, 82–209.
 10. European Parliament; Council of the European Union Directive (EU) 2019/944 on Common Rules for the Internal Market for Electricity and Amending Directive 2012/27/EU. *Off. J. Eur. Union* **2019**, 18.
 11. European Commission Clean Energy for All Europeans Package Available online: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en.
 12. NRG2peers H2020 Project Available online: <https://nrg2peers.com/> (accessed on 30 March 2023).
 13. REScoop.eu European Projects Available online: <https://www.rescoop.eu/eu-projects> (accessed on 30 March 2023).
 14. DesignBuilder Available online: <https://designbuilder.co.uk/> (accessed on 24 March 2023).
 15. Welcome to DesignBuilder V7 Available online: <https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/index.htm> (accessed on 24 March 2023).
 16. Tarpani, E.; Piselli, C.; Fabiani, C.; Pigliatile, I.; Kingma, E.J.; Pioppi, B.; Pisello, A.L. Energy Communities Implementation in the European Union: Case Studies from Pioneer and Laggard Countries. *Sustain.* **2022**, *14*, doi:10.3390/su141912528.
 17. Comune di Marsciano La Città Available online: https://www.comune.marsciano.pg.it/pagina1896_la-citt.html (accessed on 27 March 2023).
 18. Brunelli, Luca; Moretti, Elisa; Pioppi, Benedetta; Pisello, Anna Laura; Bini, Silvia; Zepparelli, Luciano; Cotana, F. Le Comunità Energetiche Rinnovabili Come Modello Innovativo Di Gestione Dell'energia: Aspetti Normativi, Benefici e Analisi Tecnico-Economica per Un Caso Di Studio. In *Atti del XXII Congresso Nazionale CIRIAF "Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute*

Umana"; Morlacchi Editore University Press. ISBN, Ed.; Perugia, 2022; pp. 315–332.

19. ITALIA.INDETTAGLIO.IT La Frazione Di Bastardo Available online: https://italia.indettaglio.it/ita/umbria/perugia_gianodellumbria_bastardo.html (accessed on 27 March 2023).
20. European Environment Agency Greenhouse Gas Emission Intensity of Electricity Generation Available online: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-12#tab-googlechartid_chart_11 (accessed on 30 March 2023).

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Analisi del comfort ambientale multi-dominio negli spazi interni e dell'impatto sulla produttività degli occupanti nei luoghi di lavoro temporaneo

Andrea Silei ^{1,*}, Ilaria Pigliautile ², Claudia Fabiani ², Cristina Piselli ¹, Carla Balocco ¹, Fabio Scurpi ¹ e Anna Laura Pisello ²

¹ Dipartimento di Architettura (DIDA), Università degli Studi di Firenze, via della Mattonaia 8, 50121, Firenze, Italia

² Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, via G. Duranti 67, 06125, Perugia, Italia

* Autore di riferimento. E-Mail: andrea.silei@unifi.it

Abstract: Questo lavoro mira ad analizzare gli effetti sinergici dei diversi domini di comfort sulla produttività delle persone perseguendo una duplice finalità: determinare se e come l'aspetto di un ambiente possa influire sulla produttività dei suoi occupanti e determinare quale combinazione di parametri termici e illuminotecnici possa portare un soggetto ad essere più o meno produttivo. Nel corso dell'inverno 2022 sono state effettuate due serie di test sperimentali con approccio multi-dominio. Durante il primo test, i soggetti sono stati esposti ad un ambiente termico costante (i.e. 20 °C e 25 °C) e a tre diverse condizioni di luce (luce RGB bianca, rossa e blu) durante un'unica sessione di prova. I soggetti hanno svolto un test di produttività in ciascuna delle condizioni di luce e temperatura. La combinazione di temperatura ambiente e colore della luce corrispondente ai più alti livelli di produttività registrati nel primo test è stata riprodotta nella seconda serie di test. Il secondo test è stato effettuato in una rappresentazione virtuale della stessa camera di prova tramite realtà virtuale. I risultati del primo esperimento hanno dimostrato che, per attività logiche di breve durata (7 minuti), i soggetti risultano più produttivi in un ambiente con temperatura dell'aria misurata pari a 25°C. L'analisi statistica effettuata sui dati raccolti mostra che la condizione di luce in cui i soggetti sono stati più produttivi è quella con sola luce bianca. Dal secondo esperimento è emerso che l'aspetto dell'ambiente non influenza in maniera apprezzabile la produttività dei soggetti per attività logiche di breve durata.

Keywords: Produttività; approccio multi-dominio; comfort; test-room; realtà virtuale.

1. Introduzione

Gli edifici rappresentano il luogo in cui la maggior parte delle persone trascorre gran parte del proprio tempo [1, 2]. Da questo si può quindi dedurre come ottimizzare il comfort all'interno degli ambienti risulti fondamentale. Le condizioni ambientali negli edifici hanno un impatto significativo sul benessere e sulla salute degli occupanti e, nel caso di ambienti lavorativi, anche sulla loro produttività. Pertanto, è fondamentale studiare la relazione tra condizioni ambientali e produttività in modo tale da progettare gli ambienti lavorativi attraverso un approccio incentrato sulle persone che mira a massimizzare la produttività riducendo al contempo il consumo di energia e gli sprechi. In letteratura sono presenti alcuni studi che analizzano l'influenza di specifici domini di Qualità dell'Ambiente Interno (Indoor Environmental Quality, IEQ), quali termico [3, 4], visivo [5, 6], acustico [7, 8] e qualità dell'aria interna [9, 10]. La ricerca condotta da Galasiu et al. mostra che la luce solare è preferita alla luce artificiale negli ambienti d'ufficio [5], mentre Daisey et al. hanno analizzato la qualità dell'aria interna di alcune aule mostrando come questa non fosse sufficiente a garantire la salute e il benessere degli studenti, portando a potenziali problemi di salute [9]. È chiaro che investire nel miglioramento dell'IEQ è fondamentale per garantire il comfort, la salute e la produttività degli occupanti dell'edificio.

Ogni giorno siamo esposti costantemente a diversi stimoli fisici appartenenti a diversi domini di comfort. Alla luce di ciò, le teorie del comfort multi-dominio cercano di individuare gli effetti dovuti alla compresenza di questi stimoli sulle risposte umane, inclusa la produttività [11]. Tuttavia, l'approccio multi-dominio non è così ampiamente accettato o utilizzato come lo è l'analisi dell'influenza dei singoli domini sulla produttività. Indagare sugli effetti di più domini risulta invece fondamentale e potrebbe diventare una parte centrale delle normative volte a ottimizzare la progettazione degli ambienti di lavoro.

L'approccio multi-dominio comporta delle complessità nella fase di analisi sperimentale in quanto è necessario monitorare una molteplicità di stimoli, appartenenti ai diversi domini fisici di comfort, al contorno di soggetti volontari e misurarne le relative reazioni. Per limitare questa difficoltà, spesso questo tipo di studi vengono effettuati all'interno di test-room ovvero ambienti controllati nei quali è possibile sia controllare con precisione gli input con cui vengono stimolati i soggetti sia le risposte che questi input provocano su di essi. Questo approccio consente di monitorare e analizzare con precisione tutti i parametri coinvolti nell'esperimento [12].

Tuttavia, un limite di questo approccio sperimentale potrebbe essere legato alla natura artificiale delle test-room. Il gran numero di apparecchiature necessarie installate potrebbe influenzare la risposta dei soggetti, rendendo i risultati meno rappresentativi degli ambienti del mondo reale [13, 14]. Nonostante ciò, l'uso delle test-room è comunque considerato uno strumento prezioso per comprendere l'effetto di più domini sul comfort e sulla produttività umana. È essenziale continuare a esplorare e investire nella ricerca multi-dominio per migliorare la nostra comprensione e capacità di progettare ambienti di lavoro ottimali.

Il comfort termico indoor è spesso associato solo alla temperatura interna di un ambiente, ma questo tipo di approccio ignora tutte le conseguenze causate dalla combinazione di altri stimoli

rischiando di portare a conclusioni errate o non precise. Per valutare il comfort termico vengono utilizzati specifici indici che riassumono la sensazione termica degli utilizzatori. I principali indici sono: PMV (Voto Medio Previsto) e PPD (Percentuale Prevista di Insoddisfatti) [15].

Recentemente alcuni studi hanno mostrato come gli stimoli appartenenti a diversi domini di comfort possano in realtà influenzare la percezione di altri domini non coinvolti direttamente [16]. Ad esempio, i parametri tipicamente utilizzati per determinare il comfort di uno specifico dominio fisico, come il colore della luce per il comfort visivo e il volume del rumore per il comfort acustico, possono anche influenzare la percezione soggettiva di altri domini, come la percezione termica [17]. È stato quindi dimostrato che la combinazione di condizioni ambientali appartenenti a domini diversi, come gli effetti combinati delle condizioni acustiche, termiche ed illuminotecniche sul comfort [18], o gli effetti combinati del calore e del rumore sulle attività lavorative, possono avere un impatto significativo sia sulla vivibilità di un ambiente sia sulla produttività [19]. Questi effetti sono stati definiti effetti intermodali ed effetti combinati. È essenziale comprendere l'interazione di diversi fattori ambientali sul comfort umano e sulla produttività, in quanto l'ignorare questi effetti intermodali e combinati può portare a un ambiente interno non confortevole. Inoltre, la possibilità di migliorare la percezione termica di uno spazio intervenendo sulla regolazione di parametri non termici apre scenari di efficientamento energetico significativi soprattutto per edifici con involucri altamente performanti. Pertanto, la progettazione e l'ottimizzazione dell'ambiente interno non dovrebbero concentrarsi su un singolo dominio, ma piuttosto considerare l'interazione di diversi fattori ambientali. Questo approccio è fondamentale per garantire il comfort, il benessere e la produttività degli occupanti dell'edificio.

Nel 2013, Azmoon et al. [20] hanno dimostrato che le condizioni ambientali come l'illuminazione e il comfort termico influenzano la qualità del sonno e l'affaticamento visivo [20]. Clausen et al. [21] hanno mostrato gli effetti dell'esposizione a tre parametri ambientali sulla percezione e sulle prestazioni dei soggetti [21]. Questo esperimento ha testato la combinazione di temperatura, rumore e qualità dell'aria. Questi studi mostrano come sia possibile analizzare il comfort attraverso le combinazioni di diversi domini. Questo approccio permette anche di verificare l'influenza reciproca che i diversi domini hanno sul disagio percepito dal soggetto [22].

La qualità dell'ambiente interno è un aspetto fondamentale nella progettazione degli edifici, poiché ha un impatto diretto sul comfort, sul benessere e sulla salute degli occupanti [23]. L'IEQ comprende vari fattori come la qualità dell'aria, l'illuminazione, le condizioni termiche, l'acustica e l'ergonomia. Il miglioramento dell'IEQ è attualmente protagonista delle ricerche volte a migliorare la qualità della vita degli occupanti degli edifici riducendo lo stress e migliorando la salute.

Ogni edificio ha vincoli di progettazione unici basati sulla sua funzione prevista, ed è essenziale considerare le esigenze dei futuri occupanti sviluppando una strategia di controllo della qualità dell'ambiente interno fin dalle prime fasi di progettazione. La percezione dell'ambiente interno può influenzare notevolmente la sensazione termica degli occupanti, rendendo indispensabile progettare ambienti che favoriscano il comfort attraverso l'utilizzo ottimale dei sistemi di climatizzazione [24]. Garantire un alto livello di IEQ richiede una profonda comprensione dei vari domini che la caratterizzano e dei parametri che li descrivono, in modo che possano essere efficacemente controllati.

Inoltre, investire in IEQ non è solo vantaggioso per il benessere degli occupanti, ma aiuta anche a ridurre il consumo di energia, aumentare la produttività e può anche avere riscontri economici molto positivi riducendo i costi associati all'assenteismo e alle assenze per malattia. È fondamentale quindi riconoscere l'importanza dell'IEQ nella progettazione degli edifici e adottare le misure necessarie per garantire che siano soddisfatte le esigenze di tutti gli occupanti.

Il presente studio è importante per molteplici ragioni. In primo luogo, punta a scoprire quale sia la combinazione di temperatura e colore della luce nella quale i soggetti sono più produttivi ottimizzando così anche l'utilizzo dei sistemi di condizionamento all'interno degli edifici. Inoltre, la ricerca condotta cerca di determinare se l'aspetto dell'ambiente di lavoro influenzi le risposte dei soggetti, in particolare la loro produttività, e di valutare l'efficacia dell'utilizzo della realtà virtuale come strumento per la progettazione degli edifici.

Pertanto, i risultati raggiunti possono fornire preziose informazioni e raccomandazioni per la futura progettazione degli edifici ed avere un impatto significativo nel settore non solo in termini di risparmio energetico ma anche in termini di produttività e benessere degli occupanti. I risultati possono essere di interesse per architetti, ingegneri e proprietari di edifici, che sono costantemente alla ricerca di modi per ottimizzare l'ambiente interno e migliorare le prestazioni complessive dell'edificio. Pertanto, questo studio non è solo importante ma anche molto rilevante nella società odierna in cui l'efficienza energetica e il design incentrato sull'uomo stanno diventando sempre più importanti.

2. Metodologia

Gli esperimenti progettati per questa attività di ricerca sono stati condotti all'interno della NEXT.ROOM [25] con un approccio multi-dominio. All'interno di questo ambiente è stato possibile impostare con precisione le condizioni termiche e di illuminazione e, attraverso numerosi sensori, analizzare in tempo reale le condizioni termo-igrometriche.

In questo studio sono state effettuate due sessioni di test progettate per affrontare entrambi gli obiettivi della ricerca, vale a dire (i) verificare statisticamente l'influenza dell'effetto combinato di specifici stimoli visivi e termici sulla produttività dei soggetti e (ii) verificare statisticamente l'influenza dell'aspetto visivo dell'ambiente di lavoro sulla produttività dei soggetti. Sono state dunque effettuate due serie di test simili, una per ciascun obiettivo, sullo stesso gruppo di soggetti composto da 34 volontari (17 maschi e 17 femmine), di età compresa tra i 18 e i 28 anni.

Durante la prima serie di test, tutti i soggetti sono stati esposti a una combinazione di due ambienti termici (specificamente pensati per essere caldi e freddi) e tre scene di luce (luci neutre o bianche, blu e rosse). Dopo aver analizzato i risultati della prima serie, è stata riprodotta per il test in rappresentazione virtuale (VR) la combinazione di ambienti termici e di illuminazione in cui i soggetti hanno ottenuto risultati migliori.

Nelle sezioni seguenti sono presentati in dettaglio materiali e procedure adottate in entrambe le serie di test.

2.1. Materiali

Le serie di test sono state eseguite nella NEXT.ROOM, una sala prove appositamente progettata per affrontare studi di comfort multi-dominio, al fine di garantire che le condizioni ambientali progettate fossero raggiunte e mantenute costanti durante ogni esperimento. La NEXT.ROOM (situata presso il Campus di Ingegneria dell'Università di Perugia, Italia [25]) è dotata di sensori in grado di monitorare in dettaglio la temperatura dell'aria (precisione $\pm 0.1\%$) e la sua omogeneità nel volume della stanza (a 0.1/0.6/1.1/1.6 m di altezza), temperatura della superficie della parete (precisione $\pm 0.1\%$), umidità relativa (precisione $\pm 3 \text{ g/m}^3$) e velocità dell'aria. L'ambiente termico è condizionato mediante un sistema di ventilazione costituito da un'unità che combina due tecnologie di recupero del calore: uno scambiatore di calore in controcorrente (recupero di calore passivo) e una pompa di calore aria-aria reversibile ($\text{COP} > 4$, calore attivo recupero), progettato per riscaldare l'aria di mandata oltre i 30°C in inverno e raffreddarla fino a 10°C in estate. L'aria di mandata condizionata viene distribuita all'interno del locale attraverso due bocchette poste su un lato del soffitto mentre l'aria espulsa viene estratta da due bocchette poste sul lato opposto del soffitto. L'ambiente di illuminazione è regolato unicamente da due sistemi di illuminazione artificiale: 4 LED ($0.6 \times 0.6 \text{ m}$) con una temperatura di colore correlata (CCT) di quasi 4000 K che forniscono 500 lx sulla superficie della scrivania e 2 riflettori RGB caratterizzati da 10 livelli di controllo della regolazione della luce e 14 diversi colori di emissione. Entrambi i sistemi sono stati utilizzati per ottenere le combinazioni di CCT ed illuminamento volute nelle diverse fasi del test, come specificato nella sezione 2.2.

2.1.1. Test di produttività e sondaggio sulla percezione

Il test di produttività effettuato durante gli esperimenti è chiamato d2 [26], un test costituito da una sequenza di lettere (p e d) che può includere delle barre verticali poste sotto o sopra le lettere. L'obiettivo del test è individuare tutte le lettere "d" con due barre poste sopra o sotto. Il test è stato stampato su fogli di $1.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ e appeso al muro. Durante i test, utilizzando una tastiera e leggendo i caratteri in ordine da sinistra verso destra e dall'alto verso il basso (come un comune testo), i soggetti hanno premuto il tasto "1" se il carattere letto era quello corretto mentre "2" se era errato. La produttività dei soggetti è stata quantificata valutando sia la quantità di caratteri esaminati nel tempo limite sia l'accuratezza delle risposte. Venivano infatti assegnate delle penalità temporali per ogni inesattezza. Nello specifico, il tempo impiegato per terminare i test è stato espresso in secondi e ad esso sono stati aggiunti 0.8 secondi per ogni errore commesso. Il valore di 0.8 secondi rappresenta il tempo impiegato da un soggetto per rendersi conto di aver sbagliato, cancellare la risposta e scrivere quella corretta (Questo valore è stato determinato da test sperimentali effettuati in laboratorio). Poiché il punteggio è rappresentativo della velocità con cui il test è stato completato, minore è la durata del test, più produttivo è stato il soggetto. In entrambi gli esperimenti, ogni volta che i soggetti hanno terminato un test, hanno compilato un sondaggio in cui hanno espresso la loro percezione di:

- Sensazione termica
- Comfort termico
- Comfort visivo

- Comfort generale
- Immersività (solo nell'esperimento con la realtà virtuale)

Queste informazioni percettive sono state indicate su una scala a cinque punti che va da 1 a 5 (dove uno significa insufficiente e 5 significa ottimo) per il comfort e l'immersività, in base a quanto positiva è stata la risposta. Nel caso della sensazione termica invece la scala va da "freddo" (-3) a "caldo" (+3) dove la neutralità corrisponde a 0.

2.2. Procedura degli esperimenti

Gli orari della giornata in cui effettuare i test sono stati scelti per ridurre al minimo la possibilità di influenzare la produttività dei soggetti con fattori esterni. Tutti i soggetti sono stati esaminati almeno un'ora dopo il risveglio, lontano dai pasti (almeno un'ora dopo) e con divieto di assunzione di sostanze eccitanti quali bevande zuccherate, caffè o sigarette nell'ora precedente il test. Queste indicazioni evitano che il soggetto sia affetto da sonnolenza o agitazione [27].

Gli esperimenti sono durati circa un'ora ciascuno e si sono svolti al mattino e al pomeriggio. Gli orari includevano sei test al giorno (uno all'ora) dalle 10:00 alle 13:00 e dalle 15:00 alle 18:00.

Per evitare che i soggetti non percepissero correttamente l'ambiente termico interno o fossero influenzati dall'ambiente termico esterno, sono stati sottoposti ad una prima fase di acclimatamento di 20 minuti [28]. Una volta entrati nella stanza, ad ogni volontario è stato chiesto di mettersi comodo e di scegliere l'abbigliamento da mantenere costante durante tutta la durata dell'esperimento. In questa fase (dalla durata minima di 20 minuti), la condizione di luce artificiale nella stanza è stata mantenuta sui 4000 K di temperatura di colore della luce.

Le specifiche sulla procedura di ogni serie di test sono fornite nelle seguenti sottosezioni.

2.2.1. Prima serie di test: effetto combinato di stimoli termici e visivi sulla produttività

Durante la prima serie di test, le condizioni termiche sono state scelte per poter garantire ai soggetti condizioni costanti di "freddo" o "caldo". In particolare, i valori di temperatura dell'aria sono stati scelti consultando la norma UNI EN ISO 7730 prendendo a riferimento le condizioni termiche corrispondenti ad un voto medio previsto (PMV) pari a -2 (prova fredda) e +2 (prova calda). Poiché gli esperimenti si sono svolti nella stagione invernale, le temperature durante i test sono state fissate a 20 °C durante gli esperimenti a freddo e a 25 °C durante gli esperimenti a caldo. Inoltre, sono stati evitati i fenomeni di disagio termico locale verificando le seguenti condizioni durante tutto l'esperimento all'interno della stanza:

- Differenza di temperatura verticale inferiore a 3 °C
- Temperatura della superficie del pavimento superiore a 19 °C
- Asimmetria radiante inferiore a 5 °C
- Umidità relativa tra il 30% e il 50%
- Velocità dell'aria inferiore a 0.16 m/s

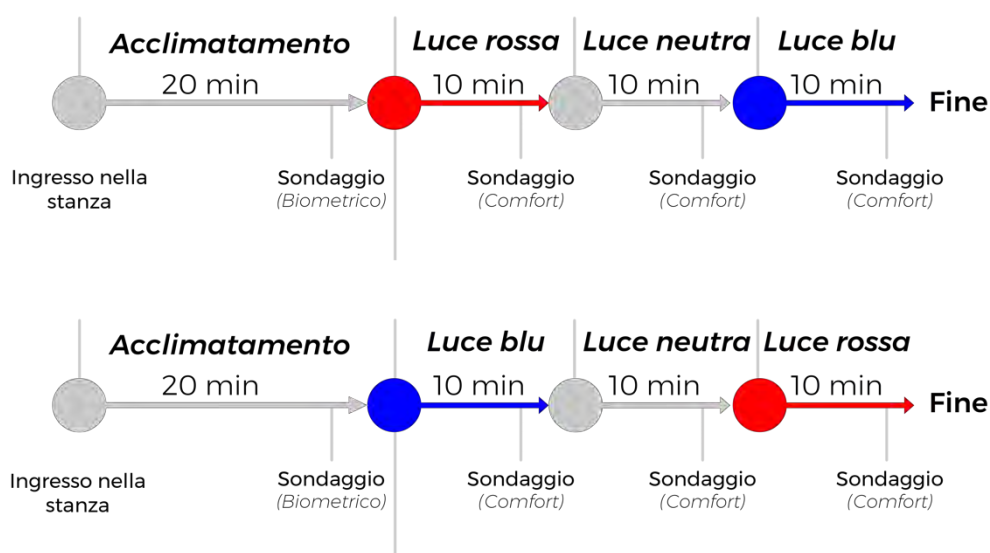
Per quanto riguarda le scene di luce, entrambi i sistemi di illuminazione artificiale sono stati utilizzati in combinazione. A seconda della fase dell'esperimento, la stanza è stata illuminata in tre modi diversi: luce biancastra (CCT=4000K), luce colorata blu (CCT=5600K) e rossa (CCT=3200K). Per evitare che l'ordine di esposizione alla luce o alla temperatura influisse sul risultato finale, metà dei partecipanti ha iniziato l'esperimento con luce blu e l'altra metà con luce rossa. Lo stesso è stato fatto con la temperatura effettuando la prima prova in condizioni termiche calde per metà dei partecipanti e fredde per l'altra metà.

La procedura sperimentale messa in atto per la prima serie di test può essere riassunta nelle seguenti fasi (come anche presentato in **Figura 1**):

1. I soggetti entrano nella stanza e inizia la fase di acclimatamento di 20 minuti in cui sono state spiegate le regole e le modalità di svolgimento del test.
2. Al termine dei 20 minuti di acclimatamento si accendono i faretti RGB e quando i soggetti sono pronti per iniziare il test fanno partire il timer che indica l'inizio del test di produttività.
3. Dopo 5 minuti, i soggetti smettono di digitare se non hanno ancora terminato il test. (Nel caso in cui qualcuno termina il test prima dei 5 minuti, ferma il timer avviato all'inizio della prova, il quale riporta il tempo impiegato per terminare)
4. I soggetti riposano per 5 minuti durante il completamento del sondaggio precedentemente descritto. Quindi i riflettori RGB vengono spenti ed inizia la quinta fase.
5. Il secondo, terzo e quarto passaggio vengono ripetuti due volte per valutare sia l'ambiente con luce neutra che quello con faretti RGB opposto a quello iniziale (blu se il test è partito con il rosso e rosso se è partito con il blu)
6. Al termine della terza prova, i soggetti escono dalla stanza.

Al termine dell'esperimento ogni soggetto ha ripetuto l'intera prova due volte (in due giorni diversi e non consecutivi) nelle due condizioni ambientali definite, cioè 20 °C e 25 °C.

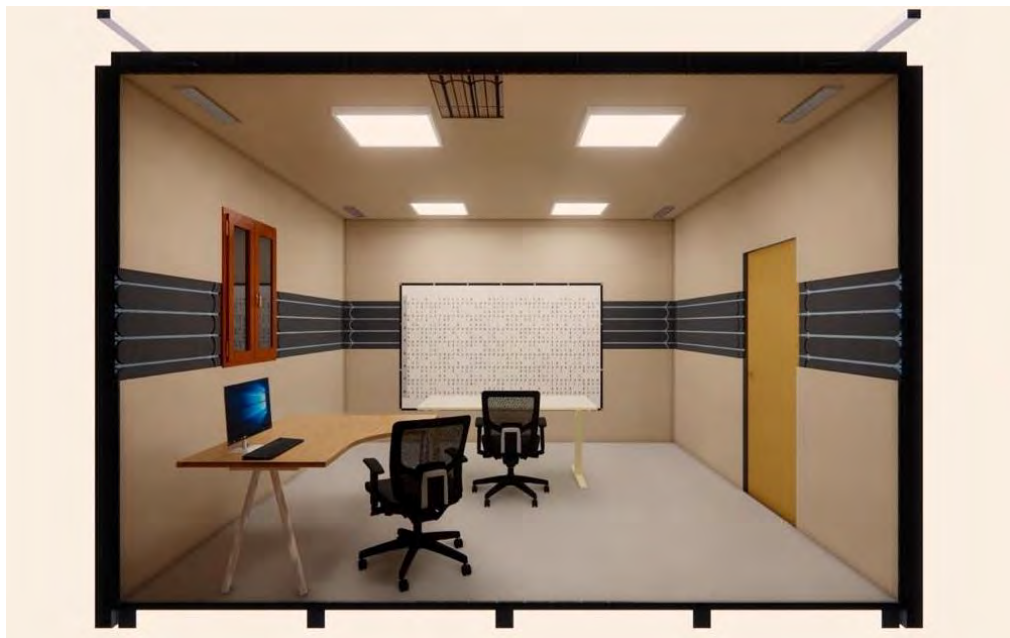
Figura 1 Illustrazione grafica delle fasi del primo esperimento.



2.2.2. Seconda serie di test: influenza dell'aspetto dell'ambiente sulla produttività

La seconda serie di test mirava a capire se l'aspetto dell'ambiente di lavoro (finiture, mobili, materiali e colori) influenza le risposte dei soggetti. La temperatura e il colore della luce sono stati mantenuti costanti ed è stata utilizzata la combinazione che è risultata più produttiva dalla prima serie di esperimenti. L'unico elemento che è stato modificato durante l'esperimento è stato l'ambiente virtuale in cui il soggetto era immerso. Questa serie di esperimenti si è svolta all'interno della NEXT.ROOM con l'utilizzo di strumenti VR. Le scene virtuali utilizzate per gli esperimenti sono state modellate nel software "SketchUp 3D" [29] e visualizzate dai soggetti tramite il visore di realtà virtuale "Oculus Rift S" [30] in combinazione con la modalità di rendering in tempo reale del software "Enscape" [31]. Gli ambienti rappresentati avevano lo scopo di simulare la stessa sala prove ma con finiture e arredi più curati. Per la prima scena (Figura 2), è stata ricreata la NEXT.ROOM nel suo stato attuale, così come l'hanno vista i soggetti entrando. La seconda scena (Figura 3), invece, presentava sempre la stessa stanza ma con arredi e finiture differenti e aveva lo scopo di simulare un ambiente di lavoro medio. L'illuminazione è stata mantenuta costante poiché un cambiamento avrebbe potuto alterare i risultati.

Figura 2. Rendering della prima scena (stato attuale della NEXT.ROOM).



La procedura sperimentale messa in atto per la seconda serie di test può essere riassunta nelle seguenti fasi (come anche presentato in Figura 4):

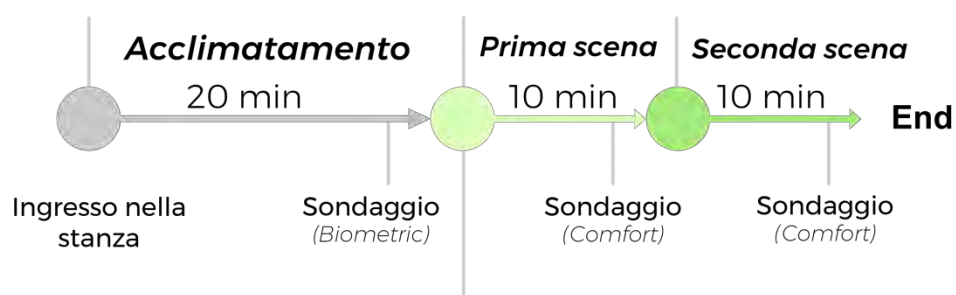
1. I soggetti entrano nella stanza e iniziano la fase di acclimatazione di 20 minuti in cui sono state spiegate le regole e le modalità di svolgimento del test.
2. Al termine dei 20 minuti di acclimatazione, il soggetto indossa il visore VR e la mano viene posizionata nella posizione corretta per premere i pulsanti corretti della tastiera. Viene quindi effettuata una simulazione per verificare che il soggetto abbia posizionato correttamente la mano. Quando il soggetto è pronto, scatta il timer per l'inizio del test.

3. Dopo 5 minuti, i soggetti smettono di digitare se non hanno ancora terminato il test. (Nel caso in cui qualcuno termina il test prima dei 5 minuti, ferma il timer avviato all'inizio della prova, il quale riporta il tempo impiegato per terminare)
4. I soggetti si riposano 5 minuti mentre completano il sondaggio descritto precedentemente. Contemporaneamente la scena visualizzata nel visore viene cambiata dalla prima scena alla seconda scena.
5. La seconda, la terza e la quarta fase vengono ripetute e al termine della seconda prova l'esperimento è terminato e i soggetti lasciano la stanza.

Figura 3 Rendering della seconda scena (stato esteticamente migliorato della NEXT.ROOM).



Figura 4 Illustrazione grafica delle fasi del secondo esperimento.



2.3. Analisi statistica

L'analisi statistica è stata effettuata analizzando le variabili ottenute durante i sondaggi compilati durante le prove ed i punteggi.

Per l'analisi sono state utilizzate le seguenti variabili:

- VR_Comfort = Indica su una scala crescente da 1 a 5 il comfort dei soggetti durante l'utilizzo della realtà virtuale;
- Overall_Comfort = Indica su una scala crescente da 1 a 5 il comfort complessivo;
- Thermal_sensation = Indica la sensazione termica su una scala a 7 punti dove -3 è molto freddo e +3 è molto caldo;
- Thermal_comfort = Indica il comfort termico in relazione alla sensazione termica percepita;
- Visual_comfort = Indica in scala crescente da 1 a 5 il comfort visivo;
- Immersività = Indica su una scala crescente da 1 a 5 l'Immersività della realtà virtuale;
- Score = Indica i punteggi ottenuti nei diversi test.

Questa analisi statistica utilizzata per analizzare la prima fase degli esperimenti mira a determinare l'influenza che le diverse condizioni di luce artificiale e temperatura hanno sulla produttività dei soggetti. Per determinare questa influenza è stato utilizzato il metodo "Two-Way Repeated Measures ANCOVA". Sono state quindi effettuate due analisi:

- la prima ha valutato solo l'influenza della luce e della temperatura come sul punteggio finale senza distinzioni di sesso;
- la seconda ha valutato lo stesso effetto considerando però l'influenza del genere dei soggetti.

La seconda serie di test è stata analizzata tramite una semplice repeated measures ANCOVA. Variabili come età e livello di resistenza termica dell'abbigliamento dei soggetti sono state controllate direttamente nella procedura di selezione del campione limitando il range di età e dando precise disposizioni di vestiario ai soggetti coinvolti. La variazione della percezione di comfort e della sensazione dei soggetti, nonché il comfort nell'indossare il VR sono stati tenuti in conto andando a controllare per la variazione dei giudizi dati dai diversi soggetti tra i due test. variabile dipendente.

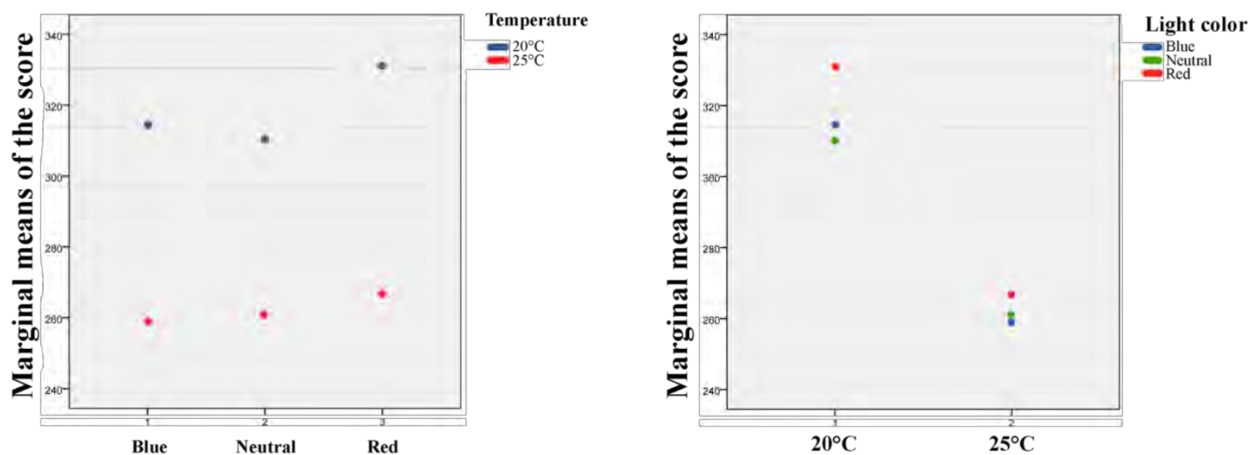
3. Risultati

3.1. Effetto combinato di stimoli termici e visivi sulla produttività

I grafici in Figura 5 mostrano le medie marginali della produttività quantificata (punteggio del test d2 in secondi) al variare dell'ambiente termico (a sinistra) e delle scene di illuminazione (a destra). L'ambiente termico sembra avere una maggiore influenza sul punteggio finale con una prestazione migliore del 23% in caso di temperature più elevate (punteggi inferiori e quindi minor durata del test). I test eseguiti a 20 °C hanno un punteggio medio di 320 secondi mentre quelli eseguiti a 25 °C hanno un punteggio medio di 265 secondi. Le scene di illuminazione, invece, sembrano non influenzare i risultati dei test. Sulla base di questi risultati, la seconda serie di test è stata condotta considerando la

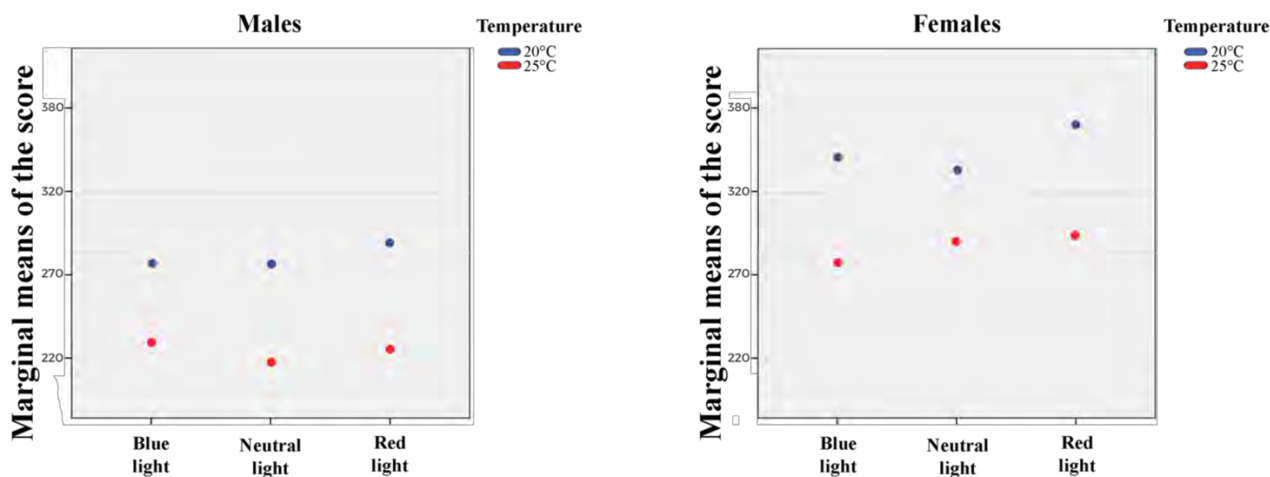
combinazione di stimoli termici e visivi migliore: temperatura dell'aria pari a 25 °C e colorazione della luce neutra.

Figura 5. Interazione temperatura-punteggio (a sinistra) e luce-punteggio (a destra).



I due grafici in Figura 6 evidenziano le differenze nei punteggi dei test d2 in diverse combinazioni di ambienti termici e visivi distinti per genere. Anche in questo caso si può notare come la temperatura influenzi il punteggio dei soggetti, sia maschi che femmine, mentre la luce artificiale non influisce in maniera significativamente apprezzabile sul risultato.

Figura 6. Interazione temperatura-punteggio nei soggetti di sesso femminile (a sinistra) e nei soggetti di sesso maschile (a destra).

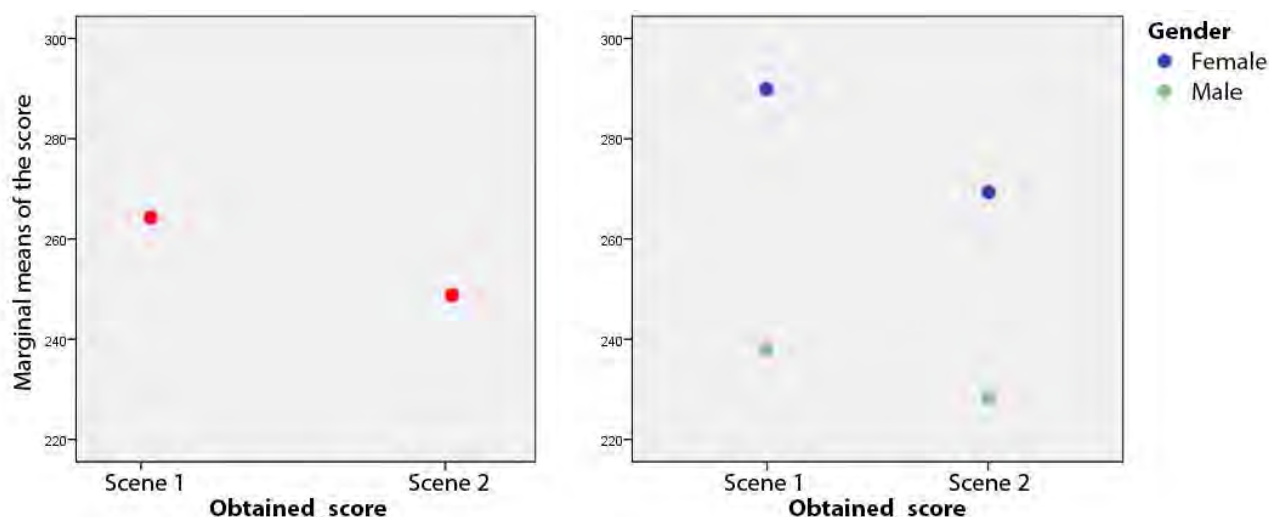


È inoltre possibile notare come i punteggi ottenuti dai soggetti di sesso femminile siano superiori a quelli dei soggetti di sesso maschile in tutte le condizioni di luce e temperatura. Dalla struttura del test, più alti sono i punteggi, meno produttivo è stato un soggetto.

3.2. Influenza dell'aspetto dell'ambiente sulla produttività

L'obiettivo di questa analisi statistica è valutare l'influenza dell'aspetto dell'ambiente, simulato in VR, sulla produttività dei soggetti, controllando per la variazione della percezione di immersività nella realtà virtuale e il comfort termico, visivo e generale. I risultati dimostrano che c'è una variazione significativa nella produttività dei soggetti esposti alle due scene in VR. È inoltre possibile notare come i punteggi ottenuti dai soggetti di sesso femminile varino maggiormente in funzione della scena considerata (vedere Figura 7).

Figura 7. Interazione temperatura-punteggio nei soggetti di sesso femminile (a sinistra) e nei soggetti di sesso maschile (a destra).



4. Discussione

Tutti i risultati ottenuti attraverso queste campagne sperimentali sono considerati validi solo per un campione di soggetti con caratteristiche comparabili a quelle analizzate (ovvero giovani adulti). I risultati potrebbero anche essere molto diversi se la fascia d'età dei soggetti fosse modificata.

I risultati ottenuti attraverso l'analisi statistica mostrano un'influenza molto diversa del colore della luce artificiale e della temperatura sui punteggi ottenuti dai soggetti. Il colore della luce con cui i soggetti eseguivano gli esperimenti non era apprezzabilmente rilevante per il loro punteggio. I grafici mostrano che i punteggi erano molto simili in tutti e tre i colori esaminati. Per quanto riguarda la temperatura dell'ambiente, invece, è emersa una forte influenza della temperatura sulle prestazioni dei soggetti. In entrambe le analisi è stato riscontrato che i soggetti hanno ottenuto punteggi inferiori (maggiore produttività) negli esperimenti in cui la temperatura della stanza era impostata a 25 °C, cioè ambiente caldo. Questo risultato è coerente con precedenti ricerche in letteratura. Infatti, Schiavon et al. hanno analizzato gli effetti sulle prestazioni cognitive e sul comfort a temperature di 23 °C, 26 °C e 29 °C. Gli esperimenti sono durati 90 minuti ciascuno in sessioni separate e hanno coinvolto cinquantasei persone. Dai loro esperimenti è emerso che la migliore prestazione cognitiva (come

indicato dalla velocità con cui veniva svolto il compito assegnato) è stata ottenuta a 26 °C [32]. Tuttavia, altri studi mostrano risultati opposti [33–35]. Confrontare i risultati di questi studi è molto difficile poiché possono essere influenzati da diversi fattori. I test di produttività utilizzati in alcuni di questi studi consistevano in una serie di semplici calcoli matematici. Tale test potrebbe anche essere influenzato dalle abitudini dei soggetti o dalla loro intelligenza. Un soggetto abituato a eseguire molti calcoli a mente presenterà risultati migliori in qualsiasi condizione ambientale rispetto a uno che non è abituato. L'appartenenza geografica dei soggetti potrebbe aver influito sulle loro abitudini termiche. Un singolo studio in un'area geografica diversa potrebbe portare a risultati diversi. I soggetti che hanno preso parte agli esperimenti analizzati in questo studio fanno parte di una categoria relativamente ristretta di persone e, di conseguenza, i risultati ottenuti possono essere molto diversi anche da un campione di soggetti di un'altra fascia di età o area geografica.

L'influenza del colore della luce artificiale sulla produttività dei soggetti dagli esperimenti condotti è risultato non apprezzabilmente significativo. Gli studi presenti in letteratura e relativi alla produttività e alla luce ambientale non mostrano sperimentazioni con diversi colori di luce. Questi esperimenti ricercano solamente le migliori condizioni di abbagliamento, luminosità e visibilità ma senza considerare il colore della luce. Gli studi che invece analizzano il colore della luce negli ambienti di lavoro hanno come obiettivo la ricerca del comfort degli occupanti ma senza studiare la produttività in contesti diversi. La mancanza di esperimenti che mettano in relazione il colore della luce e la produttività del soggetto può essere spiegata dal fatto che lo studio della produttività del soggetto in condizioni ambientali non è una priorità della comunità scientifica. Questa motivazione può essere confermata dal fatto che anche la ricerca sul comfort multi-dominio è ancora in fase di sviluppo, seppure di enorme importanza.

La seconda analisi, dividendo i risultati per genere, ha mostrato che i soggetti di sesso maschile hanno ottenuto risultati migliori a parità di condizioni ambientali rispetto ai soggetti di sesso femminile (Figura 7). Dai grafici è possibile notare che in tutte e sei le condizioni sperimentate, i soggetti di sesso femminile hanno ottenuto un punteggio di circa 70 punti superiore a quello maschile (un punteggio maggiore indica maggior tempo per terminare il test e, di conseguenza, minore produttività). Confrontando la media dei risultati a 20°C, i maschi hanno una produttività superiore del 25% rispetto alle femmine. Confrontando invece la media dei risultati a 25°C, i maschi risultano essere più produttivi al 20%.

Per quanto riguarda il ruolo dell'ambiente simulato in realtà aumentata, i test sembrano indicare l'esistenza di una relazione significativa tra la produttività del soggetto e il contesto riprodotto nella scena in realtà aumentata, in particolare per i soggetti di sesso femminile. Va comunque considerato che tutti i soggetti sono stati sottoposti alla scena 2 dopo aver svolto il test di concentrazione esposti alla scena 1. Ciò potrebbe avere parzialmente influenzato i risultati.

Nella letteratura scientifica sono pochi gli studi sulla correlazione tra l'aspetto di un ambiente e la produttività dei soggetti. La mancanza di studi simili è dovuta al recente sviluppo degli studi sul comfort multi-dominio, come mostrato nei paragrafi precedenti, e al fatto che attualmente viene data priorità ad altri fattori di comfort rispetto alla produttività e all'aspetto dell'ambiente.

Tuttavia, a conferma di quanto osservato, alcuni studi scientifici hanno trovato una correlazione tra produttività e ambiente. Mulville et al. [36] hanno dimostrato che l'ambiente circostante può avere un impatto significativo sul comfort, sulla salute e sul benessere degli occupanti, il che ha implicazioni sulle prestazioni degli occupanti. Tuttavia, a differenza del presente esperimento, questo studio non valuta la produttività riguardante il solo aspetto dell'ambiente ma nella sua qualità complessiva, considerando quindi anche altri fattori di comfort. Il risultato potrebbe essere stato influenzato da altri fattori ambientali diversi dall'aspetto dell'ambiente da solo. Uno studio pubblicato da Hansika et al. [37] analizza l'influenza del design dell'ufficio sulla produttività degli occupanti, dimostrando una significativa relazione tra il design dell'ufficio e la produttività dei dipendenti.

Altri studi in letteratura mostrano risultati molto simili a quelli ottenuti in questo studio. [34] B. P. Haynes [38] ha pubblicato uno studio in cui veniva ricercata la correlazione tra produttività e layout dell'ufficio, rivelando che la connessione tra le tre componenti significative del layout dell'ufficio, i modelli di lavoro degli occupanti dell'ufficio e la produttività, non era presente.

In letteratura sono presenti studi contrastanti con risultati non sempre simili. Ciò è dovuto ai molti fattori che potrebbero influenzare il risultato. I risultati ottenuti in questo studio potrebbero quindi essere stati influenzati da fattori che non sono stati presi in considerazione e che hanno conseguentemente alterato il risultato finale. La caratterizzazione del campione, ad esempio, potrebbe influenzare il risultato finale. L'uso della realtà virtuale potrebbe anche aver influito sul risultato anche se entrambi i test del secondo esperimento sono stati fatti in realtà virtuale e i risultati ottenuti sono molto simili a quelli ottenuti nell'ambiente reale.

5. Conclusioni

L'obiettivo dei test svolti in questo studio era duplice: determinare se e come l'aspetto di un ambiente possa influire sulla produttività dei suoi occupanti e determinare quale combinazione di parametri termici e illuminotecnici possa portare un soggetto ad essere più o meno produttivo. Il primo esperimento ha mostrato che la produttività dei soggetti è risultata maggiore con una temperatura dell'aria interna di 25 °C. Il secondo esperimento ha mostrato che migliorando l'aspetto dell'ambiente in cui il soggetto esegue il test, il punteggio finale rimane molto simile a quello ottenuto nell'ambiente precedente. L'uso della realtà virtuale è ancora poco diffuso a causa dell'elevato costo delle apparecchiature necessarie per utilizzarla e alle difficoltà sociali di utilizzare una tecnologia simile. L'esperimento in questione ha coinvolto soggetti di giovane età abituati a guardare quotidianamente immagini attraverso degli schermi ma lo stesso esperimento avrebbe potuto portare delle difficoltà non banali se avesse coinvolto soggetti con abitudini diverse. La ricerca in questo settore da parte delle principali aziende tecnologiche è un sintomo che questa tecnologia potrebbe essere diffusa nei prossimi anni. L'uso della realtà virtuale è inoltre perfettamente compatibile con lo studio del comfort multi-dominio. Grazie a questa tecnologia è possibile simulare e analizzare contesti, anche molto elaborati, semplicemente modellandoli negli appositi software. I visori per realtà virtuale possono simulare stimoli visivi attraverso lenti e stimoli sonori presenti nell'ambiente virtuale e percepiti dal

soggetto attraverso auricolari o altoparlanti nel visore stesso. Questo approccio consente di espandere le possibilità di simulazione all'interno di una sala prove, aggirando alcuni dei limiti attuali.

Un possibile sviluppo di questo studio potrebbe essere quello di replicare la prima serie di test ma combinando la luce naturale con quella artificiale. La seconda serie di test potrebbe invece essere replicata analizzando singolarmente i fattori che sono stati modificati nelle due scene come, ad esempio, i diversi layout dell'ambiente, i diversi colori dello stesso ambiente oppure gli arredi.

Un altro possibile sviluppo di questo lavoro è una sperimentazione equivalente a quella effettuata nella prima serie di test ma con temperature più vicine ai 25 °C. Il risultato mostra che i soggetti sono stati più produttivi a questa temperatura ma non significa che sia in assoluto quella ottimale. Sperimentare temperature di 23 °C, 25 °C e 27 °C permetterebbe di determinare più in dettaglio la condizione in cui un soggetto è più produttivo. Sarebbe anche possibile effettuare gli stessi esperimenti descritti in questo lavoro ma con un campione appartenente ad una fascia di età superiore. Ciò consentirebbe di verificare se i risultati ottenuti sono validi per un campione più ampio di quello esaminato o se sono limitati a soggetti con caratteristiche pari a quelli discussi.

Infine, i risultati ottenuti possono essere significativi in ambito professionale. Infatti, grazie ai risultati mostrati, le aziende possono migliorare la produttività dei propri dipendenti con semplici accortezze. Queste misure possono far risparmiare molte risorse e ottimizzare l'ambiente di lavoro. L'ottimizzazione della produttività, vista soprattutto la fascia di età dei soggetti che hanno partecipato alle prove, è un fattore determinante anche per gli studenti che vogliono massimizzare il proprio tempo e le proprie risorse.

Bibliografia

1. Schweizer, C., Edwards, R. D., Bayer-Oglesby, L., Gauderman, W. J., Ilacqua, V., Juhani Jantunen, M., ... Künzli, N. (2006). Indoor time–microenvironment–activity patterns in seven regions of Europe. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 2007 17:2, 17(2), 170–181. <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500490>
2. Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., ... Engelmann, W. H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 2001 11:3, 11(3), 231–252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
3. Rupp, R. F., Vásquez, N. G., & Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178–205. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.07.047>
4. De Dear, R. J., Akimoto, T., Arens, E. A., Brager, G., Candido, C., Cheong, K. W. D., ... Zhu, Y. (2013). Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*, 23(6), 442–461. <https://doi.org/10.1111/INA.12046>
5. Galasiu, A. D., & Veitch, J. A. (2006). Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review. *Energy and Buildings*, 38(7), 728–742. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2006.03.001>

6. Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F., & Pagliano, L. (2015). A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 1016–1033. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.03.062>
7. Ma, K. W., Wong, H. M., & Mak, C. M. (2018). A systematic review of human perceptual dimensions of sound: Meta-analysis of semantic differential method applications to indoor and outdoor sounds. *Building and Environment*, 133, 123–150. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.02.021>
8. Vardaxis, N.-G., Bard, D., & Waye, K. P. (2018). Review of acoustic comfort evaluation in dwellings-part I: Associations of acoustic field data to subjective responses from building surveys. *Building Acoustics*, 25(2), 151–170. <https://doi.org/10.1177/1351010X18762687>
9. Daisey, J. M., Angell, W. J., & Apte, M. G. (2003). Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor Air*, 13(1), 53–64. <https://doi.org/10.1034/J.1600-0668.2003.00153.X>
10. Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*, 14(SUPPL. 7), 51–58. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0668.2004.00273.X>
11. Schweiker, M., Ampatzi, E., Andargie, M. S., Andersen, R. K., Azar, E., Barthelmes, V. M., ... Zhang, S. (2020). Review of multi-domain approaches to indoor environmental perception and behaviour. *Building and Environment*, 176, 106804. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.106804>
12. Alamirah, H., Schweiker, M., & Azar, E. (2022). Immersive virtual environments for occupant comfort and adaptive behavior research – A comprehensive review of tools and applications. *Building and Environment*, 207, 108396. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108396>
13. Adair, J. G. (1984). The Hawthorne effect: A reconsideration of the methodological artifact. *Journal of Applied Psychology*, 69(2), 334–345. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.69.2.334>
14. Jones, S. R. G. (1992). Was There a Hawthorne Effect? <https://doi.org/10.1086/230046>, 98(3), 451–468. <https://doi.org/10.1086/230046>
15. ISO. (2005). ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. *Management*, 3.
16. Lin, M., Ali, A., Andargie, M. S., & Azar, E. (2021). Multidomain Drivers of Occupant Comfort, Productivity, and Well-Being in Buildings: Insights from an Exploratory and Explanatory Analysis. *Journal of Management in Engineering*, 37(4), 04021020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000923](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000923)
17. Fanger, P. O., Breum, N. O., & Jerking, E. (2007). Can Colour and Noise Influence Man's Thermal Comfort? <http://dx.doi.org/10.1080/00140137708931596>, 20(1), 11–18. <https://doi.org/10.1080/00140137708931596>
18. Yang, W., & Moon, H. J. (2019). Combined effects of acoustic, thermal, and illumination conditions on the comfort of discrete senses and overall indoor environment. *Building and Environment*, 148, 623–633. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.11.040>

19. Hancock, P. A., & Pierce, J. O. (2010). Combined Effects of Heat and Noise on Human Performance: A Review. <http://dx.doi.org/10.1080/15298668591395346>, 46(10), 555–566. <https://doi.org/10.1080/15298668591395346>
20. Azmoon, H., Dehghan, H., Akbari, J., & Souri, S. (2013). The relationship between thermal comfort and light intensity with sleep quality and eye tiredness in shift work nurses. *Journal of environmental and public health*, 2013, 639184. <https://doi.org/10.1155/2013/639184>
21. Clausen, G., & Wyon, D. P. (n.d.). The influence of exposure to multiple indoor environmental parameters on human perception, performance and motivation Nutritional effects on performance View project IAQ effects on sleep View project. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/265989251>
22. Clausen, G., & Wyon, D. P. (2008). The combined effects of many different indoor environmental factors on acceptability and office work performance. *HVAC and R Research*, 14(1), 103–113. <https://doi.org/10.1080/10789669.2008.10390996>
23. WBDG Sustainable Committee. (2013). Enhance Indoor Environmental Quality (IEQ) | Whole Building Design Guide. *Whole Building Design Guide*.
24. Vittori, F., Pigliautile, I., & Pisello, A. L. (2021). Subjective thermal response driving indoor comfort perception: A novel experimental analysis coupling building information modelling and virtual reality. *Journal of Building Engineering*, 41, 102368. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102368>
25. Vittori, F., Chiatti, C., Pigliautile, I., & Pisello, A. L. (2022). The NEXT.ROOM: Design principles and systems trials of a novel test room aimed at deepening our knowledge on human comfort. *Building and Environment*, 211, 108744. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108744>
26. Bates, M. E., & Lemay, E. P. (2004). The d2 Test of Attention: Construct validity and extensions in scoring techniques. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 10(3), 392–400. <https://doi.org/10.1017/S135561770410307X>
27. APA PsycNet. (n.d.). Retrieved 14 January 2023, from <https://psycnet.apa.org/buy/1987-14916-001>
28. Van Craenendonck, S., Lauriks, L., Vuye, C., & Kampen, J. (2018). A review of human thermal comfort experiments in controlled and semi-controlled environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3365–3378. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.10.053>
29. 3D Design Software | 3D Modeling on the Web | SketchUp. (n.d.). Retrieved 14 January 2023, from <https://www.sketchup.com/>
30. Oculus Rift S: PC-Powered VR Gaming Headset | Oculus. (n.d.). Retrieved 14 January 2023, from https://www.oculus.com/rift-s/?locale=en_EN
31. Enscape™ - Real-Time Rendering and Virtual Reality | Enscape. (n.d.). Retrieved 14 January 2023, from <https://enscape3d.com/>
32. Schiavon, S., Yang, B., Donner, Y., Chang, V. W. C., & Nazaroff, W. W. (2017). Thermal comfort, perceived air quality, and cognitive performance when personally controlled air movement is used by tropically acclimatized persons. *Indoor Air*, 27(3), 690–702. <https://doi.org/10.1111/INA.12352>

33. Lan, L., Xia, L., Hejjo, R., Wyon, D. P., & Wargocki, P. (2020). Perceived air quality and cognitive performance decrease at moderately raised indoor temperatures even when clothed for comfort. *Indoor air*, 30(5), 841–859. <https://doi.org/10.1111/INA.12685>
34. Niemelä, R., Hannula, M., Rautio, S., Reijula, K., & Railio, J. (2002). The effect of air temperature on labour productivity in call centres—a case study. *Energy and Buildings*, 34(8), 759–764. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00094-4)
35. Seppanen, O., Fisk, W. J., Lei, Q. H., Org, E., & Seppänen, O. (2006). Title Room temperature and productivity in office work Permalink <https://escholarship.org/uc/item/9bw3n707> Publication Date Room Temperature and Productivity in Office Work Room Temperature and Productivity in Office Work. Retrieved from <http://www.hut.fi>
36. Mulville, M., Callaghan, N., & Isaac, D. (2016). The impact of the ambient environment and building configuration on occupant productivity in open-plan commercial offices. *Journal of Corporate Real Estate*, 18(3), 180–193. <https://doi.org/10.1108/JCRE-11-2015-0038/FULL/XML>
37. Hansika, W. A. M., & Amarathunga, P. A. B. H. (2016). Impact of Office Design on Employees' Productivity; a Case Study of Banking Organizations of North Western Province in Sri Lanka. Retrieved from <https://ssrn.com/abstract=2910255> <https://ssrn.com/abstract=2910255> Electronic copy available at: <https://ssrn.com/abstract=2910255>
38. Haynes, B. P. (2008). The impact of office comfort on productivity. *Journal of Facilities Management*, 6(1), 37–51. <https://doi.org/10.1108/14725960810847459/FULL/XML>

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Evaluation of different inorganic salts in Salting-out process of γ -valerolactone/water solutions

Giacomo Fabbrizi^{1,*}, Leonardo Lorenzi¹, Mattia Gelosia¹, Tommaso Giannoni¹, Franco Cotana¹ and Andrea Nicolini¹

¹ Biomass Research Centre (CRB), CIRIAF, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti 63, 06125, Perugia, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: giacomo.fabbrizi@studenti.unipg.it

Abstract: Lignocellulosic residual biomass is a relevant source of carbohydrates with high industrial significance. However, many factors, in particular lignin content, can limit the digestibility of cellulose and hemicellulose to simple sugars. Pre-treatments aim to improve the digestibility of lignocellulosic biomass. Organosolv is an efficient fractionation process to produce a cellulose-rich pulp with >90% and <5% cellulose and lignin content, respectively. The main problem is the high solvent consumption, which is responsible for the economic cost and environmental impacts of the process. In this study, a solvent regeneration method using the salting-out process to separate organic and inorganic solvents was evaluated. The organic solvent γ -valerolactone (GVL) in solution with water (60% w/w) was separated with different salts NaCl and Na₂SO₄. The salting-out process demonstrated high efficiency in GVL recovery. The study paves the way for improving the industrial feasibility and sustainability of the organosolv process in lignocellulosic fractionation. The use of salts, industrially considered a waste products, further enhances its suitability.

Keywords: organosolv liquids recovery; GVL/H₂O solutions; lignin valorization; circular economy; sustainable development; technological innovation; green chemistry.

1. Introduction

1.1. Biomass and Organosolv Pretreatment

Valorization of residual lignocellulosic biomass is a key element in achieving sustainable development goals and in fighting against climate change [1]. Lignocellulosic residues are an abundant source of secondary raw materials such as cellulose, hemicellulose and lignin with high significance for

industrial applications in biofuel and biochemicals production chain [2]. The usage of the embedded saccharides source of the biomass requires the use of fractioning processes of the plant fiber to improve its accessibility. High lignin content, which hinders the breakdown of cellulose and hemicellulose into simple sugars through cellulolytic enzymes is a limiting factor.

To address this issue, pre-treatments such as organosolv are employed to enhance digestibility as an effective fractionation process that produces a cellulose-rich pulp with a high cellulose content (>90%) and a low lignin content (<5%) [3]. However, the process is associated with high solvent consumption, which leads to significant economic and environmental costs. To overcome this challenge, a solvent regeneration method to separate the organic and inorganic solvents should be considered [4]. Organic compounds containing multiple polar functionalities, such as amides, alcohols, carboxyl, and amines, are often more soluble in water, which can lead to difficulties in aqueous workups. However, there are several techniques available to address this issue, which fall under the umbrella of "enhanced extraction"[5]. These techniques include optimization of the extraction solvent and cosolvent, continuous liquid-liquid extraction, reactive extraction, selective extractions, salting-out extraction, and aqueous biphasic or two-phase extraction [6]. One effective method is salting-out extraction, which is simple to implement and can provide great benefits with little additional cost. This technique involves the addition of a salt to the aqueous solution, which increases the density of the solution, facilitating the recovery of organic compounds with minimal changes to the existing batch process. Salting-out extraction is widely used in protein isolation by precipitation with ammonium sulfate, protein crystallization, industrial manufacturing processes for dyes, soaps, and caprolactam, textile dyeing, as well as in analytical chemistry for extracting analytes from biological materials [7]. The usage of salts that are normally considered waste products can considerably increase the feasibility of this treatment [8]. Other techniques include optimization of the extraction solvent and cosolvent, continuous liquid-liquid extraction, reactive extraction, and selective extractions, which are based on noncovalent interactions between the solute and an additive. Aqueous biphasic or two-phase extraction is also effective for isolating extremely water-soluble components and is used for the purification of small polar organics, biomolecules, and even large biologic particles [9]. Although each technique has its strengths and potential liabilities, costs of these treatments could be a limiting factor. In the end, salting-out extraction is a simple and widely applicable method that can provide significant benefits in many applications [10]. In this study a salting-out process to separate the organic and inorganic solvents in an organosolv-like solution was investigated. Specifically, the study investigated the use of two different salts NaCl and Na₂SO₄ [11], to separate the organic solvent γ -valerolactone (GVL) in a solution with water (60% w/w).

1.2. Salting-out as separation method

Salting out is formally defined as the phenomenon when the solubility of a nonelectrolyte substance in water decreases with increasing salt concentration [12]. In this case, when salt is added, the solubility of GVL (nonelectrolyte substance) in the water decreases, causing it to separate out as a separate liquid phase. This phenomenon occurs because the salt ions form ion-dipole interactions with the water

molecules, reducing the availability of the water molecules to solvate the GVL molecules [13, 14]. The separation of GVL from water can be improved by optimizing the salt concentration and temperature. Higher salt concentrations and lower temperatures generally result in greater separation of the two phases. Once the two phases have separated, they can be easily separated by decantation or centrifugation. The GVL can then be isolated by removing the water from the GVL-rich phase, for example by distillation [15]. In salting out process in most literature cases, it has been consistently observed that the anion has a greater impact than the cation, with the ordering of anions by salting power remaining relatively constant [16]. The anions at the beginning of this series, up to Cl^- , are typically referred to as kosmotropes or order-makers, as they salt-out. Conversely, anions at the end of this series are known as chaotropes or chaos-makers, as they salt-in. However, the sequence for cations is more variable and depends on the nature of the solute, particularly when polar functional groups are present [17, 18]. The Hofmeister Series and Specific Ion Effects are factors that influence the degree of salting-out, which reflects the activity coefficient of the aqueous solution. While Debye-Hückel theory provides a direct mathematical link between salting-out and aqueous ionic strength, this relationship only holds true up to a salt concentration of 0.1 M [19, 20], without the inclusion of additional empirical parameters [21, 22]. However, since salting-out is typically performed with much higher salt concentrations near saturation point, specific ion effects come into play instead [23]. These refer to the consistent ordering of anions based on their salting-out strengths [7, 13, 14]. For instance, in an early study on salting-out, the following anion sequence was observed for decreasing the water solubility of phenylthiourea: $\text{OH}^- \approx \text{SO}_4^{2-} \approx \text{CO}_3^{2-} > \text{ClO}_3^- \approx \text{BrO}_3^- \approx \text{Cl}^- \approx \text{OAc}^- \approx \text{IO}_3^- > \text{Br}^- \approx \text{I}^- > \text{NO}_3^-$. As for cations, the sequence is more variable and dependent on the solute's nature, particularly when polar functional groups are present. and the cations: $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Li}^+ \approx \text{Ba}^{2+} \approx \text{Rb}^+ \approx \text{Ca}^{2+} \approx \text{Ni}^{2+} \approx \text{Co}^{2+} \approx \text{Mg}^{2+} \approx \text{Fe}^{2+} \approx \text{Zn}^{2+} \approx \text{Cs}^+ \approx \text{Mn}^{2+} \approx \text{Al}^{3+} > \text{NH}_4^+ > \text{H}^+$ [24, 25]. As well as the composition of the salt, a very important role is also played by the aqueous solubility of the solute. When solubility is too low, is not possible to reach high enough molarities that are able to permit the salting-out [26].

2. Materials and methods

Analytical grade reagents purchased from Sigma-Aldrich (St. Louis, Missouri, United States of America) were utilized in this work. The concentrations of monosaccharides and GVL were determined using an ultra-high-performance liquid chromatography (UHPLC) Dionex UltiMate 3000 (Thermo Scientific, Sunnyvale, CA, USA) equipped with a Bio-Rad Aminex HPX-87H column (Bio-rad, California, USA) and a Refraction Index Detector (ERC RefractoMax 520, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA). The mobile phase used was 0.01 N H_2SO_4 , and the flow rate was 0.6 mL/min at a column temperature of 50 °C.

2.1. Organosolv-like solution

Based on previous studies [3, 27], an organosolv-like solution was prepared with characteristics similar to those experimentally found in the liquids exiting the organosolv process. The characteristics are shown in Table 1.

Solutions exiting organosolv processes, are more complex, with more products and sub-products, but to determine the separation efficiency of the process, it was preferred to work on known standardized solutions. For this reason, no lignin or by-products were added to the water/GVL solution, only glucose, xylose, sulfuric acid (H₂SO₄) and GVL, all dissolved in water.

Table 1. Percent Composition (% w/w) of the organosolv-like water/GVL solution. This solution was prepared on analysis of previous study. Add a descriptive label of the table here.

GVL (%)	Glucose (%)	Xylose (%)	H ₂ SO ₄ (%)
55,54	0,19	1,03	1,27

2.2. Salting-out method

To perform salting out 5 mL of water/GVL solution were used for each triplicate repeat test. The tests were performed at room temperature under stirring with increasing concentrations of salt. The saturation concentrations of the two salts at room temperature were identified from literature sources and confirmed in laboratory.

Tests were performed from 10 to 100% saturation point concentration (SPC) with 10% increasing for each test. The tests, stirred until the salt was completely dissolved, were then left stand over-night, and the aqueous and organic fraction were analyzed the following day via HPLC. To reduce the salt concentration in the HPLC-injected sample to column-tolerable concentrations (< 9 g/L), the samples were all appropriately diluted. The concentrations of the three solutes: GVL, glucose and xylose were monitored in the analyzed liquids. To Perform the HPLC analysis the full volume of the fraction was used. The data obtained were used to calculate the solute concentration in the 2 phases and the percent solute recovery in the phase of interest (i.e., sugars in the aqueous phase and GVL in the organic phase). Recovery and concentrations were determined with the following formulas. Units are reported in brackets.

$$\%_{Rec}(\%) = \frac{m_f(g)}{m_s(g)} \quad (1)$$

Where:

$\%_{Rec}$ is the recovery percentage of each solute;

m_f is the mass determined via HPLC in the interested fraction;

m_s is the starting mass of the desired solute put into reaction.

$$[s] \left(\frac{g}{L}\right) = \frac{[s]_{hplc} \left(\frac{g}{L}\right) * V_{dil}(L)}{V_{tot}(L)} \quad (2)$$

Where:

$[s]$ is the concentration of solute in the fraction;

$[s]_{hplc}$ is the concentration determined via HPLC in the interested fraction;

V_{dil} is the dilution volume of the sample to perform the HPLC analysis;

V_{tot} is the total volume of the fraction analyzed.

3. Results and Discussion

Tables 2 and 3 show the results of analysis of the separated fractions after the addition of NaCl and Na₂SO₄, respectively. The tables show the concentrations of added salt versus saturation concentration, the concentration of GVL in the organic phase (OP) and aqueous phase (AP), and the concentration of glucose and xylose in the AP.

Table 2. Data about the composition of the two liquid fractions obtained after salting-out with NaCl.

In the table can be found out that the GVL recovery is stable with the increasing of the salt concentration with a maximum of 84% at 90% of SPC. GVL concentration on the OP increases while decreases in the aqueous phase with a maximum of 84.9% and a minimum of 10,1% respectively.

Carbohydrates concentration in the AP is stable over 40% of SPC.

NaCl Concentration (% of SPC)	GVL Recovery in OP (% w/w)	GVL Concentration in OP (% w/w)	GVL Concentration in AP (% w/w)	Glucose concentration in AP (g/L)	Xylose concentration in AP (g/L)
10	75.1±0.1	54.2±0.5	65.2±0.6	2.1±0.3	1.2±0.5
20	83.3±0.2	65.1±0.4	31.1±0.2	5.5±0.5	8.6±0.1
30	82.5±0.4	72.7±0.6	24.5±0.7	9.1±0.1	9.4±0.1
40	82.6±0.5	76.3±0.7	20.3±0.4	10.0±0.9	9.4±0.5
50	81.9±0.2	78.9±0.1	16.7±0.2	10.6±0.3	9.4±0.5
60	82.4±0.6	79.0±0.4	14.5±0.9	10.6±0.1	9.4±0.4
70	81.3±0.5	81.7±0.8	11.2±0.7	10.9±0.4	9.3±0.7
80	80.0±0.7	82.1±0.4	10.1±0.8	10.5±0.6	8.8±0.9
90	84.4±0.2	84.9±0.2	12.1±0.9	10.3±0.7	9.2±0.3
100	83.8±0.9	83.4±0.5	11.6±0.9	10.4±0.6	9.5±0.1

Table 3. Data about the composition of the two liquid fractions obtained after salting-out with Na₂SO₄. In the table can be found out that the GVL recovery is stable with the increasing of the salt concentration with a maximum of 99.0% at 90% of SPC. GVL concentration on the OP increases while decreases in the AP with a maximum of 80.1% and a minimum of 1,8% respectively. Carbohydrates concentration in the AP is stable over 30% of SPC.

Na ₂ SO ₄ Concentration (% of SPC)	GVL Recovery in OP (% w/w)	GVL Concentration in OP (% w/w)	GVL Concentration in AP (% w/w)	Glucose concentration in AP (g/L)	Xylose concentration in AP (g/L)
10	92.0±0.3	54.8±0.1	61.5±0.2	0	0
20	98.3±0.3	72.0±0.8	33.8±0.7	0	0
30	94.5±0.1	72.8±0.2	10.8±0.7	6.1±0.4	28.4±0.1
40	96.4±0.6	75.0±0.6	6.9±0.3	6.4±0.6	29.7±0.1
50	96.2±0.3	75.1±0.4	7.1±0.3	6.3±0.1	29.5±0.5
60	97.9±0.1	79.1±0.7	3.7±0.8	6.0±0.4	28.7±0.3
70	97.8±0.8	79.1±0.5	3.9±0.6	6.0±0.2	28.6±0.2
80	98.6±0.2	80.1±0.3	2.4±0.9	5.9±0.2	28.4±0.1
90	99.0±0.6	79.7±0.6	1.8±0.3	5.9±0.3	28.6±0.2
100	98.9±0.8	79.8±0.3	2.0±0.7	5.9±0.6	28.4±0.5

The data shown in the tables were then graphed to analyze them separately. Figure 1 shows the concentration of GVL in the OP fraction as salt concentration increases for both sodium chloride and sodium sulphate. By analyzing the figure, it can be seen that the highest concentration of GVL in the OP is obtained with 90% of SPC using NaCl resulting in a GVL concentration of $84.9 \pm 0.2\%$. The highest concentration of GVL with in sodium sulfate is for 80% of SPC and corresponds to $80.1 \pm 0.3\%$.

Continuing the analysis of Figure 1, it is possible to see that the minimum residual GVL concentration in the AP is higher in case NaCl rather than Na_2SO_4 is used, with a minimum concentration of $10.1 \pm 0.8\%$ $1.8 \pm 0.3\%$ respectively, obtained with 80% and 90% of SPC respectively. The high residual concentration in the AP using sodium chloride, which at the same time, however, showed a higher concentration of GVL in the OP, calls for further investigation of the analysis in search of the highest recovery of GVL by mass in the fraction of interest, i.e., the OP.

Figure 1. Graph of the GVL concentration (% w/w) in the AP and OP fraction obtained after salting-out with different concentration (% of SPC) of NaCl and Na_2SO_4 . Notably maximum GVL concentration in OP is slightly (~5% w/w) higher when salting-out is performed with NaCl, as well as minimum GVL concentration in AP (~8% w/w).

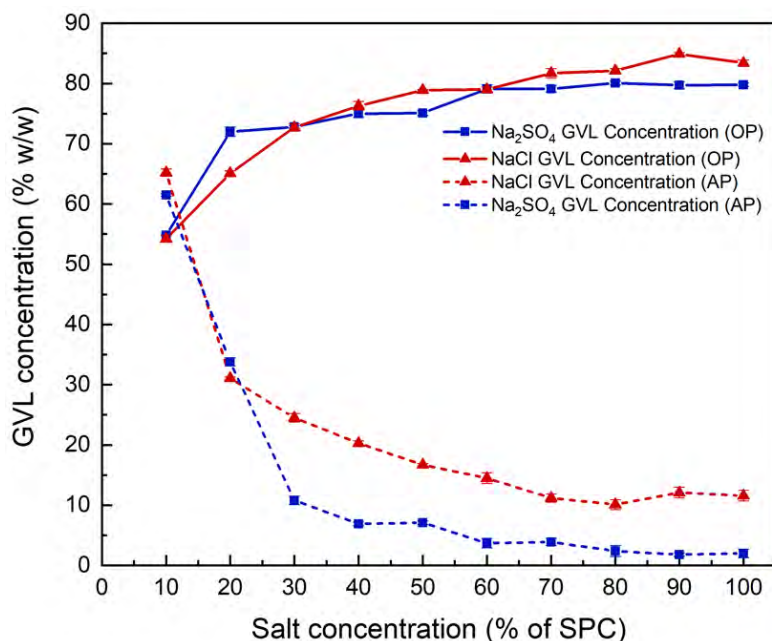
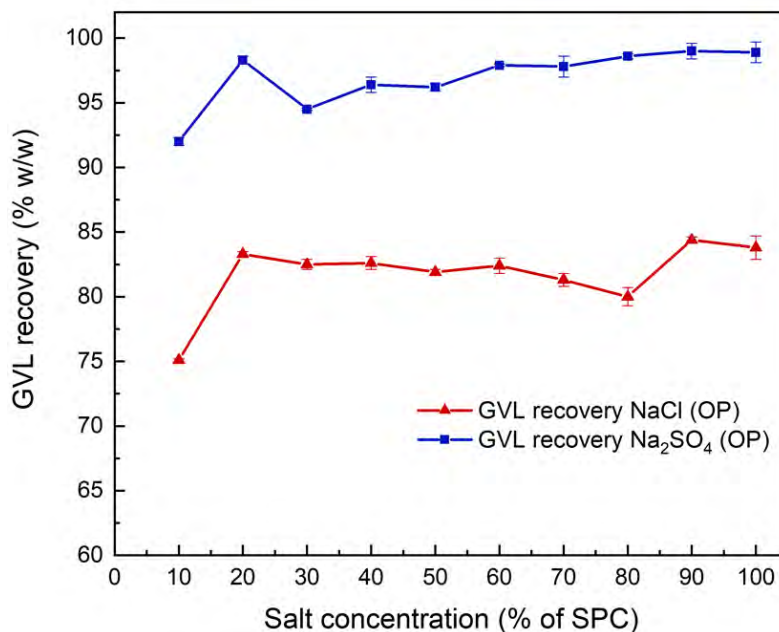


Figure 2 shows the recovery data of GVL in the OP fraction. analyzing these data, it seems clear that even the lowest concentration of sodium sulphate has a higher recovery than the highest concentration of sodium chloride. In fact, with Na_2SO_4 at 10% of SPC, a percentage GVL recovery of $92.0 \pm 0.3\%$ (% w/w) is obtained, while a recovery of $83.8 \pm 0.9\%$ (% w/w) is obtained with a 100% of SPC of NaCl. The two recoveries with NaCl and Na_2SO_4 oscillate between a minimum of $75.1 \pm 0.1\%$ and $92.0 \pm 0.3\%$, and a maximum of $84.4 \pm 0.2\%$ and $99.0 \pm 0.6\%$ respectively, obtained with 10% of SPC and 90% of SPC. The highest GVL recovery of Na_2SO_4 over NaCl in salting-out process could be found in accordance with the Debye-Hückel theory that to the same cationic group (Na^+), assigns a higher salting-out power to the anionic group of Na_2SO_4 (SO_4^{2-}) over the anionic group of NaCl (Cl^-).

Figure 2. Graph of the GVL recovery percentage in the OP fraction obtained after salting-out with different concentration of NaCl and Na₂SO₄. Notably even at the lowest concentration of added salt, Na₂SO₄ has a higher recovery of GVL in OP (~17%). This difference is maintained throughout the investigated percentage of SPC with a difference (~15%) at the 100% of SPC.



Figures 3 and 4 show the concentration of glucose and xylose in the AP obtained after salting-out with sodium sulfate or sodium chloride, respectively. From the analysis of Figure 3, it can be seen that a higher concentration of glucose is obtained in AP using NaCl as salt (maximum concentration of 10.9 ± 0.4 g/L), while the maximum concentration obtained with Na₂SO₄ is 6.4 ± 0.6 g/L. Similarly in Figure 4 we can see how a higher xylose concentration is obtained in AP with Na₂SO₄ (maximum concentration 29.7 ± 0.1 g/L), while a concentration of 9.5 ± 0.1 g/L is obtained with NaCl.

In both figures, it can be seen that for both glucose and xylose, concentrations with SPC percentages less than 20% do not lead to AP generation with sugar separation.

Figure 3. Graph of the glucose concentration (g/L) in the AP fraction obtained after salting-out with different concentration (% of SPC) of NaCl and Na₂SO₄. The highest concentration is obtained with NaCl in any investigated concentration of salt. Notably, at 10% and 20% of SPC the concentration of glucose obtained with Na₂SO₄ in AP is equal to zero.

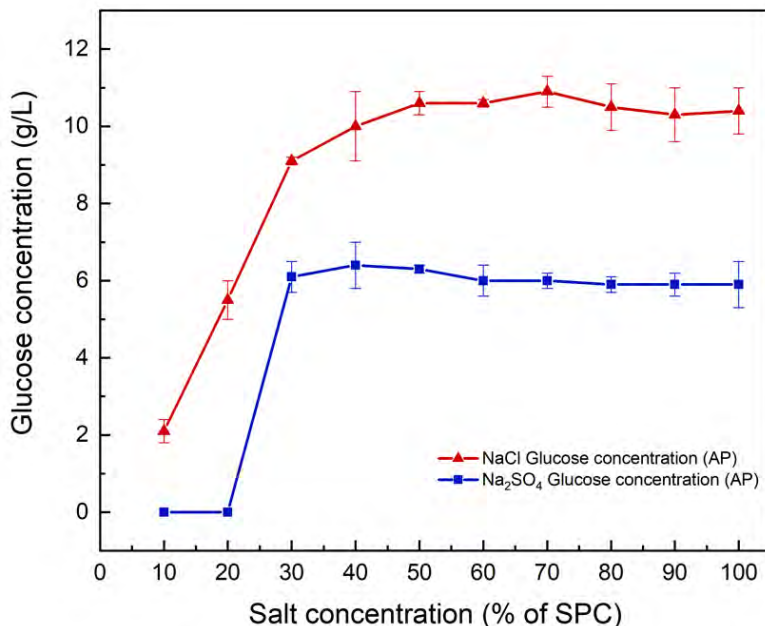
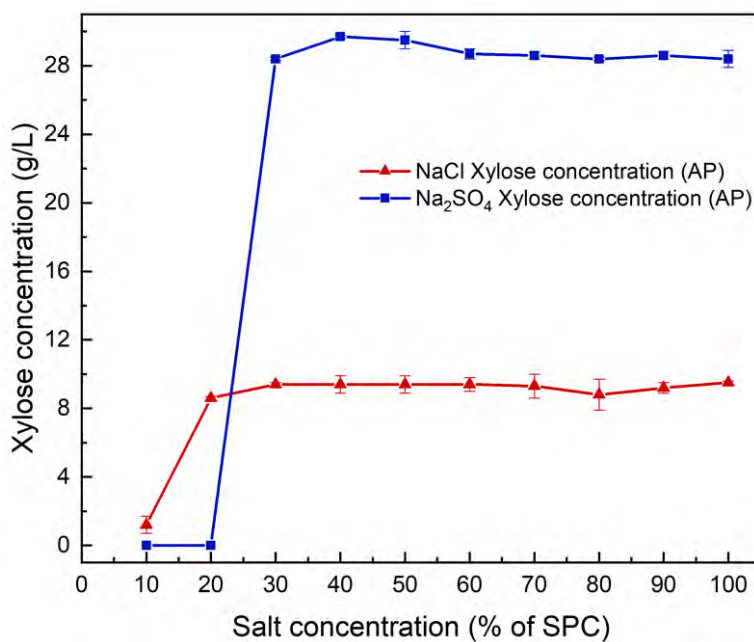


Figure 4. Graph of the xylose concentration (g/L) in the AP fraction obtained after salting-out with different concentration (% of SPC) of NaCl and Na₂SO₄. The highest concentration is obtained with Na₂SO₄ in almost any investigated concentration of salt. Notably, at 10% and 20% of SPC the concentration of xylose obtained with Na₂SO₄ in AP is equal to zero, while with the same SPC percentage a concentration of 1,2±0,5 and 8,6±0,1 with NaCl 10% and 20% of SPC respectively was obtained.



4. Conclusions

In conclusion, GVL is a promising bio-based solvent and platform chemical with various potential applications in the chemical and pharmaceutical industries. However, its utilization in Organosolv treatment is currently limited by the high cost and disposable nature in this process.

This data shows that although the final GVL concentration obtained in OP is higher performing salting-out with NaCl, the mass recovered and therefore the recovery percentage of GVL is higher with Na₂SO₄. In our case, having a higher concentration in OP is not as interesting as recovering a higher amount of GVL. At the same time, because the recovered GVL is going to be applied in an organosolv in a final solution (% w/w) 60% GVL and 40% H₂O, with Na₂SO₄ is still possible to obtain a GVL concentration higher than 60% and therefore no further processing is needed to concentrate the recovered OP before using it in input for a new organosolv process.

Moreover, with both salts a salting-out concentration above 60% of SPC achieved very similar with very low differences GVL recoveries. This phenomenon shows how it may be not necessary to use a salt concentration of 100% of SPC to obtain a maximum result, but a concentration of 70% of SPC may be sufficient. A lower concentration of salt in AP could be important to use the fraction as a carbohydrate source in fermentation processes without decrease the growth of microorganisms due to high medium salinity. The AP using Na₂SO₄ will also be rich in xylose that could be used as a source of C5-sugars in fermentation process.

In the end, salting-out with Na₂SO₄ as a liquid-liquid extraction technique, has been proposed as a promising strategy to improve the recovery of GVL from aqueous solutions, as it relies on the addition of a salt to induce the formation of a second liquid organic phase enriched in GVL. Our results demonstrate the potential of salting-out as an effective and environmentally friendly method for the recovery of GVL from organosolv-like aqueous solutions, with implications for the sustainable reutilization of this valuable bio-based solvent.

References

1. CEPAL, N., *The 2030 agenda and the sustainable development goals: An opportunity for Latin America and the Caribbean*. 2018.
2. Gupta, P.K., et al., *An update on overview of cellulose, its structure and applications*. 2019. **201**(9): p. 84727.
3. Fabbrizi, G., et al., *High Solid and Low Cellulase Enzymatic Hydrolysis of Cardoon Stems Pretreated by Acidified γ -Valerolactone/Water Solution*. 2022. **15**(7): p. 2600.
4. Raj, T., et al., *Synthesis of γ -valerolactone (GVL) and their applications for lignocellulosic deconstruction for sustainable green biorefineries*. 2021. **303**: p. 121333.
5. DeRuiter, J.J.P.o.d.a., *Carboxylic acid structure and chemistry: part 1*. 2005. **1**: p. 1-10.
6. Ventura, S.P., et al., *Ionic-liquid-mediated extraction and separation processes for bioactive compounds: past, present, and future trends*. 2017. **117**(10): p. 6984-7052.
7. Sergeeva, V.J.R.C.R., *Salting-out and salting-in of non-electrolytes*. 1965. **34**(4): p. 309.

8. Pisarska, B., et al., *Application of electro-electrodialysis for processing of sodium sulphate waste solutions containing organic compounds: preliminary study*. 2017. **142**: p. 3741-3747.
9. Lee, S.Y., et al., *Aqueous two-phase flotation for the recovery of biomolecules*. 2016. **45**(1): p. 81-92.
10. Valente, I.M., L.M. Gonçalves, and J.A.J.J.o.C.A. Rodrigues, *Another glimpse over the salting-out assisted liquid-liquid extraction in acetonitrile/water mixtures*. 2013. **1308**: p. 58-62.
11. Wang, C., et al., *Effect of sodium sulfate, ammonium chloride, ammonium nitrate, and salt mixtures on aqueous phase partitioning of organic compounds*. 2016. **50**(23): p. 12742-12749.
12. Gross, P.M.J.C.R., *The "Salting out" of Non-electrolytes from Aqueous Solutions*. 1933. **13**(1): p. 91-101.
13. Long, F. and W.J.C.r. McDevit, *Activity coefficients of nonelectrolyte solutes in aqueous salt solutions*. 1952. **51**(1): p. 119-169.
14. Xie, W.-H., W.-Y. Shiu, and D.J.M.E.R. Mackay, *A review of the effect of salts on the solubility of organic compounds in seawater*. 1997. **44**(4): p. 429-444.
15. Hyde, A.M., et al., *General principles and strategies for salting-out informed by the Hofmeister series*. 2017. **21**(9): p. 1355-1370.
16. Randall, M. and C.F.J.C.R. Failey, *The Activity Coefficient of Non-Electrolytes in Aqueous Salt Solutions from Solubility Measurements. The Salting-out Order of the Ions*. 1927. **4**(3): p. 285-290.
17. Erlander, S.R.J.J.o.M.S.C., *Explanation of Ionic Sequences in Various Phenomena. I. Salting-Out of Uncharged Molecules*. 1968. **2**(5): p. 1065-1072.
18. Pérez-Tejeda, P., et al., *Setschenow coefficients for caffeine, theophylline and theobromine in aqueous electrolyte solutions*. 1987. **83**(4): p. 1029-1039.
19. Atkins, P., P.W. Atkins, and J. de Paula, *Atkins' physical chemistry*. 2014: Oxford university press.
20. Wright, M.R., *An introduction to aqueous electrolyte solutions*. 2007: John Wiley & Sons.
21. Bockris, J.M. and H.J.T.o.t.F.S. Egan, *The salting-out effect and dielectric constant*. 1948. **44**: p. 151-159.
22. Leberman, R.J.F.I., *The Hofmeister series and ionic strength*. 1991. **284**(2): p. 293-294.
23. Tobias, D.J. and J.C.J.S. Hemminger, *Getting specific about specific ion effects*. 2008. **319**(5867): p. 1197-1198.
24. Dicks, A.P.J.J.o.C.E., *Don't forget the workup*. 2015. **92**(3): p. 405-405.
25. Perez-Tejeda, P., et al., *Single-ion Setschenow coefficients for several hydrophobic non-electrolytes in aqueous electrolyte solutions*. 1990. **68**(2): p. 243-246.
26. Mackay, D.J.E.S. and Technology, *Partition coefficient and bioaccumulation of selected organic chemicals*. 1977. **11**(13): p. 1219-1219.
27. Giannoni, T., et al., *Fractionation of Cynara cardunculus L. by Acidified Organosolv Treatment for the Extraction of Highly Digestible Cellulose and Technical Lignin*. 2021. **13**(16): p. 8714.

XXIV Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Revalorization of agrifood industry by-products: natural extracts as a sustainable strategy to enhance food safety

Rossana Roila^{1,*}, Raffaella Branciarì¹, Sara Primavilla², Caterina Altissimi¹, Luana Perioli³, Andrea Valiani², Cinzia Pagano³, Gianluca Veneziani⁴, David Ranucci¹.

¹Department of Veterinary Medicine, University of Perugia, via San Costanzo 4, 06126 Perugia, Italy

² Istituto Zooprofilattico Sperimentale dell'Umbria e delle Marche "Togo Rosati", via Salvemini 1, 06126 Perugia, Italy.

³Department of Pharmaceutical Sciences, University of Perugia, Via del Liceo 1, 06123 Perugia, Italy.

⁴Department of Agricultural, Food and Environmental Sciences, University of Perugia, Via S. Costanzo, 06126 Perugia, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: rossana.roila@unipg.it

Abstract: Recently, there has been a growing interest in the use of natural antimicrobial agents able to limit the growth of food-borne bacteria, and therefore enhance food safety. The aim of this work was to investigate the antibacterial properties of different natural extracts from different natural matrices and by-products such as saffron petals, olive mill wastewater, spent coffee grounds, *M. oleifera*, *G. simplicifolia*. The antibacterial activity was assessed determining the MICs and MBCs against two microorganisms crucially involved in food safety: *S. aureus* and *E. coli*. The results suggest that olive mill wastewater, *M. oleifera* and saffron petals extracts could represent a valuable natural alternative to conventional preservatives largely adopted in food production. Further studies are needed to define the most suitable applications in the food industry.

Keywords: natural extracts; natural antibacterial; MIC; MBC; food safety; by-product reuse;

1. Introduction

The growth of undesired microbial population such as pathogenic and spoilage microorganisms affects the safety, the quality and the shelf life of food products impacting on consumer health and thus on the economic and public health service. Particularly, according to the European Center for

Disease Control -European Food Safety Authority report on zoonoses, during 2019–2020, 8261 food-borne outbreaks occurred leading to 69,480 cases of illness, 5534 hospitalizations and 94 deaths [1, 2]. Moreover, microbial food spoilage is an issue of global concern as it means the original nutritional value, texture and flavour of the food are damaged and therefore it becomes undesirable or unacceptable for human consumption due to changes in sensory characteristics. It has been estimated that not less than 25% of all food produced is lost in post-harvest or post-slaughter phases due to undesired microbial activity [3].

Chemical antimicrobials have widely been employed at an industrial level to inhibit the microbial development in foods in order to improve its safety and shelf-life [4]. The scientific community and food industry have recently been urged to look for viable alternatives to the chemical antibacterial frequently employed in food preservation as a result of a greater understanding of the effects of diet on human health [5]. The use of these compounds indeed, although strictly regulated [6], is considered with mistrust by consumers, because of the potential long-term harm to their health they could cause [7, 8]. However, the worries about the safety of synthetic preservatives led the food industry to search for new additives from natural sources.

In this perspective, vegetable extracts are worthy of investigation as rich in bioactive molecules, such as polyphenols, terpenes, aldehydes and flavonoids as alternatives to synthetic preservatives. More recently high interest has been also oriented towards agri-food by-products that can still provide a high amount of bioactive compounds, which could be exploited in several productive sectors, including food industries. The circular economy model in the agri-food sector, with particular attention to the reuse and valorization of wastes and by-products, is particularly relevant for the scientific community and this good practice is in continuous evolution [9]. Europe plays a leading role in this research field, thanks to the primary involvement of the Member States, policy makers and stakeholders [9]. An improved science based understanding of the effects of natural derived bioactive compounds on the growth and activity of spoilage microorganisms in foods is crucial for the development of safe and eco-friendly preservation strategies and subsequent improvement of food hygiene and reduction of losses due to spoilage. This study aims to report an overview of the preliminary results obtained through the *in vitro* antimicrobial testing of different natural and by-products extracts on two microorganisms crucially involved in food safety namely *S. aureus* and *E. coli*. The extracts considered in this study were obtained from: saffron petals, olive mill wastewater, spent coffee grounds, *M. oleifera*, *G. simplicifolia*.

2. Materials and Methods

2.1 Extracts

Saffron petals are a rich source of bioactive compounds such as crocins and safranal, which have been shown to possess significant antimicrobial activity against a range of pathogenic microorganisms. Olive mill wastewater contains high levels of phenolic compounds such as hydroxytyrosol and oleuropein, which have been found to inhibit the growth of a variety of microorganisms. Coffee grounds contain various compounds such as caffeine, chlorogenic acid, and trigonelline, which have

shown potential as natural preservatives against spoilage bacteria. *M. oleifera*, commonly known as the horseradish tree, contains several bioactive compounds such as niazimicin and quercetin, which have been found to possess antimicrobial activity against pathogenic microorganisms. *G. simplicifolia*, also known as the African wild mango, contains a compound called Irvingia gabonensis, which has been shown to have antimicrobial properties against various bacteria and fungi.

2.2 Microorganisms

Reference strains *Staphylococcus aureus* (WDCM 00034) and *Escherichia coli* (WDCM 00013) were bought from Microbiologics, St. Cloud, MN, USA.

2.3 Broth microdilution method

Considering the results of the agar well diffusion test, to quantitatively determine the antibacterial activity of phenolic extract the minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) were determined. MICs/MBCs were measured using a standard broth microdilution technique, according to Clinical Laboratory Standards Institute (CLSI) guidelines [33]. The bacterial suspensions used for the assay were prepared adjusting the number of bacteria to 10^5 CFU/mL with fresh Mueller-Hinton broth (Biolife Italiana s.r.l., Milan, Italy). Aliquots of each suspension were added to 96-well microplates (Starlab International GmbH, Hamburg, Germany) containing the same volumes of two-fold serial dilution of the extracts. Moreover, three controls were set up: these included antibiotic control (with benzylpenicillin sodium salt; Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA), organism control (with culture medium and bacterial suspension) and negative control (with culture broth and the extract solution at the same concentration tested). The plates were incubated for 24 h at 37 °C under aerobic conditions. MIC was defined as the lowest concentration of extract that produced no bacterial growth when compared to time 0 wells. The MBC was determined by subculturing the broths used for MIC determination. A quantity of 10 µL of broths culture of the wells, corresponding to the MIC and to the higher MIC concentrations, was plated onto fresh 5% Sheep Blood agar dishes (Microbiol s.r.l., Cagliari, Italy) and then incubated for 24 h at 37 °C, under aerobic conditions. The MBC was represented as the smallest amount of extract that was capable of killing the bacterial inoculum, demonstrated by the total absence of growth.

3. Results

As shown in Table 1 olive mill wastewater is the extract that shows higher antimicrobial efficacy towards the two microorganisms tested. *M. oleifera* showed an even lower MIC and MBC values albei only against *S.aureus* corroborating the outcome reported by other authors in literature according to which gram positive bacteria can be more sensitive to polyphenolic compounds [10]. Saffron petals extract, like olive mill wastewater, shows its effects against both bacteria but at much higher MIC and MBC values. Concerning spent coffee grounds and *G. simplicifolia* the results show that ant the tested concentrations this two extract did not show any antibacterial activity.

Table 1. Minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) of different extracts against *S.aureus* and *E.coli*.

Estratto	<i>Staphylococcus aureus</i>		<i>Escherichia coli</i>	
	MIC (mg/ml)	MBC (mg/ml)	MIC (mg/ml)	MBC (mg/ml)
Olive mill wastewater	15.6	31.3	15.6	15.6
Saffron petals	250	250	250	500
<i>M. oleifera</i>	6.25	12.5	-	-
Spent coffee grounds	-	-	-	-
<i>G. simplicifolia</i>	-	-	-	-

4. Conclusions

These preliminary results reported in this study suggest that olive mill wastewater and *M. oleifera* extracts have the potential to be exploited in food industry for their antimicrobial activity. Despite the higher MIC/MBC values, saffron petals extract could represent a valuable source of active compounds, to be used as alternatives to conventional preservatives. It is crucial to consider the green and eco-friendly nature of the tested extracts that confer to this approach high sustainability value. Future studies are needed to evaluate possible applications in the food industry, aiming to improve the quality of foodstuff and to protect consumers' health.

References

1. European Food Safety Authority and European Centre for Disease Prevention and Control. The European Union One Health 2019 Zoonoses Report. *EFSA J.* **2021**, 19, 6406.
2. European Food Safety Authority and European Centre for Disease Prevention and Control. The European Union One Health 2020 Zoonoses Report. *EFSA J.* **2021**, 19, 6971.
3. Abbas, K. A., Saleh, A. M., Mohamed, A., & Lasekan, O. The relationship between water activity and fish spoilage during cold storage: A review. *J. Food Agric. Environ.* **2009**, 7(3/4), 86-90.
4. Tropea, A. Microbial Contamination and Public Health: An Overview. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **2022**, 19, 7441
5. Antolak, H.; Czyzowska, A.; Kregiel, D. Antibacterial and Antiadhesive Activities of Extracts from Edible Plants against Soft Drink Spoilage by *Asaia* spp. *J. Food. Prot.* **2017**, 80, 25–34.
6. EC (European Community). Commission regulation (EC) No. 1333/2008: On food additives. *Off. J.* **2008**, 354, 16.

7. Etienne, J.; Chirico, S.; McEntaggart, K.; Papoutsis, S.; Millstone, E. EU Insights–Consumer perceptions of emerging risks in the food chain. *EFSA Support. Publ.* **2018**, *15*, 1394.
8. Roila, R.; Sordini, B.; Esposto, S.; Ranucci, D.; Primavilla, S.; Valiani, A.; Taticchi, A.; Branciari, R.; Servili, M. Effect of the Application of a Green Preservative Strategy on Minced Meat Products: Antimicrobial Efficacy of Olive Mill Wastewater Polyphenolic Extract in Improving Beef Burger Shelf-Life. *Foods*, **2022**, *11*, 2447.
9. Chiaraluce, G., Bentivoglio, D., & Finco, A. Circular economy for a sustainable agri-food supply chain: A review for current trends and future pathways. *Sustainability*, **2021**, *13*(16), 9294.
10. Álvarez-Martínez, F. J., Barraji n-Catal n, E., Encinar, J. A., Rodr guez-D az, J. C., & Micol, V. Antimicrobial capacity of plant polyphenols against gram-positive bacteria: A comprehensive review. *Current medicinal chemistry*, **2020**, *27*(15), 2576-2606.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Sostenibilità della produzione di carne Chianina: quale futuro per gli allevamenti a ciclo chiuso? Sustainability of Chianina beef production: what is the future of the suckler-to-finish system?

Lucio Cecchini ¹, Aleksej Antonini ¹, Francesca Maria Sarti ¹, Sara Carè ², Massimo Chiorri¹and
Biancamaria Torquati ^{1,*}

¹ Dipartimento di Scienze Agrarie Alimentari e Ambientali, Università di Perugia

² Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria, Centro di Ricerca Zootecnia
e Acquacoltura, Lodi

* E-Mail: bianca.torquati@unipg.it

Abstract:

La sostenibilità ambientale e il benessere animale sono le due principali sfide che la zootecnia nei paesi industrializzati deve affrontare oggi e nei prossimi anni, e che occorre conciliare con sostenibilità economica e redditività aziendale. La transizione verso sistemi di allevamento estensivo del bovino da carne potrebbe rappresentare una strategia per la riduzione dell'impatto ambientale e il miglioramento del benessere animale, ma la resilienza è spesso minacciata dalla scarsa competitività tecnica di tali allevamenti, la cui sopravvivenza non può prescindere dalla definizione e dal miglioramento di modelli produttivi in grado di assicurare buoni livelli di reddito aziendale. L'allevamento bovino di razza Chianina appartenente alla filiera IGP del "Vitellone Bianco dell'Appennino Centrale" rappresenta uno dei principali esempi di allevamento estensivo a ciclo chiuso per la produzione di carne del centro-Italia, sebbene siano presenti diversi profili di criticità derivanti dalle difficoltà gestionali legate alle aree marginali in cui la maggior parte di questi allevamenti sono ubicati, dalla scarsa produttività legata anche al tipo genetico tardivo che può avere delle ripercussioni sia economiche che ambientali. Per rendere questa tipologia di allevamento un sistema produttivo che sia veramente resiliente non si può non considerare lo sviluppo sostenibile come processo multifattoriale raggiungibile solo con un miglioramento sinergico degli aspetti economici, ambientali e del benessere degli animali. L'obiettivo dello studio è quello di valutare la sostenibilità "globale" di un campione di 6

allevamenti chianini umbri applicando una metodologia di analisi basata su un approccio multi-criteriale, che consente di aggregare i dati con la media geometrica. Gli indicatori utilizzati nell'analisi sono stati il carbon Footprint (per la sostenibilità ambientale), la redditività (per la sostenibilità economica) e il benessere animale (per la sostenibilità sociale). La raccolta dei dati è stata realizzata nel 2022 utilizzando un questionario, che riguarda dati tecnici, economici, sociali e della gestione zootecnica; integrati con dati secondari provenienti dal Consorzio IGP, dall'Associazione Nazionale Allevatori Bovini Italiani da Carne (ANABIC) e dall'Associazione Regionale Allevatori Umbria (ARAU). La valutazione della sostenibilità economica è stata realizzata attraverso l'analisi dei margini, considerando il valore aggiunto al fine di aumentare la comparabilità dei risultati. Quella ambientale attraverso la metodologia Life Cycle Assessment (LCA) con un approccio "from cradle to farm gate", in accordo alle norme UNI EN ISO 14040 e 14044 a e b del 2006. Quella sociale misurando il grado di benessere animale utilizzando il sistema Classyfarm, che prevede la classificazione degli allevamenti in base a punteggi di rischio. I tre indici rilevati per le rispettive dimensioni di sostenibilità sono stati aggregati in un macro-indice di sostenibilità globale, e le aziende sono state ordinate in un ranking di performance crescente. Sulla base dei risultati ottenuti per ogni indicatore di sostenibilità sono stati messi in evidenza eventuali criticità e sono state ipotizzate possibili azioni per migliorare la competitività degli allevamenti rendendoli più resilienti.

Keywords: Sostenibilità globale, LCA, Redditività, Benessere animale, Chianina, allevamento da carne

1. Introduzione

La filiera IGP (Indicazione Geografica Protetta) del Vitellone Bianco dell'Appennino Centrale può considerarsi un fiore all'occhiello della zootecnia da carne italiana, ma negli ultimi dieci anni il numero degli allevamenti ha subito una progressiva contrazione, generando preoccupazioni dal punto di vista economico e sociale per il rischio di perdita del patrimonio produttivo e culturale.

Questa riduzione del numero di allevamenti può essere dovuta ad un calo dei consumi causato da diversi fattori: la crisi economica; i mutamenti dello stile di vita con un aumento dei vegetariani e dei vegani; la maggiore attenzione da parte del consumatore per il benessere animale e la sostenibilità ambientale

In questo contesto, la sfida dei ricercatori, delle istituzioni e degli allevatori verte nel migliorare contemporaneamente la produttività, contenere le emissioni di gas ad effetto serra (GHG) e preservare il livello di benessere degli animali. A tal fine, lo sviluppo di azioni specifiche coerenti con gli obiettivi enunciati, sono indicate come strategie inevitabili per migliorare la competitività e la resilienza di molti sistemi zootecnici [1].

Van Calster ed altri ricercatori hanno sottolineato come la sostenibilità e la resilienza degli

allevamenti sia legata a tre dimensioni: economica, sociale ed ecologica/ambientale [2]. Abbondante è la letteratura scientifica in merito alle dimensioni di sostenibilità globale, con l'obiettivo di spiegarne i trade-offs tra efficienza tecnica ed economica e indicatori del benessere animale e le loro interrelazioni.

Con l'intento di contribuire alla definizione della sostenibilità globale degli allevamenti di Chianina e del loro livello di resilienza, e fornire delle strategie utili agli allevatori per migliorare la competitività delle loro aziende, il presente lavoro ha perseguito i seguenti obiettivi principali: 1) quantificare la sostenibilità economica ed 2) ambientale; 3) valutare il benessere animale; 4) definire una graduatoria di merito attraverso l'uso di indicatori economici, sociali e ambientali.

2. Metodologia

2.1 Scelta del campione

Il campione aziendale (N.6), localizzato nelle province di Perugia e Terni, è stato definito adottando un metodo di campionamento stratificato in base alle seguenti variabili: numerosità dei capi in allevamento, tipologia di allevamento (ciclo chiuso, aperto) e tipo di stabulazione (fissa, libera, allo stato semi-brado e allo stato brado. In base ai risultati della stratificazione sono state selezionate due aziende agro-zootecniche per ogni classe di numerosità (numero di capi inferiore a 50, tra 51 e 100, superiore a 100) di cui due a ciclo aperto e quattro a ciclo chiuso.

2.2 Metodologia di analisi

L'indagine aziendale è stata condotta attraverso l'utilizzo di un questionario ideato ad hoc per raccogliere dati strutturali, tecnici ed economici utili per effettuare l'analisi economico-sociale e di impatto ambientale, con l'obiettivo di arrivare alla definizione di un set di indicatori finalizzati ad una valutazione estesa della gestione dell'allevamento e un confronto tra le diverse realtà aziendali e tra le tecniche produttive esaminate.

La valutazione della sostenibilità economica è stata fatta partendo dall'analisi dei capitali investiti in azienda sia in termini quantitativi che qualitativi e si è scelto di utilizzare uno schema del bilancio riclassificato per aree di competenza, attraverso le quali sono stati costruiti una serie di indici di redditività, valutando sia i costi espliciti che i costi impliciti, vista anche la presenza di aziende a conduzione familiare [3].

I capitali valutati possono essere ricondotti a cinque classi: capitale naturale (risorse naturali), capitale umano (lavoro, esperienza, formazione), capitale artificiale (macchine ed impianti), capitale sociale (forme di organizzazione, rapporti di proprietà ed uso, interrelazioni con Istituzioni locali) e capitale bestiame (valore economico e genetico) [4].

La valutazione della sostenibilità ambientale è avvenuta applicando la metodologia del Life Cycle Assessment (LCA) che considera l'intero ciclo di vita di un prodotto con un approccio "from cradle to farm gate", in accordo alle norme UNI EN ISO 14040 e 14044, 2006a e b [5, 6]. Sono pertanto escluse dall'analisi le fasi di trasporto, macellazione, confezionamento, distribuzione e consumo della carne prodotta. Il modello di calcolo utilizzato è il "Calcul Automatisé des Performances Environnementales

en Elevage de Ruminants” (CAP’2ER®) sviluppato in Francia presso l’Institut de l’Elevage (IDELE), niveau 2. L’unità funzionale adottata è il kg di incremento di peso vivo (live weight gain-LWG), mentre le categorie d’impatto calcolate sono: il riscaldamento globale (global warming potential, kg CO₂eq/kg LWG), l’acidificazione (kg SO₂eq/kg LWG), l’eutrofizzazione (kg PO₄₃-eq/ kg LWG), il consumo di energia fossile (MJ), il contributo al mantenimento della biodiversità e il sequestro del carbonio. [7, 8]

Tra gli aspetti sociali legati agli allevamenti zootecnici è stato considerato il benessere animale [9], misurato mediante indicatori che sono desunti dal sistema ClassyFarm (disponibile all’indirizzo <http://www.classyfarm.it/check-list/>). Il sistema consente la rilevazione dei dati relativi alla biosicurezza, benessere animale, sanità e produttività, alimentazione, consumo di antibiotici, lesioni rilevate in fase di macellazione e l’elaborazione di indicatori per il livello di rischio dell’allevamento. I dati raccolti valutano: il distress al quale l’animale è sottoposto, le strutture, le attrezzature, le condizioni microclimatiche e la gestione da parte del personale del sistema allevamento [10].

In particolare, il lavoro ha considerato una selezione di indicatori relativi alle aree “Data management” (tipologia di allevamento, rimonta, quarantena, infermeria, tipo di stabulazione, igiene lettiera, formazione addetti, assistenza del veterinario, precauzione per l’ingresso di estranei, procedure di pulizia e disinfezione al cambio lettiera) e “Dati strutturali e ambientali” (attrezzature e strutture presenti in azienda, adeguatezza degli spazi, pavimentazione, temperatura e umidità).

Per il calcolo dell’indicatore complessivo di sostenibilità abbiamo fatto riferimento al modello utilizzato da Classyfarm. In particolare, per l’indicatore relativo alla sostenibilità economica e alla sostenibilità sociale i valori assegnati alle singole aziende sono stati costruiti partendo dal percentile corrispondente, calcolato per il “valore aggiunto/Uba” e il “benessere animale”, applicando la seguente formula: $\text{Percentile} = (V - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min})$, dove V indica il valore dell’indicatore per l’azienda, V_{max} e V_{min} rispettivamente il valore massimo e il valore minimo per le sei aziende. Mentre per l’indicatore “carbon footprint”, la formula utilizzata è stata: $\text{Percentile} = (V_{\max} - V) / (V_{\max} - V_{\min})$, al fine di tener conto della scala di valori inversa dell’indicatore ambientale rispetto ai due precedenti. Il punteggio di sostenibilità globale (espresso come percentile) è stato calcolato come media geometrica dei tre punteggi di sostenibilità calcolati per ciascuna dimensione, così da evitare il fenomeno di compensazione fra punteggi tipico della media aritmetica ed ottenere risultati più affidabili [11].

3. I risultati

3.1. I risultati economici

In tabella 1 sono stati riportati, per le sei aziende agro-zootecniche selezionate, i principali indicatori tecnici e quelli economici calcolati tramite la ricostruzione del bilancio della stalla. I sei redditi netti stimati risultano tutti negativi ad eccezione di quello dell’azienda 04 con allevamento a ciclo chiuso, l’unica ad utilizzare sia manodopera familiare che salariata. Ottime le performance riproduttive della mandria caratterizzate da un’età media al primo parto di 26 mesi ed un periodo di inter-parto di appena 13,33 mesi da cui sembrano dipendere i bassi costi di produzione (1.590 euro/uba). L’ottima gestione dell’allevamento si riscontra anche sul valore delle vendite.

In generale le aziende agro-zootecniche di minor dimensione risultano quelle meno sostenibili dal punto di vista economico, le performance migliori sono raggiunte da quelle di dimensione intermedie, mentre, quelle grandi gestite con solo manodopera salariata presentano performance diverse. L'azienda 05 (allevamento a ciclo chiuso senza pascolo) fa registrare un reddito netto leggermente negativo dovuto essenzialmente ad un inter-parto lungo della durata di 15,7 mesi ed una età al primo parto tardiva (38,1 mesi) che determinano una riduzione del numero di vitelli svezzati in un anno ed un aumento dei costi di produzione, vanificando un ottimo prezzo medio di vendita della carne. L'azienda 06, che gestisce una mandria al semi-brado (7 mesi/anno) fa registrare un reddito netto fortemente negativo sia per un levato inter-parto (15,7 mesi), sia per effetto dei bassi prezzi di vendita, sia per gli elevati costi della razione alimentare durante la fase d'ingrasso derivanti dall'acquisto di una grande quantità di materie prime.

Tabella 1 Indicatori tecnici e valutazione economica degli allevamenti oggetto di studio

Indicatori tecnici ed economici	Azienda 01	Azienda 02	Azienda 03	Azienda 04	Azienda 05	Azienda 06
Ciclo della linea vacca-vitello	A ciclo aperto	A ciclo chiuso	A ciclo aperto	A ciclo chiuso	A ciclo chiuso	A ciclo chiuso
Tipologia della manodopera	familiare	familiare	familiare	fam. e salar.	salariati	salariati
Totale Sau	57,8	63,5	174,5	115,0	143,5	683,0
Numero di Uba complessive	37,4	36,2	42,6	121,0	132,0	271,0
Certificazione biologica	si		si		si	
Terreni a pascolo (ha)	40,0	-	160,0	80,0	-	350,0
Reddito d'impresa o Reddito netto (RN), euro	-33.502	-39.520	-9.410	62.321	-2.822	-37.998
Ricavi totali/uba	1.119	1.986	1.983	2.105	1.980	1.519
Ricavi da premi e contributi/uba	668	660	1.136	623	668	423
Costi totali/uba	2.015	3.078	2.204	1.590	2.002	1.659
Carico bestiame (Uba/ha)	0.52	0.41	0.25	0.96	0.78	0.38
Carne prodotta (LWG t/anno)	5.5	13.2	9.7	47.2	31.4	88.9
Indice di conversione alimentare (FCR kg SS/kg LWG)	22.09	8.87	23.26	15.07	20.62	22.53

Fonte: nostre elaborazioni

3.2. I risultati d'impatto ambientale

L'impronta di carbonio (tabella 2) media delle aziende a ciclo aperto (codice 01 e 03) è risultata pari a 15,60 kgCO₂eq/kg LWG, mentre quella relativa alle aziende a ciclo chiuso (codice 02, 04, 05 e 06) è

pari a 21,58 kgCO₂eq/kg LWG, valori che sono in linea con quelli riportati in letteratura per sistemi produttivi analoghi [12-15]. Il sistema di allevamento a ciclo aperto ha mostrato valori di eutrofizzazione e consumo energetico più elevati rispetto all'altra tipologia di allevamento; mentre non sono state riscontrate differenze significative riguardo all'acidificazione.

Tabella 2: Valutazione ambientale degli allevamenti oggetto di studio

Categoria d'impatto	Unità di misura	Azienda 01	Azienda 03	Azienda 02	Azienda 04	Azienda 05	Azienda 06
Tipologia di allevamento		A ciclo aperto		A ciclo chiuso			
Global warming potential	kg CO ₂ eq/kg LWG	31.9	23	24.8	11.1	24.5	15
Stoccaggio del carbonio	kg CO ₂ eq/kg LWG	10.6	13.1	-11.5	0.1	-2.3	2.8
Carbon footprint	kg CO ₂ eq/kg LWG	21.3	9.9	36.3	11	26.8	12.2
Acidificazione	kg SO ₂ eq/kg LWG	0.08	0.08	0.09	0.04	0.08	0.06
Eutrofizzazione	kg PO ₄ ³⁻ eq/kg LWG	0.94	0.06	0.47	0.03	0.17	0.15
Consumo energetico	MJ/kg LWG	79.3	60.8	73	19.7	51.8	34.1

Fonte: nostre elaborazioni

3.3. I risultati sociali in termini di benessere animale

I valori del benessere animale (tabella 3), basati sulla somma dei punteggi ottenuti dagli allevamenti nell'area management e nell'area strutture, indicano una valutazione qualitativa (basata su tre livelli sufficiente, buono e ottimo) più che soddisfacente per tutti gli allevamenti. La valutazione quantitativa, basata sul punteggio ottenuto dall'allevamento rispetto a quello massimo ottenibile (pari a 36,22 punti), segnala come il percentile (punteggio ottenuto/punteggio massimo) sia crescente passando dagli allevamenti più piccoli agli allevamenti di maggiori dimensioni.

Tabella 3: Valutazione del benessere animale negli allevamenti oggetto di studio

Indicatori	Azienda 01	Azienda 02	Azienda 03	Azienda 04	Azienda 05	Azienda 06
Valutazione requisiti area A Management	sufficienti	buoni	buoni	buoni	buoni	buoni
Valutazione requisiti area B Strutture	buoni	sufficienti	ottimi	ottimi	ottimi	ottimi
Valutazione generale del benessere (A+B)	buoni	buoni	buoni	buoni	ottimi	ottimi
Percentile rispetto al punteggio disponibile	36,7%	41,3%	57,7%	61,6%	73,4%	69,5%

3.4. Il livello di sostenibilità globale

L'indicatore di sostenibilità globale (tabella 4) segnala come migliore l'azienda 04 che ha come punto di forza la sostenibilità economica e come punto di debolezza quello del benessere animale, segue l'azienda 03 che ha il punto di forza nella sostenibilità ambientale. Le aziende 06 e 05 raggiungono complessivamente una buona performance ma, mentre l'azienda 06 risulta la peggiore dal punto di vista economico e recupera con il benessere animale e l'impronta carbonica, l'azienda 05 ha il suo punto di forza nel benessere animale. Fanalino di coda risultano le aziende di minori dimensioni.

Tabella 4: Valutazione del livello di sostenibilità globale negli allevamenti oggetto di studio

Blocco	Indicatori	Azienda 01	Azienda 02	Azienda 03	Azienda 04	Azienda 05	Azienda 06
Economico	Valore aggiunto/uba	1,13	1,01	1,63	2,00	1,18	1,00
Ambientale	Carbon footprint	1,57	1,00	2,00	1,96	1,36	1,91
Sociale	Benessere animale	1,00	1,12	1,57	1,68	2,00	1,89
	Percentile sostenibilità globale	21%	4%	72%	87%	47%	54%
	Livello sostenibilità globale	sufficiente	sufficiente	ottimo	ottimo	buono	buono

Fonte: nostre elaborazioni

4. Discussione

Dal punto di vista economico, la sfida principale si concentra sul controllo dei costi di produzione, rappresentati generalmente dai costi di alimentazione e della manodopera.

Va precisato che i costi sono influenzati da una molteplicità di fattori legati al management della mandria, alla produttività della stessa, e all'uso efficiente del pascolo che in alcuni casi sostituisce una quota considerevole di alimento acquistato. In sintesi, il miglioramento degli indici tecnici potrebbe apportare benefici sia dal lato dei ricavi, producendo un maggior numero di vitelli a parità di fattrici, sia dal lato dei costi, aumentando o mantenendo costante il numero dei vitelli prodotti. In aggiunta, l'efficientamento della gestione agronomica delle superfici potrebbe consentire una minor dipendenza dall'approvvigionamento esterno con conseguente riduzione dei costi per l'alimentazione degli animali.

La sostenibilità ambientale delle aziende oggetto dello studio può essere migliorata lavorando sull'ottimizzazione delle performance produttive (riduzione del ciclo d'ingrasso, miglioramento degli accrescimenti e delle rese alla macellazione), riproduttive (aumento del numero dei vitelli nati/anno, riduzione della durata dell'inter-parto e dell'età al primo parto) e dell'indice di conversione dell'allevamento per avere una mandria più efficiente migliorando l'utilizzo del pascolo. In aggiunta anche la gestione degli effluenti potrebbe essere ottimizzata utilizzando in modo efficiente il refluo prodotto in azienda con conseguente riduzione dell'utilizzo del fertilizzante chimico e si potrebbe

ricorrere all'utilizzo di impianti di digestione anaerobica per la produzione di energia rinnovabile da utilizzare in azienda.

5. Conclusioni

L'analisi della sostenibilità globale degli allevamenti di Chianina aiuta a comprendere il livello di resilienza delle aziende agro-zootecniche e conferma come il futuro della zootecnia da carne di qualità sia complesso e incerto perché legato a diversi fattori. L'approccio dei casi studio si è rilevato utile soprattutto per i confronti e le sintesi emerse tra le diverse realtà agro-zootecniche esaminate.

In tutte le aziende esaminate appaiono dei margini di miglioramento nella gestione dell'allevamento e risulta, chiaramente, che gli allevamenti estensivi raggiungono performance migliori legate agli aspetti ambientali. Lavorando sugli indicatori tecnici, quali l'inter-parto e l'età al primo parto, si potrebbero migliorare i risultati economici arrivando a produrre un maggior numero di vitelli a parità di fattrici. Migliorando la gestione agronomica delle superfici si potrebbe ottenere una minor dipendenza dall'approvvigionamento esterno. Dalla analisi delle sei aziende emerge che il ricorso al mercato per l'approvvigionamento delle materie prime da utilizzare per l'alimentazione degli animali genera dei costi di produzione elevati che non sono compensati dai ricavi ottenuti dalla carne prodotta. L'utilizzo del pascolo in modo più efficiente può contribuire al contenimento delle spese per l'alimentazione e al miglioramento dell'indice di conversione degli animali con conseguente effetto positivo sulle performance ambientali dell'azienda. Questa è la ragione per la quale alcune aziende agro-zootecniche stanno abbandonando il ciclo chiuso a favore della vendita dei vitelli da ristallo. I nuovi sistemi di allevamento dovranno puntare sempre più all'impiego di materie prime che non vadano a competere dal punto di vista alimentare con l'uomo, sfruttando il più possibile la produttività delle aree marginali, che altrimenti rimarrebbero abbandonate perché non adatte a sistemi produttivi intensivi. Il benessere animale svolgerà un ruolo sempre più importante all'interno degli allevamenti anche alla luce della nuova PAC che ha introdotto dell'Eco Schema 1 relativo al "Pagamento per il benessere animale e la riduzione degli antibiotici" dal quale ci si spetta un aumento dei premi incassati dalle aziende agro-zootecniche estensive di circa il 10%. Aumento che però non risolve i problemi di bilancio evidenziati dalla maggior parte delle aziende oggetto di studio.

Riferimenti

1. Galioto, F.; Paffarini, C.; Chiorri, M.; Torquati, B.; Cecchini, L. Economic, environmental, and animal welfare performance on livestock farms: Conceptual model and application to some case studies in Italy. *Sustainability*, **2017**, *9*(9), 1615.
2. Calker, K.J.V.; Berentsen, P.B.; Giesen, G.W.; Huirne, R.B. Identifying and Ranking Attributes That Determine Sustainability in Dutch Dairy Farming. *Agric. Hum. Values* **2005**, *22*, 53–63.
3. Gorgitano, M.T.; Torquati, B. Il Business Plan. *Torquati B. Econ. E Gest. Dell'impresa Agrar. Edagricole Bologna* **2003**.
4. Ragazzoni, A. L'azienda agro-zootecnica del futuro: come valutare la sostenibilità economica ed ambientale. *L'azienda agro-zootecnica del futuro*, FrancoAngeli. **2022**, 1-242.

5. BS EN ISO 14040:2006+A1:2020 Environmental Management. Life Cycle Assessment. Principles and Framework - European Standards.
6. BS EN ISO 14044:2006+A2:2020 Environmental Management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines - European Standards.
7. Gac A., Deltour L., Cariolle M., Dollé J.B., Espagnol S., Flénet F., Guingand N., Lagadec S., Le Gall A., Lellahi A., Malaval C., Ponchant P., Tailleur A. **2010**. GES'TIM, Guide méthodologique pour l'estimation des impacts des activités agricoles sur l'effet de serre. Version 1.2.
8. IDELE, CAP'2ER methodology guide. Institut d'Élevage, Paris, France. Retrieved on 15 May **2018** - <http://idele.fr/presse/publication/idelesolr/recommends/guide-methodologique-cap2er.htm>.
9. Lund, V.; Coleman, G.; Gunnarsson, S.; Appleby, M.C.; Karkinen, K. Animal Welfare Science—Working at the Interface between the Natural and Social Sciences. *Appl. Anim. Behav. Sci.* **2006**, *97*, 37–49.
10. EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW). "Scientific Opinion on the welfare of cattle kept for beef production and the welfare in intensive calf farming systems." *EFSA Journal* **2012**, *10*(5), 2669, 12.
11. Castoldi, N.; Bechini, L. Integrated sustainability assessment of cropping systems with agro-ecological and economic indicators in northern Italy. *European journal of agronomy*, **2010**, *32*(1), 59-72.
12. Berton, M.; Agabriel, J.; Gallo, L.; Lherm, M.; Ramanzin, M.; Sturaro, E. Environmental Footprint of the Integrated France–Italy Beef Production System Assessed through a Multi-Indicator Approach. *Agric. Syst.* **2017**, *155*, 33–42.
13. Bragaglio, A.; Lazzari, A.; Brambilla, M.; Giovinazzo, S.; Bisaglia, C. L'automazione Come Possibile Risorsa per La Gestione Del Piatto Unico Negli Ovicapri.
14. Mosnier, C.; Jarousse, A.; Madrange, P.; Balouzat, J.; Guillier, M.; Pirlo, G.; Mertens, A.; ORiordan, E.; Pahmeyer, C.; Hennart, S. Evaluation of the Contribution of 16 European Beef Production Systems to Food Security. *Agric. Syst.* **2021**, *190*, 103088.
15. Buratti, C.; Fantozzi, F.; Barbanera, M.; Lascaro, E.; Chiorri, M.; Cecchini, L. Carbon Footprint of Conventional and Organic Beef Production Systems: An Italian Case Study. *Sci. Total Environ.* **2017**, *576*, 129–137.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

The contribution of windows to the acoustic insulation of facades: prescriptions and materials

Claudio Ivona ^{1,*}, Umberto Berardi ¹

¹ BeTOP group, Dipartimento ArCoD, Politecnico di Bari, via Orabona 4, 70125, Bari

* E-Mail: claudio.ivona@poliba.it

Abstract: In the last years, the indoor housing comfort has been increasingly investigated. In particular, indoor acoustic comfort is increasingly seen as a main component in indoor environmental quality, due to the increasing environmental noises. The critical component of a façade is often the glazing partition. This study discusses acoustic standard requirements of glazing systems in Europe. Practical solutions for improving the acoustic performance of glazing are presented, such as the choice of laminated or double leaf glass, the right assembly of the gaskets in PVC or aluminum frames and their insertion on the façade design. The paper also evaluates some sound insulation improving techniques from design to retrofitting interventions. The impact of a proper in-situ installation is discussed according to the UNI 11673. Finally, the study reports future directions of research aiming to increase the sound insulation of windows.

Keywords: Acoustic comfort, acoustic performance, sound insulation, window glazing, UNI11673.

1. Introduction

The need to achieve a good indoor environmental quality is one of the main innovation goals. In all fields of study, including building science, energy saving issues have been investigated, which recalls in improving actions on thermal insulation or acoustic comfort [1]. These last two key elements of the indoor environmental quality are designed to be as efficient as possible even if trends are not strictly related to each other [2-3]. An important aspect of indoor housing environment is acoustic well-being. In fact environmental noise problems are becoming serious. Reports by the World Health Organization [4] and the European Environment Agency [5], underline the need to efforts to achieve an indoor

environmental comfort due to the increase in the number of people exposed to a high noise level, resulting in health issues.

Environmental noise pollution greatly affects indoor comfort; the ever-increasing traffic in cities, for example, or the urban noise disturbance, can cause annoyance both to ordinary dwellings located to the lower floors and to those buildings that have higher expectations in terms of acoustic comfort, such as hospitals, schools, libraries or theaters.

The assembly of façade components must be a main concern of the preliminary design of a building. On the façade in fact occurs multiple physical stresses due to different actions against which acoustic and thermal insulation standards are required [6]. Outdoor and indoor environments division is performed by the building envelope, but if there are openings for windows to allow indoor lighting or natural ventilation, the need to design different elements that must work together to achieve specific standards is a main requirement.

The opaque and glazed parts of the building envelope have different behaviors to various physical stresses; the wall part, given its mass, is often a good thermal and acoustic insulating element [7], therefore, the presence of a window could lower the overall thermal and acoustic insulation value of the facade [8]. The acoustic insulating properties of windows is measured by the sound reduction index (R) as per ISO 16283 [9], which reports calculation procedures dependent on various aspects such as type of glazing, size of glass-sheets, characteristics of the frame, type of gaskets, perimeter sealing and fittings, especially in locking points [10]. The outdoor temperature may be an influence factor too [11]. The choice of the construction characteristics of windows is crucial to ensure and keeping the consistency between the performance calculated in laboratory and declared by the manufacturers, and that actually encountered in situ or perceived by the users [12-13].

Based on growing understanding of the impact on human health (as stress, headache, sleep disturbance, cardiovascular disease and cognitive development and impairment), the acoustic performance of the building need to be focused on the control of environmental noise levels and to be assessed to limit indoor noise levels. Main solution for limiting incoming unwanted noise is in the change in the path between outdoor sources and receiver users.

Like a masonry wall, windows often have a multi-panel layering in the glazed part, presenting insulated glass units, more efficient in terms of sound insulation [14-15]. The glazing part accounts for about 75-80% of the total surface area of a window and therefore will be the one most stressed by acoustic vibrations. The acoustic impact of an aluminum or PVC frame on the sound reduction index of a glazing system is related on the acoustic quality of the glazing unit itself: the lower the Sound Reduction Index of the glazing, the lower the impact of the frame [16]. So, the performances of a product must be verified in situ, once the construction phase is completed. However, the acoustical and thermal trend performances do not always coincide [17].

2. Methods and Valuations

Most frequently average noise indicators in Europe are the day-evening-night sound pressure level (L_{den}) and the night sound pressure level (L_n) [5]. These can be specified for different reference gaps:

L_{den} , a noise indicator calculated as the A-weighted sound power level based on energy equivalent noise level (L_{eq}), is measured in a 24-h period with a 10 dB(A) penalty for night time (23:00-7:00) and 15 dB(A) for evening hours (19:00-23:00); L_n is measured over an 8-h period during night-time (23:00-7:00); L_{day} over a 12-h period during day-time (7:00-19:00); and L_e over a 4-h during evening (19:00-23:00).

After the COST Acton TU091, the harmonization for descriptors and sound insulation classes was proposed, to facilitate data exchange and experience between countries [18]. Starting from the classification standards proposed in different countries, regulations requirements are basically divided into two main categories:

- Requirement performance of the building elements, as the weighted standardized façade sound level difference ($D_{2m,nT,w}$), which characterizes the façade ability to insulate against the airborne sound transmission. In this case, the façade descriptors, as R_w and $R_w + C_{tr}$, must be specified in the acoustic design project;
- Requirements for the value of the maximum indoor sound level (L_{Aeq}) which considers the outdoor noise exposure (L_{den}) measured inside the buildings. This category is mostly used by countries with classification schemes.

Some countries have introduced a simpler set of criteria for higher acoustic comfort as an alternative to the classification schemes, which is considered to supplement the noise prescriptions.

In France, for example, the minimum requirement is related to outdoor noise level, so that the limit can be higher or lower depending on the location of the building, according with noise pollution maps. These requirements are a function of the areas of exposure to external environmental noise, which are zones from 1 to 3 of the acoustic disturbance plan (PGS = Plan de Gêne Sonore), and the areas where the limit values of the road and rail noise maps are exceeded [19].

In Germany, there are apparently no specific prescriptions for existing buildings that depends directly on acoustic disturbance plans mapping, and the acoustic insulation of a building is evaluated by the sound reduction index of the assembled components, related to the A-weighted sound pressure level (L_{Aeq}), with a 50 dB(A) and an 80 dB(A) limit for respectively day and night [20].

In Nordic Countries, as Norway, Sweden or Ireland, sound classification schemes are defined in current regulations. Relating to façades, indoor noise limits are specified according to the room type (living room, bedroom or kitchen), and not to a single sound insulation value. Classes sorting is associated with the limit values intended for new housing (C or III) and a less restrictive class for renovated housing (D or IV) [21].

Table 1 - Limit values of decrypting parameters of building elements by the UNI 11367 [22]

Class	$D_{2m,nT,w}$ [dB]	R'_w [dB]
I	43	56
II	40	53
III	37	50
IV	32	45

In Italy, the UNI 11367 (updated on 2023) [22] describes the procedures to define the acoustic classification of single properties. The classification can be expressed for each requirement or as a single descriptor. The determination of the acoustic classes (Table 1) is based on the average values of the performance of all the in-situ measurements carried out on the various elements. This classification is independent from the room type, and the external acoustic climate [23], and classes are commonly associated with the limit value intended for new construction (II). The revised Italian standard UNI 11367 also include guidelines for applications, measurement and valuation criteria.

2.1. *Setting Prescriptions*

The reference standard for the installation of windows and curtain walls is the UNI 11673. It contains four parts dedicated to specific aspects, published from 2017 to 2021.

The first part [24] defines methodologies for verifying the basic requirements of window and door installation projects, providing design guidance. The verification of installation joints and their performance, along with that of the window frame, is also defined. It must be carried out considering the climatic and usage conditions of the building.

Second part [25], deals specifically with the operators; installers and foremen who will be responsible for installing the windows. It establishes the training and verification path necessary to achieve the qualifications of level EQF2, level EQF3 and level EQF 4. This training greatly influences how the installation is done and thus the performance achieved.

The third part [26], still deals with training, but from the side of the bodies that deliver it. It establishes criteria for transparency and competence, both for the organizations that provide and certify training. The goal is to give guarantees and value to the qualifications obtained, distinguishing sharply from laying licenses and other training courses lacking clear and transparent certification.

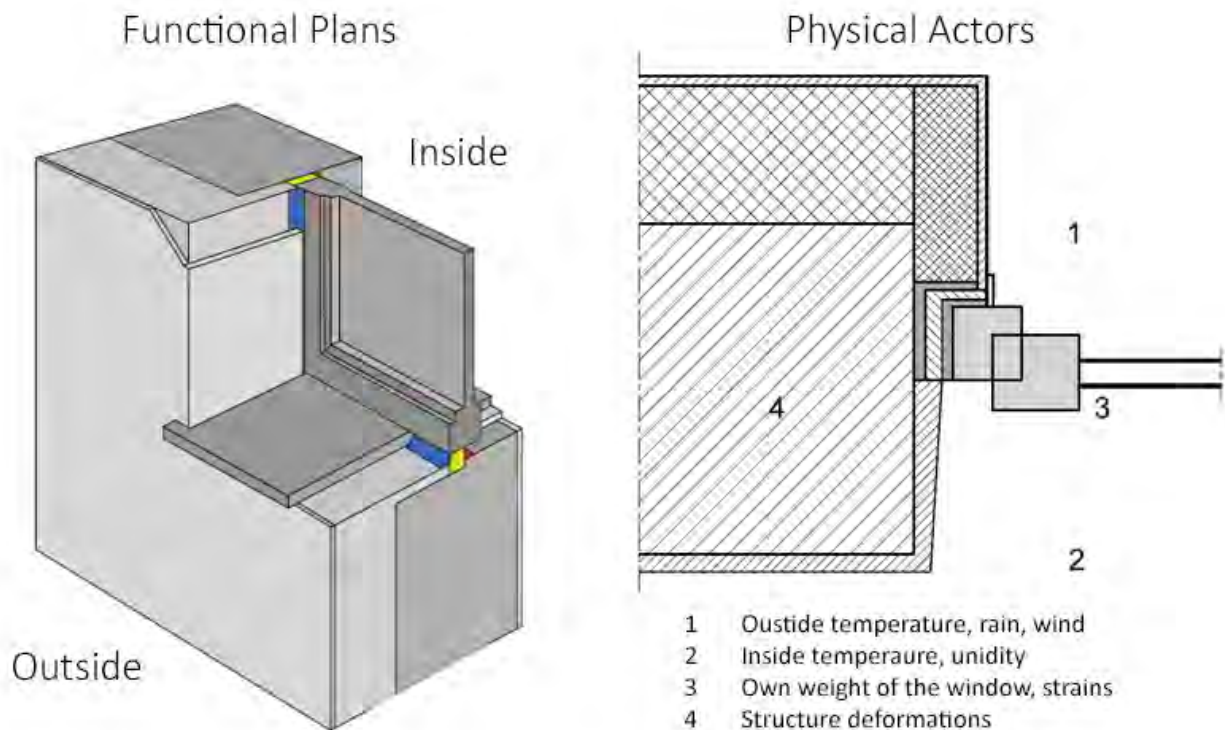
The last part [27], provides guidance on how to verify the proper installation of fixtures. It deals with two combined methods: Blower Door Test and Thermographic Examination. The former consists of pressure and vacuuming the installed window frame. It allows the detection of cracks and leakage points. Thermographic Examination is an analysis performed with the thermo-scanner that allows us to see hot spots represented graphically. Combined, these two tests provide an ideal overall picture, helping to detect even those leaks that would not be noticed by performing only one.

The design development of the joints must consider the physical actions on both the window frame and the boundary elements. The UNI 11673 defines the design of the window interface solution, which considers the housing of the window, as well as of the joints, insulation and sealing on the so-called Functional Plans (Fig. 1): weathertightness plan (blue); plan of permeability to the air inside the building (red); plan of thermo-acoustic insulation and mechanical fixing (yellow).

Prescriptions define checks to be performed and rules to be followed for verification of installation plumb with the wall cavity, parallelism between the faces of the counter-frame and its coplanarity with the wall-opening, square construction of the window component, and perimeter sealing. The importance of subframe design for the purpose of durable sealing is crucial, to prevent it from breaking if subjected to tensile stress or major temperature changes. The replacement or installation of a new

window on an existing frame is also prescribed. Due to its no-standard situation, specific evaluations needs to be carried out on site with specific surveys. Examples with standard installations and joint designs can be found in Section 4 of UNI 11673-1 [24].

Figure 1. Functional Plans and Physical Actors on the facade [UNI 11673-1].



The installation is crucial for sound insulation purposes, due to the difference in the various materials on the façade. Precautionary guidance is also given, such as assessing the acoustic pressure at the edges of the window frame, which is often higher than central parts, or evaluating a frame with a rebate design rather than in the perimeter of the wall opening. Thus, acoustic performance is strongly linked to the airtightness performance of the joints.

The current regulation [24-27] suggests guidelines to achieve such performance: continuity of the internal sealing, to allow continuity of the functional airtightness plane, and the study of the physicochemical compatibility of sealing materials and glass components.

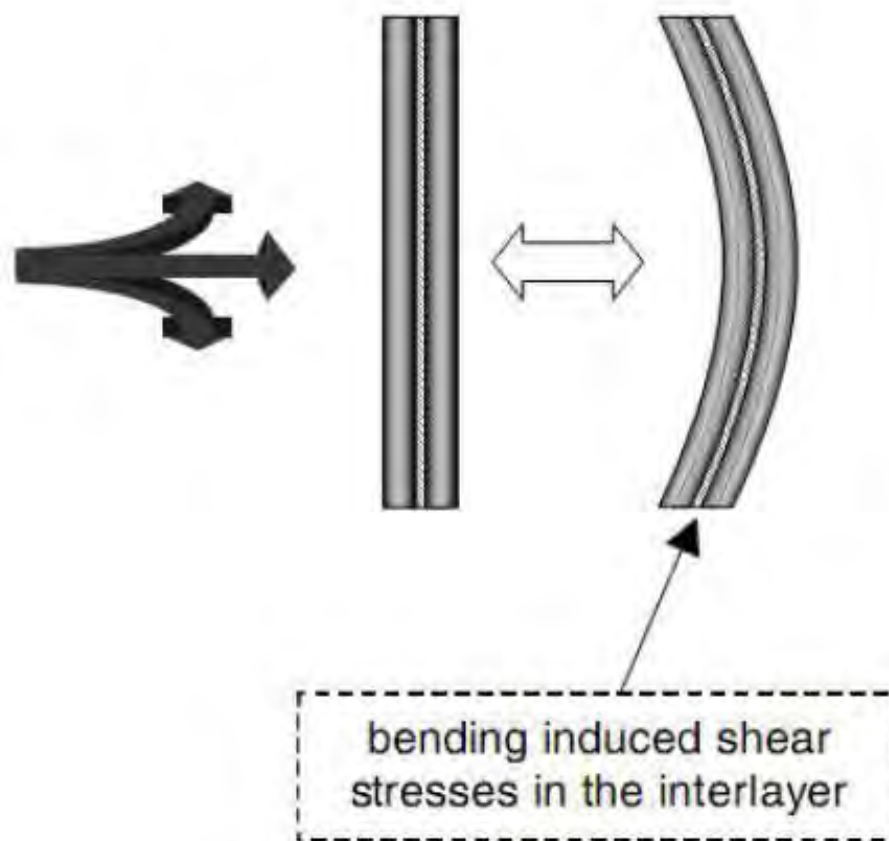
3. Materials and Characteristics

3.1. Glazing Unit

The main component of the window that most fulfills the task of insulating the indoor environment from the outdoor environment is the glazing unit. Its main characteristic, in addition to transparency, is its density, which allows this material to have excellent acoustic insulating capabilities. Particular

attention should be directed to the processing and treatments that can be performed on the sheets to improve their performance. Layering two panes through the interposition of a plastic and transparent material, such as PVB, allows to increase the mass by coupling several panes together and reduce the critical frequency (f_c), in which there will be the negative effect of coincidence [28]. This effect decreases the sound insulation of the glazing system. In this treatment, the PVB reduce the amplitude of the incident vibration on the surface, because of the sound pressure stress. There will be a microscopic deformation of the two sheets that will lead to a shear stress between the fibers of the material, but also to a dissipation of this mechanical energy into heat (Fig. 2). This is the process that explains the damping action in the inner layers of the laminate [10].

Figure 2. Laminated glass schematic diagram

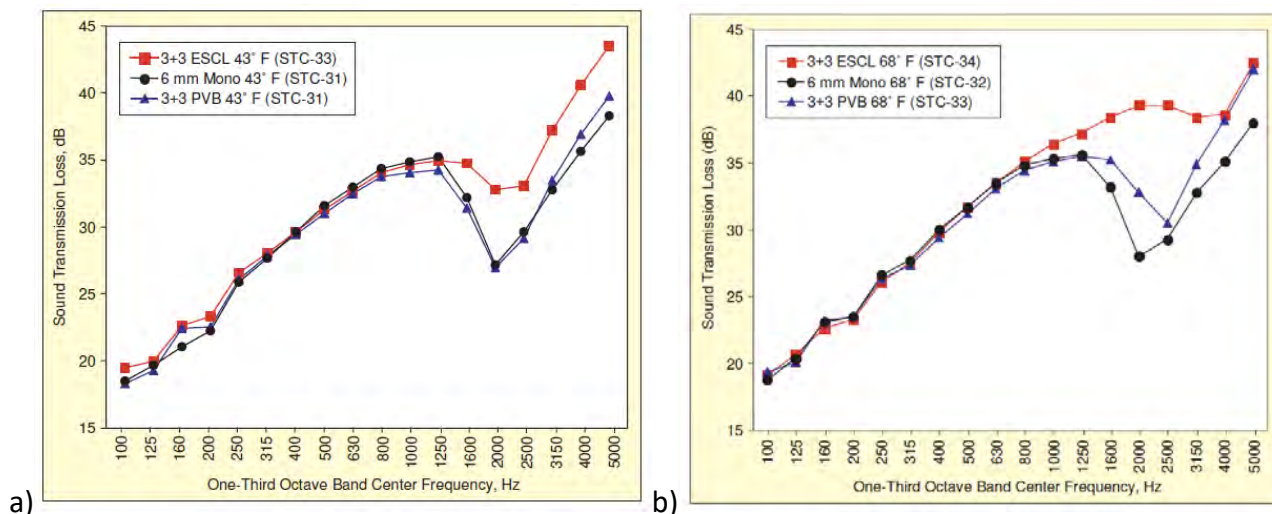


3.2. Glass Processing

The thickness of glass unit is one of the main parameters to lower the value in which the coincidence effect occurs. A pane with a thickness of 3 mm will generally have a critical frequency of about 4000 Hz, while with a doubled thickness (6 mm), the f_c will be found at 2400Hz, and with 12mm at 1200 Hz [14]. Regarding the behavior depending on the various thicknesses of a monolithic glass (1 pane), or a laminated glass (glass pane + PVB + glass pane), there is a substantial change in behavior around 1000 Hz was (Fig. 3). A monolithic pane with a thickness of 6 mm, and a laminate glazing with the same total

thickness consisting of two 3 mm panes with two PVB sheets interposed, have an insulation behavior almost similar up to 800 Hz. In this frequency region, the acoustic performance will be relied on the density mass of the glazing unit.

Figure 3. Sound transmission loss of laminated glass at 6°C (a), and 20°C (b) [8]



3.2.1. Insulated Glass Units

Improved acoustic performance can be achieved by using lamination in Insulated Glazed Unit (IGU), consisting of two laminated panes, with a gap of air or other gas (eg. argon), sealed around the perimeter. The presence of this gap improves acoustic performance, but low-frequency behavior will always remain critical.

This problem is clear when the behavior of various types of insulating glass unit conformations were compared [29]: the first formed by two single panes coupled with an air gap, ranges from 18 to 24 mm; the second specimens have the first pane laminated with a layer of PVB, and a second single pane, with an air gap from 24 to 27 mm between them; third ones are an insulating glass unit with both panes laminated with two sheets of PVB, and an air gap range from 20 to 27 mm.

Results show that there is better insulation of the insulating glass unit in the case where the total thickness of the laminated panes is different (eg. specimen WOG2/4, Table 2). This turns out in a smoothed sound insulation curve, because when tinner glass coincidence dip occur the more fest increment of thicker glass compensate it, and result in a higher value of sound reduction index.

Trend of the indicators in the frequency range considered in the case of the sample with the first laminated pane only (specimen WOLG1/4, Table 2): in this case the resonance effect will occur equally at the frequencies 125 and 250 Hz, but the overall value of the SRI will be about 5 dB higher below 250 Hz, but remains basically unchanged above 400 Hz. This behavior is mainly due to the increase in the mass of the first slab (from 4 to 8 mm). An increase in the air gap of 2-3 mm it showed no improvement on value of the SRI. Finally, in the case of samples with both laminated panes, with two sheets of PVB each, the resonance effect will always be present below 200 Hz, but will have a higher value on those

levels (5-10 dB). Therefore, the use of laminated glass can lead to an increase in Sound Reduction Index especially at low frequencies, due to the improvement of the glass-air-glass resonance system.

The R values after introducing the spectral fit values C and C_{tr} (as per UNI 717-1 [37]) can be seen ranging between 37 and 39 dB for the first group of samples (two single panes), between 38 and 41 dB for the second group (only one laminated pane), and between 41 and 44 dB for the third (two laminated panes).

Variations in SRI has been found as the thickness of the insulating glass unit cavity changed [28], and different behaviors in a casement system with 6 mm slabs with an air gap ranging from 12 mm to 85 mm. The results show an increase in sound insulation, especially at low frequencies, but these are boundary situations, as a window frame with an air gap of 85 mm, although with excellent performance, would present several problems in execution and operation, in addition to being non-standard production and with a high production cost.

Table 2. Window specimens with sound reduction index values [29]

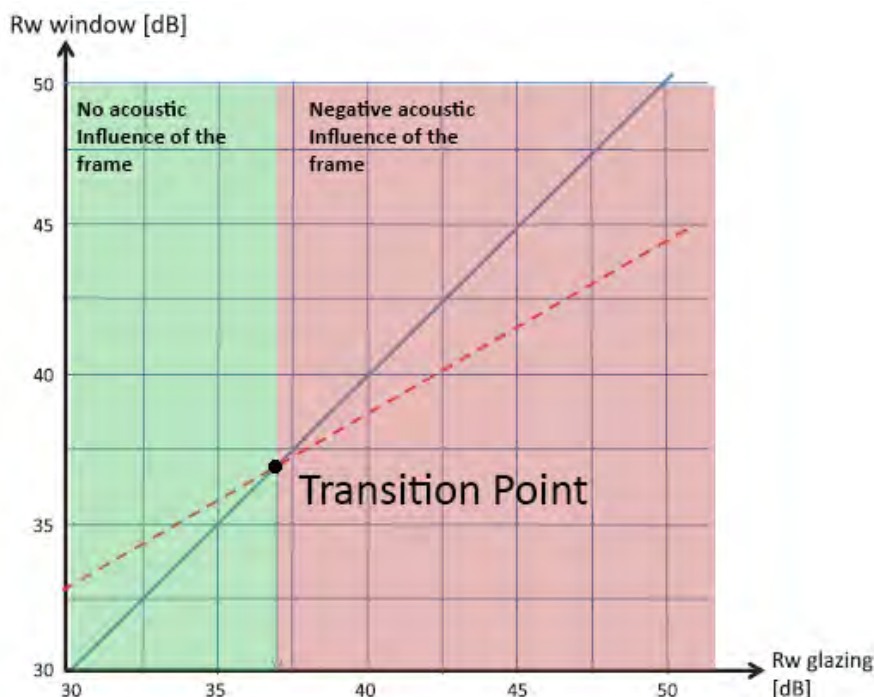
Specimen Code	1 st Glass [mm]	Air Gap [mm]	2 nd Glass [mm]	R_w [dB]	$R_w + C_{tr}$ [dB]
WOG2/1	4	18	6	37	32
WOG2/2	4	24	6	38	33
WOG2/3	4	24	8	38	33
WOG2/4	4	24	12	39	34
WOLG1/1	44.1	24	6	38	34
WOLG1/2	44.1	24	8	41	38
WOLG1/3	44.1	27	6	41	36
WOLG1/4	44.1	24	12	41	37
WLG2/1	66.2	27	44.1	43	40
WLG2/2	66.2	22	44.2	42	38
WLG2/3	66.2	20	55.1	42	35
WLG2/4	66.2	20	55.2	44	39

3.2. Window Frame

The window frame has many different conformations and materials, which affect acoustic performance. In fact, the cross section of the window frame is an important factor for air and water tightness characteristics. The shape of the frame, whether aluminum or PVC, affects sound transmission as it generally has a lower SRI value than the glazing part [16]. It is often an element that needs to be operable and that is framed in a masonry that is not perfectly regular or square. It was found that in laboratory measurements the impact of an aluminum frame on the SRI of a window depends on the acoustic quality of the glass itself: the lower the SRI value of the glass pane, the lower the impact of the frame on the final value. In addition, researchers found a Transition Point in the trend between the R_w values of the glass and the frame, where for values over 37 dB the frame will have a

negative acoustic impact on the total performance of the window [16]. The transition point can be seen in Fig. 4: the continuous line represents no acoustic influence of the frame on the window and the dashed line is an interpolation of different tests and represents the acoustic influence of a thermally decoupled aluminum frame when combined with a glazing. The transition point between 35 dB and 40 dB depends on whether the cavities are closed on the frame perimeter with different insulation materials, such as mineral wool or polyurethane foam.

Figure 4. Influence of the frame on the performance of a glazing [16].

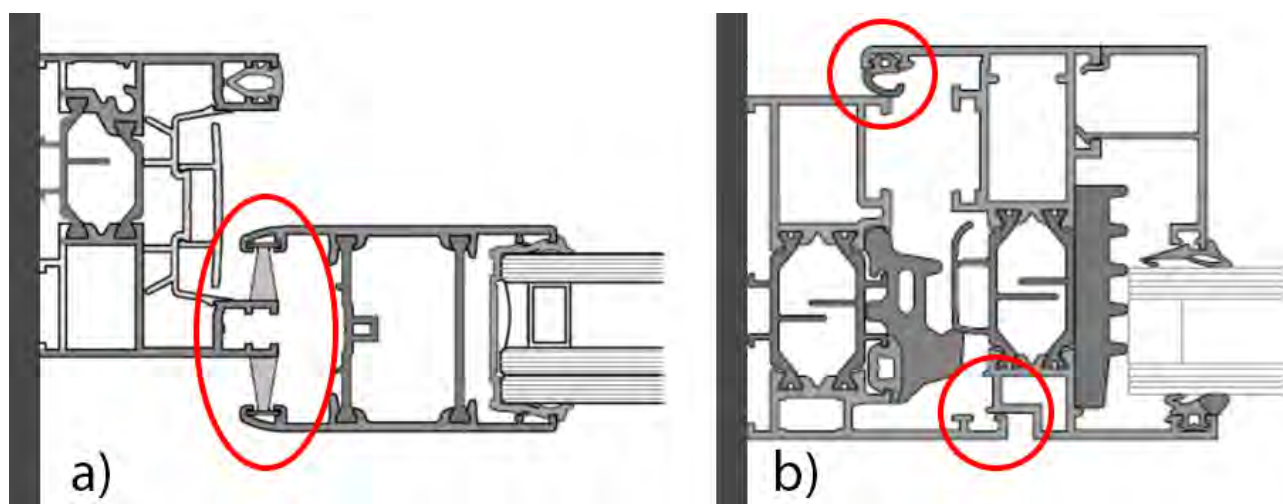


Indoor acoustic comfort of a building is strictly related to the presence of windows opening in the façade. The concomitance of the dual function of acoustically insulating from external noise and allowing ventilation of the indoor environment creates several problems. Therefore, the conformation of the closing and opening system is a crucial point for sound insulation to be achieved. The various shapes of the sections of a frame allow a certain level of freedom in the conformation of the building element, but there are mainly three types of designs: hinged, sliding and fixed. The other more common types of opening systems, such as vasistas or tilt and turn, are merged with the hinged system as they differ only in the locking system.

A first comparison between the acoustic behaviors of these frames must be carried out without changing the dimensional sizes of the samples and using different frame designs. 21 samples were analyzed [31] considering various factors such as: pane thickness, glazing lamination, frame type and frame style, and the use of external shutters. The results show a higher value of transmission loss in casement windows, rather than sliding windows. Improvements in these cases can go from +5 dB to +9 dB. A small improvement was also found from the use of an air gap in the Insulated Glass Unit of 20 mm instead of 12 mm.

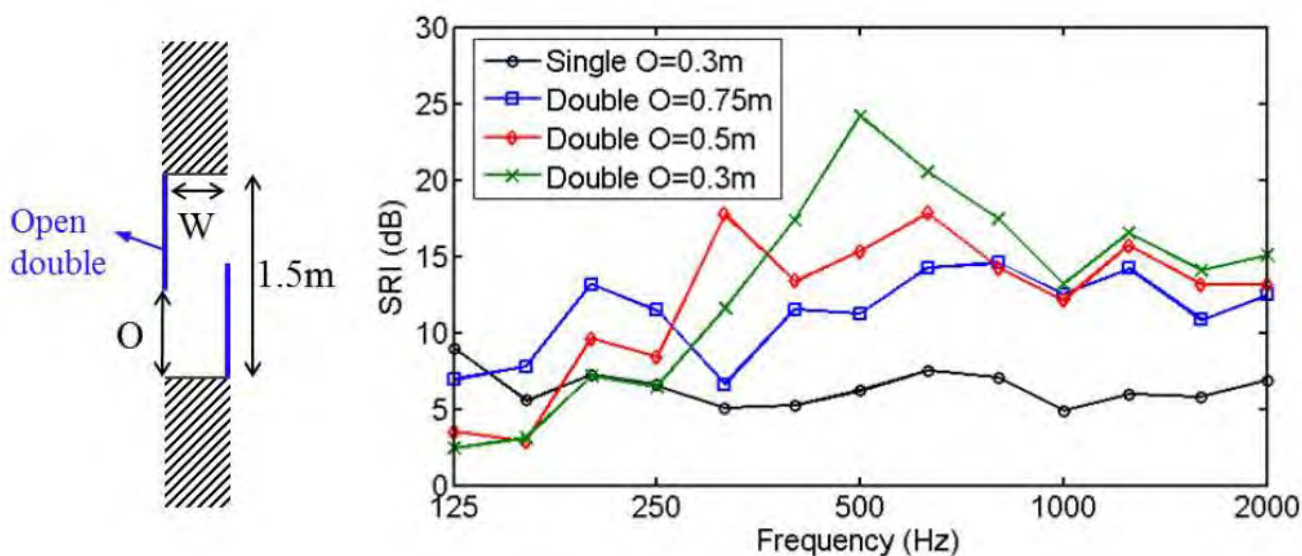
The difference in frame performance is due to the amount of air that its locking systems allows: a sliding window, for mechanical reasons of operation and assembly, has a carriage system that will inevitably leave a gap between the sashes, from which sound waves propagates (Fig. 5a). The locking system of a casement frame encase the fixed frame profile, with locking points at all around the perimeter, that close and crush the rebate gasket, making the opening almost airtight (Fig. 5b). A sliding window frame has no-crushed gaskets with a different closing function.

Figure 5. Window frame sections with sliding design (a) and hinged design (b)



Gaskets are usually made of thermoplastic or silicon material and are inserted in special slots between sash and frame (rebate gaskets) to seal closing system, and between sash and glazing unit (glazing-bead gaskets).

Figure 6. Sound Reduction Index of open glazing with adjustable opening size O [36]

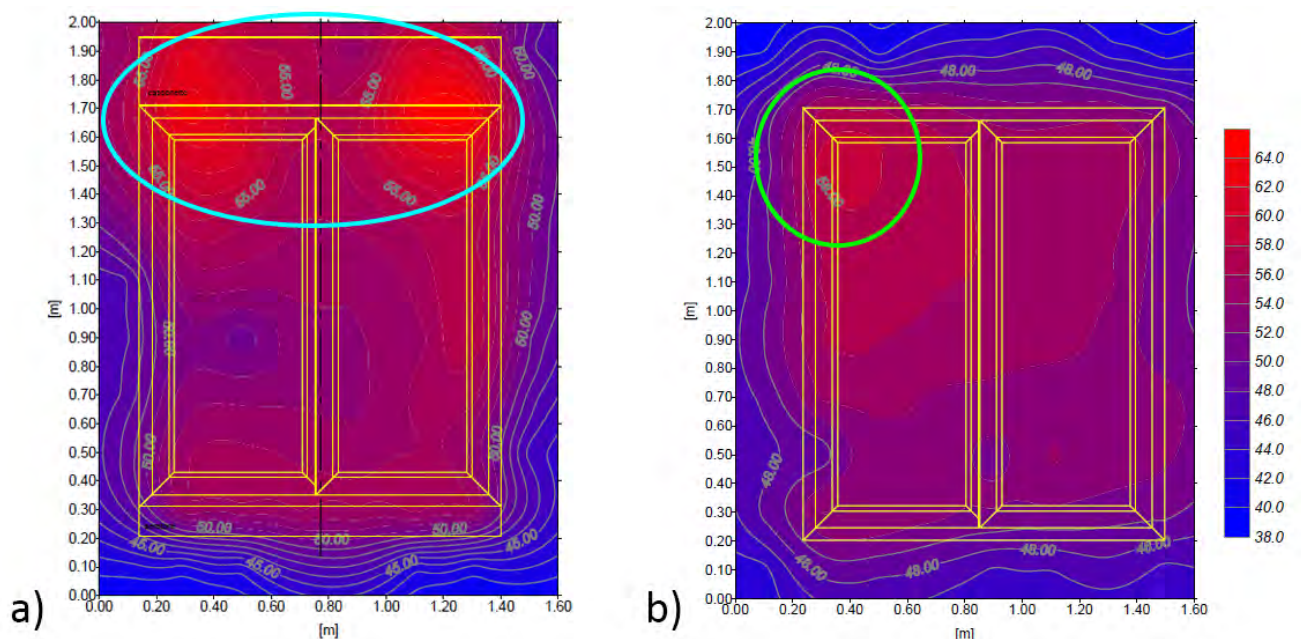


Smaller opening size generally gives better insulation in the mid-to-high frequency range [36]. The use of double glazing to improve this behavior is shown in Fig. 6. For the same opening size, the sound reduction index of the double window (blue, red and green lines) is at least 7 dB higher than the single glazing (black line) above 315 Hz, even without considering the damping. A single window requires very small opening size for good sound insulation, which in turn deteriorates the ventilation performance. The improvement by using double units generally leads to a good sound insulation in the mid-to-high frequency range. Besides, this system allows additional sound control devices such as absorbing materials or active control techniques to be applied inside.

4. Assembly and Compliant Solutions

The importance of proper mounting, even in the case of a laboratory test, is a key theme, and its contribution to acoustic performance of the component is crucial [32]. The definition of intensity maps is crucial to identify critical assembly points. The specimen is a casement window with an upper shutter box, and a forced ventilation system at the threshold level (Fig. 7a). The analysis of the map of acquired sound intensity levels was set up. Non-negligible levels were identified, located mainly in the border points of the frame-supporting masonry connection zone. Acoustic issues are difficult to analyze if only measurements of pressure levels are performed. Through the measurement of sound intensity levels, in fact, is possible to define maps that provide pointy indications of the insulation properties of individual zones of the tested specimens.

Figure 7. Intensimetric Sound pressure level map, first specimen (a) and second specimen (b) [32]



The upper and right sides of the frame-supporting connection area were identified as the main critical area of this specimen. After a new installation of the window frame with an improvement in the frame-supporting connection, a new measurement session revealed the expected improvements.

From the soundproofing power trends, there is a constant improvement of R_w of 1-2 dB on the frequency range, starting from 300 Hz. This is also confirmed by the value of R_w increasing from 39 dB to 40 dB, between first and second measurements [32].

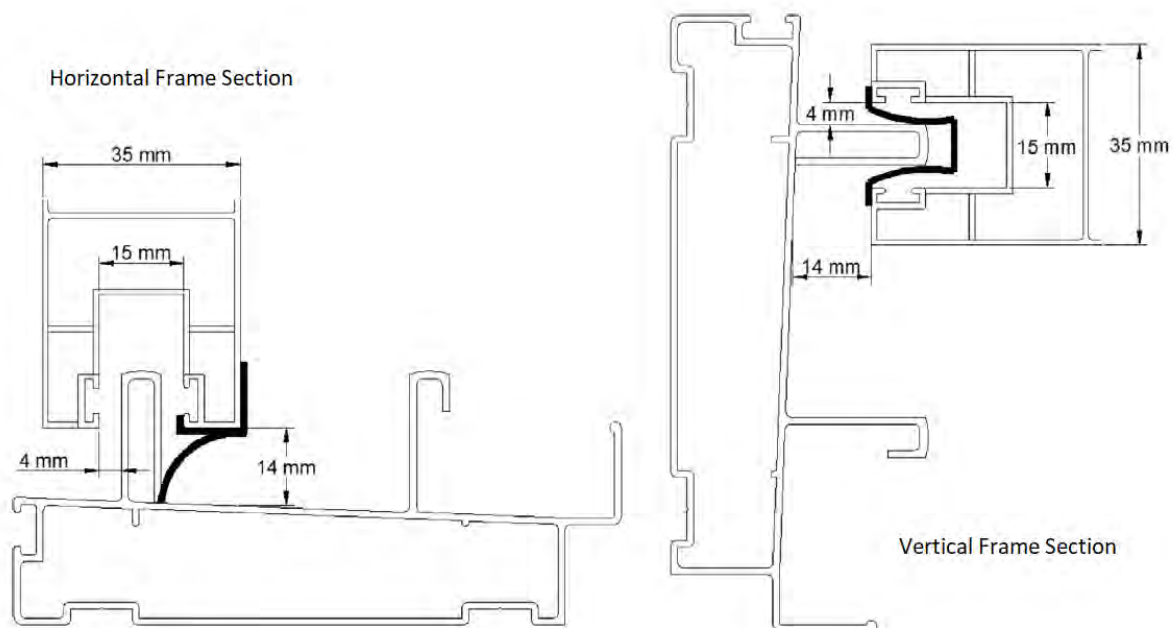
The second example concerns an anti-noise window frame sample that, unlike the preceding one, has neither the shutter box nor the ventilator (Fig. 7b). From the first intensimetric measurements, a decrease in the average of the values measured on the mapping is spotted, compared to the values on the first sample.

Despite the lack of shutter box and forced ventilation of the first specimen, localized sound leaks were also found on the contact perimeter between the window frame and masonry. Dissimilarities on the size of the sashes, which were smaller than they should have been, formed an insufficient rebate to provide a perfect fit to the frame [32]. After the replacement of the operable part with the correct sized ones, a new campaign of soundproofing power R measurements was carried out.

The improvement in performance can be estimated at 2 to 4 dB throughout the examined frequency range. The Sound Reduction Index goes from 38 dB for the first measurement session to 41 dB for the second highlighting the importance and influence that the correctness of assembly of a complex system such as a window frame has. At this point, it is important to reduce the negative impact of the frame (aluminum or PVC) on the total soundproofing capacity of the window. The opening system in this case turns out to be a crucial aspect. The precision in which the window frame is installed and the degree of deterioration of insulation materials used frame are factors that strongly influence the environmental performance of a window over time.

The evaluation of sound insulation of existing windows is also a topic that needs to be studied.

Figure 8. Cross-sectional view of installed airtight structures [35].

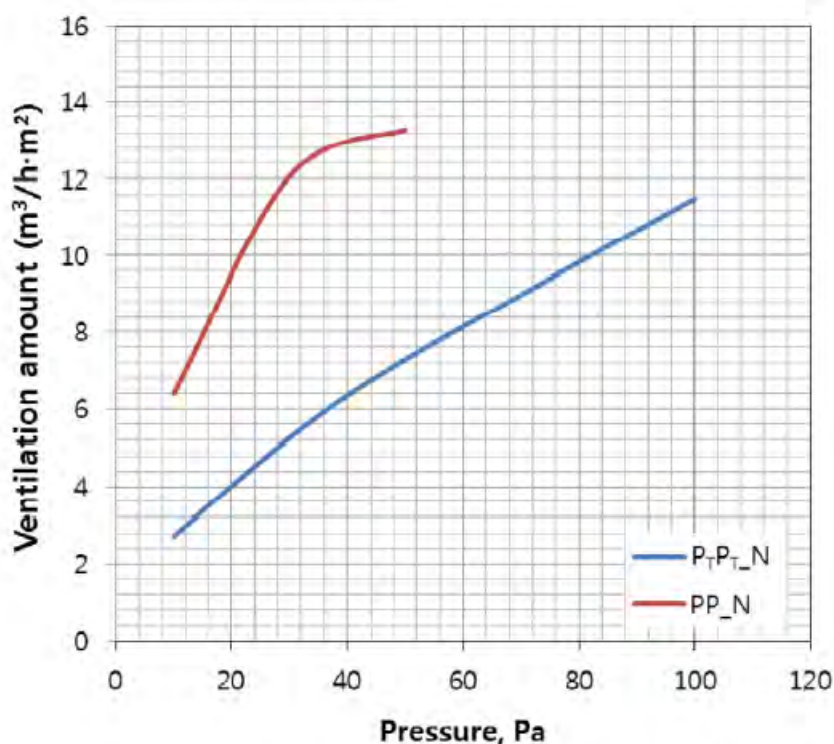


A solution applicable to both existing and new buildings is to reduce the leakage of air on critical points, which are most frequent in a sliding-frame window. To avoid intrusive intervention, the insertion of a special profile whose function is to reduce unwanted ventilation is a practicable solution. The sound insulation performance of single and double airtight windows was measured and compared, then the specimens were classified into new and old frame designs, and improvements due to the installation of airtight structures were evaluated [35]. These airtight structures are PVC or aluminum complex shaped profiles that hook up on the frame perimeter of the sashes without the aid of mechanical fixings (Fig.8).

The glazing part was a 16 mm thick insulated glass unit (5 mm glass + 6 mm air + 5 mm glass), and the window-wall connection were treated with silicone to prevent lateral sound transmission. Sound pressure levels in the sound receiving room and levels in the source room were measured simultaneously after generating white noise through the speakers installed in the laboratory.

Based on the measured the values, Sound Reduction Index was calculated once the reverberation time of the sound receiving room was calibrated. Pressure differences were measured in sequential order for pressures of 10 Pa, 30 Pa, 50 Pa and 100 Pa. The additional improved profiles were installed on the 4 families of samples on the horizontal, vertical and middle section of the window frame, as in Fig. 11. The results show that improvements were obtained in the range value between families of specimens. Single windows recorded improvements in sound insulation performance of only 2-4 dB, while double windows recorded improvements of 10 dB or more.

Figure 9. Comparison in the air-tightness performance of PVC dual window [35].



Notably, when airtight structures were installed on the old windows, the sound insulation was similar to that of the new windows. Therefore, these airtight structures appear to be an alternative to achieve the performance of a new window without replacing the old one. Single windows with airtight frames installed vertically, recorded a performance improvement of about 2-4 dB, new PVC double windows with airtight frames installed in both vertical and horizontal directions recorded an improvement of 8 dB, and aluminum + PVC double windows recorded an improvement of 12 dB.

The old PVC double windows recorded an improvement of 13 dB and the old aluminum + PVC double windows recorded an improvement of 14 dB, with a greater improvement in airtightness performance than the new windows (Blue Line in Fig. 9). When airtight structures were installed on the old windows, the sound insulation performance was similar to that of the new windows [13]. Therefore, these airtight structures appear to be an alternative to achieve the performance of a new window without replacing the old window.

5. Conclusions

A review of European regulations and the problems in façade acoustic insulation performance was presented. The studies presented brought out the great work that has been done in the field of window acoustics in recent years. It was seen how the use of an Insulated Glass Unit improves transmission loss performance, working on the mass of the element and reducing the negative effects at low frequencies, which was found to be a critical point in many tests. The use of glass processing techniques such as lamination has produced improvements to the soundproofing power of the glazing unit itself. However, this has not always led to an equally positive increase in the overall performances, it depends on the effect of the frame performance.

The assembly of an Insulated Glass Unit with toughened glass (with internal fibers more tense than a normal float glass) could be subject of future study: this processing does not confer any specific acoustic qualities but could be functional in reducing pressure sound vibrations transferred to the frame through glass panes and gaskets.

The determination of transition points between frame and glass acoustic performance is a useful predicting tool the achievable sound insulation of the glass-frame system. Improvement of this element can come either from modeling the profile sections to create geometries which upgrade the air transmission loss, or from the affixing of dedicated profiles that limits the leakage of air at critical points of the closure system. This choice has been shown to improve performance, as the use of a casement rather than a sliding system is recommended. The study of the window frame must therefore necessarily contain an evaluation of each collaborating element in the façade and its design from the construction phase through installation to the operational phase.

References

1. Hu Z.; Zayed T.; Cheng L.; A critical review of acoustic modeling and research. *Building Acoustics* **2021**, *29*, 1-28. <http://doi.org/10.1177/1351010X211022736>
2. Di Bella A.; Granzotto N.; Pavarin C.; Comparative analysis of thermal and acoustic performance of

- building elements. Forum Acusticum, Kraków, Poland, 7-14 September **2014**
<http://doi:10.13140/2.1.5063.3280>
3. Granzotto N.; Bettarello F.; Ferluga A.; Marsich L.; Schmid C.; Fausti P.; Caniato M.; Energy and acoustic performances of windows and their correlation. *Energy and Buildings* **2017**, *136*, 189–198. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.024>
 4. World Health Organization, Regional Office for Europe, Environmental Noise Guidelines for European Region, **2018**, <http://www.euro.who.int/pubrequest>
 5. European Environmental Agency – Environmental Noise in Europe **2020**, <http://doi:10.2800/180334>
 6. Xu W.; Mao D.; Yu W.; Jiang Z.; Acoustic performance of balconies having inhomogeneous ceiling surfaces on a roadside building facade. *Building and Environment* **2015**, *93*, 1–8. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.027>
 7. Keränen J.; Hakala J.; Hongisto V.; The sound insulation of façades at frequencies 5-5000 Hz. *Building and Environment* **2019**, *156*, 12–20. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.061>
 8. Bajraktari E.; Lechleintner J.; Mahdavi A.; Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation. *Energy Procedia* **2015**, *78*, 140-145. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.129>
 9. UNI EN ISO 16283/2016 - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements.
 10. Lu X.; Jinhong W.; Weiling W.; Windows sound insulation research with different glass. *Applied Mechanics and Materials* **2014**, *584-586*, 1868–1871. <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.584-586.1868>
 11. Konstantinov A.; Verkhovsky A.; Lyabakova E.; Sound insulation of PVC windows at negative outdoor temperatures. *IOP Conference Series: Materials and Science and Engineering* **2020**, *896*, 012054. <http://doi:10.1088/1757-899X/896/1/012054>
 12. Caniato M.; Bettarello F.; Schmid C.; Fausti P.; Assessment criterion for indoor noise disturbance in the presence of low frequency sources. *Applied Acoustics* **2016**, *113*, 22–33. <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.06.001>
 13. Guan H.; Hu S.; Lu M.; He M.; Mao Z.; Liu G.; People’s subjective responses to the combined thermal-acoustic environments. *Building and Environment* **2020**, *172*, 106709. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106709>
 14. Lilly J.G.; Recent advances in acoustical glazing. *Sound and Vibration* **2004**, *February*, *38*, 8–13. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.061>
 15. Scamoni F.; Scrosati C.; The façade sound insulation and its classification. Forum Acusticum, Krakow, Poland, 7-14 September **2014**
 16. Blasco M.; Belis J.; De Bleecker H.; Acoustic Failure analysis of windows in buildings. *Engineering Failure Analysis* **2011**, *18*, 1761–1774. <http://doi:10.1016/j.engfailanal.2011.03.027>
 17. Scamoni F.; Parati L.; Baccan V.; Scrosati C. Le prestazioni dei serramenti dal laboratorio al collaudo in opera. A.I.A., Ferrara, Italia, 11-12 March **2009**

18. COST Action TU0901, Towards a Common Framework in Building Acoustics throughout Europe, **2013**
19. Alonso A.; Suárez R.; Patricio J.; Escandón R.; Sendra J.J.; Acoustic retrofit strategies of windows in facades of residential buildings: requirements and recommendations to reduce exposure to environmental noise. *Journal of Building Engineering* **2021**, *41*, 102773. <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102773>
20. DIN 4109-1/2018-1 Sound insulation in buildings – Part 1: Minimum requirements
21. Rasmussen B.; Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe, *Applied Acoustics* **2010**, *71*, 373-385. <http://doi:10.1016/j.apacoust.2009.08.011>
22. UNI 11367/2023 Building acoustics - Acoustic classification of building units - Evaluation procedure and in situ verification.
23. Fausti P.; Di Bella A.; Santoni A.; Scamoni F.; The Italian classification scheme of buildings. Application to apartments and schools. Inter-Noise, Seoul, South Korea, 23-26 August **2020**.
24. UNI 11673-1/2017 - Installation of doors and windows - Part 1: Requirements and verification criteria of design
25. UNI 11673-2/2019 - Installation of doors and windows - Part 2: Knowledge, skill and competence requirements of specialist in installation of doors and windows
26. UNI 11673-3/2019 - Installation of doors and windows - Part 3: Requirements for provide courses of non-formal education and training to specialist in installation of doors and windows
27. UNI 11673-4/2021 - Installation of doors and windows - Part 4: Requirements and verification criteria of installation
28. Garg N.; Shama O.; Maji S. Experimental investigations on sound insulation through single, double and triple window glazing for traffic noise abatement. *Journal of Scientific & Industrial Research* **2011**, *70*, 471–478.
29. Miskins K.; Dikavicious V.; Bliudzius R.; Banionis K.; Comparison of sound insulation of windows with double glass units. *Applied Acoustics* **2015**, *92*, 42–46. <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.007>
30. UNI EN ISO 717-1/2021 - Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation.
31. Maraqa M.A.; Hawas Y.S.; Alam Md. D.; Zarif J.El.; Aljunadi K.N.; Laboratory testing of different window design cases for noise. *Materials Science and Engineering* **2018**, *383*, 012027. <http://doi.10.1088/1757-899X/383/1/012027>
32. Asdrubali, F., Giorgio, B., Francesco, D., A., P. Prestazioni acustiche di infissi antirumore: influenza delle modalità di posa. 6° Congresso Nazionale CIRIAF. Perugia, 7-8 April **2006**.
33. UNI EN ISO 10140-2/2021 Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation
34. Meijer F; Itard L.; Sunikka-Blank M.; Comparing European residential building stocks: performance, renovation and policy opportunities. *Building research & Information*, **2009**, *37*(5-6), 533–551
35. Park H.K.; Kim H.; Acoustic insulation performance of improved airtight windows. *Construction and*

Building Materials **2015**, 93, 542–550. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.058>

36. Yu X.; Cui F.; Yao K.; Modeling and Simulation of windows with noise mitigation and natural ventilation, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, *Institute of Noise Control Engineering*, **2016**, 253-8, 258-263.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Progressi nello sviluppo di materiali per imballaggi sostenibili

Nicoletta Terlizzi ^{1,*}, Umberto Berardi ¹

¹ BeTOP group, ARCOD, Politecnico di Bari, via Orabona n.4, 70125, Bari

* E-Mail: nicoletta.terlizzi@poliba.it

Sommario: Il packaging ha assunto un ruolo importante per la capacità di assecondare le esigenze del consumatore moderno e dei nuovi stili di vita. Negli ultimi anni, diverse problematiche, quali il costo del petrolio e la sua disponibilità limitata, il volume dei rifiuti da imballaggio e le difficoltà legate allo smaltimento hanno spinto a ricercare materiali per produrre packaging sostenibili. L'utilizzo di biopolimeri per la realizzazione di imballaggi rappresenta una delle sfide più innovative e competitive. Cellulosa, amido, chitosano, acido polilattico e polioidrossialcanoati sono visti come alternative promettenti alle plastiche convenzionali negli imballaggi. Tuttavia, l'applicazione di questi biopolimeri negli imballaggi è limitata a causa delle loro scarse prestazioni meccaniche, dell'elevato costo di produzione e dei pregiudizi da parte dei consumatori che tendono a preferire prodotti commerciali meglio conosciuti. Questo articolo mira a fornire una panoramica sui recenti progressi nella ricerca sul tema di nuovi imballaggi sostenibili, fornendo informazioni critiche sulle prestazioni meccaniche e termiche e le annesse tecniche di produzione. L'obiettivo è quello di valutare la conversione dei biopolimeri in diverse forme di imballaggio mediante la produzione di biocompositi verdi, compositi laminati, micocompositi e compositi in amido termoplastico. Il lavoro mostra che il potenziale dei biopolimeri come nuovi materiali da imballaggio può essere migliorato mediante l'aggiunta di fibre o nanoriempitivi di rinforzo nella matrice polimerica e la miscelazione di biopolimeri.

Parole chiavi: Biopolimeri, biocompositi, micocompositi, bionanocompositi, packaging, imballaggi sostenibili.

1. Introduzione

Le materie plastiche che interessano oggi il settore del packaging sono quasi esclusivamente di natura sintetica e di origine petrolchimica come PVC, PET, polistirene (PS), polipropilene (PP),

poliammide (PA) [1]. Le caratteristiche che li rendono facilmente utilizzabili come materiali da imballaggio sono il basso costo, eccellenti proprietà fisiche (densità, peso molecolare), buone proprietà meccaniche (resistenza alla trazione) e di trasmissione (O_2 , CO_2), buona durata di conservazione del prodotto e ottime funzionalità in termini di praticità per i consumatori. Tra i rifiuti in plastica prodotti in tutto il mondo solo il 9% viene riciclato, il 12% viene incenerito ed il 79% è smaltito in discariche e nell'ambiente [2].

I materiali plastici che non vengono smaltiti correttamente contaminano irreversibilmente acque e suoli, tanto da formare enormi "isole di plastica" galleggianti sugli oceani, e inquinano le acque sotto forma di piccole particelle (le microplastiche) che entrano nelle reti alimentari dei mari, fino ai pesci e ai mammiferi marini, con gravi danni biologici. Molte industrie stanno cercando materiali alternativi sostenibili e rispettosi dell'ambiente. L'obiettivo della Commissione dell'Unione Europea (UE) è quello di ridurre i rifiuti di plastica del 55% entro il 2025 e garantire che i materiali siano riciclabili o riutilizzabili al 100% entro il 2030 [3]. Promettenti alternative alle tradizionali materie plastiche non biodegradabili sono i biopolimeri, ovvero materiali polimerici estratti direttamente o prodotti indirettamente da biomassa. Il loro principale vantaggio consiste nella facilità con cui possono essere eliminati (compostabili) e nel basso impatto ambientale legato al non esaurimento di risorse non rinnovabili.

Tutti i materiali biopolimerici sono biodegradabili, ma non tutti i materiali biodegradabili sono biopolimeri. Un esempio di polimeri a base di petrolio biodegradabili sono il policaprolattone (PCL), il polibutilene adipato tereftalato (PBAT) e il polibutilene succinato (PBS) [3]. Si è soliti associare ai biopolimeri i concetti di biodegradabilità e compostabilità. Un imballaggio risulta biodegradabile se viene coinvolto in un processo di decomposizione per azione di microrganismi ed enzimi presenti in natura.

Si parla di biodegradazione completa o mineralizzazione quando la sostanza organica è degradata fino a CO_2 , H_2O , sali minerali e altri prodotti a basso peso molecolare. L'arco temporale della biodegradazione è connesso a molteplici fattori quali temperatura, umidità, ossigenazione e concentrazione di microrganismi ed enzimi ed è, di conseguenza, difficilmente quantificabile.

Il metodo di smaltimento più accettabile per i polimeri biodegradabili è il compostaggio. Tuttavia, il compostaggio richiede un'infrastruttura che include sistemi di raccolta e impianti di compostaggio in cui si ha la possibilità di controllare artificialmente i parametri che influenzano la biodegradabilità, al fine di aumentarne la velocità in condizioni controllate. I biopolimeri sono generalmente suddivisi in tre gruppi: i polimeri ottenuti da fonti naturali, vegetali o animali (come l'amido, le proteine e la cellulosa), i polimeri sintetizzati da monomeri naturali (come il Polilattato PLA), i polimeri da fermentazione microbica (come il poli-idrossi-butirato PHB e i poli-idrossialcanoati PHA) [1]. Tuttavia, su scala commerciale l'impiego di biopolimeri è limitato perché essi presentano un alto costo di produzione, difficoltà di lavorazione e caratteristiche prestazionali non ottimali.

I biopolimeri, in generale, hanno una bassa resistenza, scarsa flessibilità, elevata suscettibilità al calore e all'umidità e basse temperature di distorsione al calore [4]. I vantaggi e i limiti associati ai biopolimeri, miscele e bionanocompositi sono riassunti nella Tab. 1.

Tabella 1. Vantaggi e limiti dei materiali biopolimeri per imballaggi sostenibili.

Biopolimeri/ Miscele di biopolimeri/ Bionanocompositi	Vantaggi	Limiti	Rif.
Cellulosa	-Buona resistenza a trazione -Resistenza termica -Barriera ai raggi UV	- Scarsa barriera al vapore -Scarsa durata nel tempo -Scarse proprietà meccaniche	[1-5]
Amido	-Basso prezzo -Alta biodegradabilità	- Scarsa stabilità termica -Scarse proprietà meccaniche - Scarsa barriera al vapore	[1]
Chitosano/chitina	- Buone proprietà antimicrobiche -Rallenta fenomeni di ossidazione	- Scarsa barriera al vapore -Scarse proprietà meccaniche	[1-6]
Pectina	- Buone proprietà antimicrobiche -Rallenta fenomeni di ossidazione	- Scarsa barriera al vapore -Scarse proprietà meccaniche	[1]
Proteine	-Discrete proprietà meccaniche -Buona barriera ai gas	-Alto prezzo -Scarsa barriera al vapore -Difficoltà di lavorazione -Bassa stabilità termica	[1-7]
PLA	-Buona barriera ai gas -Alta biodegradabilità	- Alto modulo di Young (materiale fragile) -Bassa capacità di deformazione plastica -Scarsa stabilità termica	[1-8-9]
PHA	-Barriera ai raggi UV -Buona resistenza a trazione -Scarsa fragilità - Buona barriera al vapore	-Alto prezzo -Moderata barriera ai gas	[10-4]
PLA/PHB	-Buona resistenza a trazione	- Alto modulo di Young (materiale fragile) -Difficoltà di lavorazione	[11-12]
Chitosano/Amido	- Buone proprietà meccaniche -Buona barriera a vapore	/	[13]
Chitosano/Cellulosa	-Buona resistenza a trazione	/	[4]
PLA/Amido	/	-Scarse proprietà meccaniche -Bassa resistenza all'urto -Basso allungamento a rottura	[4-14]
Nanoriempitivi (argille, nanoparticelle di chitosano, ossidi metallici)	- Buona barriera ai gas -Buone proprietà meccaniche -Stabilità termica - Barriera ai raggi UV -Minore densità	/	[15-16]

2. Norme su materiali biopolimerici

Le principali normative che fanno riferimento ai biopolimeri sono la UNI CEN/TR 15932 (Raccomandazioni per la terminologia e la caratterizzazione dei biopolimeri e delle bioplastiche), la UNI EN 13432 (Requisiti per imballaggi recuperabili mediante compostaggio e biodegradazione. Schema di

prova e criteri di valutazione per l'accettazione finale degli imballaggi) e la EN 14995 (Materie plastiche. Valutazione della compostabilità. Schema di prova e specificazioni). La EN 13432 è una norma armonizzata relativa alle caratteristiche che un materiale deve possedere per potersi definire biodegradabile o compostabile, ossia che può essere riciclato attraverso il recupero organico (compostaggio e digestione anaerobica). Questa norma combina vari test, criteri e valori che un materiale per packaging deve rispettare per essere considerato come compostabile. Il test può essere descritto attraverso le seguenti fasi:

- Caratterizzazione del materiale: identificazione e informazione dei differenti costituenti; determinazione del contenuto di carbonio organico e della presenza di sostanze pericolose come i metalli;
- Biodegradazione: deve essere utilizzata la prova di compostaggio aerobico controllato, secondo la ISO 14855, o eventualmente da altri standard internazionali. Per lo studio della biodegradabilità anaerobica può essere utilizzata la ISO 14853 o la ISO 11734. Il materiale deve presentare un valore di biodegradazione non inferiore al 90% da raggiungere in meno di 6 mesi; i costituenti presenti sotto l'1% non devono essere valutati fin quando il totale di questi costituenti non rilevanti sia inferiore al 5%;
- Disintegrazione: determina la frammentazione e perdita di visibilità nel compost finale del prodotto iniziale. Il materiale in esame deve essere biodegradato insieme con rifiuti organici entro dodici settimane. Alla fine il compost viene vagliato con un setaccio di 2 mm di luce. I residui del materiale di prova con dimensioni maggiori di 2 mm sono considerati non disintegrati. Questa frazione deve essere inferiore al 10% della massa iniziale.
- Qualità del compost: vengono analizzati alcuni parametri fisico-chimici e vengono effettuati test di ecotossicità per valutare la qualità del compost. Assenza di effetti negativi sul processo di compostaggio. Non devono essere presenti metalli pesanti e non vi devono essere effetti negativi sulla qualità del compost. Una prova di crescita di piante è eseguita su campioni di compost dove è avvenuta la degradazione del materiale di prova. Altri parametri chimico-fisici valutati che non devono differire dal compost di controllo dopo la biodegradazione sono: pH; contenuto salino; solidi volatili.

Sono stati formulati metodi per la valutazione della biodegradabilità di sostanze/prodotti con diverse finalità e applicazioni. Tra questi vi è: l'ASTM D 5338, Metodo di prova standard per la determinazione della biodegradabilità aerobica dei materiali plastici sotto condizioni controllate di compostaggio; l'UNI 11183, Requisiti per la biodegradabilità delle materie plastiche a temperatura ambiente; l'ISO 17556, Metodo per determinare la biodegradabilità finale nel suolo.

3. Metodi di produzione

3.1. Biocompositi verdi

Le ricerche hanno suddiviso i biocompositi in tre gruppi: 1) polimeri derivati dal petrolio non biodegradabili rinforzati con fibre naturali; 2) polimeri a base biologica rinforzati con fibre sintetiche; e

3) polimeri a base biologica rinforzati con fibre naturali. Le prime due categorie non sono completamente rispettose dell'ambiente perché uno dei costituenti è derivato dal petrolio. La terza categoria, in cui entrambi i costituenti sono derivati da risorse rinnovabili, è definita "biocompositi verdi", ritenuta da Salwa la migliore alternativa per affrontare le problematiche ambientali.

I biocompositi verdi si degradano naturalmente e tornano ad essere parte integrante dell'ambiente dopo l'uso. La matrice biopolimerica può derivare da polisaccaridi, polilattidi (PLA), poliidrossialcanoati (PHA), poliidrossibutirati (PHB) e copolimeri di idrossibutirato e idrossivalerato (PHBV). I principali svantaggi del biopolimero sono scarse proprietà meccaniche e di barriera al vapore. Tuttavia, l'inclusione di fibre o riempitivi di rinforzo aiuterebbe a migliorare le proprietà finali dei compositi. Le fibre naturali usate per biocompositi verdi possono essere ottenute da piante o animali. Simili alle fibre sintetiche come il carbonio o la fibra di vetro, le fibre naturali rinforzano i materiali compositi migliorando la rigidità e la resistenza. Le fibre vegetali sono preferite come rinforzo nei compositi per le loro caratteristiche: biodegradabilità, rinnovabilità, riciclabilità e natura non tossica.

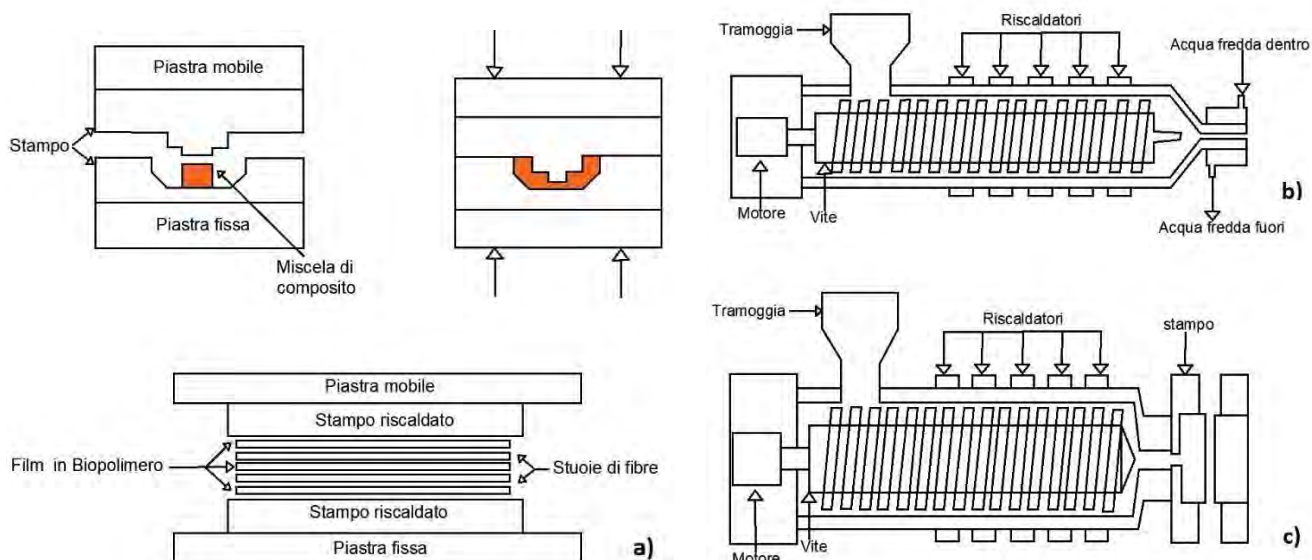
Lo svantaggio delle fibre vegetali è quello di essere estremamente sensibili all'umidità e di assorbire facilmente l'acqua dall'ambiente circostante, alterando le caratteristiche meccaniche e fisiche dei compositi [15]. Hu et al. hanno studiato il biocomposito in PLA rinforzato con fibre corte di canapa. In questo studio, la fibra corta è stata immersa nel 6% di soluzione di idrossido di sodio, e la fibra è stata risciacquata con acqua deionizzata fino a rimuovere l'NaOH residuo. In questo esperimento è stato utilizzato un film biodegradabile in polilattide (PLA). Per la preparazione del biocomposito in PLA e fibre di canapa si utilizza il metodo di stampaggio a compressione. Tale metodologia prevede che il film in PLA e la fibra di canapa corta vengano inserite nello stampo strato dopo strato. Lo stampo con il materiale al suo interno è posizionato in una pressa a caldo. La temperatura è impostata a 170°C in base al punto di fusione del polimero. La pressione è applicata per 10 minuti a 1,3 Mpa [17]. Lo stampaggio a compressione permette di ottenere compositi di buona qualità dato che è possibile controllare i parametri di produzione come viscosità, pressione, tempo di mantenimento e temperatura, a seconda del tipo di matrice e fibra, evitando problemi di degrado della fibra [18].

Pappu et al. esaminano la produzione di compositi biodegradabili rinforzati con il 30% in peso di fibre ibride come fibra di sisal e canapa con acido polilattico utilizzando tecniche di lavorazione a fusione e stampaggio ad iniezione ad una temperatura di esercizio di 160 °C. La fibra di sisal presenta proprietà meccaniche elevate rispetto ad altre fibre naturali come cocco, iuta, cotone, palma e bambù. Le fibre sisal e canapa sono essiccate in forno e miscelate in modo omogeneo in rapporto 1:1 [19]. Lo stampaggio per iniezione è un processo che converte i granuli biopolimerici in parti termoplastiche stampate con massima precisione dimensionale. I granuli inseriti in una tramoggia passano in un iniettore riscaldato all'interno del quale è presente una vite senza fine; questo spinge la massa fusa dal foro di iniezione allo stampo. Lo stampo è costituito da due o più parti in acciaio bloccate da una forza di serraggio. Lo spazio tra le sezioni maschio e femmina dello stampo corrisponde alla forma, alla finitura e allo spessore dello stampaggio richiesto come mostrato nella Figura 1 [20].

Sha Cheng ha effettuato ricerche sull'uso di fibre di piume di pollo come rinforzo per polimero biodegradabile PLA. Le piume di pollo sono un prodotto di scarto del settore avicolo, smaltite mediante

seppellimento. La fibra di piuma di pollo (CFF) è costituita da cheratina idrofobica, una proteina con una forza simile a quella del nylon. La piuma di pollo è stata immersa in alcool per la sterilizzazione, lavata in acqua ed essiccata. Tutti i campioni sono stati preparati mediante metodi di estrusione e stampaggio per iniezione. I pellet CFF e PLA sono inseriti in un microestrusore a doppia vite ad una temperatura di 180°C [21].

Figura 1. Tecniche di lavorazione: (a) stampaggio a compressione; (b) estrusione; (c) stampaggio a iniezione.



3.2. Laminati

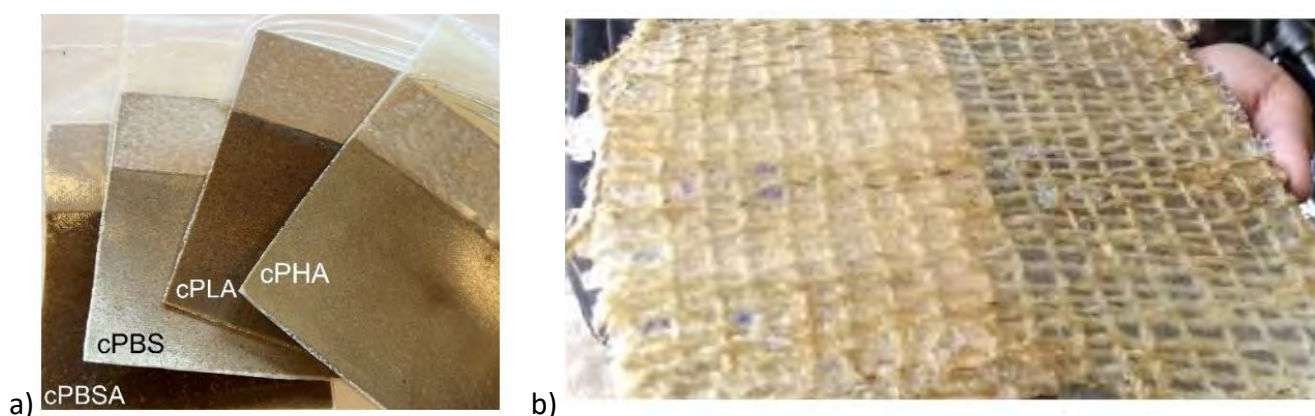
I laminati detti anche poliaccoppiati sono strutture sottili multistrato ottenuti combinando per adesione materiali piani preesistenti come carta, tessuti con matrici termoplastiche. Le tecniche di laminazione sono molto versatili, permettono di combinare insieme i materiali più diversi e di controllare accuratamente gli spessori di ogni singolo strato [1]. Nella laminazione per estrusione i granuli di polimero vengono inseriti nell'estrusore dove si sciolgono. La massa fusa è ad una temperatura tale da aderire al substrato dopodiché viene fatta passare su un rullo di raffreddamento. I film di natura biopolimerica prodotti mediante estrusore e i tessuti in fibra sono impilati alternativamente e compressi tra le piastre riscaldate dello stampo [20].

Nabels-Sneiders ha studiato il comportamento di quattro biopolimeri (PHA, PLA, PBS e PBSA), applicati come rivestimento a fusione diretta su carta di canapa colata per dare origine a nuovi laminati biodegradabili e compostabili. I nuovi biopolimeri come acido polilattico (PLA), poliidrossialcanoati (PHA), polibutilene succinato adipato (PBSA) e polibutilene succinato (PBS) sono emersi come alternative alle materie plastiche esistenti. PHA è 100% a base biologica, riciclabile, compostabile, e adatto allo stampaggio ad iniezione. Succinato di polibutilene (PBS) è biologico al 50%, adatto per stampaggio ad iniezione e laminazione. PBSA è biologico al 30–50% ed è compostabile. PBSA è adatto per l'estrusione di film in bolla. Per la preparazione della carta di canapa sono stati utilizzati gli steli di

canapa lavorati in un mulino da taglio. La polvere di canapa è stata dispersa in acqua e miscelata con NaOH e xilano. Il laminato in carta di cellulosa si ottiene essiccando i granuli di PBSA, PBS, PLA e PHA in un forno sottovuoto. Dopo l'essiccamento, i granuli sono stati modellati in pellicole. I film ottenuti sono uniti alla carta di canapa precedentemente preparata e pressati insieme. Le piastre riscaldanti sono state impostate a 85 °C per PBSA, 120 °C per PBS, 175 °C per PLA e 180 °C per PHA. La pressione applicata è stata impostata a 0,5, 1,5 e 3,0 MT [22].

Song analizza laminati in polimeri termoplastici rinforzati con tessuti tessili utilizzando il metodo di impilamento del film. I rinforzi in tessuto liscio e twill di canapa servono a migliorare le proprietà meccaniche del biocomposito. I fogli di canapa e PLA sono laminati in una struttura sandwich (cioè fogli di PLA/strati di canapa/fogli di PLA) e compressi con una pressione di 2,45 MPa a 170 °C [23]. Motru et al. si occupano della fabbricazione di laminati PLA/ tessuto in lino mediante stampaggio manuale a compressione su piastra calda. La fibra di lino grezza è immersa in una soluzione di NaOH all'1%. Tale trattamento è stato effettuato per migliorare l'adesione tra la fibra di lino e il PLA. Successivamente all'ammollo, le fibre sono state essiccate in condizioni atmosferiche e lavate ripetutamente con acqua distillata. Le fibre sono tessute a mano in stuoie. Il processo di laminazione manuale, utilizzato per la produzione di compositi prevede l'uso di una piastra riscaldante piatta alimentata a carbone. Le palline di PLA sono state cosparse sul tappetino in fibra, che è coperto su entrambi i lati da carta pergamena. La carta pergamena è utilizzata per impedire l'adesione del PLA con la superficie inferiore della piastra piana calda. La piastra piana calda è stata posizionata sulla carta pergamena per consentire il trasferimento di calore ai pellet di PLA. Questo processo è stato ripetuto fino a quando il PLA si è sciolto e ha occupato gli spazi tra i fili del tessuto di lino. La stuoia viene capovolta per eseguire lo stesso processo anche dall'altro lato, fino ad ottenere una struttura in laminato piatto tipo sandwich [24].

Figura 2. Laminati: (a) composito matrice/carta di canapa; (b) composito PLA/tessuto in lino.



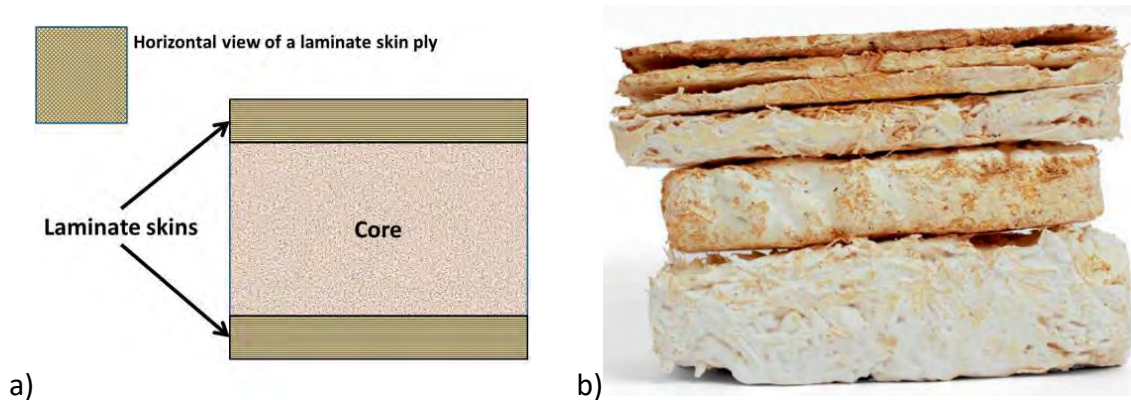
3.3. Micocompositi

La parete cellulare del micelio contiene principalmente chitina, glucani, proteine e lipidi, le cui concentrazioni dipendono dal substrato di alimentazione che definisce le proprietà finali dei materiali sintetizzati. I materiali a base di micelio, grazie alla loro natura leggera e non tossica, potrebbero essere utilizzati per un'ampia gamma di applicazioni di imballaggio, tra cui elettronica, articoli fragili e

nell'industria alimentare. I funghi colonizzano il loro substrato attraverso cellule filamentose allungate chiamate ife, che crescono e formano una rete filamentosa intrecciata tridimensionale, nota come micelio. Il micelio secerne enzimi e degrada diversi substrati in componenti più semplici che possono essere utilizzati come nutrienti. I funghi utilizzano questi nutrienti e aumentano la loro biomassa, sia crescendo sulla superficie del substrato sia penetrando in esso. I materiali a base di micelio puro e differiscono dai micocompositi in base al processo di sintesi: ad esempio, i materiali a base di micelio puro sono ottenuti attraverso la completa degradazione del substrato, mentre i materiali compositi a base di micelio sono prodotti riscaldando/essiccando il substrato durante la colonizzazione. Il micelio adotta la forma dello stampo in cui viene inoculato. Inoltre, in base alle condizioni di crescita e la scelta del substrato, è possibile produrre micelio con resistenza, densità e altre caratteristiche strutturali controllate. Il materiale sintetizzato è di natura idrofobica e ha dimostrato un'eccellente stabilità termica e meccanica, inoltre risulta essere leggero, biodegradabile ed elastico [25].

La ricerca svolta da Sivaprasad si concentra sullo sviluppo di un materiale rinnovabile e biodegradabile a base di micelio adatto per applicazioni di imballaggio. I biocompositi a base di micelio hanno una resistenza simile all'EPS pur essendo biodegradabile. Il micelio è coltivato utilizzando solo segatura, ma la segatura ha una bassa durata di conservazione. Per questo motivo Sivaprasad decide di usare come nuovo substrato segatura e fibra di midollo di cocco. Il midollo di cocco contiene la lignina, che è un materiale digerito difficilmente dagli organismi presenti nell'ambiente. Di conseguenza, la fibra di cocco ha una maggiore durata di conservazione rispetto la segatura. Il rapporto 3:2 è selezionato con un metodo per tentativi ed errori. Il micelio del fungo *Ostreatus* viene selezionato come rinforzo per il composito. I funghi ostrica sono capaci di sopportare temperature molto elevate ed hanno una maggiore durata di conservazione rispetto ad altre specie di funghi. Lo stampo in vetro acrilico riempito di matrice e rinforzo viene coperto da un involucro di plastica. Per sterilizzare la miscela da microbi che possono degradare la crescita del micelio, essa è posta in un'autoclave con temperatura a 120 °C. Gli stampi vengono inseriti in un armadio a flusso d'aria laminare a 27 °C e 80% RH per 14 giorni. Al termine del periodo di crescita, il campione viene trasferito nel forno ad aria calda. L'azione essiccante del forno serve ad arrestare la crescita del micelio e rimuovere l'umidità in modo tale da rendere il campione asciutto e leggero [26]. Jiang ha studiato il nuovo approccio per la produzione di strutture sandwich biocomposite in pelli di rinforzo di derivazione naturale, tra cui juta, lino e tessuto di cellulosa legate mediante bioresina ad un'anima in matrice di micelio cresciuta su un substrato di scarti agricoli. L'anima del nuovo materiale a sandwich è al 100% riciclabile o biodegradabile dopo il suo uso, mentre la bioresina è altamente sostenibile. Le pelli di rinforzo naturale vengono aggiunte alla superficie superiore e inferiore del nucleo per completare la struttura a sandwich [27]. Il processo produttivo messo a punto dai ricercatori che hanno sperimentato la realizzazione di biocompositi a sandwich in micelio e pelli di rinforzo prevede i seguenti passaggi: taglio del tessuto in fibra naturale; impregnare uno o più pelli con una colla naturale che non ostacola la crescita dei funghi; riempire lo stampo con scarti agricoli precolonizzati da micelio; dopo la crescita del micelio che avviene in cinque giorni in una stanza con temperatura ed umidità impostata, è prevista l'essiccazione del composito; legare le pelli di rinforzo al composito in micelio con resina naturale [28].

Figura 3. Micocompositi: (a) schema strutturale di un composito sandwich a base di micelio; (b) struttura di un biocomposito a base di micelio.



3.4. Film e compositi in amido termoplastico

Trinh et al. sperimentano film multistrato composti da amido termoplastico (TPS) e poli (acido lattico) (PLA), fabbricati tramite processo di estrusione reattiva, stampaggio a compressione e rivestimento per immersione. È stato utilizzato un amido termoplastico modificato mediante l'aggiunta di anidride maleica (MTPS) per migliorare l'adesione interfacciale tra gli strati TPS e PLA e le proprietà fisico-meccaniche dei film multistrato. L'amido termoplastico (TPS) è prodotto dall'amido nativo utilizzando plastificanti come glicerolo. Il TPS presenta eccellenti proprietà di barriera all'ossigeno, tuttavia, risulta essere estremamente sensibile all'acqua, e ha bassa resistenza a trazione. Un'ottima strategia per superare tali svantaggi è combinare TPS con altri polimeri e creare un film multistrato. In precedenti studi sono state provate le combinazioni di TPS con altri materiali termoplastici come quelli a bassa densità polietilene (LDPE), policaprolattone (PCL), acido polilattico (PLA) e poliidrossialcanoato (PHA). Tra questi materiali, il PLA si è rivelato essere il miglior candidato per integrare i punti deboli di TPS. MA è stato sciolto in acetone, miscelato con amido di mais essiccato. Il glicerolo è stato aggiunto alla massa di amido di mais con una concentrazione pari al 30%. La miscela è lasciata in un contenitore sigillato per 24 ore prima della lavorazione con un processo di estrusione reattiva. L'amido misto di mais, glicerolo, materiali di MA e nanoargilla sono caricati nel miscelatore affinché avvenga la plastificazione. Il prodotto è pressato allo stato fuso in un sottile film tramite stampaggio a compressione. Per fabbricare i film multistrato, i film monostrato sono stati rivestiti per immersione in una soluzione di PLA [29]. Saepoo et al. studiano compositi di amido termoplastico (TPS) e rifiuti di fibre di olio di palma. La fibra di mesocarpo di olio di palma (PC) è ridotta in polvere (MPC) mediante macinazione a secco in un mulino a sfere planetario. Si è dimostrato che il composito TPS con il 50% in peso di MPC ha massima resistenza a trazione, stabilità termica e resistenza all'acqua. Il composito TPS viene lentamente degradato dai microrganismi presenti nel terreno senza rilasciare sostanze inquinanti. La polvere di fibra (MPC) è essiccata in un forno ad aria calda e conservata fino al momento dell'uso. Amido di manioca, glicerolo e MPC sono miscelati fino ad ottenere un composto omogeneo. Questa miscela è nuovamente mescolata in un mulino a due rulli. I fogli in TPS sono preparati utilizzando una macchina per lo stampaggio a compressione [30].

4. Proprietà meccaniche di materiali per imballaggi sostenibili

Le proprietà meccaniche dei compositi rinforzati con fibre naturali dipendono dall'interazione dei componenti nella regione dell'interfaccia rinforzo/matrice. L' interazione può essere migliorata modificando la superficie con trattamento chimico, il cui scopo è aumentare l'idrofilia, la dispersione e l'aderenza delle fibre. Altri parametri che influenzano le prestazioni meccaniche di materiali compositi sono i metodi di lavorazione, la lunghezza, l'orientamento e la frazione volumetrica delle fibre [31].

La Tabella 2 mostra come il tipo di fibra, nanoriempitivo e tessuto utilizzato influiscono sulle prestazioni meccaniche dei compositi analizzati.

Tabella 2. Confronto tra le proprietà meccaniche di materiali compositi

Matrice	Fibre e Nanoriempitivi	Tessuti	Tecniche di lavorazione	Proprietà meccaniche					Rif.
				Resist. a trazione (MPa)	Mod. di trazione (GPa)	Resist. a flessione (MPa)	Mod. di flessione (GPa)	Impatto (KJ/m ²)	
PLA	Canapa (40%)	--	Stampaggio a compressione	54,60	8,5	112,7	--	--	[17]
PLA	Canapa/sisal	--	Stampaggio a iniezione	46,25	6,10	94,83	6,04	10,29	[19]
PLA	Sisal	--	Stampaggio a iniezione	23,6	3,57	--	--	3,25	[32]
PLA	Piuma di pollo	--	Estrusione + Stampaggio a iniezione	55	4,2	--	--	--	[21]
PLA	--	Carta di canapa	Stampaggio a iniezione	17	1,1	--	--	--	[22]
PHA	--	Carta di canapa	Stampaggio a iniezione	18	1,0	--	--	--	[22]
PLA	--	Tessuto liscio in canapa (20%)	Stampaggio a compressione	65	3	--	--	24	[23]
PLA	--	Tessuto twill in canapa (20%)	Stampaggio a compressione	70	5	--	--	27	[23]
PLA	--	Stuoia in lino (17,6%)	Pressa a caldo	30,58	26,53	--	--	--	[24]
Micelio	Cotone/canapa	Stuoia in cotone	Pressa a caldo	0,20	3,65	--	--	--	[27-28]
Micelio	Segatura/fibra di cocco	--	--	--	--	0,167	0,00278	--	[26]
TPS/PLA	Anidride maleica	--	Estrusione + Stampaggio a compressione	3,5	0,2	--	--	--	[29]
TPS	Mesocarpo di olio di palma (MPC) (50%)	--	Stampaggio a compressione	1,43	--	--	--	--	[30]

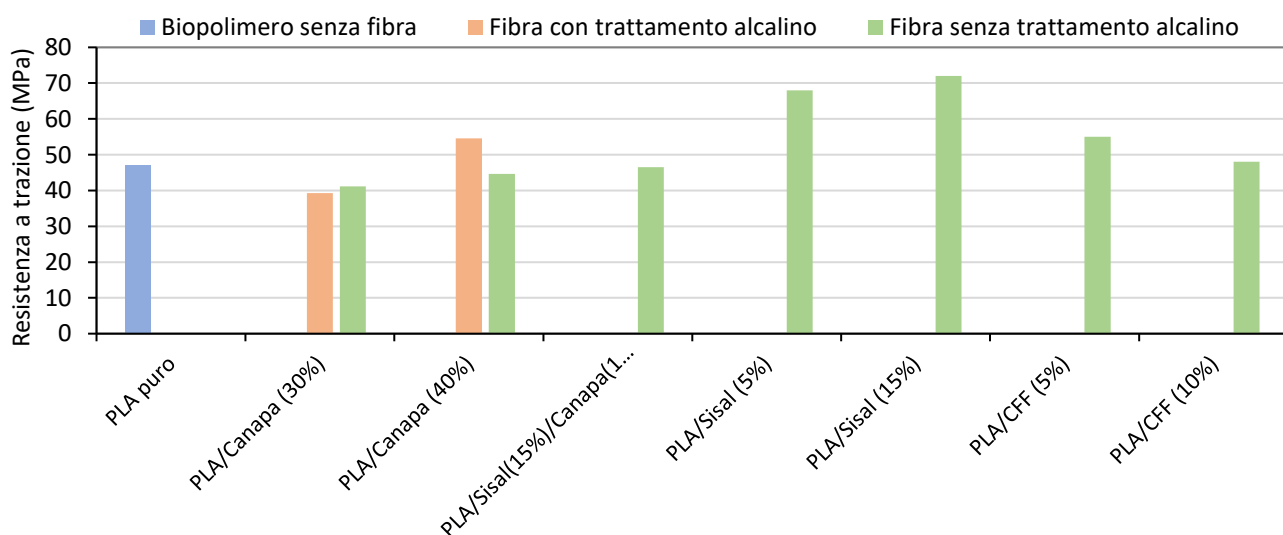
4.1. Biocompositi

4.1.1. Resistenza a trazione

Lo studio effettuato da Hu e Lim su biocomposito in PLA rinforzato con fibre corte di canapa trattate con alcali ha mostrato che la resistenza a trazione e i moduli elastici cambiavano in base alle diverse frazioni di volume delle fibre e alle diverse condizioni di trattamento. La massima resistenza a trazione pari a 54,6 MPa e modulo di 8,5 GPa si ottiene con il 40% di fibra trattata. Il composito con fibra non trattata non ha portato ad un aumento significativo della resistenza. Gli allungamenti a rottura di questi materiali sono molto bassi a causa della fragilità del PLA e della fibra di canapa [17].

La resistenza a trazione dei compositi PLA rinforzati con fibre ibride è di 38 MPa, che è circa il 22% superiore a quella del PLA puro. Pappu et al. nella realizzazione di biocompositi con fibre ibride non trattate hanno notato che la fibra di canapa ha una superficie più ruvida rispetto alla fibra sisal, grazie ad una maggiore quantità di cellulosa e questo farebbe pensare ad un miglior legame interfacciale con la matrice e di conseguenza ad un aumento della resistenza a trazione. Questo non si verifica poiché il contenuto effettivo di cellulosa è influenzato da composizioni non cellulosiche come emicellulose, lignina e pectina, che hanno una resistenza inferiore ed agiscono come impurità. La frattura da trazione del composito con fibre ibride mostra una deformazione di rottura inferiore rispetto al solo PLA [19]. Autori come Cheng si sono concentrati sullo sviluppo e test di trazione di compositi in fibra di piuma di pollo (CFF) e PLA, notando che la resistenza a trazione del PLA diminuiva con l'aumentare del contenuto di CFF. Tale decremento dovuto ad una debole forza di legame interfacciale tra CFF e PLA, è inferiore a 10 Mpa quando il contenuto di CFF varia dal 2% al 10 % in peso, valore di trazione accettabile per applicazioni che non richiedono elevata capacità di carico. Il modulo di trazione di ogni campione composito CFF/PLA è superiore a quello del campione PLA puro. Il valore massimo pari a 4,2 GPa è raggiunto con un contenuto di CFF del 5% in peso [21]. La Figura 2 mostra come la resistenza a trazione varia in base alla frazione volumetrica di fibra, alla tipologia di fibra e al trattamento chimico effettuato.

Figura 4. Resistenza a trazione di biocompositi con diversa frazione volumetrica di fibra.



4.1.2. Resistenza a flessione

I risultati ottenuti mostrano che la resistenza a flessione migliora con il trattamento alcalino [17]. Gli studi condotti da Hu e Lim mettono in evidenza che la massima resistenza a flessione dei compositi costituiti dal 40% di fibra di canapa trattata e PLA è di 112,7 Mpa. Questo valore è comparativamente superiore a 108,9 MPa dei compositi PLA rinforzati con il 30% di fibra di vetro e risulta essere superiore anche a quello del polipropilene rinforzato con fibra di vetro (la resistenza alla flessione è 79,7 Mpa) [17]. La resistenza a flessione dei compositi PLA rinforzati con fibre ibride era 79 Mpa, che è circa il 27% superiore a quella dei campioni PLA senza rinforzo [19].

4.1.3. Resistenza all'urto

La caratteristica fondamentale che descrive la resistenza all'urto di un materiale è costituita dalla capacità di assorbire energia prima della rottura sotto sollecitazioni dinamiche. I meccanismi di danneggiamento che si verificano nel composito durante l'impatto sono in genere la delaminazione, l'indentazione della matrice, la rottura delle fibre e la perforazione. Ciascun meccanismo di danneggiamento è più o meno evidente ad una certa soglia di energia di impatto ed in genere il danno si manifesta come una combinazione di più meccanismi contemporaneamente [33]. I risultati sviluppati da Pappu et al. hanno rivelato che la resistenza all'urto del composito in PLA rinforzato con fibre di canapa e sisal variava da 9,21 KJ/m² a 11,08 KJ/m² ed era aumentata rispetto al PLA puro di natura fragile [19].

4.2. Laminati

4.2.1. Resistenza a trazione

Nabels-Sneiders et al. hanno valutato modulo elastico, resistenza a trazione e allungamento a rottura per laminati preparati con carta di canapa/bioplastiche sottoposti a differenti pressioni durante il processo di stampaggio. Si osserva che ad un aumento di pressione di laminazione corrisponde un aumento del modulo elastico e della resistenza a trazione, dovuta alla migliore adesione della carta di canapa al biopolimero. Tutti i laminati mostrano un miglioramento dell'elasticità con range di pressione da 0,5 MT e 3,0 MT. L'allungamento è diminuito nei laminati pressati a 3.0 MT ad eccezione del laminato con PLA, poiché la carta di canapa subisce notevoli modifiche strutturali, favorendo così la concentrazione dello stress e il precoce cedimento del composito [22]. Lee et al. hanno studiato il comportamento meccanico di laminati compositi in PLA rinforzati da tessuti in canapa. I risultati dello studio hanno mostrato che i compositi rinforzati con tessuto di canapa intrecciato in twill hanno una resistenza a trazione maggiore rispetto a quelli in tessuto liscio, ciò è dovuto alla diversa trama. La trama intrecciata in twill ha fornito un modulo di Young più elevato e per questo risulta essere più adatto per il rinforzo meccanico [23]. Motru et al. hanno valutato che il trattamento chimico della fibra di lino porta alla rimozione dell'emicellulosa che provoca un aumento della separazione delle fibre, con conseguente calo della resistenza alla trazione. Lo stesso motivo vale per la diminuzione del modulo elastico del composito [24].

4.2.2. Resistenza all'urto

Lee et al. hanno utilizzato per misurare la resistenza all'urto dei provini composti in PLA e tessuto in canapa una prova di impatto Izod. La frazione volumetrica della fibra svolge un ruolo chiave nell'aumentare la resistenza all'urto, in particolare con una frazione volumetrica della fibra del 20%, che diventa una frazione critica di volume per un efficace assorbimento di energia [23]. Sono evidenti fenomeni di danneggiamento per delaminazione, debonding e pull-out delle fibre per i sistemi che impediscono la completa rottura dei provini con il risultato di un comportamento più duttile ed una maggiore energia assorbita a fine prova. Motru et al. hanno valutato la resistenza all'urto con diversa altezza di caduta libera su sei campioni di composti in PLA rinforzati con tessuto in lino. È stato osservato che in base all'altezza di caduta libera, i campioni hanno sviluppato o crepe o sono stati fratturati dal penetratore. La velocità dell'impatto e l'altezza di caduta libera sono i due fattori che hanno un effetto significativo sulla resistenza all'impatto del composito. Il comportamento del provino al test d'impatto ci fornisce informazioni sulla resistenza all'urto, influenzata dalla presenza di fibra di lino e dal meccanismo di lavorazione utilizzato per produrre il composito [24].

4.3. *Micocompositi*

4.3.1. Resistenza a trazione

La resistenza a trazione dei biocompositi a sandwich con micelio inoculato in fibre di canapa è inferiore a quella di prodotti comparabili come polistirolo, che ha massima resistenza a trazione pari a 0,20 Mpa. I valori bassi del modulo di trazione e della resistenza a trazione sono causati dall'orientamento casuale delle fibre nella matrice. Per rendere il materiale più resistente alle forze di trazione nel piano parallelo si usa un maggior quantitativo di fibre sottili e lunghe con un orientamento direzionale. Il modulo di trazione dei biocompositi sandwich con micelio varia tra 3,65 e 7,14 MPa e la resistenza a trazione varia da 0,09 e 0,20 MPa. Girometta et al. osservarono che il tipo di lavorazione come la pressatura a caldo aumentava la resistenza a trazione dei micocompositi [27].

4.3.2. Resistenza a flessione

Sivaprasad et al. confrontano la resistenza a flessione dei composti in micelio con quella dell'EPS. I provini sono stati deformati fino a rottura, subendo una deformazione massima che richiedeva 0,18225 Mpa per il micocomposito e 0,0290 Mpa per l'EPS. Il modulo di flessione del micelio biocomposito è circa 5 volte il modulo di flessione dell'EPS. Pertanto, il composito di micelio richiede una maggiore quantità di forza per piegarsi o deformarsi rispetto all'EPS [26].

4.3.3. Resistenza a compressione

Il test di compressione viene eseguito su quattro campioni di micelio bio-composito ed EPS per metterli a confronto. Si osserva che il valore medio della resistenza a compressione e il modulo di compressione del materiale biocomposito è superiore a quello dell'EPS. Pertanto il materiale biocomposito è più resistente alla compressione rispetto all'EPS [26]. Lo studio di Tacer-Caba evidenzia

come 4 ceppi di micelio inoculati in substrato di colza (RS) e buccia di avena (OH) hanno dato origine a compositi con diverse resistenze a compressione. In particolare, i compositi in micelio alimentati con RS hanno mostrato una maggiore resistenza. Il nuovo composito TA (*Trichoderma asperellum*)-RS ha mostrato massima resistenza a compressione rispetto a tutti i campioni studiati. Dai seguenti risultati si nota che la resistenza a compressione dei compositi di micelio dipende dalla natura dei substrati e dai ceppi di miceli. La presenza della chitina nella parete cellulare fungina fornisce resistenza meccanica ai compositi miceliari riducendo la formazione di crepe durante la compressione [34].

4.4. Film e compositi in amido termoplastico

4.4.1. Resistenza a trazione

Lo studio effettuato da Saepoo et al. dimostra come l'aggiunta di polvere di fibra di olio di palma (MPC) ha aumentato la resistenza a trazione del TPS. La resistenza a trazione del composito TPS con il 50% in peso di MPC è di 1,43 MPa; quattro volte la resistenza a trazione del TPS puro pari a 0,35 Mpa. L'aumento della resistenza a trazione è attribuito alla buona dispersione delle piccole particelle di MPC nella matrice di amido. L'allungamento a rottura del TPS puro risulta essere maggiore rispetto ai compositi TPS. Tale diminuzione dell'allungamento nei compositi TPS è attribuita alla ridotta deformabilità dell'interfaccia fibra/amido [29]. Trinh et al. studiano la resistenza a trazione di film nanocompositi TPS e MTPS rivestiti in PLA. È stato notato che lo strato PLA ha migliorato la resistenza a trazione dei film. Il rivestimento in PLA è spesso associato a riduzioni dell'allungamento a causa della sua bassa elasticità, in questo studio è stata osservata la tendenza opposta. I film multistrato MTPS/PLA hanno dimostrato avere una miglior resistenza a trazione rispetto ai film in TPS/PLA. Ciò ha indicato che la maleazione di TPS ha amplificato le interazioni chimiche tra PLA e MTPS migliorando così l'adesione del legame e l'integrità complessiva del film multistrato [30].

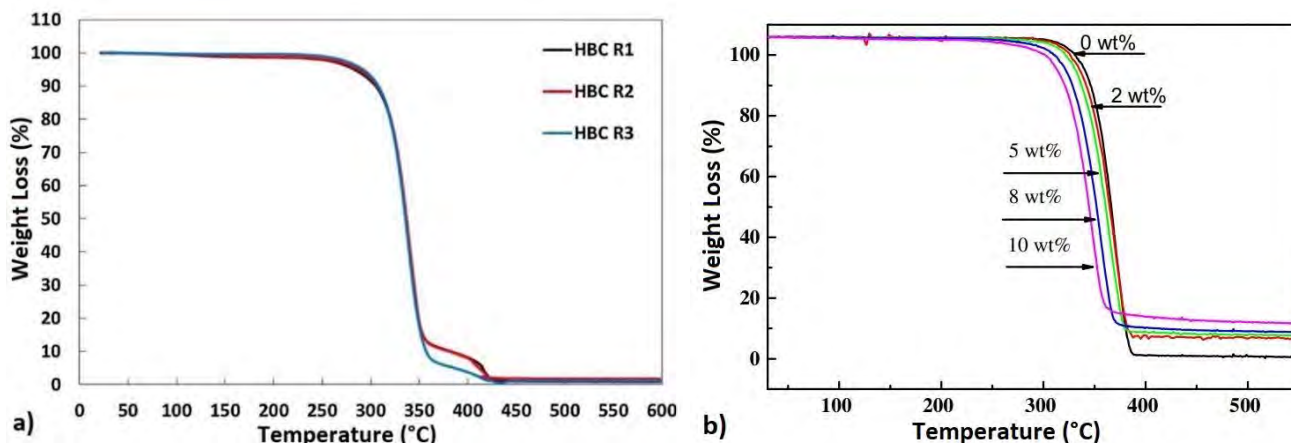
5. Proprietà termiche di materiali per imballaggi sostenibili

5.1. Biocompositi

5.1.1. Analisi termogravimetrica

La termogravimetria è una tecnica di analisi termica, impiegata nel caso di materiali polimerici e misura quanto peso viene perso dal campione ad una certa temperatura. I campioni di composito ibrido subiscono due fasi di decomposizione comprendente una fase principale con perdita di peso a circa 300 °C seguita da una seconda fase con una perdita di peso relativamente molto minore a circa 410 °C che si conclude rapidamente a 425 °C [19]. È stato osservato che i compositi PLA rinforzati con fibre naturali sono sensibili all'assorbimento di calore tanto da degradarsi ed avere cambiamenti nelle prestazioni complessive. Il PLA puro e i biocompositi mostrano una stabilità termica simile evidenziata da curve termogravimetriche relativamente vicine l'una all'altra come si nota dalla Figura 3. L'analisi termogravimetrica di compositi PLA/CFF mostra una diminuzione di peso a partire da 300 °C, principalmente a causa del degrado del materiale. Una seconda transizione si verifica a circa 360 °C quando i materiali iniziano a decomporsi [21].

Figura 5. Curve termogravimetriche in funzione della temperatura di biocompositi: a) PLA puro e compositi PLA/fibre ibride; b) PLA puro e CFF/compositi PLA [19-21].

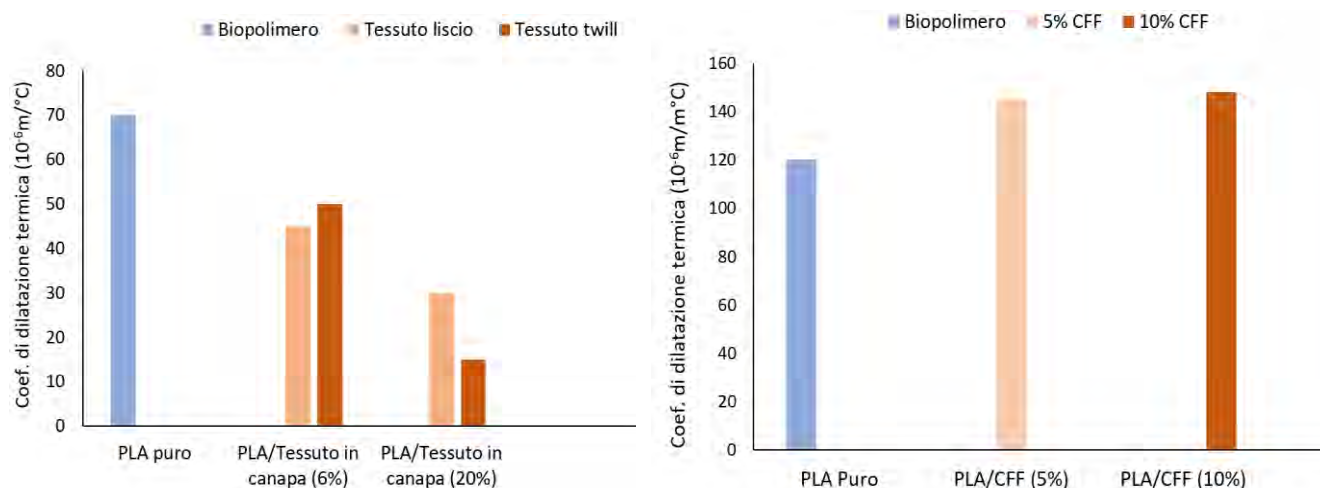


5.2. Laminati

5.2.1. Analisi termica

Il CTE tiene conto che ad ogni incremento di temperatura segue una deformazione del composito. Il coefficiente di dilatazione termica (CTE) di laminati compositi canapa/PLA è misurato utilizzando l'estensimetro. Lee et al. confrontano il CTE del PLA puro e dei compositi tessuto di canapa/PLA, verificando che il CTE è diminuito drasticamente con l'aumento della frazione volumetrica delle fibre. In particolare, con una frazione di volume del 20%, i compositi rinforzati con tessuti di canapa in twill hanno mostrato un CTE notevolmente basso [23].

Figura 6. Coefficiente di dilatazione termica per compositi PLA puri, CFF/PLA e PLA/tessuto in canapa con diversa frazione volumetrica di fibra e diversa tipologia di tessuto.



In conclusione le fibre di rinforzo hanno un CTE estremamente basso e per questo ci si aspetta che riducano drasticamente l'espansione termica dei polimeri come mostrato in Figura 6. La riduzione

dell'espansione termica può anche essere attribuita alle interazioni fibra/matrice, poiché una forte interazione limita la mobilità delle catene polimeriche aderite alla superficie della fibra [35]. I compositi PLA/piuma di pollo (CFF) hanno valori di CTE superiori a quello del PLA puro. Ciò può essere causato dalla debole stabilità termica dei CFF, da difetti di distacco all'interfaccia matrice/rinforzi [21].

5.2.2. Conduttività termica

La conduttività termica dei laminati in PLA/tessuto in lino è stata misurata utilizzando il metodo del termoflussimetrico con anello di guardia. La maggior parte degli studi esaminati ha dimostrato che la conduttività termica diminuisce con l'aumentare del contenuto di fibre. Lo studio condotto da Li et al. ha mostrato che la conduttività termica della fibra di lino trattata chimicamente aumentava dalla temperatura ambiente a circa 90 °C, per poi rimanere costante fino a 200 °C. La conduttività termica media della fibra di lino ad una temperatura superiore a 90 °C è di 0,1187 W/mC [36]. La conduttività termica del PLA è aumentata per campioni che subiscono una ricottura per 24 ore, poiché il crescente grado di cristallizzazione del PLA crea ridotti vuoti d'aria. Per ottenere campioni di PLA come isolanti termici con una minore conducibilità termica vanno ricotti per un'ora a 90°C [37].

5.3. Micocompositi

5.3.1. Analisi termica

I biocompositi a base di micelio sottoposti ad elevate condizioni di temperatura subiscono una forte deformazione di contrazione che indica una scarsa stabilità dimensionale. Tali valori di contrazione sono attribuiti alla struttura porosa dei compositi rinforzati con fibre naturali. Il coefficiente di dilatazione termica lineare di biocompositi sandwich a base di micelio sottoposti ad alte temperature risulta variare da -2,99 a $-17,42 \times 10^{-5}$ mm/°C [27].

5.3.2. Conduttività termica

Sivaprasad per misurare la conduttività termica dei micocompositi utilizza il metodo della piastra calda protetta e nota come la conduttività termica del biocomposito in micelio è leggermente superiore a quella dei campioni di EPS. Il composto di micelio mostra una conducibilità termica di circa 0,069950 W/mk, mentre il campione di EPS ha una conducibilità termica di 0,053984 W/mk. Dal risultato si può dedurre che il polistirene espanso è marginalmente un isolante migliore [26].

5.4. Film e compositi in amido termoplastico

5.4.1. Analisi termogravimetrica

L'influenza del contenuto di MPC sulla stabilità termica del TPS è stata studiata mediante analisi TGA. Le curve TGA di MPC mostrano le tre principali fasi di degradazione. La prima fase di degradazione avviene intorno ai 100 °C con una perdita di peso pari al 10% dovuta all'evaporazione dell'acqua presente nelle fibre.

La seconda fase è avvenuta da 280 °C a 320 °C ed è stata attribuita alla degradazione di composti organici come l'emicellulosa. La terza fase di degradazione si è verificata dai 330 °C ai 420 °C ed è stata attribuita alla decomposizione di materiali organici ad alto peso molecolare come la cellulosa e alla decomposizione della matrice di amido. Questi risultati hanno indicato che MPC ha migliorato la stabilità termica del TPS. La buona dispersione e la forte adesione tra MPC e la matrice di amido possono ritardare il passaggio del calore [30].

6. Conclusioni

I compositi utilizzati come materiali da imballaggio hanno sicuramente un alto potenziale per sostituire le plastiche convenzionali non biodegradabili. Sono stati svolti diversi studi per migliorare le caratteristiche fisico-chimiche dei biopolimeri utilizzando varie strategie come la nanotecnologia, mescolando biopolimeri con altri biopolimeri e modificazioni fisico/chimiche, portando a progressi sostanziali nell'imballaggio biobased. Tuttavia, nello scenario attuale i biopolimeri sono materiali ancora incapaci di sostituire i commerciali polimeri a base petrolchimica, in particolare in condizioni ambientali umide a causa della loro bassa resistenza all'acqua e delle loro inadeguate proprietà meccaniche.

Ulteriori ostacoli per l'applicazione dei biocompositi come materiali da imballaggio sono il costo delle materie prime e le tecniche di produzione che devono poter essere più efficienti con un minor consumo di energia. Inoltre, a causa del loro intrinseco comportamento alla biodegradazione, le loro funzioni sono attive per un breve periodo di tempo, inferiore a quello degli imballaggi convenzionali e non adeguato alla durata di conservazione richiesta da produttori e consumatori. Sono necessarie ulteriori ricerche sullo sviluppo di materiali per imballaggi sostenibili da parte di aziende produttrici per garantire una società più sostenibile con un impatto minimo sull'ambiente e sulle generazioni future.

Riferimenti

1. Piergiovanni, L.; Limbo, S.; Materiali e imballaggi prodotti a partire da biopolimeri. In *Food packaging Materiali, tecnologie e qualità degli alimenti*, 1 ed.; Springer-Verlag; Italia, 2010; 9, 239-257.
2. Geyer, R.; Jambeck, J.R.; Law, K.L.; C.; Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* **2017**, *3*, 1-5, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
3. Ibrahim, I.D.; Sadiku, E.R.; Hamam, Y.; Need for Sustainable Packaging: An Overview. *Polymers* **2022**, *14*, 44-30, <https://doi.org/10.3390/polym14204430>.
4. Kumari, S.; Pakshirajan, K.; Pugazhenthii, G.; Recent advances and future prospects of cellulose, starch, chitosan, polylactic acid and polyhydroxyalkanoates for sustainable food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules* **2022**, *221*, 163-182, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.203>.
5. Shaghaleh, H.; Xu, X.; Wang, S.; Current progress in production of biopolymeric materials based on cellulose, cellulose nanofibers, and cellulose derivatives. *Royal Society of Chemistry Advances* **2018**, *8*, 825-842, [10.1039/C7RA11157F](https://doi.org/10.1039/C7RA11157F).

6. Souza, V. G. L.; Pires, J. R. A.; Rodrigues, C.; Coelho, I. M.; Fernando, A. L.; Chitosan Composites in Packaging Industry-Current Trends and Future Challenges. *Polymers* **2020**, *12*, 417, <https://doi.org/10.3390/polym12020417>.
7. Pana, Y.; Farmahini-Farahani, M.; O'Hearn, P.; Xiaob, H.; Ocampo, H.; An overview of bio-based polymers for packaging materials. *Journal of Bioresources and Bioproducts* **2016**, *1*, 106-113.
8. Ahmed, J.; Varshney, S. K.; Polylactides - Chemistry, Properties and Green Packaging Technology: A Review. *International Journal of Food Properties* **2011**, *14*, 37-58, [10.1080/10942910903125284](https://doi.org/10.1080/10942910903125284).
9. Ahmed, J.; Varshney, S.K.; Zhang, J.X.; Ramaswamy, H.S.; Effect of high pressure treatment on thermal properties of polylactides. *Journal of Food Engineering* **2009**, *93*, 308-312, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.026>.
10. Plackett, D.; Siro, I.; Polyhydroxyalkanoates (PHAs) for food packaging. *Multifunctional and Nanoreinforced Polymers for Food Packaging* **2011**, *18*, 498-526, <https://doi.org/10.1533/9780857092786.4.498>.
11. Arrieta, M.P.; Samper, M.D.; Lopez, J.; Jimenez, A.; Combined effect of poly (hydroxybutyrate) and plasticizers on polylactic acid properties for film intended for food packaging. *Journal of Polymers and the Environment* **2014**, *22*, 460-470, [10.1007/s10924-014-0654-y](https://doi.org/10.1007/s10924-014-0654-y).
12. Hu, Y.; Sato, H.; Zhang, J.; Noda, I.; Ozaki, Y.; Crystallization behavior of poly (lactic acid) affected by the addition of a small amount of poly (3- hydroxybutyrate). *Polymer* **2008**, *49*, 4204-4210, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.07.031>.
13. Bourtoom, T.; Chinnan, M.S.; Preparation and properties of rice starch-chitosan blend biodegradable film, *LWT-Scienze e tecnologie alimentari* **2008**, *41*, 1633-1641, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.10.014>.
14. Collazo-Bigliardi, S.; Ortega-Toro, R.; Chiralt, A.; Using lignocellulosic fractions of coffee husk to improve properties of compatibilised starch-PLA blend films. *Food Packaging* **2019**, *22*, 100-423, <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100423>.
15. Salwa, H.N.; Sapuan, S.M.; Mastura, M.T.; Zuhri, M.Y.; Green Bio composites For Food Packaging. *International Journal of Recent Technology and Engineering* **2019**, *8*, 450-459, [10.35940/ijrte.B1088.07825419](https://doi.org/10.35940/ijrte.B1088.07825419).
16. Kumar, N.; Kaur, P.; Bhatia, S.; Advances in bio-nanocomposite materials for food packaging: a review. *Nutrition & Food Science* **2017**, *47*, 591-606, <https://doi.org/10.1108/NFS-11-2016-0176>.
17. Hu, R.; Lim, J.; Fabrication and Mechanical Properties of Completely Biodegradable Hemp Fiber. *Journal of Composite Materials* **2016**, *41*, 1665-1669, <https://doi.org/10.1177/0021998306069878>.
18. Väisänen, T.; Batello, P.; Lappalainen, R.; Tomppo, L.; Modification of Hemp Fibers (*Cannabis Sativa*, L.) for Composite Applications. *Industrial Crops & Products* **2018**, *111*, 422-429, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.049>.
19. Pappua, A.; Pickering, K. L.; Thakur, V. K.; Manufacturing and characterization of sustainable hybrid composites using sisal and hemp fibres as reinforcement of poly (lactic acid) via injection

- moulding. *Industrial Crops & Products* **2019**, *137*, 260-269, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.040>.
20. Riley, A.; Riley, A.; Plastics manufacturing processes for packaging materials. *Packaging Technology* **2012**, *14*, 310-360, <https://doi.org/10.1533/9780857095701.2.310>.
21. Cheng, S.; Lau, K.; Liu, T.; Zhao, Y.; Lam, P.; Yin, Y.; Mechanical and thermal properties of chicken feather fiber/PLA green composites. *Composites Part B: Engineering* **2009**, *40*, 650–654, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.011>.
22. Nabels-Sneiders, M.; Platnieks, O.; Grase, L.; Gaidukovs, S.; Lamination of Cast Hemp Paper with Bio-Based Plastics for Sustainable Packaging: Structure-Thermomechanical Properties Relationship and Biodegradation Studies. *Journal of Composite Science* **2022**, *246*, 3-15, <https://doi.org/10.3390/jcs6090246>.
23. Song, Y. S.; Lee, J. T.; Ji, D. S.; Kim, M. W.; Lee, S. H.; Youn, J. R.; Viscoelastic and thermal behavior of woven hemp fiber reinforced poly(lactic acid) composites. *Composites Part B: Engineering* **2012**, *43*, 856-860, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.021>.
24. Motrua, S.; Adithyakrishna, V. H.; Bharath J.; Guruprasad R.; Development and Evaluation of Mechanical Properties of Biodegradable PLA/Flax Fiber Green Composite Laminates, *Materials Today: Proceeding* **2020**, *24*, 641-649,
25. Manana, S.; Ullaha, M. W.; Ul-Islamb, M.; Attaa, O. M.; Yang, G.; Synthesis and applications of fungal mycelium-based advanced functional materials. *Journal of Bioresources and Bioproducts* **2021**, *6*, 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.318>.
26. Sivaprasad, S.; Byju, S. K.; Prajith, C.; Shaju, J.; Rejeesh, C.R.; Development of a novel mycelium bio-composite material to substitute for polystyrene in packaging applications. *Materials Today: Proceedings* **2021**, *47*, 5038-5044, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.622>.
27. Jiang, L.; Walczyk, D.; McIntyre, G.; Bucinell, R.; Li, B.; Bioresin infused then cured mycelium-based sandwich-structure biocomposites: Resin transfer molding (RTM) process, flexural properties, and simulation. *Journal of Cleaner Production* **2019**, *207*,123-135, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.255>.
28. Jiang, L.; Walczyk, D.; McIntyre, G.; Bucinell, R.; A new approach to manufacturing biocomposite sandwich structures: mycelium-based cores. *International Manufacturing Science and Engineering Conference* **2016**,2-11, <https://doi.org/10.1115/MSEC2016-8864>.
29. Trinh, B. M.; Chang, C. C.; Mekonnen, T. H.; Facile fabrication of thermoplastic starch/poly (lactic acid) multilayer films with superior gas and moisture barrier properties. *Polymer* **2021**, *223*,1-13, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123679>.
30. Saepoo, T.; Sarak, S.; Mayakun, J.; Eksomtramage, T.; Kaewtatip, K.; Thermoplastic starch composite with oil palm mesocarp fiber waste and its application as biodegradable seeding pot. *Carbohydrate Polymers* **2023**, *299*, 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120221>.
31. R. A. Ilyas, R. A.; Zuhri, M. Y. M.; Aisyah, H. A.; Asyraf , M. R. M.; Hassan, S. A.; Zainudin, E. S.; Sapuan, S. M.; Sharma, S.; Bangar, S. P.; Jumaidin , R.; Nawab, Y.; Faudzi, A. A. M.; Abral , H.; Asrofi, M.; Syafri, E.; Sari, N. H.; Natural Fiber-Reinforced Poly(lactic Acid), Poly(lactic Acid Blends and Their

- Composites for Advanced Applications. *Polymers* **2022**, *202*, 1-39, <https://doi.org/10.3390/polym14010202>.
32. Samouh, Z.; Molnar, K.; Boussu, F.; Cherkaoui, O.; El Moznine, R.; Mechanical and thermal characterization of sisal fiber reinforced polylactic acid composites. *Polymers advanced technologies* **2018**, *3*, 1-9, <https://doi.org/10.1002/pat.4488>.
33. WJ, C.; Morton, J.; The impact resistance of composite materials-a review. *Composites* **1991**, *22*, 347–362, [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(91\)90549-V](https://doi.org/10.1016/0010-4361(91)90549-V).
34. Tacer-Caba, Z.; Varis, J.; Lankinenb, P.; Mikkonen, K. S.; Comparison of novel fungal mycelia strains and sustainable growth substrates to produce humidity-resistant biocomposites. *Materials and Design* **2020**, *192*, 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108728>.
35. Nakagaito, A. N.; Yano, H.; The effect of fiber content on the mechanical and thermal expansion properties of biocomposites based on microfibrillated cellulose. *Cellulose* **2008**, *15*, 555–559, [10.1007/s10570-008-9212-x](https://doi.org/10.1007/s10570-008-9212-x).
36. Li, X.; Tabil, L. G.; Oguocha, I. N.; Panigrahi, S.; Thermal diffusivity, thermal conductivity, and specific heat of flax fiber–HDPE biocomposites at processing temperatures. *Composites Science and Technology* **2008**, *68*, 1753–1758, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.02.016>.
37. Barkhad, M. S.; Abu-Jdayil, B.; Mourad, A. H. I.; Iqbal, M. Z.; Thermal Insulation and Mechanical Properties of Polylactic Acid (PLA) at Different Processing Conditions. *Polymers* **2020**, *12*, 1-16, <https://doi.org/10.3390/polym12092091>.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Circularità nella mobilità elettrica: focus sul ciclo di vita delle batterie agli ioni di Litio

Flavio Scrucca ^{1,*}, Giorgio Baldinelli ², Grazia Barberio ¹, Lucio Postriotti ², Cem Karaca ²

¹ Dipartimento di Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali, ENEA – Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, Roma, Italia

² Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria, Perugia, Italia

* Autore di riferimento. E-Mail: flavio.scrucca@enea.it

Abstract: Data la rilevanza in termini di impatto ambientale del settore dei trasporti, l'elettrificazione del trasporto su strada è ritenuta una delle più efficaci strategie ai fini della sfida globale di decarbonizzazione e mitigazione dei cambiamenti climatici. L'uso dei veicoli elettrici è in costante crescita e, conseguentemente lo è la domanda di batterie agli ioni di litio (LIBs), tecnologia di accumulo/alimentazione più diffusa per i veicoli elettrici in virtù delle proprie caratteristiche specifiche. Nonostante le LIBs siano generalmente considerate una tecnologia "pulita", viste alcune criticità che le contraddistinguono e la rapida crescita nel loro impiego, un loro sviluppo e utilizzo effettivamente sostenibile richiede approfondite valutazioni di ciclo di vita. Il presente articolo ha analizzato la letteratura scientifica più recente relativa a studi di ciclo di vita delle LIBs, al fine di fornire un quadro quanto più esaustivo e aggiornato sul tema di sempre maggiore interesse, identificare i principali aspetti metodologici degli studi LCA svolti in letteratura e analizzare i principali risultati in termini di impatto. Uno specifico approfondimento ha riguardato la fase di fine vita delle LIBs, in quanto fase cruciale del loro ciclo di vita, al fine di evidenziare l'importanza degli aspetti chiave dell'efficienza delle risorse e della circolarità. Sono fornite, sulla base delle evidenze emerse dalla review, indicazioni ritenute strategiche ai fini di una uniformità metodologica dell'LCA applicata alle LIBs e di una loro corretta gestione in ottica di economia circolare.

Keywords: LCA; analisi del ciclo di vita; batterie agli ioni di Litio; veicoli elettrici; mobilità sostenibile; mobilità elettrica; elettrificazione; trasporti.

1. Introduzione

Nell'ultimo decennio, nonostante negli anni il tasso di crescita sia rallentato, le emissioni medie annue di gas serra (GHG) a livello globale hanno raggiunto i livelli più alti della storia dell'umanità. Come chiaramente indicato anche nell'ultimo rapporto dell'IPCC, l'obiettivo di limitare l'incremento di temperatura a 1,5°C – valore al cui superamento, secondo gli esperti, sono associati molteplici e inevitabili rischi climatici – è strettamente legato ad una immediata e profonda riduzione delle emissioni in tutti i settori [1].

Tra i vari settori, quello dei trasporti riveste un ruolo fondamentale nel percorso di decarbonizzazione e mitigazione dei cambiamenti climatici, in quanto seconda fonte mondiale di emissioni di GHG e, tra le varie strategie possibili, l'elettrificazione del trasporto su strada è ritenuta una delle più efficaci [2].

L'uso di veicoli elettrici è attivamente promosso e incoraggiato in diversi paesi e regioni in tutto il mondo e la transizione verso l'elettrificazione della mobilità è oggi quasi unanimemente considerata come irreversibile [3, 4]. Dopo un rapido sviluppo che ha contraddistinto l'ultimo decennio, a fine del 2020 sono stati 10 milioni i veicoli elettrici messi in circolazione in tutto il mondo [5] e si prevede che le vendite di tali veicoli cresceranno in modo significativo in futuro, raggiungendo i 18 milioni nel 2025 e 21 milioni nel 2030 [6].

In tale contesto, in virtù dell'elevata densità energetica, del basso tasso di autoscarica, della lunga durata e dell'assenza di effetto memoria, le batterie agli ioni di litio (LIBs) rappresentano la tecnologia di accumulo/alimentazione più diffusa per i veicoli elettrici e la loro domanda globale è aumentata esponenzialmente negli ultimi anni, di pari passo con l'implementazione della mobilità elettrica. Negli ultimi cinque anni è stato osservato un aumento di quasi 20 volte nelle spedizioni globali di LIBs [7] e, a fronte di un valore pari a 120 GWh nel 2019, si prevede che la domanda globale di LIBs per veicoli elettrici crescerà rapidamente nei prossimi anni, raggiungendo 680 GWh nel 2025 e 1.525 GWh nel 2030 [8, 9].

Tale crescita pone con urgenza la questione delle inevitabili problematiche ambientali legate alla loro produzione, uso e smaltimento. Infatti, nonostante le LIBs siano generalmente considerate una tecnologia "pulita", il loro ciclo di vita è caratterizzato da criticità ambientali specifiche, che devono essere adeguatamente prese in considerazione ai fini di un utilizzo e uno sviluppo effettivamente sostenibile di questa tecnologia.

In primo luogo, le LIBs contengono materie prime critiche come Litio, Cobalto e Nichel le cui riserve globali sono limitate e distribuite in modo non uniforme sul Pianeta e la cui estrazione/lavorazione richiede un elevato consumo di risorse naturali. Inoltre, anche la produzione e l'assemblaggio delle stesse LIBs è caratterizzata da rilevanti consumi energetici e dall'emissione di sostanze nocive [10]. Pertanto, tralasciando i rischi legati alla scarsità e alla distribuzione non uniforme di queste materie prime e alle potenziali interruzioni della catena di approvvigionamento [11-13], la massiccia attesa produzione di LIBs causerà inevitabilmente uno sfruttamento su larga scala di risorse naturali con impatti significativi sull'ambiente. L'enorme produzione prevista, tra l'altro, genererà flussi significativi di LIBs da gestire correttamente a fine vita, il cui trattamento/smaltimento attraverso processi a ridotto

impatto ambientale rappresenta un'altra questione rilevante del ciclo di vita delle LIBs. Infatti, oltre ai rischi per la salute associati a sostanze tossiche e corrosive [14] e altri rischi “diretti” (quali, ad esempio, quelli legati a scosse elettriche [15] e incidenti da incendio [16]) associati alle operazioni di trattamento, la gestione del fine vita pone questioni rilevanti sotto il duplice aspetto delle risorse e dell'ambiente.

Con il Piano di Azione per l'Economia Circolare [17], la Commissione Europea ha individuato quella delle batterie e veicoli come una delle catene di valore chiave prioritarie e, successivamente, il Parlamento Europeo ha lavorato all'aggiornamento della Direttiva sulle batterie [18], al fine di disciplinarne il ciclo di vita, aumentare la circolarità della filiera e introdurre nuovi standard di sostenibilità. Il paradigma dell'economia circolare, basato su un concetto di “produzione-uso-riciclo-riproduzione”, può dunque a tutti gli effetti essere ad oggi considerato il principio guida e l'efficienza delle risorse, tramite la riduzione dei consumi (ad esempio, attraverso la diminuzione dell'utilizzo di materie prime e prodotti e il prolungamento del loro utilizzo) e la chiusura dei cicli (riciclaggio a ciclo chiuso) [19-21], le strategie chiave per lo sviluppo di LIBs e veicoli elettrici sostenibili [22, 23].

Tuttavia, se non adeguatamente pianificate e implementate, le strategie CE possono avere effetti di rimbalzo [24]. Ad esempio, prendere in considerazione solo l'uso di input riciclati nella produzione delle LIBs senza considerare altri aspetti del ciclo di vita (ad esempio le prestazioni in fase d'uso), potrebbe portare a una riduzione della durata e dell'efficienza energetica con un aumento dell'impatto ambientale totale dei veicoli a lungo termine [25]. Inoltre, focalizzare l'attenzione solo su un singolo problema ambientale, potrebbe potenzialmente generare l'effetto “spostamento dei carichi ambientali”, ovvero la risoluzione di un aspetto critico a scapito della creazione di un impatto negativo su altre dimensioni ambientali e/o fasi del ciclo di vita del prodotto [26].

Pertanto, al fine di considerare adeguatamente tutte le questioni critiche relative alle LIBs già menzionate, nonché al fine garantire una solida analisi delle strategie di economia circolare e una comprensione olistica “dalla culla alla culla” del loro utilizzo/sviluppo, sono necessarie valutazioni di ciclo di vita complete [27, 28]. A tale proposito, la metodologia LCA (Life Cycle Assessment) [29, 30] rappresenta uno strumento scientifico ampiamente utilizzato per analizzare l'intero ciclo di vita di prodotti e processi e quantificare un'ampia gamma di potenziali impatti ambientali, ed è stato recentemente sempre più applicato per valutare LIBs [31-33].

I risultati della letteratura LCA relativa alle LIBs differiscono anche notevolmente tra loro, a seconda delle differenze nell'approccio metodologico degli studi (ambito di applicazione, scopo, confini del sistema, ...) e nelle ipotesi specifiche adottate da ognuno di essi e, in alcuni casi, sono anche evidentemente contraddittori, come evidenziato dalla letteratura precedente [34-39].

Il presente articolo si pone quindi l'obiettivo di analizzare la letteratura scientifica più recente, al fine di fornire un quadro quanto più esaustivo e aggiornato sul tema di crescente interesse delle LIBs, identificare i principali aspetti metodologici degli studi LCA svolti in letteratura e analizzare i principali risultati in termini di impatto. Un focus specifico del lavoro di review ha riguardato anche le caratteristiche specifiche relative allo studio e alla modellazione della fase di fine vita all'interno dei lavori LCA di letteratura, al fine di comprendere nel dettaglio tale fase cruciale del ciclo di vita ed evidenziare l'importanza degli aspetti chiave dell'efficienza delle risorse e della circolarità.

2. Metodologia della review

2.1. Criteri adottati per la ricerca bibliografica

La ricerca bibliografica è stata svolta alla fine del 2022 (mese di novembre) al fine di identificare in maniera esaustiva gli studi dedicati all'applicazione della metodologia LCA alle LIBs per i veicoli elettrici disponibili nella letteratura scientifica più recente in lingua inglese. La ricerca è stata eseguita con i motori di ricerca e i browser più utilizzati (ad es. Scopus, ScienceDirect, ...) in modo da coprire il più ampio perimetro di pubblicazioni scientifiche, combinando in modo sistematico parole chiave e operatori logici come dettagliato in Tabella 1 e fissando l'arco temporale di pubblicazione degli articoli dal 2020 al 2022.

In accordo allo scopo del lavoro, le batterie per applicazioni stazionarie sono state escluse dalla review e sono state prese in considerazione solo le tecnologie "convenzionali" per le LIBs, ovvero quelle attualmente utilizzate e quelle previste in crescita nel breve termine per applicazioni nei veicoli elettrici. Sono stati esclusi dall'analisi tutti gli studi che non rappresentavano specificamente analisi LCA a livello di cella/batteria, così come tutti gli articoli di review ottenuti dalla ricerca bibliografica.

Non sono stati effettuati calcoli/elaborazioni sui risultati degli studi di letteratura reperiti ai fini della presentazione dell'impatto di ciclo di vita delle LIBs.

Tabella 1. Dettagli approccio sistematico alla ricerca bibliografica.

Keyword 1		Keyword 2		Keyword 3
life cycle assessment		life cycle assessment		
<i>or</i>		<i>or</i>		Electric vehicles
life cycle analysis	<i>and</i>	life cycle analysis	<i>and</i>	<i>or</i>
<i>or</i>		<i>or</i>		EVs
LCA		LCA		

2.2. Criteri adottati per l'analisi della letteratura individuata

Ottenuto il campione di articoli scientifici ritenuti rilevanti ai fini della review, in accordo agli obiettivi del lavoro e alle regole di selezione adottate, gli stessi sono stati analizzati secondo criteri specifici volti ad identificare i principali aspetti metodologici degli studi LCA e i principali risultati in termini di impatto degli stessi, nonché le caratteristiche specifiche relative alla modellazione della fase di fine vita, al fine di evidenziare l'importanza degli aspetti chiave dell'efficienza delle risorse e della circolarità (Figura 1).

Per quanto riguarda gli aspetti metodologici degli studi LCA, si è posta particolare attenzione a:

- chimica delle batterie studiate (Nichel–Manganese–Cobalto, Litio–Ferro–Fosfato, ...);
- approccio dello studio ("dalla culla al cancello", "dalla culla alla tomba", ...);
- confini del sistema/esclusione di fasi del ciclo di vita;
- tipologia di dati alla base dello studio (primari, secondari);
- software e database LCA utilizzati.

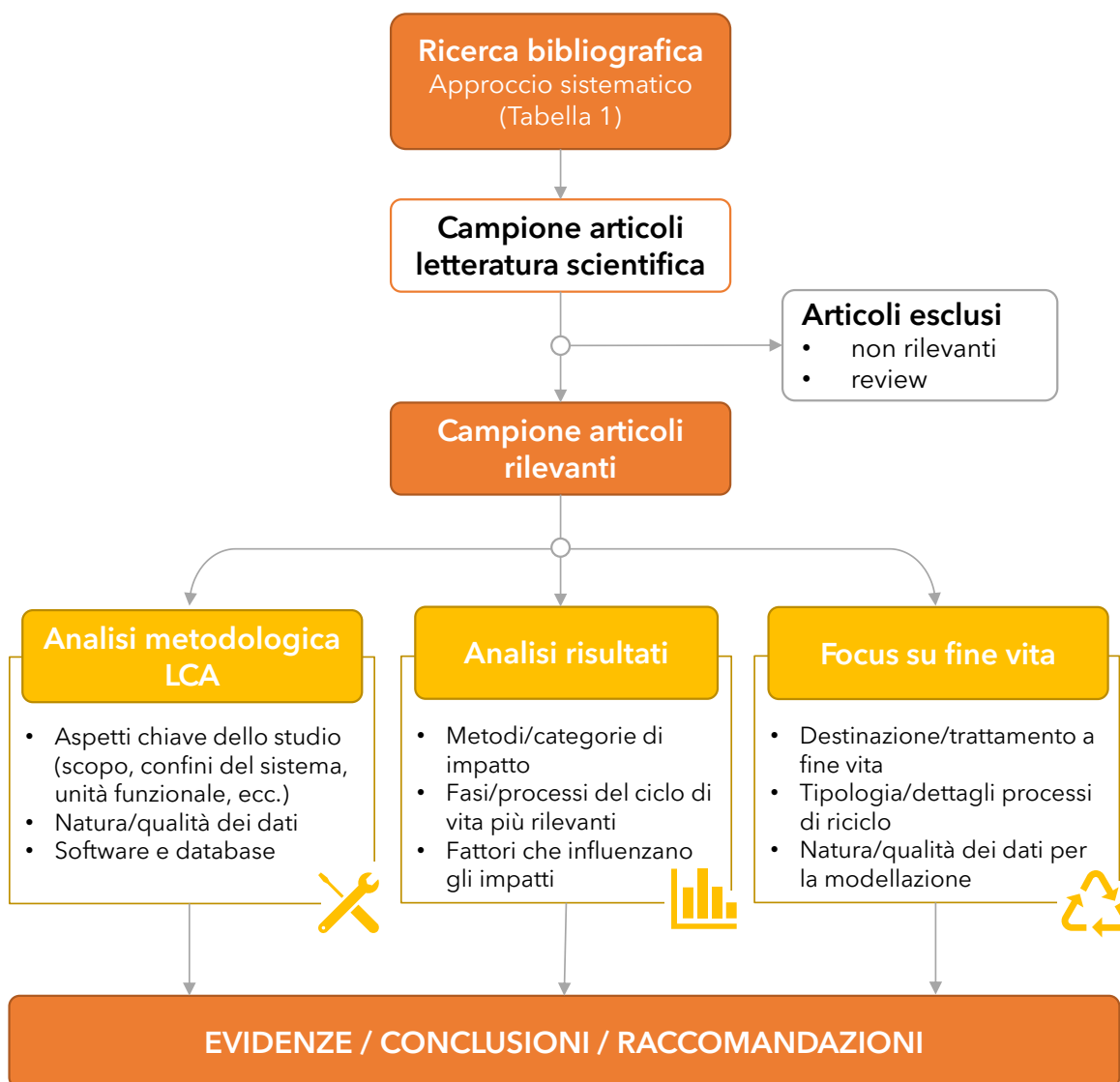
In merito alla valutazione degli impatti di ciclo di vita (LCIA), invece, l'attenzione è stata focalizzata su:

- metodo LCIA adottato/categorie di impatto calcolate;
- fasi del ciclo di vita/processi più rilevanti;
- eventuali fattori comuni che influenzano gli impatti.

Uno specifico focus di analisi ha poi riguardato l'inclusione/esclusione della fase di fine vita delle LIBs e i dettagli relativi alla modellazione della stessa, quali:

- destinazione a fine vita e modalità di trattamento;
- tipologia e caratteristiche dei processi, nel caso di riciclo;
- tipologia di dati alla base della modellazione (primari, secondari).

Figura 1. Schema della metodologia adottata per la review.



3. Risultati

3.1. Risultati quali-quantitativi della ricerca bibliografica

La ricerca bibliografica ha consentito di reperire un totale di 51 articoli di letteratura. Di tali articoli, come si può notare in Figura 2, 13 sono stati pubblicati nel 2020, 15 nel 2021 e 23 nel 2022, a conferma del sempre maggiore interesse della letteratura scientifica per l'argomento.

Nonostante l'approccio sistematico alla ricerca bibliografica, basato su una "rigida" combinazione di parole chiave e operatori logici, sono stati reperiti anche articoli non rilevanti per lo scopo del presente lavoro, ovvero articoli non conformi ai criteri di selezione adottati e articoli di review.

Nel dettaglio, si può notare come siano stati in totale 13 gli articoli esclusi dalla review perché non conformi ai criteri di selezione adottati e, quindi, non rilevanti ai fini di questa review in quanto, ad esempio, relativi ad applicazioni stazionarie delle LIBs (2 articoli) o perché relativi a studi LCA non a livello di cella/batteria ma di singoli materiali come Litio (4 articoli) e Grafite (1 articolo). Gli articoli di review non considerati sono invece stati in totale 9, 7 dei quali pubblicati nel 2022, ad ulteriore conferma della maggiore numerosità degli studi scientifici e del crescente interesse per l'argomento negli anni più recenti.

In definitiva, quindi, sono stati 29 gli articoli sottoposti a review (Tabella 2), 9 dei quali pubblicati nel 2020, 11 nel 2021 e 9 nel 2022. A tale proposito, è necessario sottolineare che alcuni lavori più recenti potrebbero essere "sfuggiti" alla ricerca bibliografica, vista la copertura non completa del 2022, ovvero il gap di circa due mesi tra il momento in cui la medesima ricerca è stata svolta (novembre 2022) e la fine dell'anno. Inoltre, nonostante la ricerca bibliografica sia stata eseguita utilizzando gli strumenti più comuni combinando e "trasformando" le parole chiave, è opportuno evidenziare anche che parte della letteratura di interesse potrebbe non essere stata identificata per ragioni "fisiologiche", quali ad esempio potenziali errori casuali in fase di selezione da parte dell'operatore.

Figura 2. Numero articoli inclusi ed esclusi dalla review per anno.

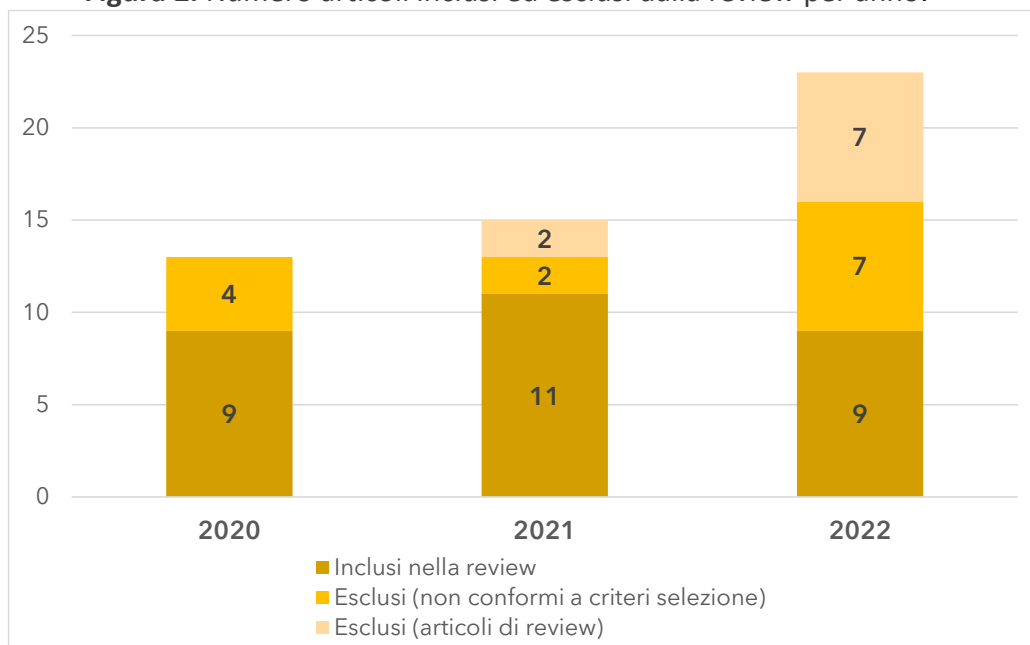


Tabella 2. Campione di articoli rilevanti sottoposti a revisione.

Anno	ID	Autori	Riferimento bibliografico
2020	1	Kallitsis et al.	[40]
	2	Sun et al.	[41]
	3	Burchart-Korol et al.	[42]
	4	Wang F. et al.	[43]
	5	Wang L. et al.	[39]
	6	Silvestri et al.	[44]
	7	Tao and You	[45]
	8	Mohr et al.	[46]
	9	Kelly et al.	[47]
2021	1	Lybbert et al.	[48]
	2	Shu et al.	[49]
	3	Wilson et al.	[50]
	4	Lopez et al.	[51]
	5	Crenna et al.	[52]
	6	Yu et al.	[53]
	7	Wang and Yu	[54]
	8	Iturrondobeitia et al.	[55]
	9	Accardo et al.	[56]
	10	Wu et al.	[57]
	11	Kurz et al.	[58]
2022	1	Philippot et al.	[59]
	2	Duarte Castro et al.	[60]
	3	Popien et al.	[61]
	4	Quan et al.	[62]
	5	Benveniste et al.	[63]
	6	Kallitsis et al.	[64]
	7	Degen and Schütte	[65]
	8	Winjobi et al.	[66]
	9	Blömeke et al.	[67]

3.2. *Principali evidenze metodologiche emerse dalla review*

Come prima importante evidenza, è emerso che praticamente tutti gli studi analizzati mostrano un elevato livello di accordo metodologico con le norme tecniche di riferimento ISO 14040 e ISO 14044, con una coerente definizione di scopi e obiettivi malgrado la carenza di qualche dettaglio specifico, come ad esempio l'indicazione del pubblico di riferimento o delle limitazioni dello studio associate a metodo, ipotesi e copertura degli impatti.

La definizione dell'unità funzionale (UF) è risultata essere molto eterogenea nel campione di articoli analizzati, con scelte indirizzate sulla singola batteria (UF = 1 batteria) o sull'unità di massa della stessa (UF = 1 kg/ o 1 t di batteria/e) o, ancora, sul/sui km percorsi dal veicolo in cui la/e batteria/e è/sono impiegata/e (UF = 1 km, 100 km). Tuttavia, 1 kWh di capacità di accumulo della batteria, scelta funzionale a considerare anche il numero di cicli di ricarica della batteria nel corso della sua vita, è risultata essere l'UF maggiormente utilizzata, essendo adottata in 14 studi dei 29 totali oggetto della review.

Altrettanta difformità è stata riscontrata nella definizione dei confini del sistema, con l'approccio "dalla culla al cancello" che è risultato essere adottato in misura sensibilmente maggiore (12 studi) rispetto all'approccio "dalla culla alla tomba" (10 studi). Inoltre, nel caso di scelta dell'approccio "dalla culla alla tomba", è da evidenziare come in diversi casi sono risultate essere escluse sia la fase di uso (2 studi sui 10 svolti con questo approccio) che di fine vita (1 studio sui 10 svolti con questo approccio) delle batterie.

A livello di dati utilizzati per l'implementazione degli studi è emerso che nella stragrande maggioranza dei casi si è fatto riferimento a dati secondari, derivanti sia da database LCA che da letteratura esistente, piuttosto che a dati primari raccolti ad hoc per lo studio. Nel dettaglio, 18 studi sul totale dei 29 analizzati sono risultati essere basati esclusivamente su dati secondari, mentre sono 2 gli studi che hanno integrato tali dati secondari con dati di laboratorio e 5 gli studi che hanno fatto ricorso all'uso combinato di dati primari e secondari. L'utilizzo esclusivo di dati primari è stato dichiarato solo da 4 lavori sul totale dei 29 analizzati, mentre in 1 caso la natura dei dati utilizzati non è stata esplicitamente specificata.

Molta eterogeneità è stata osservata nelle categorie di impatto selezionate, così come nella scelta degli specifici metodi di valutazione dell'impatto (CML e ReCiPe sono quelli maggiormente impiegati). SimaPro ed Ecoinvent sono invece risultati essere rispettivamente il software e il database più utilizzati.

Per quanto riguarda invece le caratteristiche delle LIBs oggetto di studio, le chimiche più studiate sono risultate esse Litio-Ferro-Fosfato (LFP), Litio-Manganese-Ossido (LMO) Nichel-Manganese-Cobalto (NMC).

3.3. *Impatto di ciclo di vita delle LIBs per veicoli elettrici*

Ai fini di un'analisi indicativa degli impatti di ciclo di vita associati alle LIBs, l'attenzione è stata posta sulla categoria Cambiamenti Climatici/Riscaldamento Globale, ovvero sui risultati di impatto espressi in termini di anidride carbonica equivalente (CO₂eq). Tale scelta nasce del fatto che questa categoria

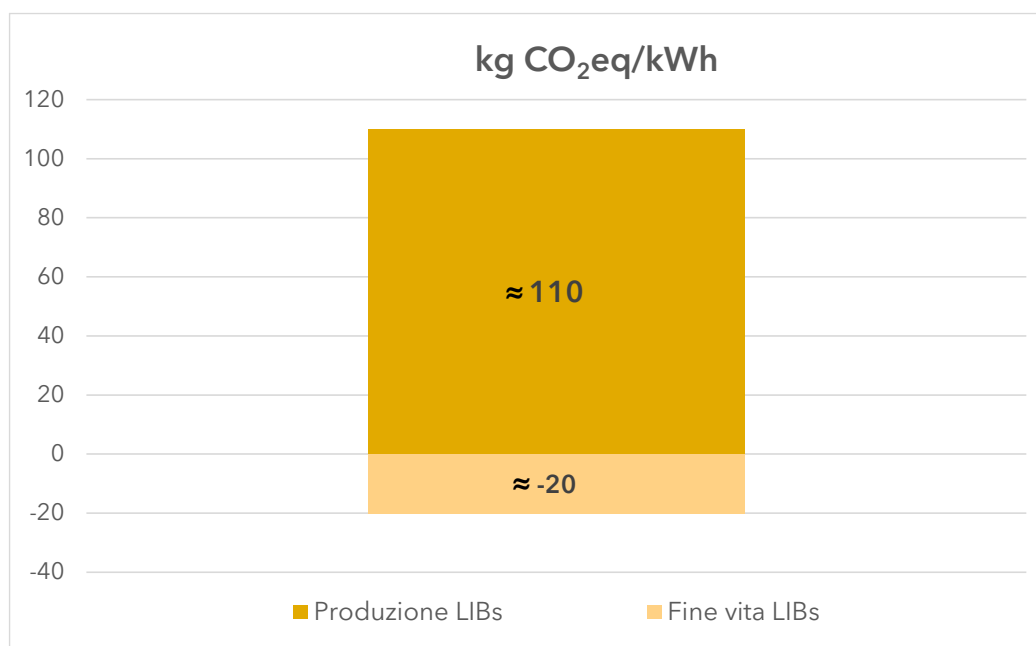
di impatto, oltre ad essere tra le più diffuse e note (anche ad un “pubblico” non tecnico), è risultata essere anche una delle più valutate nell’ambito dei vari studi LCA di letteratura.

Focalizzando l’attenzione solo sugli studi con approccio “dalla culla alla tomba” svolti in riferimento ad una UF pari ad 1 kWh di capacità di accumulo, è stato possibile osservare valori complessivi variabili (in funzione della specifica tipologia di batterie studiate e di altre caratteristiche peculiari di ciascuno studio) da circa 94 a circa 394 kg CO₂eq, con un contributo della fase di produzione (materie prime + manifattura delle batterie) nel range 77-139 kg CO₂eq. La fase d’uso, laddove considerata, ha invece mostrato una variabilità più contenuta, con valori tra 180 e 260 kg CO₂eq circa e la fase di fine vita contributi di riduzione delle emissioni variabili tra -10 e -30 kg CO₂eq circa.

Andando a focalizzare l’attenzione sugli studi svolti con approccio “dalla culla al cancello”, considerando sempre solo quelli con 1 kWh di capacità di accumulo come UF, si sono osservati valori in linea con quelli emersi dagli studi precedentemente illustrati, ovvero un impatto variabile principalmente tra circa 55 kg CO₂eq e circa 130 kg CO₂eq, con un solo valore massimo pari a circa 248 kg CO₂eq. L’analisi dei benefici associati alle operazioni di riciclo delle batterie ha invece evidenziato valori variabili principalmente tra -15 e -35 kg CO₂eq circa, con valori massimi di circa -60 kg CO₂eq nel caso di specifiche condizioni di trattamento e geografiche.

In Figura 3 si è sintetizzata l’analisi di questi risultati attraverso valori medi puramente indicativi dell’ordine di grandezza dell’impatto di ciclo di vita associato alla fase di produzione e alla fase di fine vita delle LIBs (escludendo la fase d’uso in quanto strettamente dipendente dal mix energetico utilizzato per la ricarica che, notoriamente, è molto variabile da paese a paese). Si tiene a sottolineare che tali valori non sono il risultato di un’analisi statistica accurata dei risultati di letteratura e hanno esclusivamente una valenza illustrativa del valore medio indicativo dell’impatto associato alle diverse fasi del ciclo di vita considerate.

Figura 3. Valori medi indicativi dell’impatto di ciclo di vita delle LIBs.



3.4. Focus sulla fase di fine vita delle LIBs

L'analisi degli articoli rilevanti reperiti focalizzata sul fine vita delle LIBs ha innanzitutto evidenziato che, anche ai fini della modellazione di questa specifica fase del ciclo di vita, l'utilizzo di dati secondari (derivanti sia da database LCA, che da altri database specifici e letteratura esistente) è preponderante rispetto all'uso di dati primari raccolti ad hoc per lo studio. Nel dettaglio, dei 18 articoli sul totale dei 29 reperiti, solo 2 hanno fatto ricorso all'uso esclusivo di dati primari e 3 all'uso combinato di dati primari e secondari. Diversi sono gli studi che hanno preso in considerazione lo sfruttamento delle batterie in una "seconda vita" prima del loro smaltimento finale, evidenziando la natura strategica sia in termini di riduzione dell'uso di risorse che dell'impatto di questa soluzione di gestione del ciclo di vita delle LIBs. Le batterie esauste, infatti, alla fine della loro "prima vita" all'interno di un veicolo elettrico presentano ancora il 70%-80% della capacità iniziale e risultano idonee per una serie di altre applicazioni di tipo stazionario, quali ad esempio sistemi di accumulo domestico e/o asserviti ad impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

In termini di tecnologie impiegate per il riciclo delle batterie, dall'analisi degli studi di letteratura è emerso come le più classiche, ovvero quelle basate su metodi di estrazione chimica dei metalli (trattamenti pirometallurgici e idrometallurgici), sono quelle maggiormente considerate e valutate in termini di ciclo di vita. In un caso [63] si è fatto riferimento ad un processo di trattamento specifico, sviluppato all'interno di un progetto di ricerca dedicato, basato sulla combinazione di un trattamento termico sottovuoto, di un trattamento meccanico e di un idrotrattamento della massa attiva.

In termini di impatto, la riduzione associata ad una corretta gestione del fine vita delle LIBs è risultata essere tutt'altro che trascurabile, come anche illustrato nel paragrafo precedente con lo specifico focus di analisi sulle emissioni di CO₂eq. L'analisi della letteratura ha quindi in definitiva evidenziato come un opportuno riciclo delle batterie può efficacemente ridurre lo sfruttamento delle risorse e l'impatto in termini di ciclo di vita delle stesse. È emerso inoltre come tale scelta sia da considerare come trattamento finale a seguito di una altrettanto strategica scelta di gestione delle LIBs, che è il loro secondo utilizzo in applicazioni diverse da quella primaria per cui risultano essere particolarmente idonee a conclusione della "prima vita utile".

4. Conclusioni e raccomandazioni

Ai fini della sfida globale di decarbonizzazione e mitigazione dei cambiamenti climatici, il settore dei trasporti riveste un ruolo fondamentale (in quanto una delle principali fonti di emissioni di GHG) e, tra le varie strategie possibili, l'elettrificazione del trasporto su strada è ritenuta una delle più efficaci. L'uso dei veicoli elettrici ha fatto registrare un rapido sviluppo negli ultimi anni ed è previsto un ulteriore significativo sviluppo nel breve-medio termine, con conseguente incremento nella domanda di batterie agli ioni di litio (LIBs), tecnologia di accumulo/alimentazione più diffusa per i veicoli elettrici in virtù delle proprie caratteristiche specifiche. Nonostante le LIBs siano generalmente considerate una tecnologia "pulita", viste alcune criticità che le contraddistinguono e la rapida crescita prevista (incremento di circa 10 volte previsto da qui al 2030), un loro sviluppo e utilizzo effettivamente

sostenibile richiede approfondite valutazioni di ciclo di vita.

Nel presente articolo è stata analizzata la letteratura scientifica più recente relativa a studi di ciclo di vita delle LIBs, al fine di fornire un quadro quanto più esaustivo e aggiornato sul tema, identificare i principali aspetti metodologici degli studi LCA svolti in letteratura e analizzare i principali risultati in termini di impatto (con uno specifico approfondimento sulla fase di fine vita).

Dalla review è chiaramente emerso che l'LCA rappresenta un valido strumento che consente di valutare efficacemente gli impatti ambientali delle LIBs nell'intero ciclo di vita, attraverso la costruzione/analisi di scenari reali o futuri che possono costituire un prezioso riferimento per l'ottimizzazione dei processi, lo sviluppo di nuovi prodotti, lo sviluppo aziendale e la formulazione di politiche. La maggior parte degli studi analizzati è risultato essere basato su dati secondari derivanti da appositi database o letteratura esistente e, nonostante l'elevato livello di accordo metodologico con le norme tecniche di riferimento ISO 14040 e ISO 14044, nell'approccio alla valutazione adottato negli studi sono state riscontrate alcune inconsistenze che danno luogo a risultati variabili in maniera apprezzabile e tra loro non del tutto confrontabili.

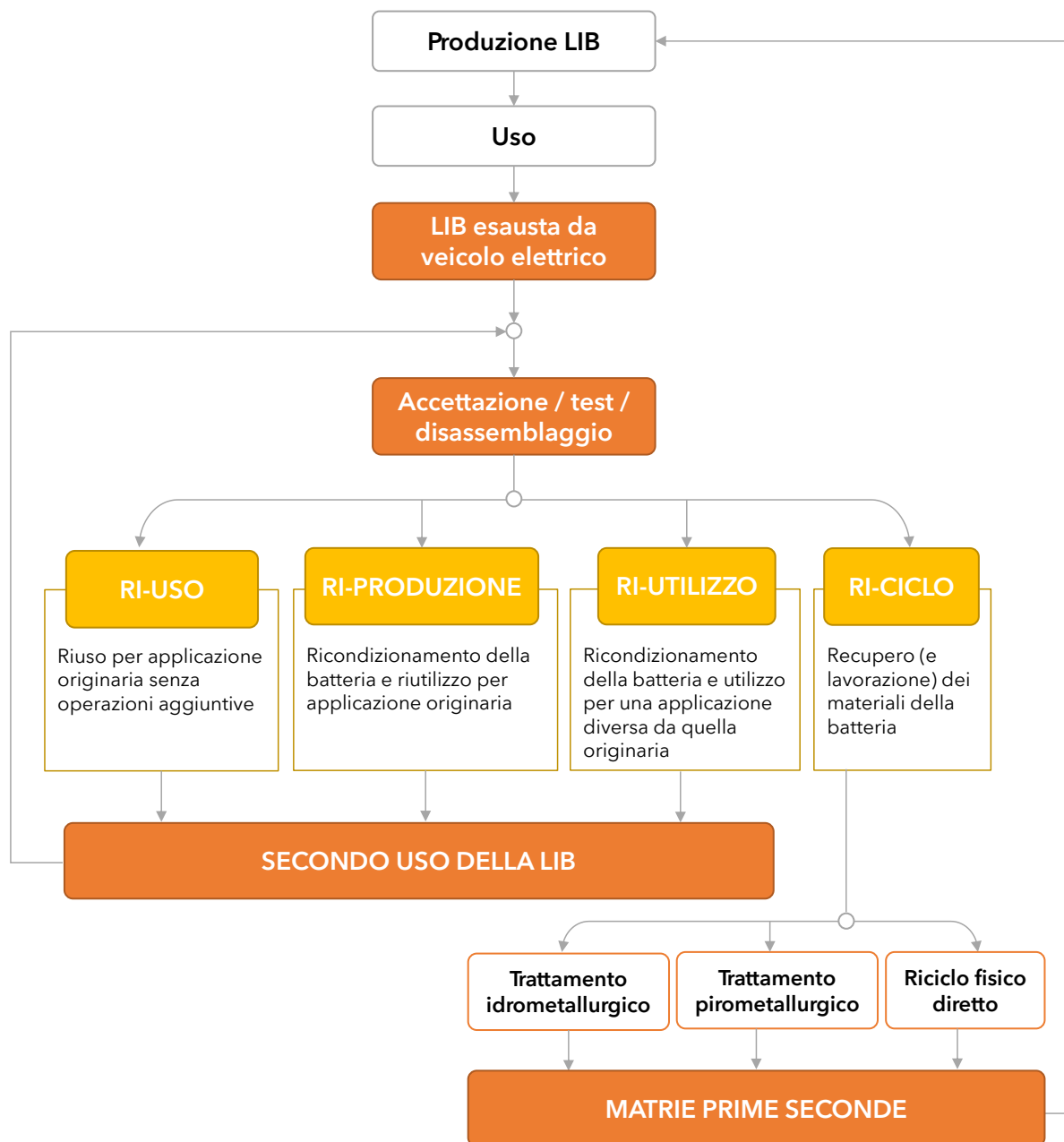
A titolo esemplificativo, focalizzando l'attenzione sull'impatto in termini di emissioni di CO₂eq degli studi aventi come UF 1 kWh di capacità di accumulo (UF emersa come maggiormente adottata ai fini delle valutazioni LCA), si è osservata una variabilità dei risultati di impatto complessivo da circa 94 a circa 394 kg CO₂eq. Il contributo della fase di produzione è stato osservato nel range di circa 55-139 kg CO₂eq, mentre i contributi di riduzione delle emissioni della fase di fine vita sono risultati variabili principalmente tra -10 e -35 kg CO₂eq circa. La fase d'uso, quando considerata, ha invece mostrato una variabilità sempre apprezzabile ma più contenuta, con valori tra 180 e 260 kg CO₂eq circa.

Il focus specifico sulla fase di fine vita ha confermato che le fonti principali dei dati utilizzati per la modellazione sono di tipo secondario, evidenziando come una opportuna implementazione delle attività di riciclo delle batterie può ridurre in maniera efficace lo sfruttamento delle risorse e l'impatto in termini di ciclo di vita delle stesse. Tuttavia, dall'analisi degli studi è emerso evidentemente come sia particolarmente strategico considerare il riciclo come trattamento finale delle batterie a seguito di un loro secondo utilizzo in applicazioni per cui risultano essere idonee a conclusione della "prima vita utile", anche differenti da quella originaria.

Si ritiene dunque particolarmente importante:

- lo sviluppo e l'adozione diffusa di un quadro metodologico standard per gli studi LCA delle batterie e la valutazione degli impatti di ciclo di vita. La disponibilità di risultati "standardizzati" è infatti ritenuta particolarmente strategica in ottica di ottimizzazione dei processi, sviluppo di nuovi prodotti, e definizione di politiche per la riduzione degli impatti;
- l'implementazione di strategie di economia circolare ed efficienza delle risorse lungo le catene di valore delle batterie, attraverso una opportuna applicazione della "gerarchia delle R" in ottica di chiusura dei cicli attraverso azioni di riuso, riutilizzo e riciclo delle stesse (Figura 4).
- la definizione/valutazione di specifiche categorie di impatto che possano essere direttamente correlate all'efficienza delle risorse, al fine di fornire dettagli in merito a tale aspetto rilevante e, quindi, un quadro più esaustivo sugli impatti lungo il ciclo di vita delle LIBs.

Figura 4. Approccio strategico di economia circolare per la gestione delle LIBs.



References

1. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.

2. COM/2016/501 final. "A European Strategy for Low-Emission Mobility".
3. Zhao, X.; Ma, X.W.; Chen, B.Y.; Shang, Y.P.; Song, M.L. Challenges toward carbon neutrality in China: strategies and countermeasures. *Resour Conserv Recycl* **2022**, 176, 105959.
4. Harvey, L.D.D. Rethinking electric vehicle subsidies, rediscovering energy efficiency. *Energy Pol* **2020**, 146, 111760.
5. Xia, X.; Li, P. A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries. *Sci. Total Environ.* **2022**, 814, 152870.
6. Dolganova, I.; Rödl, A.; Bach, V.; Martin, K.; Finkbeiner, M. A review of life cycle assessment studies of electric vehicles with a focus on resource use. *Resources* **2020**, 9(3), 32.
7. Miao, Y.P.; Liu, L.L.; Zhang, Y.P.; Tan, Q.Y.; Li, J.H. An overview of global power lithium-ion batteries and associated critical metal recycling. *J Hazard Mater* **2022**, 425, 127900.
8. Pinegar, H.; Smith, Y.R. Recycling of end-of-life lithium-ion batteries, Part I: commercial processes. *J Sustain Metall* **2019**, 5, 402–416.
9. Ambrose, H.; Kendall, A. Understanding the future of lithium: Part 2, temporally and spatially resolved life-cycle assessment modeling. *J Ind Ecol* **2020**, 24, 90–100.
10. Harper, G.; Sommerville, R.; Kendrick, E.; Driscoll, L.; Slater, P.; Stolkin, R. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* **2019**, 575, 75–86.
11. Rajaeifar, M.A.; Ghadimi, P.; Raugei, M.; Wu, Y.; Heidrich, O. Challenges and recent developments in supply and value chains of electric vehicle batteries: a sustainability perspective. *Resour Conserv Recycl* **2022**, 180, 106144.
12. Sun, X.; Hao, H.; Hartmann, P.; Liu, Z.W.; Zhao, F.Q. Supply risks of lithium-ion battery materials: an entire supply chain estimation. *Mater Today Energy* **2019**, 14, 100347.
13. Olivetti, E.A.; Ceder, G.; Gaustad, G.G.; Fu, X.K. Lithium-ion battery supply chain considerations: analysis of potential bottlenecks in critical metals. *Joule* **2017**, 1(2), 229–243.
14. Gandoman, F.H.; Jaguemont, J.; Goutam, S.; Gopalakrishnan, R.; Firouz, Y.; Kalogiannis, T. et al. Concept of reliability and safety assessment of lithium-ion batteries in electric vehicles: basics, progress, and challenges. *Appl Energy* **2019**, 251, 113343.
15. Christensen, P.A.; Anderson, P.A.; Harper, G.D.J.; Lambert, S.M.; Mrozik, W.; Rajaeifar, M.A. et al. Risk management over the life cycle of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Renew Sustain Energy Rev* **2021**, 148, 111240.
16. Lai, X.; Jin, C.; Yi, W.; Han, X.; Feng, X.; Zheng, Y. et al. Mechanism, modeling, detection, and prevention of the internal short circuit in lithium-ion batteries: recent advances and perspectives. *Energy Storage Mater* **2021**, 35, 470–499.
17. COM/2020/98 final, "Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare per un'Europa più pulita e più competitiva"
18. Direttiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio
19. Bocken, N.M.P.; de Pauw, I.; Bakker, C.; van der Grinten, B. Product design and business model strategies for a circular economy. *J. Indus. Prod. Eng.* **2016**, 33, 308–320.
20. Mendoza, J.M.F.; Sharmina, M.; Gallego-Schmid, A.; Heyes, G.; Azapagic, A. Integrating backcasting

- and eco-design for the circular economy: the BECE framework. *J Ind Ecol* **2017**, *21*, 526–544.
21. Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. *Resour Conserv Recycl* **2017**, *127*, 221–32.
 22. Mahmoudzadeh Andwari, A.; Pesiridis, A.; Rajoo, S.; Martinez-Botas, R.; Esfahanian, V. A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renew Sustain Energy Rev* **2017**, *78*, 414–430.
 23. Picatoste, A.; Justel, D.; Mendoza, J.M.F. Circularity and life cycle environmental impact assessment of batteries for electric vehicles: Industrial challenges, best practices and research guidelines. *Renew Sustain Energy Rev* **2022**, *169*, 112941.
 24. Zink, T.; Geyer, R. Circular economy rebound. *J Ind Ecol* **2017**, *21*, 593–602.
 25. Hawkins, T.R.; Singh, B.; Majeau-Bettez, G.; Strømman, A.H. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *J Ind Ecol* **2013**, *17*, 53–64.
 26. Algunaibet, I.M.; Guillén-Gosálbez, G. Life cycle burden-shifting in energy systems designed to minimize greenhouse gas emissions: novel analytical method and application to the United States. *J Clean Prod* **2019**, *229*, 886–901.
 27. Singh, S.; Weeber, M.; Birke, K.P.; Sauer, A. Development and Utilization of a Framework for Data-Driven Life Cycle Management of Battery Cells. *Procedia Manuf* **2020**, *43*, 431–438.
 28. Wu, Z.; Kong, D. Comparative life cycle assessment of lithium-ion batteries with lithium metal, silicon nanowire, and graphite anodes. *Clean Technol. Environ. Policy* **2018**, *20*, 1233–1244.
 29. UNI EN ISO 14040:2021. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento.
 30. UNI EN ISO 14044:2018. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida.
 31. Dunn, J.B.; Gaines, L.; Sullivan, J.; Wang, M.Q. Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries. *Environ Sci Technol* **2012**, *46*(22), 12704–12710.
 32. Tagliaferri, C.; Evangelisti, S.; Acconcia, F.; Domenech, T.; Ekins, P.; Barletta, D. et al. Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: a cradle-to-grave systems engineering approach. *Chem Eng Res Des* **2016**, *112*, 298–309.
 33. Hiremath M, Derendorf K, Vogt T. Comparative life cycle assessment of battery storage systems for stationary applications. *Environ Sci Technol* **2015**, *49*(8), 4825–4833.
 34. Ellingsen, L.A.W.; Majeau-Bettez, G.; Singh, B.; Srivastava, A.K.; Valøen, L.O.; Strømman, A.H. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *J. Ind. Ecol.* **2014**, *18*, 113–124.
 35. Hawkins, T.R.; Singh, B.; Majeau-Bettez, G.; Strømman, A.H. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *J. Ind. Ecol.* **2013**, *17*, 53–64.
 36. Majeau-Bettez, G.; Hawkins, T.R.; Strømman, A.H. Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plugin hybrid and battery electric vehicles. *Environ. Sci. Technol.* **2011**, *45*, 5454.
 37. Notter, D.A.; Gauch, M.; Widmer, R.; Wäger, P.; Stamp, A.; Zah, R.; Althaus, H.J. Contribution of Lithium batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environ. Sci. Technol.* **2010**, *44*,

- 6550–6556.
38. Sanf elix, J.; Messagie, M.; Omar, N.; Van Mierlo, J.; Hennige, V. Environmental performance of advanced hybrid energy storage systems for electric vehicle applications. *Appl. Energy* **2015**, *137*, 925–930.
 39. Wang, L.; Hu, J.; Yu, Y.; Huang, K.; Hu, Y. Lithium-air, lithium-sulfur, and sodium ion, which secondary battery category is more environmentally friendly and promising based on footprint family indicators? *J. Clean. Prod.* **2020**, *276*, 124244.
 40. Kallitsis E.; Korre, A.; Kelsall, G.; Kupfersberger, M.; Nie Z. Environmental life cycle assessment of the production in China of lithium-ion batteries with nickel-cobalt-manganese cathodes utilising novel electrode chemistries. *J. Clean. Prod.* **2020**, *254*, 120067.
 41. Sun, X.; Luo, X.; Zhang, Z.; Meng, F.; Yang, J. Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. *J. Clean. Prod.* **2020**, *273*, 123006.
 42. Burchart-Korol, D.; Jursova, S.; Fole, P.; Pustejovska, P. Life cycle impact assessment of electric vehicle battery charging in European Union countries. *J. Clean. Prod.* **2020**, *257*, 120476.
 43. Wang, F.; Deng, Y.; Yuan, C. Life cycle assessment of lithium oxygen battery for electric vehicles, *J. Clean. Prod.* **2020**, *264*, 121339.
 44. Silvestri, L.; Forcina, A.; Arcese, G.; Bella, G. Recycling technologies of nickel-metal hydride batteries: An LCA based analysis. *J. Clean. Prod.* **2020**, *273*, 123083.
 45. Tao, Y.; You, F. Comparative life cycle assessment of three recycling approaches for electric vehicle lithium-ion battery after cascaded use. *Chem. Eng. Transactions* **2020**, *81*, 1123-1128.
 46. Mohr, M.; Peters, J.F.; Baumann, M.; Weil, M. Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes, *J. Ind. Ecol.* **2020**, *24*, 1310–1322.
 47. Kelly, J.C., Dai, Q. & Wang, M. Globally regional life cycle analysis of automotive lithium-ion nickel manganese cobalt batteries. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* **2020**, *25*, 371–396.
 48. Lybbert, M.; Ghaemi, Z.; Balaji, A.K.; Warren, R. Integrating life cycle assessment and electrochemical modeling to study the effects of cell design and operating conditions on the environmental impacts of lithium-ion batteries. *Renew Sustain Energy Rev* **2021**, *144*, 111004.
 49. X. Shu, Y. Guo, W. Yang, K. Wei, G. Zhu, Life-cycle assessment of the environmental impact of the batteries used in pure electric passenger cars. *Energy Rep.* **2021**, *7*, 2302–2315,
 50. N. Wilson, E. Meiklejohn, B. Overton, F. Robinson, S.H. Farjana, W. Li, J. Staines, A physical allocation method for comparative life cycle assessment: A case study of repurposing Australian electric vehicle batteries. *Resour. Conserv. Recycl.* **2021**, *174*, 105759.
 51. Lopez, S.; Akizu-Gardoki, O.; Lizundia, E. Comparative life cycle assessment of high performance lithium-sulfur battery cathodes. *J. Clean. Prod.* **2021**, *282*, 124528.
 52. Crenna, E.; Gauch, M.; Widmer, R.; Patrick W ager, P.; Hischier, R. Towards more flexibility and transparency in life cycle inventories for Lithium-ion batteries. *Resour. Conserv. Recycl.* **2021**, *170*, 105619.
 53. Yu, M.; Bai, B.; Xiong, S.; Liao, X. Evaluating environmental impacts and economic performance of

- remanufacturing electric vehicle lithium-ion batteries. *J. Clean. Prod.* **2021**, *321*, 128935.
54. S. Wang, J. Yu, A comparative life cycle assessment on lithium-ion battery: Case study on electric vehicle battery in China considering battery evolution. *Waste Manage Res.* **2021**, *39(1)*, 156-164.
55. Iturrondobeitia, M.; Akizu-Gardoki, O.; Minguez, R.; Lizundia, E. Environmental Impact Analysis of Aprotic Li-O₂ Batteries Based on Life Cycle Assessment. *Sustainable Chem. Eng.* **2021**, *9*, 7139–7153.
56. Accardo, A.; Dotelli, G.; Musa, M.; Spessa, E. Life cycle assessment of an NMC battery for application to electric light-duty commercial vehicles and comparison with a sodium-nickel-chloride battery, *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 1160.
57. Wu, H.; Hu, Y.; Yu, Y.; Huang, K.; Wang, L. The environmental footprint of electric vehicle battery packs during the production and use phases with different functional units. *Inter. J. Life Cycle Assess.* **2021**, *26*, 97–113.
58. L. Kurz, M. Faryadras, I. Klugius, F. Reichert, A. Scheibe, M. Schmidt, R. Wörner. Global warming potential of a new waterjet-Based recycling process for cathode materials of lithium-ion batteries, *Batteries* **2021**, *7(2)*, 29.
59. Philippot, M.; Costa, D.; Hosen, M.S.; Senécat, A.; Brouwers, E.; Nanini-Maury, E.; Van Mierlo, J.; Messagie, M. Environmental impact of the second life of an automotive battery: Reuse and repurpose based on ageing tests. *J. Clean. Prod.* **2022**, *366*, 132872.
60. Francine Duarte Castro, F.; Eric Mehner, E.; Laura Cutaia, L.; Mentore Vaccari, M. Life cycle assessment of an innovative lithium-ion battery recycling route: A feasibility study. *J. Clean. Prod.* **2022**, *368*, 133130.
61. Popien, L.L.; Thies, C.; Spengler, T.S. Exploring recycling options in battery supply chains – a life cycle sustainability assessment. *Procedia CIRP* **2022**, *105*, 434–439.
62. Quan, J.; Zhao, S.; Song, D.; Wang, T.; He, W.; Li, G. Comparative life cycle assessment of LFP and NCM batteries including the secondary use and different recycling technologies. *Sci. Total Environ.* **2022**, *819*, 153105.
63. Benveniste, G.; Sánchez, A.; Rallo, H.; Corchero, C.; Amante, B. Comparative life cycle assessment of Li-Sulphur and Li-ion batteries for electric vehicles. *Resour Conserv Recycl advances* **2022**, *15*, 200086.
64. Kallitsis, E.; Korre, A.; Kelsall, G.H. Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs. *J. Clean. Prod.* **2022**, *371*, 133636.
65. Degen, F.; Schütte, M. Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production. *J. Clean. Prod.* **2022**, *330*, 129798.
66. Winjobi, O.; Kelly, J.C; Dai, Q. Life-cycle analysis, by global region, of automotive lithium-ion nickel manganese cobalt batteries of varying nickel content. *Sustain. Mater. Technol.* **2022**, *32*, e00415.
67. Blömeke, S.; Scheller, C.; Cerdas, F.; Thies, C.; Hachenberger, R.; Gonter, M.; Herrmann, C.; Spengler, T.S. Material and energy flow analysis for environmental and economic impact assessment of industrial recycling routes for lithium-ion traction batteries. *J. Clean. Prod.* **2022**, *377*, 134344.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

La prima Comunità Energetica Rinnovabile di Assisi: analisi tecnico-economica e legale

Elisa Moretti^{1, 2, *}, Ettore Stamponi², Simona Stoklin², Michele Eugeni¹, Christian Cavazzoni³, Marco Luigi Marchetti⁴, Patrizia Fortini⁵ and Stefania Proietti⁵

¹ Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti 93 - 06125 Perugia

² CIRIAF, Via G. Duranti 93 - 06125 Perugia

³ Dipartimento di Economia, Università degli Studi di Perugia, Via A. Pascoli 20 - 06123 Perugia

⁴ Studio legale MARCHETTI - Via XIV Settembre 73 – 06121 Perugia

⁵ Comune di Assisi - Piazza Nassirya - Santa Maria degli Angeli - 06081 Assisi (PG)

* Autore di riferimento. E-Mail: elisa.moretti@unipg.it

Abstract: Le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), previste dalla Direttiva Europea RED II (2018/2001/UE), sono una forma collaborativa tra cittadini, enti di ricerca e formazione, enti religiosi, pubbliche amministrazioni locali, piccole e medie imprese, che decidono di dotarsi di uno o più impianti condivisi per la produzione e l'autoconsumo di energia da fonti rinnovabili. Questo lavoro ha ad oggetto lo studio della prima CER nel comune di Assisi, un importante driver per la transizione energetica e il raggiungimento degli obiettivi del Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima adottato dal Comune. Nel lavoro è discussa una possibile configurazione della CER, attraverso l'analisi energetica, ambientale ed economica che include il calcolo dei principali indici economico-finanziari (VAN, TIR, payback time). Grazie alla CER, l'energia prodotta potrà essere condivisa virtualmente con i membri consumatori domestici e commerciali che risiedono all'interno dei centri storici, in modo da consentire l'uso di energia rinnovabile anche nei luoghi dove questa, ad oggi, non può essere prodotta. La ricerca individua, inoltre, le principali barriere alla creazione della CER, suggerendo alcune proposte che consentano il superamento delle possibili criticità. Il lavoro affronta, infine, i profili giuridici della CER caratterizzati dal ruolo assunto dal Comune che, oltre a svolgere la funzione di soggetto aggregatore, parteciperà come membro della CER nel ruolo di prosumer. Con riferimento a questi profili, è stato necessario individuare la forma giuridica più appropriata, ovvero quella che mitiga il rischio di danno erariale e rispetta la disciplina delle società a partecipazione pubblica.

Keywords: Comunità energetiche rinnovabili; fonti energetiche rinnovabili; impianti fotovoltaici; generazione distribuita di energia; analisi economica; analisi legale; Assisi.

1. Introduzione

A distanza di 40 anni dalla proclamazione, nel 1980, di San Francesco di Assisi come patrono degli ecologi, il comune di Assisi nel 2020 ha adottato il Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC), un documento programmatico che prevede alcune azioni strategiche finalizzate alla mitigazione delle emissioni climalteranti prodotte in diversi settori: Edilizia pubblica e privata, Industria, Agricoltura, Terziario, Servizi pubblici (Trasporti, Illuminazione) [1-2]. Siccome nulla avviene per caso, questa sincronicità lascia presagire che Assisi possa diventare un esempio su tematiche quali il rispetto per la natura e la sostenibilità, sia ambientale che economico-sociale. In quest'ottica le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) costituiscono una importante best practice, in quanto consentono una notevole riduzione delle emissioni e, contestualmente, contribuiscono a ridurre la povertà energetica [3-5].

Le CER, previste dalla Direttiva Europea RED II (2018/2001/UE) [6-7], rappresentano una forma di condivisione energetica fondata sulla collaborazione tra cittadini, enti di ricerca e formazione, enti religiosi, pubbliche amministrazioni locali o piccole e medie imprese, che decidono di dotarsi di uno o più impianti condivisi per la produzione e l'autoconsumo di energia da fonti rinnovabili. Una CER è un modello di gestione energetica con il quale più soggetti si uniscono con l'intento di produrre, consumare e vendere energia prodotta da fonti rinnovabili, traendone benefici sociali, ambientali ed economici [8-9]. Questo modello di produzione si fonda sulla diffusione di impianti di piccola scala, al fine di valorizzare il più possibile l'energia auto-consumata dalla comunità. L'implementazione di questo tipo di soluzione è guidata dalla costante attenzione all'efficienza ed è agevolata dalla riduzione dei costi di alcune tecnologie rinnovabili, tra le quali crescente importanza ha il fotovoltaico in ragione della sua modularità e del fatto che utilizza una fonte rinnovabile diffusamente disponibile. L'obiettivo di questa ricerca è studiare il modello della prima CER del comune di Assisi, sviluppando una metodologia di analisi tecnica ed economica del modello finalizzata all'ottimizzazione della composizione della comunità energetica. Questa analisi tecnica è stata applicata ad uno studio di fattibilità per la creazione di una CER nel comune di Assisi che prevede a regime la produzione annuale di 2,2 GWh di energia da fonti rinnovabili.

Attraverso la CER, sarà possibile abbattere le emissioni generate dai grandi flussi di turisti e dai residenti nel centro storico (dove, per vincoli paesaggistici e architettonici, è quasi impossibile realizzare nuovi impianti fotovoltaici) alimentando con l'energia prodotta nella zona industriale e commerciale della città edifici residenziali, alberghi, edifici commerciali ed edifici comunali. L'abbattimento dei consumi energetici e la produzione di energia rinnovabile, in un contesto economico che mostra un significativo incremento dei prezzi dell'energia, garantiscono sia benefici per i membri della CER che esternalità positive per i diversi stakeholders che operano nel territorio

Comunale con significativi benefici sociali. Inoltre, le Comunità Energetiche possono contrastare il fenomeno della povertà energetica e le conseguenti difficoltà di accesso all'energia, fornendo strumenti e informazioni per una corretta gestione dei consumi anche in ambito domestico.

Nel lavoro viene discussa una possibile configurazione per la CER, individuandone i benefici economici e ipotizzandone la configurazione giuridica inclusiva anche della scelta della veste giuridica.

2. La transizione energetica del Comune di Assisi

L'attuale situazione del nostro pianeta rende necessario ridurre le emissioni climalteranti e limitare gli effetti del riscaldamento globale, ma questo processo ci impone di affrontare sfide complesse non solo in ambito tecnologico ma anche sotto il profilo economico e sociale reso più complesso dalla rapida ripresa economica post-Covid. In aggiunta, nei mesi successivi all'invasione russa dell'Ucraina nel febbraio 2022, il mercato energetico è degenerato in una vera e propria crisi. In questo contesto, la transizione energetica è, e sarà, uno dei fattori che caratterizzeranno i decenni a venire.

Secondo uno studio precedente [2], la cittadinanza di Assisi è direttamente responsabile di circa il 50% delle emissioni del territorio comunale. Pertanto, l'attenzione va focalizzata sul cittadino e su quanto può ridurre direttamente le proprie emissioni, grazie anche alle azioni che il Comune può adottare, attraverso strategie di coinvolgimento e sensibilizzazione.

2.1. PAESC e Obiettivi

Ad ottobre 2020 il Comune di Assisi, a seguito dell'adesione al Patto dei Sindaci nel luglio 2017, ha adottato il PAESC, elaborato con il supporto tecnico-scientifico del CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente "Mauro Felli") dell'Università di Perugia [1].

Con il PAESC, Assisi si impegna a ridurre del 40% le proprie emissioni di CO₂ e ad accrescere la propria capacità di mitigazione dei cambiamenti climatici entro il 2030, adottando strategie di mobilità sostenibile, riqualificazione energetica del patrimonio esistente, gestione ottimale dei rifiuti, investimenti in fonti di energia rinnovabile.

Il primo passo per la redazione del PAESC è stata la stesura dell'inventario delle emissioni (IBE), elaborato per l'anno di riferimento 2008. I dati complessivi sono stati elaborati al fine di determinare i consumi energetici, suddivisi per fonti e settori e utilizzati per calcolare le emissioni di CO₂ nel territorio comunale. Al 2008 il consumo energetico nel territorio comunale era pari a 541.797 MWh, mentre le emissioni totali di CO₂ erano pari a 146.611 tonnellate. Il 30% di queste emissioni era ascrivibile al settore dei trasporti, seguito dall'industria (25%) e dal residenziale (24%). Al settore terziario risultavano imputabili il 17% delle emissioni, mentre quelle del settore pubblico incidevano per circa il 2% al pari a quelle del settore agricolo. L'aggiornamento di questo monitoraggio ad otto anni di distanza, nel 2016, mostra una riduzione dei consumi energetici del 4,2%, mentre le emissioni di CO₂ sono diminuite del 17,41% (25.528 tonnellate). Il risultato è dovuto, oltre alla variazione del fattore di emissione nazionale dell'energia elettrica, all'incremento della produzione di energia da fotovoltaico e all'entrata in funzione dell'impianto di cogenerazione di Santa Maria degli Angeli. Per raggiungere l'obiettivo prefissato di riduzione delle emissioni del 40% rispetto al 2008 (58.644 tonnellate) restano

ancora da ridurre 33.116 tonnellate entro il 2030.

Nel PAESC sono state previste azioni di mitigazione e azioni di adattamento. In particolare, sono individuate 13 azioni strategiche di mitigazione delle emissioni, che coinvolgono diversi settori e che sono finalizzate a ridurre le emissioni del 40% rispetto al 2008. Il piano di azione prevede la riduzione di almeno 33.116 tonnellate entro il 2030 rispetto a quelle relative all'anno 2016. Di queste tredici azioni, sei sono azioni chiave in accordo alle linee guida di riferimento (Covenant of Mayors - Europe Office, Reporting Guidelines, 2020). Le prime cinque azioni sono relative all'efficientamento energetico degli edifici residenziali e comunali, del terziario, industria e agricoltura, mentre la sesta si riferisce alla realizzazione di impianti solari fotovoltaici. Vi sono, inoltre, tre azioni relative alla mobilità e ai trasporti (con contributi pari a circa il 56%) che riguardano rispettivamente il rinnovamento del parco commerciale privato, di quello comunale e il PUMS (Piano Urbano per la Mobilità Sostenibile) della città di Assisi. Altre azioni riguardano l'efficientamento energetico e la riqualificazione della pubblica illuminazione, la piantumazione di alberi, la sensibilizzazione ed il coinvolgimento dei numerosi stakeholders.

Per l'efficiente e corretto coordinamento delle azioni è prevista l'istituzione dell'ufficio Energy management e Ambiente e dello sportello energia al fine di organizzare le attività di aggiornamento e monitoraggio del PAESC.

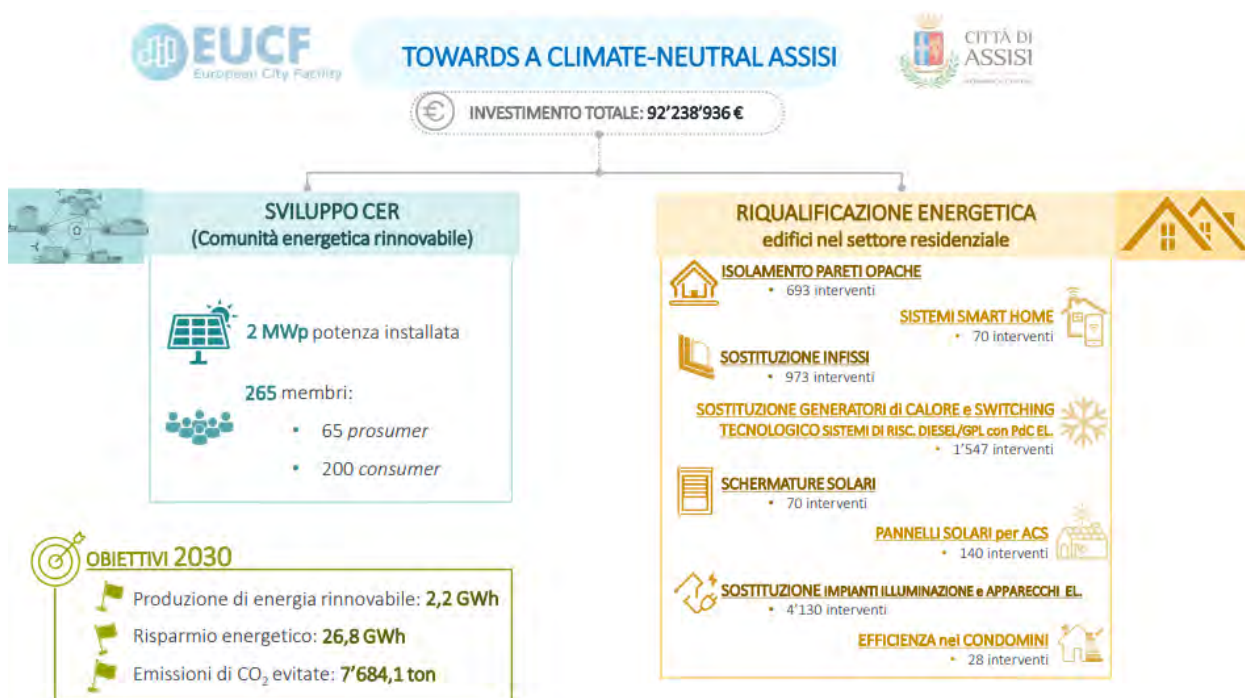
Attraverso il PAESC, il Comune di Assisi si impegna anche ad accrescere la propria capacità di adattamento ai cambiamenti climatici entro il 2030. L'analisi dettagliata della città di Assisi (evoluzione storica della piovosità e della temperatura) e lo studio della documentazione disponibile hanno permesso la valutazione dei rischi e delle vulnerabilità al cambiamento climatico del territorio. Sono stati individuati sette rischi principali: caldo estremo, forti precipitazioni, inondazioni, siccità e scarsità d'acqua, deterioramento dei terreni (frane), incendi boschivi, cambiamento chimico (inquinamento delle falde acquifere e dell'aria). Sono state quindi individuate nove azioni di adattamento al cambiamento climatico, che sono: protocollo per i monitoraggi ambientali, strategia "Zero Waste", valorizzazione e cura del Parco Monte Subasio, incentivazione dell'utilizzo dell'acqua pubblica, applicazione del "green procurement", obiettivo "consumo del suolo zero al 2026", manutenzione e cura del verde urbano, dematerializzazione e razionalizzazione delle spese di funzionamento, promozione dell'evento "un albero per Francesco".

Tuttavia, l'attuazione di azioni che coinvolgano esclusivamente il settore pubblico risulterebbe certamente insufficiente per raggiungere gli ambiziosi obiettivi del PAESC in assenza del contributo dei soggetti che, a diverso titolo, concorrono alla definizione dei consumi energetici.

2.2 EUCF e contributo del cittadino

Questa iniziativa si inserisce in un processo di rinnovamento energetico attuato dal Comune di Assisi anche nell'ambito del progetto denominato "Towards a climate neutral Assisi: the role of citizen and tourist in the city of Francesco in the post covid new normal", finanziato mediante il bando europeo Horizon 2020 EUropean City Facility (EUCF). Le risorse ottenute hanno lo scopo di accelerare il raggiungimento degli obiettivi del PAESC.

Figura 1. Schema del Progetto EUCF.



Pur essendo a trazione pubblica, il progetto è rivolto principalmente a cittadini e soggetti privati, e si sviluppa attraverso due direttrici: una profonda riqualificazione degli edifici residenziali (26,749 GWh/anno risparmiati), con 7.791 interventi di riqualificazione energetica effettuati entro il 2030 (ristrutturazione dell'involucro edilizio e riqualificazione energetica degli impianti, passaggio tecnologico degli impianti di riscaldamento a combustibili fossili verso soluzioni a minore impatto ambientale) e un aumento significativo della produzione di energia rinnovabile mediante nuovi impianti fotovoltaici sulle coperture degli edifici pubblici e privati (2 MWp nel 2030 – 2,2 GWh prodotti), attraverso la creazione della prima CER all'interno del territorio di Assisi. Sfruttando questa comunità energetica sarà, infatti, possibile abbattere le emissioni prodotte dagli imponenti flussi turistici e dai cittadini residenti nelle strutture collocate nel centro storico dove, per vincoli paesaggistici e architettonici, è quasi impossibile realizzare nuovi impianti fotovoltaici. La CER consentirà, quindi, di alimentare edifici residenziali, alberghi, edifici commerciali, edifici comunali, con l'energia prodotta nella zona industriale e commerciale della città.

Le azioni di riqualificazione energetica degli edifici permetteranno inoltre di migliorare la qualità di vita e il comfort dei cittadini e di ridurre significativamente i consumi energetici degli immobili.

Questi benefici, collocati in un contesto economico che mostra un significativo incremento dei prezzi dell'energia, generano significativi benefici sociali sia per i membri della CER che per i diversi stakeholders. Inoltre, le CER possono contrastare il fenomeno della povertà energetica e le conseguenti difficoltà di accesso all'energia, anche fornendo strumenti e informazioni per una corretta gestione dei consumi. A queste considerazioni di carattere generale va tuttavia affiancata una puntuale analisi tecnico-economica e legale, oggetto del presente lavoro, che consenta di valutare in termini analitici e quantitativi l'efficacia delle azioni da intraprendere sul territorio.

3. La prima CER del comune di Assisi

3.1 Obiettivo

Il Comune di Assisi presenta vincoli architettonici e paesaggistici che limitano fortemente la diffusione di impianti da fonti rinnovabili; pertanto, nel progetto si è ipotizzato il solo contributo fornito dall'energia fotovoltaica, in quanto questa tipologia impiantistica risulta meno impattante da un punto di vista visivo e più integrabile nel contesto ambientale. Questa caratteristica territoriale è confermata dalla presenza di impianti fotovoltaici nelle zone industriali e residenziali della piana di Santa Maria degli Angeli distante dal centro storico cittadino.

In questo contesto il progetto ha l'obiettivo di incrementare la potenza degli impianti fotovoltaici installati, fornendo al settore una forte spinta propulsiva, e di realizzare nuovi impianti solari fotovoltaici da installare su edifici di proprietà comunale che saranno inseriti nel contesto della CER. Gli edifici oggetto dell'analisi sono costituiti da due scuole, che rientrano nell'elenco delle utenze comunali più energivore, oltre all'edificio ex scalo merci ferroviario denominato "Locali ferrovia". I generatori di prevista installazione contribuiranno a diminuire i costi in bolletta delle utenze aumentando la quota di autoconsumo fisico di energia. Inoltre, essendo gli impianti inseriti nella configurazione di una comunità energetica, contribuiranno al contrasto della povertà energetica e al raggiungimento degli obiettivi fissati dal PAESC al 2030.

Al fine del raggiungimento di tali obiettivi la creazione della prima comunità energetica rinnovabile nel comune di Assisi riveste un ruolo cruciale poiché consente:

- la diffusione delle fonti rinnovabili nel mix energetico comunale;
- l'installazione di sistemi di accumulo energetico e l'incremento dell'autoconsumo di energia da FER;
- la diffusione della domotica (smart meters, contatori digitali, piattaforme di controllo e gestione) e la conseguente ottimizzazione dei profili di consumo;
- la transizione verso la mobilità sostenibile (colonnine di ricarica e veicoli elettrici);
- il coinvolgimento attivo dei cittadini nella transizione energetica, in veste di consumatori (consumer), produttori di energia (producer) o entrambi (prosumer).

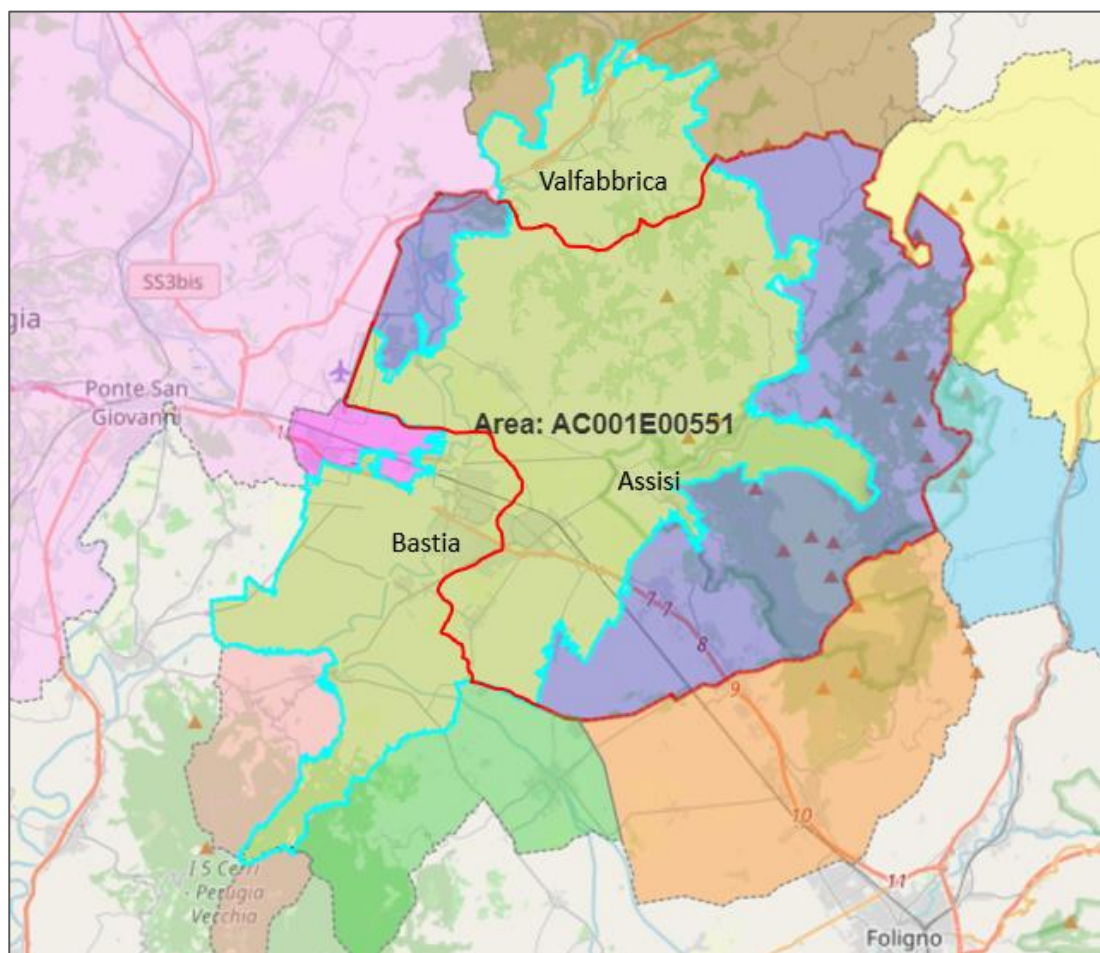
Inoltre, la generazione diffusa di energia elettrica porta ad una diminuzione delle perdite conseguenti al trasporto per lunghe distanze. L'energia che viene condivisa all'interno della CER, definita come il minimo su base oraria tra l'energia immessa dagli impianti da fonte rinnovabile e quella prelevata dalla rete dai membri della CER, permette di instaurare un sistema virtuoso di autoconsumo virtuale che comporta sia vantaggi ambientali che economici.

3.2 Scelta della Configurazione

Al fine di ottenere una potenza complessiva da impianti da fonti rinnovabili al 2030 di circa 2 MWp (ed una produzione di 2,2 GWh/anno), si è ipotizzato di distribuire sul territorio del Comune di Assisi 65 impianti solari fotovoltaici in copertura. Gli impianti che entreranno a far parte della CER dovranno

essere sottesi alla stessa cabina di distribuzione primaria. Facendo seguito a quanto previsto dalla Delibera ARERA 727/2022/R/eel, è stata pubblicata la mappa che individua le aree convenzionali afferenti alle cabine primarie sul territorio nazionale. Ciò ha permesso di designare l'area AC00100551 come parte del territorio comunale adibita ad ospitare la CER (Figura 2). Questa è stata scelta poiché, nonostante non sia interamente contenuta nel territorio comunale, comprende l'area del centro storico di Assisi, Bastia Umbra, Santa Maria degli Angeli e le limitrofe zone industriali.

Figura 2. Mappa area CER nel Comune di Assisi. [10]



Come anticipato, gli impianti di cui è prevista l'installazione saranno distribuiti in maniera diffusa al di fuori dei centri storici e comprenderanno tre edifici messi a disposizione dal Comune di Assisi, sui quali il Comune si impegna nella realizzazione di impianti fotovoltaici. Poiché non è possibile, ad oggi, stimare le utenze che in futuro entreranno a far parte della CER si sono ipotizzati dei gruppi o "cluster" sia di prosumer che di consumer. I cluster di Prosumer da A a E, sono dei gruppi di utenze aventi stessa potenza fotovoltaica installata e medesimi consumi annui, ipotizzando un profilo di consumo degli edifici ad uso uffici.

Nella configurazione ipotizzata, riportata in tabella, il 50% della potenza installata è quindi ascrivibile a 5 impianti da 199 kWp (Prosumer A). La potenza rimanente è distribuita tra utenze con impianti di taglia minore, per un totale di 65 prosumer (Prosumer da B ad E). Nella configurazione a regime si è

considerato un cluster di consumer composta da 200 abitazioni, caratterizzate dal profilo di consumo annuo di un'utenza domestica pari a 3.000 kWh ciascuna. A questi vanno ad aggiungersi 23 edifici pubblici del Comune di Assisi che, facendo riferimento a dati forniti dal Comune per l'anno 2021, globalmente consumano 1.021.939 kWh.

Tabella 1. Configurazione CER

	Ruolo	Numero utenze	Potenza impianti (kW)	Consumi annuali (kWh)
Locali ferrovia	Producer	1	65,4	-
Giovanni XIII	Prosumer	1	44,5	68.112
Via Toti	Prosumer	1	91,6	96.646
Prosumer A	Prosumer	5	199	1.000.000
Prosumer B	Prosumer	4	99	400.000
Prosumer C	Prosumer	3	50	150.000
Prosumer D	Prosumer	10	10	100.000
Prosumer E	Prosumer	40	4	120.000
POD comunali	Consumer	23	-	1.021.939
Utenze domestiche	Consumer	200	-	600.000
TOTALI		288	2.002	3.556.697

Gli impianti più grandi sorgeranno nella zona commerciale-industriale di Santa Maria degli Angeli in copertura di edifici non residenziali. Non sono attualmente considerati nella configurazione né sistemi di accumulo né torrette di ricarica per automobili che inciderebbero principalmente sui costi fissi. Pertanto, l'analisi energetica non considera i benefici che potrebbero derivare da sistemi di accumulo che andrebbero ad incrementare la quota di autoconsumo delle utenze e, se messi al servizio della comunità, ad aumentare la condivisione dell'energia.

4. Analisi tecnica ed economica

L'obiettivo prefissato di realizzare 2 MWp di potenza fotovoltaica installata implica la necessità di dover analizzare molteplici aspetti e valutarne l'impatto negli anni, sia da un punto di vista economico che tecnico attraverso adeguati strumenti di analisi. In quest'ottica è stata sviluppata una specifica metodologia di studio della configurazione energetica della CER che, muovendo dai risultati forniti dall'analisi tecnica, ha consentito di sviluppare una valutazione economica del progetto. In questa trattazione, poiché funzionale alla realizzazione di una CER escl"“fotovoltaica”, si andrà a valutare il solo contributo dato da impianti fotovoltaici. Lo stesso procedimento, andando ad aggiustare i parametri tecnici ed economici, potrà essere applicato anche ad altri impianti di produzione da fonti rinnovabili.

4.1. Analisi energetica e stima dei benefici ambientali

Impostata la configurazione della CER, sono state studiate le principali grandezze energetiche costituite dall'energia prodotta, prelevata, autoconsumata (c.d. autoconsumo fisico), immessa in rete e condivisa.

Per valutare il bilanciamento energetico della configurazione, sono stati definiti i seguenti parametri:

- indice di autoconsumo virtuale: rapporto tra l'energia condivisa tra gli utenti della comunità e la produzione fotovoltaica complessiva;
- indice di autoconsumo fisico: rapporto tra l'autoconsumo fisico e la produzione fotovoltaica;
- indice di autoconsumo totale: somma tra indice di autoconsumo fisico e indice di autoconsumo virtuale. Poiché entrambi i termini di questo indice presentano al denominatore l'energia prodotta dalla CER, questo indice fornisce indicazioni su quanto la configurazione riesce a sfruttare l'energia complessivamente prodotta;
- indice di autosufficienza energetica: somma dell'autoconsumo fisico e dell'energia condivisa divisi per i consumi energetici totali.

Questi parametri, calcolati per la configurazione proposta sulla base di profili di consumo rappresentativi delle tipologie di membro, sono riportati in tabella 2.

Tabella 2. Riepilogo parametri energetici della comunità

Parametri energetici	Valore
Energia elettrica consumata (MWh)	3.557
Produzione fotovoltaica (MWh)	2.392
Autoconsumo fisico (MWh)	1.219
Indice di Autoconsumo fisico (%)	50,96
Energia immessa in rete (MWh)	1.173
Energia Immessa in rete (% su produzione)	49,04
Energia prelevata (MWh)	2.338
Energia condivisa (MWh)	651
Energia condivisa (% su immessa in rete)	55,50
Indice di autoconsumo virtuale (%)	27,22
Indice di autoconsumo totale (%)	78,21
Indice di autosufficienza energetica (%)	52,57

I dati energetici finora discussi mostrano come la CER possa essere ulteriormente migliorata nel suo bilanciamento, andando ad agire sulle abitudini delle utenze al fine di massimizzare la condivisione.

Un ulteriore output che è stato ricavato è l'impatto ambientale della comunità, riportato in tabella 3, calcolato facendo riferimento ai seguenti fattori di conversione:

- $0,187 \cdot 10^{-3}$ TEP (tonnellate equivalenti di petrolio)/kWh[11];
- 0,255 kg di CO₂/kWh [12].

Tabella 3. Riepilogo parametri ambientali della comunità

Parametri ambientali	Valore
Tonnellate equivalenti di petrolio risparmiate (TEP)	447
CO ₂ annuale evitata (tonnellate)	609

La configurazione studiata è caratterizzata da una percentuale di energia condivisa, rispetto all'energia immessa, del 55,0%, per un totale di 651.244 kWh. Questo valore è fondamentale, in quanto ci fornisce indicazioni sulla bontà della configurazione scelta. Sebbene valori di energia condivisa superiori all'80% siano maggiormente auspicabili, la percentuale ottenuta indica comunque che la CER è sufficientemente bilanciata, sebbene vi siano possibili margini di miglioramento.

4.2 Analisi economica [13-18]

Dopo aver definito i parametri energetici di ogni utenza (o cluster), è stata effettuata un'analisi economica sviluppando un algoritmo su di un foglio di calcolo.

Per prima cosa sono state individuate le voci di ricavo per ogni tipologia di flusso energetico ipotizzando i seguenti valori:

- energia immessa in rete: ritiro dedicato (RID) corrisposto dal GSE per la vendita dell'energia immessa in rete, ipotizzato in maniera cautelativa pari al prezzo minimo garantito, seppure variabile nel corso della vita utile della CER, pari a 40,7 €/MWh
- autoconsumo fisico: corrispondente al risparmio derivante dal mancato acquisto di energia elettrica dalla rete pari a 300,0 €/kWh;
- energia condivisa nella CER:
 - incentivo annuale corrisposto dal GSE su energia condivisa: l'incentivo corrisposto dal GSE alla CER (C_{ACV}) ha una durata di 20 anni ed è direttamente proporzionale all'energia condivisa (E_{ACV}). In attesa del Decreto del Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica MASE che stabilisce, in attuazione del D.lgs. 199/21, i valori dell'incentivo, si è fatto riferimento al regime transitorio attualmente in vigore cui corrisponde un importo di 110,0 €/kWh;
 - corrispettivo legato ai rimborsi ARERA: rimborso della tariffa di trasmissione (TRASE) definita per le utenze in bassa tensione e del valore più elevato della componente variabile di distribuzione per le utenze altri usi in bassa tensione. Facendo riferimento ai valori fissati da ARERA per utenze in bassa tensione per il 2023, si considerano rispettivamente 8,48 €/MWh e 0,61 €/MWh, per un totale di 9,09 €/MWh.

Il valore complessivo di incentivo e corrispettivo considerato per la valorizzazione dell'energia condivisa è, quindi, pari a 119,09 €/MWh.

Per effettuare un'analisi economica accurata si è preliminarmente effettuato uno studio sulle voci di costo di una CER. Una comunità energetica rinnovabile presenta delle spese da sostenere, suddivise in costi iniziali una tantum CAPEX (realizzazione degli impianti, costituzione ente giuridico) e costi periodici OPEX (manutenzione ordinaria e straordinaria, piattaforma). Si riportano in tabella 4 le voci di costo e di ricavo della comunità articolate secondo la logica sopra esposta.

Tabella 4. Voci di costo e ricavo della CER.

Voci di costo e ricavo	Valore annuale
CAPEX (€)	2.973.180
OPEX (€/anno)	88.142
OPEX al 10° anno (€/10°anno)	384.927
RID (€/anno)	45.992
Autoconsumo fisico (€/anno)	380.995
Incentivo su energia condivisa (€/anno)	74.009

Un altro fattore di cui tener conto è il tempo in quanto, soprattutto per configurazioni che prevedono elevate potenze, sono necessari anni per portare la CER a regime. Considerando ciò, è stato ipotizzato il raggiungimento della potenza di 2 MW nel 2029.

Partendo dall'energia immessa in rete, autoconsumata dalle utenze e condivisa nella comunità, risulta immediato il calcolo dei ricavi della CER per ogni anno. Si è inoltre considerato un incremento annuale dell'1% del costo di acquisto dell'energia elettrica e una componente inflattiva del 3% che recepisce l'incremento dei prezzi di acquisto e installazione degli impianti.

Per valutare la convenienza economica dell'intervento, l'indicatore economico utilizzato è il Valore Attuale Netto (VAN). Il Valore Attuale Netto è la somma algebrica dei flussi di cassa originati da un progetto, rettificati attraverso un fattore di attualizzazione che, in un arco di temporale definito, tiene conto del costo opportunità del denaro, ovvero del rendimento a cui si rinuncia decidendo di investire in quel progetto piuttosto che in un'attività finanziaria con il medesimo rischio, e dell'inflazione.

Il tasso di sconto (i) utilizzato nell'analisi è pari al 3,21%, corrispondente al rendimento dei titoli di stato (BTP) aventi durata prossima all'orizzonte temporale dell'intervento complessivo, moltiplicato per il tasso di rischio specifico (β unlevered corrected for cash) del comparto Green & Renewable Energy rilevato con riferimento alle società quotate nei mercati del western europe (Damodaran, NYU, Gen 2022). Dall'andamento del flusso di cassa cumulato e del VAN sono individuati, rispettivamente, il Tempo di Ritorno Semplice (Simple Payback period) ed il Tempo di Ritorno Attualizzato (Discounted Payback period). L'importanza di questa informazione attiene alla disponibilità di risorse finanziarie del soggetto che effettua l'investimento, poiché se non si ha possibilità di finanziare il progetto prima che il flusso di cassa diventi positivo e quindi nel periodo antecedente al tempo di ritorno (Cut-off period), si è costretti a scartare l'investimento, sebbene nel lungo periodo questo risulti redditizio.

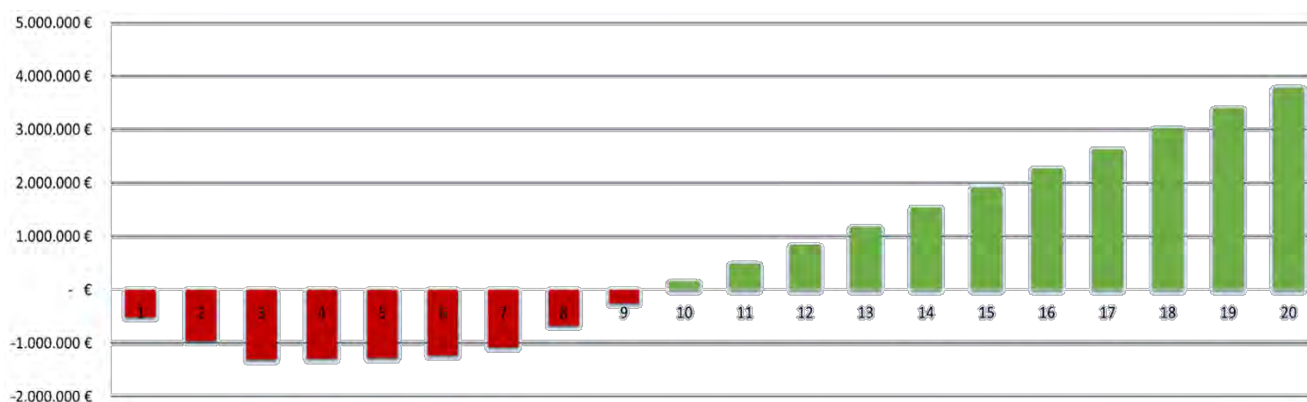
Un altro indice economico impiegato nello studio dell'intervento è il Tasso Interno di Rendimento (o TIR o IRR, acronimo di "internal rate of return"), definito come il tasso di attualizzazione per cui il VAN risulta pari a zero ed esprime il tasso di rendimento reale del progetto.

Si riportano in tabella 5 i risultati ottenuti dall'analisi economica con le ipotesi specificate. Per visualizzare l'andamento economico del progetto si riporta in figura 2 l'andamento del flusso di cassa cumulato per la durata del progetto.

Tabella 5. Riepilogo parametri economici della comunità

Indicatori economici	Valore
VAN (€)	2.575.707
Tempo di ritorno semplice (Anni)	10
Tempo di ritorno attualizzato (Anni)	11
Tasso interno di rendimento (%)	13,94

Figura 2. Andamento del flusso di cassa cumulato della configurazione



4.3 Analisi economica: confronto scenari

La metodologia di analisi economica finora descritta (ed applicata), in virtù della sua automazione, è molto versatile per valutare diversi scenari. Si è quindi deciso di studiare due configurazioni (Caso Intermedio, Caso Ottimo) con prestazioni energetiche migliori rispetto alla CER descritta (Caso 0). In entrambi gli scenari alternativi viene mantenuta fissa la potenza obiettivo di 2 MW della comunità, mentre variano il numero di consumer e gli indicatori energetici riportati in tabella. Rispetto al Caso 0, il Caso Intermedio ipotizza una maggiore percentuale di energia condivisa (75%), mentre nel Caso Ottimo si ipotizza una condivisione totale dell'energia prodotta dalla CER. Ciò fornisce informazioni sul massimo incentivo che la CER ottimizzata può ottenere. Inoltre, rimanendo costanti i membri, sia i costi fissi (CAPEX) che operativi (OPEX standard e al 10° anno) risultano invariati in tutti gli scenari. I casi descritti sono stati scelti per valutare la variazione delle prestazioni economiche del progetto nel caso in cui si abbia un utilizzo più razionale dell'energia, con il Caso Ottimo che ne costituisce il valore estremo.

L'aumento della percentuale di autoconsumo fisico determina una diminuzione dal ricavo per l'immissione in rete dell'energia elettrica. Questa perdita viene compensata dall'aumento del risparmio dato dall'autoconsumo fisico che impatta maggiormente sui flussi di cassa in virtù del maggiore valore al kWh che è associato a questo utilizzo energetico. Pertanto, in entrambi i casi alternativi, si avranno prestazioni economiche migliori della configurazione sulla base degli indicatori economici utilizzati, riportati in tabella 7.

Quindi, al crescere dell'indice di autoconsumo totale aumenta sensibilmente il valore delle entrate del progetto. Questo comporta una riduzione del tempo di rientro dell'investimento e, al termine della vita utile, si genera un VAN sensibilmente maggiore. Pertanto, con la sola ottimizzazione dei consumi dei membri della comunità, senza l'ausilio di sistemi di accumulo, è possibile aumentare in modo apprezzabile la redditività del progetto.

Tabella 6. Configurazioni alternative della comunità

	Caso 0	Caso Intermedio	Caso Ottimo
Consumer	223	223	223
Indice di Autoconsumo fisico (%)	50,72	63,00	70,00
Energia condivisa (% su immessa in rete)	55,00	75,00	100,00
Indice di autoconsumo totale (%)	77,82	90,80	100,00

Tabella 7. Parametri economici configurazioni alternative della comunità

	Caso 0	Caso Intermedio	Caso Ottimo
RID (€/anno)	45.992	35.934	29.255
Autoconsumo fisico (€/anno)	380.995	455.130	504.360
Incentivo su energia condivisa (€/anno)	74.009	78.852	85.595
Totale (€/anno)	500.996	569.916	619.210
VAN (€)	2.575.707	3.361.434	4.057.567
Tempo di ritorno semplice (Anni)	10	10	9
Tempo di ritorno attualizzato (Anni)	11	11	9
Tasso interno di rendimento (%)	13,94	16,07	18,58

5. La forma giuridica delle CER: una tipologia di investimento modellata sull'Ente pubblico [19-20]

L'Analisi giuridica contenuta nel progetto e condotta ai fini dell'inquadramento della prima CER nel territorio del Comune di Assisi è stata sviluppata tenendo presente il quadro legislativo, regolamentare, e interpretativo avendo di mira prioritariamente la partecipazione di un Ente pubblico alla Comunità quale propulsore, coordinatore ed attuatore dell'iniziativa, nonché *prosumer* all'interno del progetto.

Centrale è la scelta della veste giuridica da conferire alla Comunità di energia rinnovabile, considerato che i parametri da rispettare sono:

- la coerenza con le fonti della disciplina;
- la contrazione dei tempi procedurali;
- un modello gestorio che possa prevenire conflitti;
- la struttura aperta alla partecipazione di nuovi aderenti;
- l'adozione di un modello dotato di autonomia patrimoniale e responsabilità limitata nella gestione;
- la coerenza con i principi della partecipazione degli Enti all'interno delle Società.

L'ultimo parametro risiede nell'art. 3 co.1 del Testo Unico in materia di società a partecipazione pubblica (Decreto legislativo 19 agosto 2016 n. 175) il quale dispone che: *“Le amministrazioni pubbliche possono partecipare esclusivamente a società, anche consortili, costituite in forma di società per azioni o di società a responsabilità limitata, anche in forma cooperativa.”*

La particolare finalità della CER, configurata come tipica nell'oggetto e nello scopo nonché, proprio per questo, tutelata e agevolata porta a ritenere più idoneo per un ente pubblico lo schema della cooperativa in quanto appare coerente sia con la disciplina sopracitata, evitando anche rischi di responsabilità erariale, che con la finalità della CER, in quanto la cooperativa è un ente che esercita una attività economica ma non ha scopo di lucro bensì mutualistico, cioè svolge la propria attività prevalentemente in favore dei soci, consumatori o utenti di beni e servizi, e si avvale prevalentemente, degli apporti di beni o servizi da parte dei soci.

Nell'ambito delle cooperative possano essere identificate le cooperative di comunità, caratterizzate da un rapporto stretto con il territorio e dallo svolgimento di servizi di interessi generali, dove la mutualità copre lo scambio di utilità tra i cittadini in un determinato territorio, realizzando uno degli esempi più rappresentativi di sussidiarietà orizzontale. La nozione, in quanto diretta a creare un rapporto di scambio tra i cittadini e attori dello stesso territorio, calza perfettamente sul modello delle CER per come delineato e abbozzato dal legislatore comunitario e nazionale.

5.1 Lo stato dell'arte in Umbria sulle cooperative di comunità

La Regione Umbria ha emanato una apposita legge sulla disciplina delle cooperative di comunità (L.R. 11 aprile 2019 n.2) definendole come *“società cooperative, costituite ai sensi degli articoli 2511 e seguenti del codice civile ed iscritte all'Albo delle cooperative di cui all' articolo 2512 del codice civile e all'articolo 223-sexiesdecies delle disposizioni per l'attuazione del codice civile , le quali, anche al fine di contrastare fenomeni di spopolamento, declino economico, degrado sociale e urbanistico, perseguono l'interesse generale della comunità in cui operano, promuovendo la partecipazione dei cittadini alla gestione di beni o servizi collettivi, nonché alla valorizzazione, gestione o all'acquisto collettivo di beni o servizi di interesse generale....”*

La legge prevedeva agevolazioni generiche e rinviava alla Giunta l'emissione di provvedimenti attuativi. Con la DGR n. 449 11 maggio 2022, la Giunta poi pre-adotta un disegno di legge, privo però

di cogenza ed effettività, valido solo per comprendere un indirizzo di eventuali scelte politiche in materia e lascia immutato un quadro normativo, per la verità, scarso e incerto. Sul tema delle CER a questo è seguita la istituzione di due tavoli tecnici regionali e la DGR 1015 del 5.10.2022 che adotta uno schema di protocollo di intesa. Unico punto fermo è comunque ritenere che la cooperativa di comunità, in quanto impresa sociale, non può essere pretermessa nelle valutazioni di scelta sulle forme della CER restando la tipologia più coerente con essa. Si è pertanto ipotizzato nel progetto un modello di Statuto che vede inserite al suo interno clausole coerenti con lo scopo, limitando l'attività allo stretto perimetro della CER in coerenza con le previsioni normative attuali. Lo schema verrà poi modellato sulla base delle scelte concrete effettuate dall'Ente pubblico, a seconda delle adesioni, del contesto, delle risorse finanziarie, e di tutti gli altri parametri che costituiscono variabili sull'attuazione concreta del progetto citato, a cui si aggiungerà uno schema negoziatale di ripartizione di oneri e proventi.

6. Barriere alla creazione della CER

In un contesto ormai teso sia alla riqualificazione energetica degli edifici che alle iniziative di costituzione di CER, il progetto ha anche analizzato i fattori che divengono barriere, intese come ostacoli ovvero cause di rallentamento all'attuazione dei progetti. Esse nascono sia dalla complessità del tessuto normativo che dall'evoluzione dell'interpretazione, rendendo così incerta e di difficile fruizione la materia.

Nodale concentrare l'attenzione sulla parte pubblica quale protagonista per il superamento delle inerzie partendo da una corretta, diffusa ed esaustiva informazione fino ad arrivare alla predisposizione di strumenti regolamentari espressione di un riconosciuto potere in capo anche al Comune che possa agevolare la fase di transizione.

Le tipologie di barriere sono costituite dal patrimonio informativo, dal contesto normativo, dai vincoli di carattere urbanistico e paesaggistico, dalla normativa di sbarramento alle installazioni in termini di limiti e punti di equilibrio.

6.1 I cardini delle agevolazioni legislative alle installazioni di impianti FER: i principi della materia.

Uno degli ostacoli rispetto alla agevole fruizione della normativa sulla materia è rappresentato, paradossalmente, dal principio della *massima diffusività degli impianti* e della *neutralità urbanistica delle installazioni* giacché gli impianti FER sono collocabili su aree aventi qualunque destinazione (principio della neutralità urbanistica), costituendo elementi non valutabili in termini di coerenza con i piani urbanistici comunali e con le regole dello zoning. L'art. 12, comma 7, del D.Lgs 387/2003 stabilisce infatti che: "Gli impianti di produzione di energia elettrica, di cui all'articolo 2, comma 1, lettere b) e c), possono essere ubicati anche in zone classificate agricole dai vigenti piani urbanistici...". Non solo, anche di fronte ad un divieto espresso del PRG connesso alla destinazione dell'area, l'autorizzazione regionale avrebbe comunque effetto di variante urbanistica vanificando il divieto comunale. Ciò apre inevitabilmente ad un conflitto poiché contraddice la programmazione urbanistica del territorio in mancanza di un puntuale e lungimirante pianificazione.

Lo stesso art. 12 sopracitato qualifica gli impianti FER quali “opere di pubblica utilità, indifferibili ed urgenti” e ciò consente tutta una serie di prerogative che generano la ovvia prevalenza delle installazioni nelle valutazioni di bilanciamento e comparazione tra gli interessi differenziati presenti nel contesto decisionale di riferimento.

Discendono dal quadro delineato una serie semplificazioni procedurali di vario tipo:

- riforma della conferenza di servizi (Legge Madia e successive attuazioni);
- introduzioni di tempi certi e contratti;
- istituto del silenzio- assenso come forma tipica di espressione della volontà della PA;
- limitazione dei poteri interdettivi del Ministero della Cultura con obbligatorietà del parere solo quando si verte in aree vincolate; in caso di aree contermini a quelle oggetto di tutela quel parere non assume carattere vincolante;
- introduzione della Soprintendenza speciale per PNRR in caso di VIA di competenza statale;
- elevazione della potenza degli impianti a libera installazione o soggetti a procedura semplificata;
- installazione sui tetti degli edifici qualificata opera di manutenzione ordinaria;
- varianti semplificate;
- possibilità di installazione di pannelli fotovoltaici anche su tetti ubicati in centri e nuclei storici, fermo rimanendo il rispetto delle condizioni di legge.

Il quadro è stato poi ulteriormente ampliato anche per mezzo della modifica dell’art. 9 e dell’art. 41 della Costituzione che cerca di coniugare la tutela del paesaggio con lo sviluppo sostenibile.

6.2 Il conflitto tra Installazione di impianti FER e Paesaggio

Il tema permane nella sua attualità, ancora alla ricerca di una composizione tra divergenze profonde in dottrina e giurisprudenza.

L’articolo 9 della Costituzione apre (dopo la riforma del 2022 anche letteralmente) alla tutela dell’ambiente, della biodiversità, degli ecosistemi e degli animali; mentre l’art. 41 flette l’iniziativa economica privata al rispetto della salute e dell’ambiente al pari della sicurezza, della libertà e della dignità umana, statuendo inoltre che: “la legge determina i programmi e i controlli opportuni perché l’attività economica pubblica e privata possa essere indirizzata e coordinata a fini sociali e ambientali”.

La riforma pone all’interprete diversi dubbi sulla collocazione dei beni Ambiente e Paesaggio rispetto all’iniziativa economica privata e, nello specifico, rispetto alla collocazione di impianti FER sul territorio. Le installazioni costituiscono senza dubbio espressione della iniziativa economica privata colorata, tuttavia, da fini pubblicistici: la transizione energetica e lo sviluppo sostenibile. Gli impianti divengono così, paradossalmente, coniugazione perfetta tra iniziativa economica e tutela ambientale, lasciando scoperto però l’altro attore principale del conflitto e cioè il paesaggio che, da una lettura del solo art. 41, sembrerebbe pretermesso rispetto ad una tutela ambientale che negli impianti FER non trova scontro ma specchio. In realtà, la forza precettiva dell’art. 9, inserito nei principi fondamentali della nostra Costituzione, impone che anche il paesaggio permanga come Bene essenziale, imprescindibile

e primario, la cui tutela deve necessariamente essere inserita nell'opera di bilanciamento condotta all'interno dei procedimenti autorizzatori.

Il tema del conflitto permane quindi in tutta la sua rilevanza e, ad oggi, le soluzioni sono tutte di carattere precario, soggette a verifiche giudiziarie o amministrative.

Le soluzioni passano attraverso un diverso approccio al problema e alla predisposizione di strumenti che richiedono competenza e strategia adeguata. Il tutto affinché l'obiettivo di decarbonizzazione e di transizione energetica della Nazione non tradisca la tutela del Bene paesaggio inteso nella sua accezione culturale e costituzionale di valore primario ed elemento identitario della Nazione. In sintesi, la transizione ecologica e quindi la possibilità di installazione di impianti FER non deve diventare giustificazione della lesione paesaggistica quale sacrificio necessario dello sviluppo sostenibile, dovendo invece cercare, con tutti gli strumenti dell'ordinamento, nuove soluzioni. In questa direzione la pianificazione preventiva, l'uso dei regolamenti comunali e la qualità progettuale, divengono strumenti utili al fine.

6.3 Strategia per il superamento del conflitto: nuovi approcci e nuovi strumenti.

Le soluzioni indicate nel progetto sulla scorta dell'analisi giuridica passano attraverso le seguenti azioni:

- recuperare la strategia della pianificazione e lo strumento del piano per prevenire il conflitto;
- individuare le aree idonee o inidonee alla installazione degli impianti ad opera della regione e ad opera dei comuni che potranno elaborare un vero e proprio piano in applicazione della normativa sovraordinata e nel rispetto di tutti i principi elaborati dalla giurisprudenza in materia;
- incentivare la cultura del progetto che costituisce il perno su cui ruota la qualità delle previsioni ed è sintesi degli interessi che portano poi al risultato adeguato;
- i contesti decisionali o di valutazione delle istanze devono adeguare la visione che essi esprimono proprio al risultato di autorizzare o consentire progetti che, tramite cautele adeguate e parametri di idoneità, escludano lesioni paesaggistiche e territoriali;
- il conflitto con il MIC può essere superato utilizzando una forma preventiva di condivisione di criteri collocativi, con protocolli di intesa o anche come gentlemen agreement, avente ad oggetto: modelli progettuali, sistemi di mitigazione, collocazioni guidate, mascheramento degli impianti e delle infrastrutture, incentivazione dell'agrivoltaico (secondo le linee guida elaborate dal MITE, oggi MASE, in questa materia) realizzato in modo da azzerare o comunque ridurre l'impatto e l'erosione della produzione agricola. A tale proposito si richiama l'esperienza dell'area Via della Regione Lazio che recepisce nel complesso lavoro istruttorio delle conferenze di servizio gli schemi operativi di alcuni comuni;
- infine, il potere regolamentare dei comuni in questa materia (già contenuto nel D.Lgs 152/2006) completa il quadro della disciplina assicurando attraverso varie cautele e strumenti di tipo esecutivo che vanno dalle misure compensative alla opportunità di predisporre un sistema di convenzionamento attuativo con le società proponenti, l'idoneità delle installazioni sul proprio territorio.

7. Conclusioni e sviluppi futuri

Le comunità energetiche rappresentano una delle opportunità attraverso le quali sarà possibile raggiungere gli obiettivi che l'UE si è prefissata di per il 2050. Queste iniziative sono importanti per sfruttare il potenziale del territorio per la diffusione degli impianti da fonte rinnovabile e per rafforzare il ruolo dei cittadini e delle comunità locali come parte attiva del sistema energetico.

In questo lavoro è stato studiato l'impatto di una comunità energetica nel contesto del Comune di Assisi, finalizzata al raggiungimento degli obiettivi fissati dal PAESC al 2030, andando ad individuare i principali ostacoli, e definendo le strategie per poterli superare. Con una produzione di 2,2 GWh si ha un risparmio di 411 tonnellate equivalenti di petrolio (TEP), riducendo le emissioni di gas climalteranti nel territorio.

Le principali barriere sono state rilevate nella scarsa informazione, alla quale si può ovviare con campagne informative diffuse promosse dal Comune; nella difficoltà di interpretazione normativa, che richiede la predisposizione di nuovi strumenti e l'adozione di un nuovo regolamento comunale; e nei vincoli di carattere urbanistico e paesaggistico gravanti su tutto il Comune di Assisi che richiedono scelte progettuali non lesive e zone da preservare. In merito a quest'ultima criticità, il potenziale conflitto con la Soprintendenza potrebbe essere superato con un protocollo di intesa ed una corretta pianificazione preventiva condivisa con l'ente preposto alla tutela dei beni vincolati. Per rendere possibile la nascita della prima CER di Assisi è imperativo andare a rivedere l'iter procedurale per l'installazione degli impianti fotovoltaici. Una semplificazione delle procedure sarebbe infatti un grande incentivo alla diffusione sul territorio di iniziative virtuose di questo tipo.

Al netto di ciò, il principale contributo che si è dato con questo lavoro è stato lo sviluppo di una metodologia di analisi per lo studio delle comunità energetiche. Basandosi sui dati così ottenuti è stato possibile valutare quali utenze andare a coinvolgere per massimizzare la condivisione dell'energia nella prima CER di Assisi. I consumi elevati rendono auspicabile aumentare la potenza fotovoltaica della configurazione e, viceversa, l'eccesso di produzione di energia elettrica rende opportuno il coinvolgimento di utenze con consumi elevati.

Poiché una delle finalità dell'intervento è il contrasto alla povertà energetica, è opportuno garantire che la redistribuzione dell'incentivo vada a coprire le spese; In quanto, visti gli ambiziosi obiettivi del progetto, è importante garantirne la sostenibilità economica. Secondo le ipotesi adottate, con un VAN di 2.575.707 €, assieme ad un tempo di ritorno semplice di 10 anni, l'intervento che è stato studiato è redditizio. Questo è un fattore che non può che aiutare a coinvolgere utenze, sia imprese che privati, soprattutto se si pensa che nella valutazione dei costi non si sono considerati i contributi di bonus o incentivi. Inoltre, essendo la CER una configurazione aperta, possono entrare a farvi parte anche utenze che hanno realizzato il proprio impianto fotovoltaico avendone già ammortizzati i costi di installazione.

Dallo studio di due configurazioni CER alternative alla prima, caratterizzate da un crescente indice di autosufficienza energetica, si evince come, per una stessa potenza installata, si possono ottenere sia minori tempi di ritorno dell'investimento che maggiori VAN finali ottimizzando gli indici di autoconsumo della CER.

Per quanto riguarda le considerazioni sull'incentivo, si è in attesa del nuovo Decreto che è stato

presentato in bozza alla Commissione europea: il nuovo sistema proposto, oltre a dipendere dalla taglia dell'impianto e dalla zona di installazione, diventa strettamente dipendente dal prezzo zonale orario dell'energia elettrica. Tale approccio rende maggiormente complicata la fase di pianificazione della CER e la relativa stesura del business plan, poiché diventano di difficile stima i ricavi derivanti dall'incentivo, soprattutto quando tra i membri si trovano pubbliche amministrazioni.

Sotto il profilo legale, considerando che il Comune di Assisi, oltre ad assumere il ruolo di soggetto aggregatore, sarà membro della CER nel ruolo di prosumer, si è individuata la forma giuridica più appropriata, ovvero quella che mitiga maggiormente il rischio. La forma giuridica che è stata individuata per la CER è la cooperativa. Il Comune, essendo il principale promotore del progetto, si sta impegnando nel coinvolgimento di cittadini e stakeholders. Mediante la creazione dello Sportello Energia virtuale e la diffusione di un questionario di indagine, l'Amministrazione comunale ha mosso i primi passi verso il coinvolgimento delle utenze, affinché la Comunità Energetica si avvii verso la sua costituzione [21]. Con questo progetto, oltre a portare benefici economici ed ambientali nel territorio, si potrà coinvolgere attivamente la popolazione per sviluppare modelli cooperativi virtuosi basati sull'inclusione sociale ed economica.

Ringraziamenti

Parte del lavoro è stato finanziato nell'ambito del bando europeo Horizon 2020 European City Facility (EUCF) con il progetto "Towards a climate-neutral Assisi: the role of citizen and tourist in the city of Francesco in the postcovid new normal".

Bibliografia

1. PAESC (Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima) Città di Assisi, Ottobre 2020
2. Stamponi, E.; Cardinali, M.; Fondacci, L.; Moretti, E.; Cotana, F.; Proietti, S.; Broccolo, B. M.; Fortini, P. The role of the citizen in sustainability: the Sustainable Energy and Climate Action Plan for the Municipality of Assisi. In: Atti del XXI Congresso Nazionale CIRIAF 2021, Perugia: Morlacchi Editore University Press, 2021.
3. Brunelli, L.; Moretti, E.; Pioppi, B.; Pisello, A.L.; Bini, S.; Zepparelli, L.; Cotana, F. Le comunità energetiche rinnovabili come modello innovativo di gestione dell'energia: aspetti normativi, benefici e analisi tecnico-economica per un caso di studio. In: Atti del XXII Congresso Nazionale CIRIAF 2022. Morlacchi Editore University Press.
4. Regione Piemonte, Guida alle comunità energetiche rinnovabili a impatto sociale, 2022. Disponibile online: <https://www.compagniadisanpaolo.it/wp-content/uploads/Guida-CER-Impatto-Sociale-versione-2-18.07.2022.pdf>
5. De Vidovich, L.; Tricarico, L.; Zulianello, M. Community energy map: una ricognizione delle prime esperienze di comunità energetiche rinnovabili. Franco Angeli, 2021.
6. Legge n.8 del 28 febbraio 2020, Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 30 dicembre 2019, n. 162, recante disposizioni urgenti in materia di proroga di termini legislativi, di organizzazione delle pubbliche amministrazioni, nonché di innovazione tecnologica.

7. Decreto Legislativo 8 novembre 2021, n. 199. Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.
8. Van Summeren, L. F.M.; Wieczorek, A. J.; Bombaerts, G. J.T.; Verbong, G. P.J. Community energy meets smart grids: Reviewing goals, structure, and roles in Virtual Power Plants in Ireland, Belgium and the Netherlands. *Energy Research & Social Science* 2020, 63.
9. Bauwens, T.; Schraven, D.; Drewing, E.; Radtke, J.; Holstenkamp, L.; Gotchev, B.; Yildiz, Ö. Conceptualizing community in energy systems: A systematic review of 183 definitions. *Renewable and Sustainable Energy Review* 2022, 156.
10. E-Distribuzione, Mappa aree sottese alla stessa cabina primaria, disponibile online: <https://www.e-distribuzione.it/a-chi-ci-rivolgiamo/casa-e-piccole-imprese/comunita-energetiche.html>
11. ARERA, Delibera EEN 3/08 Aggiornamento del fattore di conversione dei kWh in tonnellate equivalenti di petrolio connesso al meccanismo dei titoli di efficienza energetica.
12. ISPRA, RAPPORTI 363/2022 Indicatori di efficienza e decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e del settore elettrico, 2022.
13. Ministero dello Sviluppo Economico, Decreto Ministeriale Individuazione della tariffa incentivante per la remunerazione degli impianti a fonti rinnovabili inseriti nelle configurazioni sperimentali di autoconsumo collettivo e comunità energetiche rinnovabili. *Gazzetta Ufficiale* n.285 16 Settembre 2020.
14. GSE, Regole Tecniche per accesso al servizio di valorizzazione e incentivazione energia elettrica condivisa, 2022.
15. ARERA, Deliberazione 4 agosto 2020 318/2020/R/EEL, Regolazione delle partite economiche relative all'energia elettrica condivisa da un gruppo di autoconsumatori di energia rinnovabile che agiscono collettivamente in edifici e condomini oppure condivisa in una comunità di energia rinnovabile l'autorità di regolazione per energia reti e ambiente, 2020.
16. ARERA, Delibera 27 dicembre 2022 727/2022/R/eel, Testo integrato delle disposizioni dell'autorità di regolazione per energia reti e ambiente per la regolazione dell'autoconsumo diffuso.
17. MASE, Consultazione pubblica: Attuazione della disciplina per la regolamentazione degli incentivi per la condivisione dell'energia di cui all'articolo 8 del decreto legislativo 8 novembre 2021, n.199.
18. Eugeni, M. La Comunità Energetica Rinnovabile come superamento delle barriere alla crescita di produzione di energia da fonti rinnovabili: sviluppo di una metodologia di calcolo per analisi tecnico-economica per la prima CER nel Comune di Assisi. Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Perugia, a.a. 2021-2022.
19. Decreto Legislativo 19 agosto 2016, n. 175. Testo unico in materia di società a partecipazione pubblica.
20. Corte dei Conti, Sezione Regionale della Lombardia, Deliberazione n. 174/2020 VSG.
21. <https://www.comune.assisi.pg.it/le-comunita-energetiche-rinnovabili/>

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Definizione di modelli di Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) incentrate sulla riqualificazione dell'edilizia scolastica da implementare nel territorio italiano: primi scenari del progetto eduCER

Luca Brunelli^{1,*}, Elisa Belloni^{1,2}, Maria Luisa Cotana³, Ilaria Pigliautile^{1,2}, Anna Laura Pisello^{1,2} e Fabio Santini³

¹ CIRIAF – Centro interuniversitario di Ricerca sull’Inquinamento e sull’Ambiente Mauro Felli, Via G. Duranti, 67 - 06125 Perugia

² Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria, Via G. Duranti, 93 - 06125 - Perugia

³ Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Economia, Via A. Pascoli, 20 - 06123 Perugia

* Autore di riferimento. E-Mail: luca.brunelli1@studenti.unipg.it

Abstract: Il progetto eduCER ambisce a promuovere la diffusione di Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) in tutta Italia per incentivare la produzione di energia da risorse locali rinnovabili diffondendo la cultura della sostenibilità. Questo obiettivo sarà supportato dallo sviluppo di un modello di business che massimizzi la condivisione dell’energia sulla base dei profili di consumo dei membri della costituenda CER, delle disponibilità di produzione di energia da risorse locali rinnovabili e delle potenzialità di investimento. EduCER pone al centro la scuola come luogo di produzione di energia e formazione dei futuri cittadini sulle tematiche di sostenibilità, circolarità, condivisione e risparmio che sono alla base dei principi della CER. Qui è presentato il primo step del progetto prendendo a riferimento l’istituto comprensivo Carducci-Purgotti di Perugia frequentato da circa 300 studenti per un consumo di energia medio annuo di 54 MWh. Il progetto di CER prevede l’installazione di un impianto fotovoltaico da 200 kW in copertura e di una colonnina di ricarica intelligente posta a servizio di un minibus e di un’automobile elettrica per massimizzare l’energia condivisa. Partendo dall’analisi dei consumi reali del plesso, i benefici economici ed energetici per scuola sono stimati tramite un’analisi tecnico-economica. Lo stesso modello è quindi riproposto a differenti latitudini (Nord e Sud Italia), tenendo conto delle differenti producibilità dell’impianto e della variabilità dell’incentivo ottenibile. Il progetto Carducci-Purgotti è stato generalizzato e rielaborato attraverso un business model canvas per

definire una roadmap nazionale. Lo scopo è creare un modello virtuoso, inclusivo e sostenibile da replicare in tutto il territorio italiano. Il modello è infine stato generalizzato e rappresentato attraverso il business

Keywords: Comunità energetiche rinnovabili; energie rinnovabili; scuola; edilizia scolastica;

1. Introduzione

I cambiamenti climatici rappresentano una minaccia sempre più concreta, tanto da non poter più essere ignorati. Risulta innegabile che la velocità con cui si sta realizzando questo processo sia dovuta alle emissioni di gas serra prodotte dalle attività umane e come le conseguenze di questo cambiamento deteriorino la qualità della vita dell'uomo esponendolo ad eventi meteorologici estremi.

Alla crisi ambientale si unisce quella energetica, venutasi a creare in seguito alla ripresa economica dalla Pandemia da Covid-19, ed aumentata esponenzialmente con lo scoppio del conflitto russo-ucraino nel 2022. In un contesto che appare decisamente critico, risulta sempre più evidente la necessità di una transizione energetica dai combustibili fossili alle fonti rinnovabili, fondamentali non solo per la riduzione delle emissioni e la mitigazione dei cambiamenti climatici, ma anche nell'ottica dell'autosufficienza e della sicurezza energetica.

L'Europa da diversi anni ha cominciato a muoversi in questa direzione, con l'obiettivo di assumere un ruolo trainante ponendosi obiettivi di decarbonizzazione importanti così da proporsi come leader nello sviluppo di tecnologie e modelli di consumo sostenibili accompagnando, allo stesso tempo, i propri paesi membri verso una "transizione green" giusta ed inclusiva. Tra le misure adottate vi è l'implementazione e la diffusione di schemi di autoconsumo come le Comunità Energetica Rinnovabili (CER), ovvero associazioni di consumatori e/o produttori di energia elettrica (privati cittadini, attività commerciali, pubbliche amministrazioni locali o Piccole e Medie Imprese, PMI) che decidono di unire le proprie forze per dotarsi di uno o più impianti condivisi per la produzione e l'autoconsumo di energia da fonti rinnovabili. L'obiettivo principale di una CER è portare benefici sociali, ambientali ed economici ai propri membri. Grazie, infatti, alla valorizzazione delle risorse energetiche locali rinnovabili si riduce l'impatto della comunità sull'ambiente, mitigando l'impatto dell'uomo sul cambiamento climatico. La condivisione dell'energia permette inoltre di supportare situazioni di povertà energetica grazie alla redistribuzione, interna alla comunità, degli incentivi destinati alla CER. Affinché, però, una CER raggiunga i propri obiettivi questa deve essere accuratamente progettata, per un ottimale bilancio tra domanda e produzione, e i propri membri devono essere consapevoli del valore della condivisione e del risparmio delle risorse che lo stesso modello CER propone.

Introdotta in Italia nel 2020, con il recepimento della Direttiva RED II [1] attraverso il Decreto "Milleproroghe" [2], e definitivamente recepita attraverso il Decreto Legislativo 199/2021 [3], si è visto come in questi primi anni in Italia le CER abbiano subito diverse carenze progettuali:

- la mancanza di figure specializzate alla progettazione della CER e alla massimizzazione dell'energia condivisa;

- un'adeguata comunicazione dei benefici ambientali e sociali verso i cittadini;
- un modello di business che possa rendere attrattiva la partecipazione anche di attività commerciali o PMI che sono i principali consumatori di energia elettrica.

A queste carenze tenta di ovviare il progetto eduCER, supportando la diffusione di un modello di comunità sostenibile e resiliente. Questo lo fa grazie al lavoro sinergico di un gruppo multidisciplinare in grado di analizzare ed intervenire, con chiarezza, rispetto a questioni tecniche, economiche e sociali.

Partendo dal modello europeo, calato rispetto alle specificità nazionali, questo è messo a punto grazie ai primi casi applicativi individuati all'interno del progetto. Sarà data importanza all'interdisciplinarietà del processo di progettazione e costituzione di CER considerando gli aspetti tecnologici, economici, legali e sociali indispensabili. In particolar modo si tiene conto delle aree legate alla presenza di edilizia scolastica e/o sociale volendo poi coinvolgere direttamente la cittadinanza e la comunità studentesca nelle attività di divulgazione.

Il progetto consiste nella realizzazione di una configurazione di autoconsumo, Comunità Energetica Rinnovabile (CER) o Gruppo di autoconsumatori di energia rinnovabile che agiscono collettivamente (Autoconsumo Collettivo AC), presso un plesso scolastico.

L'obiettivo è rendere la scuola fulcro di una possibile comunità energetica rinnovabile e, da questo esempio, ricavare un modello di gestione dell'energia virtuoso ed efficiente da applicare ad altri istituti. In questo modo il consumo di energia condivisa viene veicolato a fini sociali, attribuendo alla configurazione non solo un ruolo energetico, ma anche paideutico-educativo, come modello di sviluppo inclusivo e sostenibile.

Di seguito vengono riportate le definizioni delle due configurazioni [4]:

- Autoconsumo Collettivo: è un insieme di almeno due autoconsumatori di energia rinnovabile che agiscono collettivamente e che si trovano nello stesso condominio o edificio. Per autoconsumatore di energia rinnovabile si intende un cliente finale che, operando in propri siti ubicati entro confini definiti, produce energia elettrica rinnovabile per il proprio consumo e può immagazzinare o vendere energia elettrica rinnovabile autoprodotta purché, per un autoconsumatore di energia rinnovabile diverso dai nuclei familiari, tali attività non costituiscano l'attività commerciale o professionale principale.
- Comunità Energetica Rinnovabile: soggetto giuridico, il cui obiettivo principale è fornire benefici ambientali, economici o sociali a livello di comunità ai suoi azionisti o membri o alle aree locali in cui opera, piuttosto che profitti finanziari, basato sulla partecipazione aperta e volontaria, che ha il compito di produrre, consumare, immagazzinare e vendere l'energia rinnovabile.

2. Caso di studio e ipotesi di progetto

2.1. Descrizione del complesso scolastico e analisi dei consumi

Il progetto ha come oggetto di studio l'istituto comprensivo Carducci-Purgotti di Perugia [5], edificio di recente costruzione di proprietà comunale, dotato di contatore elettrico trifase (Figura 1).

Si suppone la presenza di una superficie disponibile per l'installazione di un impianto fotovoltaico, in assenza di ombre portate e alberature ombreggianti, di 1000 m².

Considerando un numero di studenti posto pari a 300, ad ogni studente è stato associato un consumo di energia elettrica pari 180 kWh/anno, facendo riferimento ad uno studio condotto da Linea Energia Spa in collaborazione con Nuova Energia e RSE Spa-Ricerca sul Sistema Energetico [6].

Figura 1. Istituto comprensivo Carducci-Purgotti



2.2. Analisi degli scenari

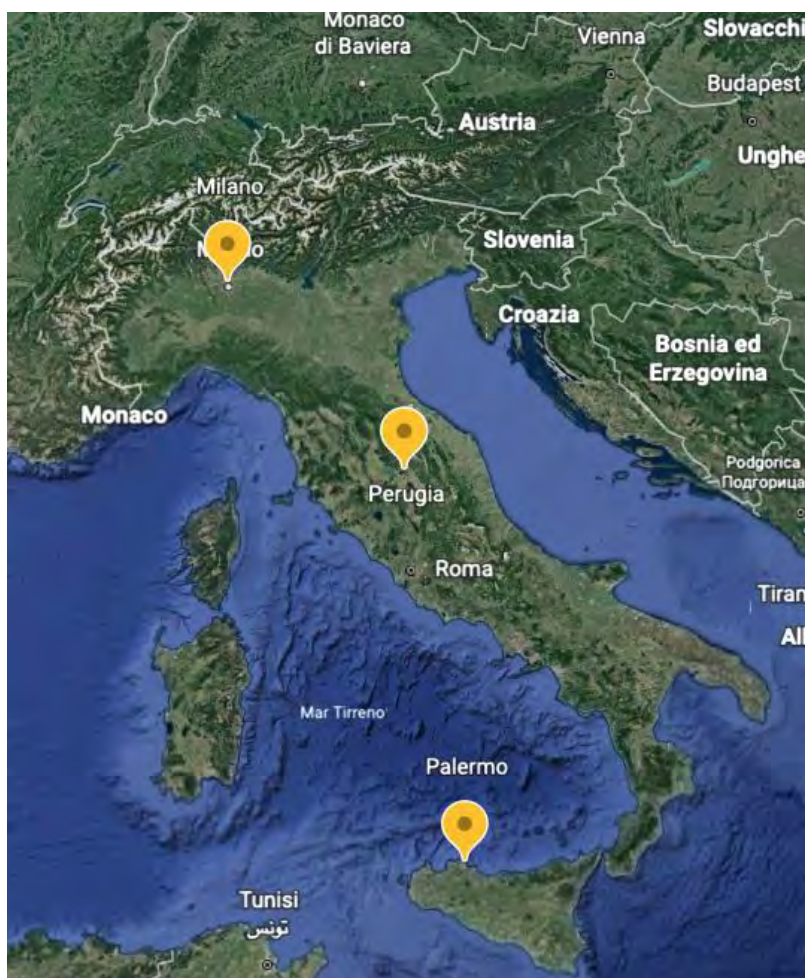
L'obiettivo del progetto è la costituzione di una Comunità Energetica Rinnovabile o un Gruppo di auto-consumatori di Energia Rinnovabile. Gli utenti sono il proprietario dell'immobile e titolare del POD (Point of Delivery= Punto di connessione alla rete elettrica) della scuola, ossia il comune o la provincia, e la scuola stessa, con legale rappresentante il dirigente scolastico, titolare di un POD di una colonnina di ricarica per veicoli elettrici, posta in prossimità del plesso.

Saranno pertanto illustrate le due possibili configurazioni di autoconsumo sotto l'aspetto economico ed energetico, valutando il tempo di ritorno che l'investimento comporta.

Inoltre, eduCER intende creare un modello di gestione e sviluppo virtuoso che possa fungere da esempio per numerosi altri esempi di edifici scolastici.

Pertanto, lo studio è stato allargato anche ad altri due ipotetici plessi scolastici, rispettivamente collocati al Nord e Sud Italia, nelle città di Milano e Palermo (Figura 2), così da avere una casistica rappresentativa dell'intero territorio nazionale.

Figura 2. Collocazione dei tre casi di studio



2.3. Impianto fotovoltaico e soluzioni per massimizzare l'energia condivisa

La configurazione di autoconsumo produce energia rinnovabile attraverso un impianto fotovoltaico di potenza pari a 200 kWp, di proprietà dell'amministrazione comunale. Pertanto, il comune o la regione assumono il ruolo di prosumer, mentre la scuola attraverso l'utenza della colonnina di ricarica quello di consumer.

L'impianto varia la sua producibilità a seconda del sito in cui è collocato e attraverso il Software open source PVGIS [7] è stato possibile stimarla. Di seguito, vengono riportati i dati sulla produzione annuale di energia elettrica del fotovoltaico, rispettivamente pari a:

- Nord (Milano): 266 MWh
- Centro (Perugia): 283 MWh
- Sud (Palermo): 304 MWh

Si può osservare come la produzione di energia aumenti notevolmente da nord a sud, complice l'aumento dei valori di irradiazione solare.

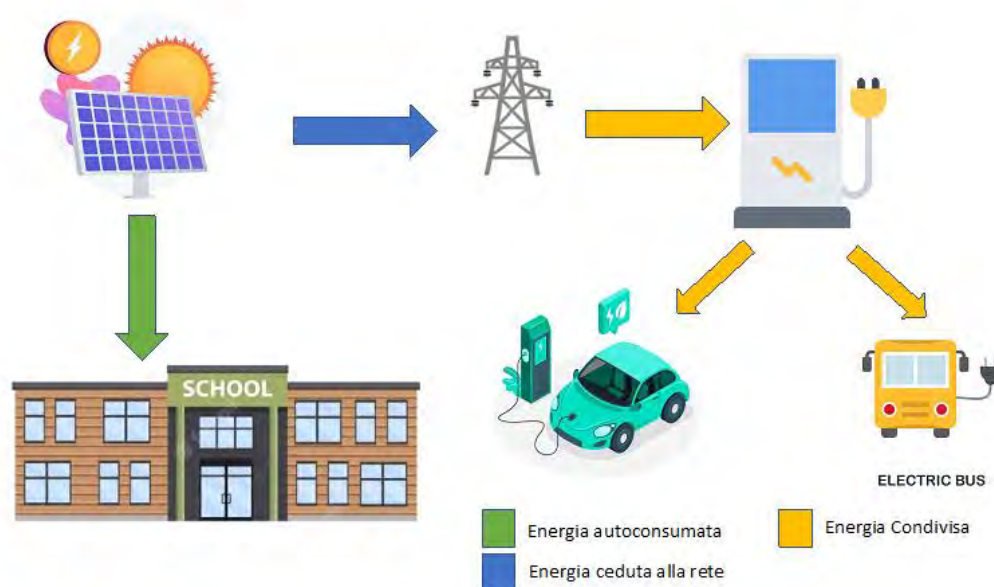
Viene scelta un'infrastruttura di ricarica smart, in grado di modulare i flussi energetici a seconda delle necessità, con una potenza pari a 200 kW.

Il plesso scolastico autoconsuma l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico e immette la restante in rete. Al fine di massimizzare la percentuale di energia condivisa tra gli utenti della configurazione, pari al minimo orario tra l'energia prelevata e quella immessa in rete dalla configurazione di autoconsumo, l'istituto scolastico viene dotato di un'automobile e di un minibus scolastico, entrambi a motore elettrico, da poter ricaricare sfruttando la potente infrastruttura di ricarica.

Inoltre, si suppone che il minibus venga dotato di fari ad alta luminosità, in grado di svolgere così un servizio di illuminazione pubblica nello spazio adiacente alla scuola nelle ore notturne.

Si assume, date queste premesse, che l'energia condivisa sia pari al 100% dell'energia immessa in rete dalla configurazione.

Figura 3. Configurazione di autoconsumo



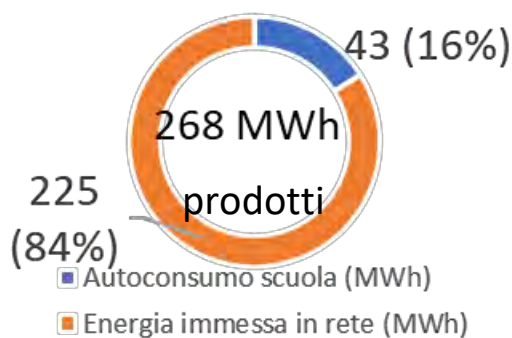
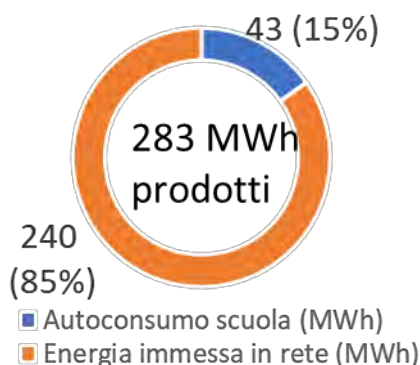
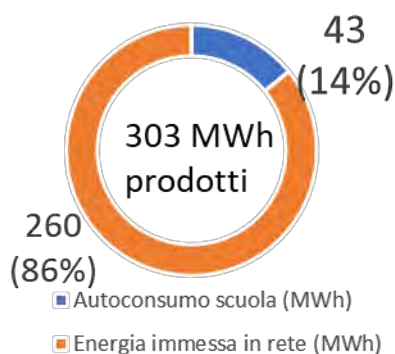
3. Analisi tecnico-economica dei diversi scenari

3.1. Analisi energetica

Il plesso scolastico autoconsuma l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico e la restante non autoconsumata viene immessa in rete. Si stima una percentuale di energia autoconsumata pari all'80% dei consumi della scuola.

Avendo considerato un numero di alunni pari a 300, ciascuno con un consumo anno di 180 kWh, la scuola avrà dunque un consumo annuo di 54 MWh, di cui 43 MWh saranno autoconsumati in situ. Tale dato rimane costante, al variare della configurazione di autoconsumo e della località. Ciò che varia è la produzione dell'impianto fotovoltaico e di conseguenza, a parità di energia autoconsumata, l'energia immessa in rete.

Di seguito vengono riportati tali dati al variare della collocazione geografica dell'impianto (Figura 4-5-6):

Figura 4. Flussi energetici Nord (Milano)**Figura 5. Flussi energetici Centro (Perugia)****Figura 6. Flussi energetici Sud (Palermo)**

Si può dunque notare come aumenti progressivamente da Nord a Sud l'energia immessa in rete, passando da 225 MWh/anno a 260 MWh/anno ceduti.

3.2. Analisi economica

La creazione di una configurazione di autoconsumo richiede diverse spese.

Il costo dell'impianto fotovoltaico è stato supposto pari a 1300 €/kW + IVA (10%), con costi di manutenzione annuale dell'1% sull'investimento iniziale, basandosi sui preventivi di un'azienda locale (Olivi Spa) [8]. Il prezzo del minibus elettrico è stato posto pari a 200.000 € Iva inclusa, quello dell'auto elettrica di 60.000 € Iva inclusa. Sono stati inoltre stimati dei costi annuali di assicurazione dei veicoli elettrici, rispettivamente pari a 2000 € e 1500 €.

La configurazione di autoconsumo è dotata inoltre di “Smart Meters”, contatori intelligenti per il monitoraggio dei flussi di energia autoconsumata e condivisa, e di un software di gestione.

Per quanto riguarda gli smart meters (SMs), in base al preventivo di Algowatt [9], azienda specializzata nel settore, sono stati individuati i seguenti costi (+ Iva 22%):

- 194€: SM per utenza monofase;
- 245€: SM per utenza trifase;
- 225€: RTU: Industrial Cellular Router 4G (n.RTU=n. SM-1);
- 15 €/anno: servizi cloud per ogni SM.

Inoltre, secondo il preventivo dell’azienda AlgoWatt Spa, si stimano:

- 500 € + Iva (22%): acquisto licenza della piattaforma
- 500 €/anno + Iva (22%): manutenzione della piattaforma.

Infine, sono presenti costi relativi al GSE, al conto corrente della configurazione e, nel caso di CER, allo statuto di una creata associazione. Tali voci di spesa sono state stimate facendo riferimento al caso di una CER presente in Umbria, a Marsciano in provincia di Perugia.

La registrazione dello statuto della CER prevede un costo di 2000 €, in cui sono comprese anche le spese legali di costituzione. Sono inoltre previste delle spese amministrative del GSE, che si dividono in fisse, pari a 30€ all’anno, e variabili in base al numero di POD all’interno della comunità, 4€ ciascuno. Infine, dal momento che l’associazione CER necessita di un conto corrente bancario, sono presenti delle spese dovute ad esso. Per il primo anno dalla fondazione dell’associazione si ha un costo all’apertura del conto, pari a 400€, mentre a partire dal secondo anno si stima una quota annuale di 292 €.

Nella seguente tabella (Tabella 1) vengono riassunte le citate voci di spesa. Si precisa che queste sono sostenute interamente dal comune.

Tabella 1. Spese configurazione di autoconsumo

Spese	Impianto Fotovoltaico	Smart Meters + Piattaforma	Conto Corrente	Statuto (solo nel caso di CER)	GSE	Bus elettrico	Auto elettrica	Colonnina 200 kW5	Totali
Iniziali (€)	286000	2056	400	2000	42	200000	60000	34000	584498
Annuali (€/anno)	2600	665	292	non presenti	42	2000	1500	-	7099

Per quanto riguarda i ricavi dovuti alla Comunità Energetica Rinnovabile o ad un Gruppo di autoconsumatori di Energia Rinnovabile, questi sono rappresentati da tre contributi:

- Risparmio da autoconsumo fisico;
- Vendita dell’energia elettrica alla rete;
- Incentivo MiSE sull’energia condivisa.

Il plesso scolastico autoconsuma l’energia prodotta dall’impianto fotovoltaico, non prelevando dunque tale quotaparte dalla rete. Nello stimare il risparmio è stato fatto ricorso ai dati relativi all’energia prelevata dalla rete dal plesso scolastico Carducci-Purgotti di Perugia e alle bollette

dell'energia elettrica di quest'ultimo, stimando un prezzo di acquisto dell'energia elettrica pari a 460 €/MWh

L'energia non autoconsumata dalla scuola viene ceduta alla rete elettrica con la pratica del Ritiro Dedicato (RID) [10], attraverso la quale il GSE (Gestore dei Servizi Energetici) corrisponde una somma pari al Prezzo Unico Nazionale (PUN) [11], corrisposto sulla base del profilo orario di immissione del singolo impianto di produzione. Con riferimento al giorno 24/02/2023, si assume il PUN pari a 164 €/MWh.

L'incentivo del MiSE sull'energia condivisa è pari a [3]:

- 110 €/MWh per le Comunità Energetiche Rinnovabili;
- 100 €/MWh per i Gruppi di Autoconsumatori di Energia Condivisa.

Secondo il Decreto attuativo del Dlgs 199/2021 del Ministero dell'Ambiente in fase di pubblicazione, è inoltre previsto un fattore di correzione territoriale per tale incentivo [12]:

- +4 €/MWh per le regioni Lazio, Marche, Toscana, Umbria, Abruzzo;
- +10 €/MWh per le regioni Emilia-Romagna, Friuli-Venezia Giulia, Liguria, Lombardia, Piemonte, Trentino-Alto Adige, Valle d'Aosta, Veneto.

Infine, a tale incentivo si aggiunge un rimborso da parte di ARERA sull'energia condivisa, pari a 8 €/MWh.

Sulla base di accordi presi in fase di costituzione della configurazione, il risparmio da autoconsumo fisico e il corrispettivo dovuto alla vendita al GSE tramite RID vengono percepiti dal comune in quanto proprietario dell'impianto (prosumer) e titolare del POD della scuola. Alla scuola (consumer) spetterà invece il premio derivante dall'incentivo sull'energia condivisa.

In seguito a queste premesse e in virtù della stima dei flussi energetici, vengono stimati i guadagni della pubblica amministrazione e della scuola nelle due possibili configurazioni di autoconsumo (Tabella 2):

Tabella 2. Ricavi configurazioni di autoconsumo

	CER			AC		
	Nord	Centro	Sud	Nord	Centro	Sud
Producibilità annua Impianto (MWh)	268	283	303	268	283	303
Consumo annuo per ogni studente (kWh)	180					
Numero di studenti	300					
Consumo annuo scuola (MWh)	54					
Energia autoconsumata (MWh)	43					
Energia immessa in rete (MWh)	225	240	261	225	240	261
Risparmio da autoconsumo Fisico (€) COMUNE	19872					
Premio da Ritiro Dedicato (€) (COMUNE)	36870	39327	42656	36870	39327	42656
Energia condivisa (MWh)	225	240	260	225	240	260
Premio Energia condivisa MiSe+ ARERA (€) (SCUOLA)	28777	29256	30692	26529	26877	28091
TOTALE COMUNE (€)	56742	59199	62528	56742	59199	62528
TOTALE SCUOLA (€)	28777	29256	30692	26529	26877	28091

Tenendo conto, inoltre, della durata ventennale dell'incentivo sull'energia autoconsumata e supponendo di ammortizzare per lo stesso periodo l'incentivo iniziale, è possibile stimare un utile annuale della scuola e del comune/provincia. Inoltre, si stima il tempo di ritorno delle spese sostenute dal comune (Tabella 3).

Tabella 3. Ricavi annuali e tempi di ritorno

	CER			AC		
	CER Nord	CER Centro	CER Sud	AC Nord	AC Centro	AC Sud
Ricavo e risparmi annuali COMUNE (€)	56742	59199	62528	56742	59199	62528
Spese annuali COMUNE (€)	7099					
Investimento iniziale ammortizzato in 20 anni (€)	29225			29125		
Utile annuale COMUNE (€)	20418	22875	26204	20518	22975	26304
Tempo di Ritorno COMUNE (anni)	12	11	11	12	12	12
Ricavo annuale SCUOLA (€)	28777	29256	30692	26529	26877	28091

Per tale tipologia di investimento, il tempo di ritorno potrebbe non essere il metodo di valutazione più adatto. Progetti con tempi di ritorno analoghi potrebbero avere rendimenti completamente diversi e investimenti con tempi di recupero molto lunghi potrebbero presentare rendimenti estremamente interessanti. Rispetto al caso analizzato, il tasso interno di rendimento complessivo dell'investimento, ovvero il tasso che rende equo l'investimento iniziale e il valore attuale del flusso di redditi netti attesi negli anni di durata del progetto, si attesta al 12,04% per il centro Italia, un valore significativamente superiore al rendimento di BTP ventennali, oggi intorno al 4,70%.

Il rendimento evidenziato consentirebbe ai partecipanti di sfruttare l'opportunità di forme tecniche di finanziamento con capitale di credito, utili a comprimere in maniera consistente l'esborso iniziale. La partecipazione del Comune al progetto potrebbe abbattere significativamente il costo del debito. Pur considerando un costo del denaro crescente, un qualsiasi finanziamento ad un tasso inferiore a quello di rendimento, ad esempio 4%, consentirebbe di sfruttare un effetto leva significativo massimizzando il rendimento del minor capitale investito.

Tali valutazioni devono, ovviamente, scontare, sia ipotesi finanziarie circa l'evoluzione del costo dell'energia e dei tassi di riferimento, sia la reale finalità perseguita che, nel caso di una istituzione scolastica, va oltre il mero rendimento economico.

4. Business model Canvas eduCER

La replicabilità su scala nazionale del progetto eduCER è resa possibile grazie al sistema organizzativo e di gestione degli edifici scolastici normato su scala nazionale disciplinato dalla legge n. 23/1996, dalla legge n. 47/2006 e sotto egida del Ministero dell'Istruzione.

Al fine di poter meglio diffondere e comprendere il modello eduCER è necessaria la definizione di perimetro d'azione per tutte le scuole dall'infanzia, primarie e secondarie di I grado e II grado vogliono approcciarsi e valutarne lo sviluppo e la costituzione. In tal senso il business model canvas sviluppato

da De Vidovich et al., 2021; Reis et al., 2021 può essere un valido strumento per la creazione di una generalizzazione del progetto pilota eduCER Carducci-Purgotti. Il business model canvas sviluppato si basa quindi sul caso Carducci – Purgotti con l'intento di creare una roadmap di ampio spettro e che possa essere di facile utilizzo e replicabilità per realtà simili.

La raccolta delle informazioni necessarie al business model è avvenuta tramite il coinvolgimento, attraverso un ciclo di riunioni, dei principali stakeholders coinvolti nel progetto Carducci – Prugotti.¹

I temi che sono stati sviluppati e che trovano la loro collocazione nel modello generalizzato sono: attività ed obiettivi del progetto, attori, risorse, tecnologia, normativa, processo, community, partecipazione, benefici.

Tabella 4. BUSINESS MODEL CANVAS eduCER:

INPUT:		OUTPUT:	
ATTORI: - Membri della comunità (POD): Scuola, Comune o Provincia - Docenti, studenti e personale scolastico - Gestore della CER (interno o esterno alla scuola) - Esperti CER (es. Università, specialisti) - Provider energia - Provider colonnina elettrica intelligente e impianti - GSE	OBIETTIVI: - Produzione di energia per autoconsumo - Scambio sul posto - Massimizzazione dell'energia condivisa - Formazione, educazione e sensibilizzazione degli studenti e genitori	PROCESSO: - Engagement top/down: costituzione della CER tramite linee guida e circolari del MIM ovvero tramite promotori CER - Engagement bottom/up: iniziativa dalla comunità scolastica	COMMUNITY: Comunità energetica tra enti Pubblici – Comune o Provincia e Scuola
	TENCOLOGIA: - Colonnina di ricarica intelligente di proprietà della scuola - Impianti di produzione di energia rinnovabile (es. fotovoltaico) di proprietà Comune/Provincia	PARTECIPAZIONE: - Incontri tra scuola/enti pubblici per la definizione e costituzione della CER - Incontri tra scuola/famiglia per la condivisione del progetto - Definizione della distribuzione dei benefici: es Benefici 1. 2. Al comune e benefici 3. 4. Alla eduCER - Modello giuridico: associazione senza fini di lucro o srls	
COSTI: - Costi impianti energie rinnovabili - Costo colonnina elettrica - Smart Meters - Piattaforma software - Costo conto corrente - Costo costituzione - Costo gestione CER - Costo acquisto eventuali mezzi elettrici ad uso scolastico	NORMARIVA/POLICY: - Dlgs 199/2021 del Ministero dell'Ambiente - DL 162/2019 - DIRETTIVA 2019/944/CE - L n. 23/1996 - L 47/2006	BENEFICI: - Benefici economici: 1. risparmio dei costi dell'energia elettrica a beneficio del comune, 2. Ricavo dalla produzione immissione in rete a beneficio del comune (PUN); 3. Incentivo eduCER commisurato alla quantità di energia condivisa (immessa e contestualmente prelevata da altri POD); 4. Vendita dell'energia elettrica di ricarica a beneficio della eduCER - Benefici per la collettività (es. utilizzo della colonnina da parte di soggetti esterni alla scuola) - Comportamenti virtuosi indotti dalla sensibilizzazione di studenti, corpo docente e famiglie etc e aumento della sensibilità - Diffusione della cultura della transizione	

5. Conclusioni

L'obiettivo del progetto eduCER è quello di attribuire alla scuola un ruolo chiave nel processo di transizione energetica e di decarbonizzazione, come modello di sviluppo virtuoso, educativo, inclusivo e sostenibile.

¹ I soggetti coinvolti sono stati: gruppo di ricercatori, dirigente scolastica, referenti del comune di Perugia. Il progetto, in fase di sviluppo, vedrà in una seconda fase il coinvolgimento anche di tutto il personale scolastico, il corpo studentesco e le relative famiglie.

Nel caso oggetto di studio, l'istituto Carducci-Purgotti di Perugia, è stata ipotizzata la creazione di due configurazioni di autoconsumo: Comunità Energetica Rinnovabile e Gruppo di Autoconsumatori di Energia Rinnovabile.

L'analisi è poi stata allargata a due ipotetici istituti scolastici del Nord e Sud Italia, con l'intenzione di creare un modello applicabile in tutto il paese. Infine, il modello è stato generalizzato attraverso il business model Canvas così da poter avere un primo draft fruibile su scala nazionale per tutti i possibili soggetti interessati alla costituzione delle eduCER.

Dall'analisi dei risultati, si evidenzia come tra le due configurazioni la più conveniente sia la Comunità Energetica Rinnovabile, pur dovendo sostenere spese maggiori dovute alla creazione dell'associazione, dal momento che viene percepito un incentivo maggiore calcolato rispetto all'energia condivisa.

Inoltre, la configurazione mostra maggiori utili nel caso del Sud Italia, dal momento che si ha una maggiore produzione che, a parità di consumi, garantisce una maggiore immissione in rete e conseguenti vendita e condivisione di energia maggiori.

Dovendo sostenere le spese iniziali di costituzione della configurazione, dell'impianto e dei dispositivi atti a massimizzare l'energia condivisa, il comune riceverà la maggior parte dei benefici economici.

Tuttavia, considerando l'investimento iniziale ammortizzato in un periodo ventennale, pari alla durata dell'incentivo sull'energia condivisa, emerge come la scuola abbia un utile annuale maggiore.

Il tempo di ritorno di investimento assume una durata consistente.

Nel bilancio pesano oltre all'impianto le spese per la colonnina smart di ricarica elettrica e i due veicoli elettrici.

Quest'ultimi potrebbero comunque usufruire di incentivi o di eventuali bandi, riducendo notevolmente l'investimento.

Infine, si evidenzia come il Decreto attuativo del Dlgs 199/2021 del Ministero dell'Ambiente in fase di pubblicazione, prevederà delle modifiche in merito all'incentivo sull'energia condivisa, che terrà conto anche della potenza dell'impianto da fonti rinnovabili.

Sulla base dei dati effettivi misurati nell'attuale impianto fotovoltaico da 20 KW di potenza di picco risulta che l'energia immessa in rete al netto di quella auto consumata dal prosumer (Comune di Perugia) risulta pari a circa 10,5 MWh/anno, nell'ipotesi che tutta sia energia condivisa, è in grado di produrre un ricavo per la eduCER di 1.344 euro/anno.

Se infine tale quantità di energia fosse venduta dalla colonnina al prezzo di 450 €/MWh (attuale prezzo di mercato) di arriverebbe ad un ricavo ulteriore pari a 4.725 euro/anno. La eduCER nelle ipotesi di cui sopra potrebbe avere ricavi annui totali massimi pari a circa 6.000 euro.

Nel caso specifico oggetto di studio, oltre alla riduzione dei costi e agli incassi effettuati dal comune per l'energia immessa in rete e al premio derivante dall'energia condivisa, il ricavo totale lordo della eduCER dovuto alla colonnina di ricarica per l'intera vita ventennale dell'impianto potrebbe arrivare fino ad un totale massimo di circa 120.000 euro.

Riferimenti

1. “DIRETTIVA (UE) 2019/ 944 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO - del 5 giugno 2019 - relativa a norme comuni per il mercato interno dell’energia elettrica e che modifica la direttiva 2012/ 27/ UE”, [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/LSU/?uri=CELEX:32019L0944>
2. “Decreto-legge del 30/12/2019 n. 162,” 2019. [Online]. Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/02/29/20A01353/sg>
3. “DECRETO-LEGISLATIVO-8-novembre-2021-n.-199,” 2021, [Online]. Available: https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2021-11-30&atto.codiceRedazionale=21G00214&elenco30giorni=true
4. GSE and Gestore dei Servizi Energetici, Nuove Regole Tecniche per accesso al servizio di valorizzazione e incentivazione energia elettrica condivisa. [Online]. Available: https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Servizi%20per%20te/AUTOCONSUMO/Gruppi%20di%20autoconsumatori%20e%20comunita%20di%20energia%20rinnovabile/Regole%20e%20procedure/Regole%20Tecniche%20per%20accesso%20al%20servizio%20di%20valorizzazione%20e%20incentivazione%20energia%20elettrica%20condivisa.pdf
5. “Scuola Carducci-Purgotti Perugia.” <https://cercalatuascuola.istruzione.it/cercalatuascuola/istituti/PGMM868016/carduccipurgotti/>
6. Linea Energia Spa, Nuova Energia, and RSE Spa-Ricerca sul Sistema Energetico, “La scuola... in Bolletta: Buona idea!” [Online]. Available: <https://www.green-school.it/uploads/files/148.pdf>
7. “PVGIS.” https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP
8. “Olivi Spa.” <https://www.olivispa.com/>
9. “algoWatt Business | algoWatt S.p.A.” <https://algowatt.com/>
10. “Ritiro Dedicato.” <https://www.arera.it/it/elettricità/prezziminimi.htm>
11. “PUN-Prezzo Unico Nazionale.” <https://www.mercatoelettrico.org/It/default.aspx>
12. “Attuazione della disciplina per la regolamentazione degli incentivi per la condivisione dell’energia di cui all’articolo 8 del decreto legislativo 8 novembre 2021, n.199.” <https://www.mase.gov.it/bandi/consultazione-pubblica-attuazione-della-disciplina-la-regolamentazione-degli-incentivi-la>
13. De Vidovich, Lorenzo, Luca Tricarico, and Zulianello Matteo. *Community Energy Map. Una ricognizione delle prime esperienze di comunità energetiche rinnovabili*. Franco Angeli, 2021.
14. Reis, I.F.G., Gonçalves, I., Lopes, M.A.R., & Henggeler Antunes, C. (2021). Business models for energy communities: A review of key issues and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111013.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Produzione di idrogeno molecolare tramite foto-sonolisi dell'acqua: stato dell'arte nel contesto italiano

Piergiovanni Domenighini ^{1,*}, Ferdinando Costantino ², Anna Donnadio ³, Morena Nocchetti ³, Alceo Macchioni ², Federico Rossi ¹ e Franco Cotana ⁴

¹ Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti, 93, 06125 Perugia

² Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Università di Perugia, Via dell'Elce di Sotto, 8, 06123 Perugia

³ Dipartimento di Scienze Farmaceutiche, Università degli Studi di Perugia, Via del Liceo, 1, 06123 Perugia

⁴ Centro di Ricerca sulle Biomasse CRB, Via Goffredo Duranti, 67, 06125 Perugia

* Autore di riferimento. E-Mail: piergiovanni.domenighini@studenti.unipg.it

Abstract: La foto-sonolisi è un processo di produzione di idrogeno molecolare da acqua distillata attraverso scissione fotochimica e cavitazione dovuti all'esposizione combinata alla radiazione solare e ultrasuoni. Per ottimizzare il processo di fotolisi, il reattore viene provvisto di foto-catalizzatori semiconduttori, o gli stessi possono essere dispersi nella soluzione acquosa. La foto-sonolisi è menzionata tra le tecniche innovative per la produzione d'idrogeno molecolare nel Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima 2030 (PNIEC) e la Strategia Italiana di Ricerca sull'Idrogeno (SIRI), e negli ultimi anni la ricerca scientifica ci si è rivolta con particolare attenzione. In letteratura sono presenti prototipi in scala di laboratorio di foto-sono reattori realizzati in acciaio AISI304 con copertura di vetro al quarzo. A seguito di prove sperimentali per valutare il rendimento di produzione, nelle sperimentazioni degli ultimi anni sono stati utilizzati miscele fisiche di ossidi di lantanio, indio e gallio come catalizzatori dispersi nella soluzione acquosa per ottimizzare i processi di fotolisi. La frequenza degli ultrasuoni ai quali la soluzione è stata esposta negli studi analizzati vede un'ottimizzazione da 22.5 kHz a 38 kHz. Campagne sperimentali a pressione variabile tra 1-2.5 atmosfere sono state condotte attestando un rendimento più elevato a pressioni inferiori. Oltretutto, i risultati delle ricerche revisionate evidenziano un aumento del rendimento della produzione di μmol di H_2 del 13% dopo 6 h di esposizione a radiazione solare e ultrasuoni di acqua bidistillata con catalizzatori dispersi, fornendo traccia della presenza di "coupling" tra fotolisi e sonolisi, e aprendo la ricerca a nuove possibilità di ottimizzazione del processo di produzione.

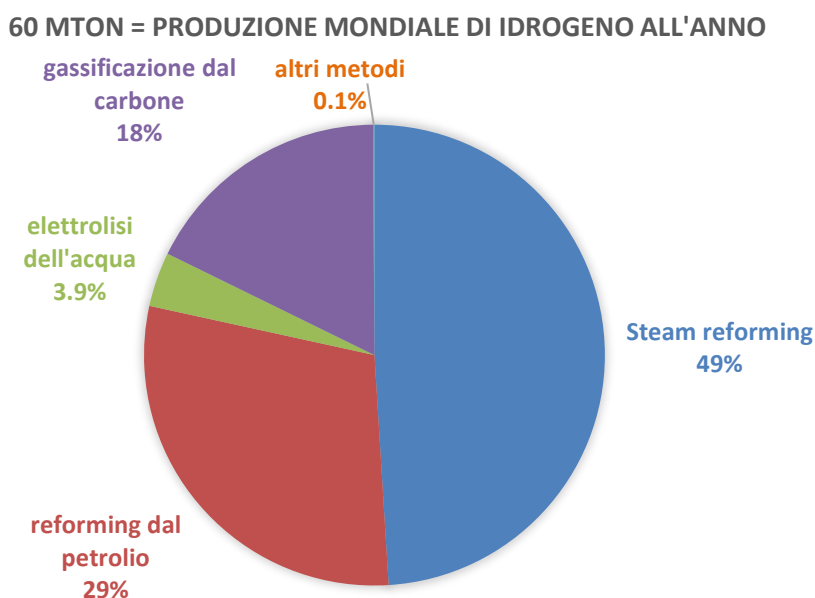
Keywords: hydrogen energy; solar energy; photocatalysis; sonochemistry; synergy; metal oxides; sulphur-doping.

1. Introduzione

L'utilizzo dell'idrogeno molecolare (H_2) come carrier energetico è considerato come uno dei potenziali utilizzi energetici del futuro [1, 2]. Adottata come soluzione energetica rinnovabile chiave dalla Commissione EU nel Luglio 2020 [3], rientra a pieno titolo con un ruolo da protagonista nel contesto della transizione energetica odierna. Oltretutto, l'essere un'efficace risorsa energetica alternativa ha dato ha permesso la nascita del concetto di *Hydrogen Economy* [1].

Stimando la produzione di idrogeno annuale a 60 milioni di tonnellate al 2019, con un parallelo aumento del consumo del 6% annuo [1, 2], la comunità scientifica ha focalizzato la propria attenzione, impegno e risorse economiche nell'ottimizzazione dei processi già consolidati di produzione di idrogeno molecolare, con un importante attenzione nell'applicazione di tecnologie rinnovabili, e nella formulazione di nuove soluzioni rinnovabili di produzione.

Figura 1. Diagramma dei metodi di produzione di idrogeno impiegati in percentuali (2019), dati da [1, 2].



Tra le tecnologie di creazione di idrogeno "green", che utilizzano energia fornita da sistemi rinnovabili citiamo:

- da gassificazione e pirolisi di biomassa: derivabile da scarto animale, rifiuto cittadino o industriale, rifiuto agricolo, che coinvolgono processi di ossidazione parziale della biomassa con rendimenti di produzione dell'idrogeno tipici del 14.3 wt% e punte significative del 17 wt% nel caso della biomassa lignocellulosica [4];

- da processi biochimici: attraverso bio-fotolisi diretta, indiretta, foto-fermentazione o fermentazione in assenza di luce [5];
- Produzione per elettrolisi dell'acqua: attraverso il passaggio di corrente elettrica tramite due elettrodi in soluzione acquosa [2], essa rappresenta odiernamente il 4% della produzione mondiale di idrogeno [6] con rendimenti di produzione dal 60 (celle alcaline) all'80% (celle a carbonati disciolti) [7, 8];
- Produzione per foto-elettrolisi: attraverso processi di elettrolisi foto-catalizzata. A seconda delle condizioni di intensità della radiazione solare, con elettrodi composti da semiconduttori che fungono anche da foto-catalizzatori, è possibile raggiungere il *water splitting* con densità di corrente nel range dei 10 mA/cm² – 30 mA/cm² e una differenza di potenziale elettrico di +1.35 V [9].

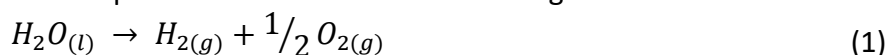
Nel contesto innovativo italiano, a seguito dell'accordo di Parigi del 2015 [10], le tecnologie menzionate sono citate nei principali piani di sviluppo tecnologico per il settore idrogeno: la Strategia Energetica Nazionale (2017) [11], il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima [12], la le linee guide preliminari della Strategia Nazionale Idrogeno (2020) [13] e la Strategia italiana Ricerca Idrogeno SIRI (2020) [14]. Con l'ambizione di portare al 2% la penetrazione dell'idrogeno nella domanda energetica nazionale, di ridurre di 8 Mton le emissioni di CO_{2eq} e di portare la capacità di elettrolisi a 5 GW entro il 2030, con una ramificazione dell'applicazione dell'idrogeno nella mobilità a lungo raggio (camion e treni), negli *hard-to-abate* del settore industriale e nell'applicazione domestica (climatizzazione) [13], e una previsione di incremento di questi numeri al 2050 (Table 1), la Strategia Ricerca Italiana Idrogeno indirizza con importanza l'attenzione verso la produzione di "*Idrogeno pulito*". Con obiettivi coerenti al Green deal europeo, concretizzato nel Recovery Plan [15], alle attività del in ambito Horizon Europe (HE) [16], Clean Hydrogen Europe e Clean Energy Transition [17] e Built4people [18], la SIRI considera come potenziali per l'attività di innovazione tecnologica-energetica nel campo dell'idrogeno la elettrolisi, la foto elettrolisi da FER (fonte Energetica Rinnovabile) e tecnologie innovative, divise nelle tre fasce di TRL (1-3, 3-5, 5-7). Tra le tecnologie emergenti viene evidenziata con risalto la foto-sonolisi catalizzata.

Tabella 1. Idrogeno: obiettivi Nazionali Italiani per il 2030 e il 2050 [13, 14].

Obiettivo	Deadline	
	2030	2050
Penetrazione dell'idrogeno nella domanda energetica finale	2%	13-14%
Elettrolizzatori	5 GW	60 GW
Emissione in meno di CO _{2eq}	8 Mton < 1990	- (1990)

La foto-sonolisi è un processo di produzione di idrogeno che coinvolge contemporaneamente fotolisi (energia solare) e sonolisi (ad ultrasuoni US) [19] dell'acqua con il contributo delle onde elettromagnetiche della luce solare e le sollecitazioni delle onde meccaniche degli ultrasuoni sulla soluzione target. Prove sperimentali di tale processo riportano in letteratura effetti di *coupling* tra i due processi distinti, rendendo la foto-sonolisi un *benchmark* importante per lo sviluppo di tecnologie di produzione più efficienti. Il processo di produzione consiste nella scissione della molecola d'acqua,

water splitting, una reazione *redox* il cui processo è sintetizzabile con la seguente formula:



e richiede una quantità di energia libera pari a 237 kJ/mol per essere innescata a condizioni standard [20].

Di seguito vengono introdotti separatamente il fenomeno della fotolisi e della sonolisi, con un'analisi dello stato dell'arte nella produzione scientifica italiana in studi incentrati sulla foto-sonolisi degli ultimi vent'anni. Gli studi oggetto di questo lavoro vedono due set-up sperimentali i cui estremi sono riportati in Tabella 2:

- Set-up 1 [21]: un reattore realizzato in acciaio AISI 304 di forma parallelepipedica (Figura 2A);
- Set-up 2 [22–25]: un reattore realizzato in acciaio AISI 304 di forma cilindrica (Figura 2B).

Figura 2. (A) Reattore rettangolare set-up 1, (B) Reattore cilindrico set-up 2, (C) schema dell'apparato sperimentale per entrambi i set-up.



Tabella 2. Caratteristiche dei due set-up analizzati.

	Set-up 1 [21]	Set-up 2 [22, 23, 25]
Copertura del reattore	al quarzo rettangolare	al quarzo cilindrica
Valvole	<ul style="list-style-type: none"> - Ingresso acqua - Uscita gas con setto poroso - Pompa a vuoto e gas inerte (Argon) 	
Lampada solare	Allo Xenon (35W, intensità=500W/m ² a 0.05m)	
Trasduttori	2 (50W)	1 (50W)
Frequenza US	22.5 [kHz]	38 [kHz]
Analisi gas	Gas cromatografo Varian CP-4900	
Foto catalizzatori	-	$S:/La_{2x}Ga_{2y}In_{2(1-x-y)}O_3$ [22, 23] $S:/Ln_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ (Ln = La, Gd, Y, Yb)[25]

I rendimenti di $\mu\text{mol/h}$ di idrogeno prodotti nei due set-up sono stati implementati valutando l'influenza dei seguenti parametri sperimentali:

- i catalizzatori per i processi di fotolisi, e le configurazioni sperimentate;
- la presenza e concentrazione di etanolo nella composizione chimica della soluzione sottoposta ai processi di fotolisi, sonolisi e foto-sonolisi;
- il volume della soluzione (dai 100 ai 800 ml);

- la pressione a cui la soluzione è sottoposta (da 1 a 2.5 atm);
- la dissipazione di potenza acustica degli US e l'efficienza sono-chimica del processo di *splitting*;
- l'effetto della potenza degli US;
- la configurazione dei catalizzatori sulla viscosità cinematica e l'assorbimento acustico della soluzione;
- la sinergia del processo foto-sonolitico.

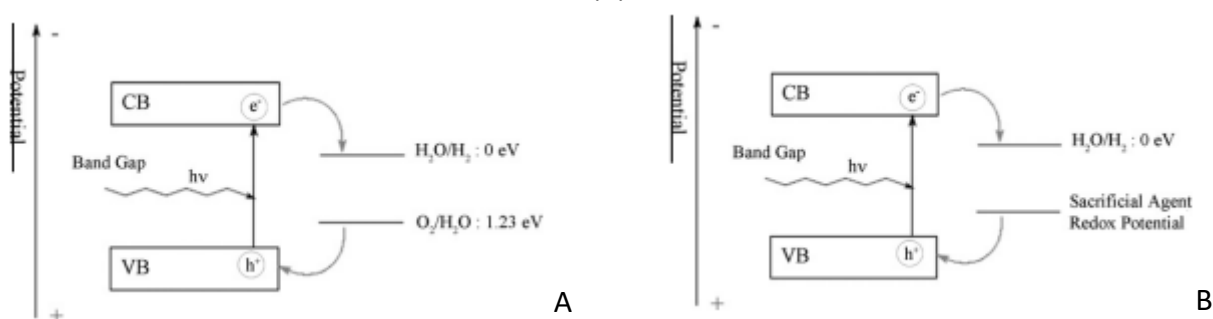
2. Fotolisi

La fotolisi è il processo che sfrutta il contributo energetico della radiazione solare per scindere la molecola della soluzione esposta. Nel caso dell'acqua la fotolisi si declina nel *water splitting* seguendo le reazioni:



L'analisi energetica delle reazioni, considerando le perdite termodinamiche, definisce come limite inferiore la regione visibile dello spettro della radiazione solare [26]. Dato che l'acqua assorbe solo nella regione degli infrarossi ($\lambda < 200nm$), fascia dello spettro dotata di una quantità insufficiente di energia per sopportare il processo di *splitting*, si rendono necessari dei foto-catalizzatori, in grado di assorbire la radiazione e trasferire la carica degli elettroni in migrazione verso le specie chimiche in soluzione per innescare il processo di ossidoriduzione (Figura 3 A) [23]. I semiconduttori sono foto-catalizzatori ideali per la loro stabilità termica e chimica, ed assorbono fotoni di energia pari o superiore al loro band gap [23, 27]. Per rigenerare i foto-catalizzatori è possibile aggiungere alla soluzione un agente sacrificale, in questo caso etanolo [28], che ossidi più facilmente dell'ossigeno e il cui potenziale sia inferiore di quello dell'acqua (Figura 3B).

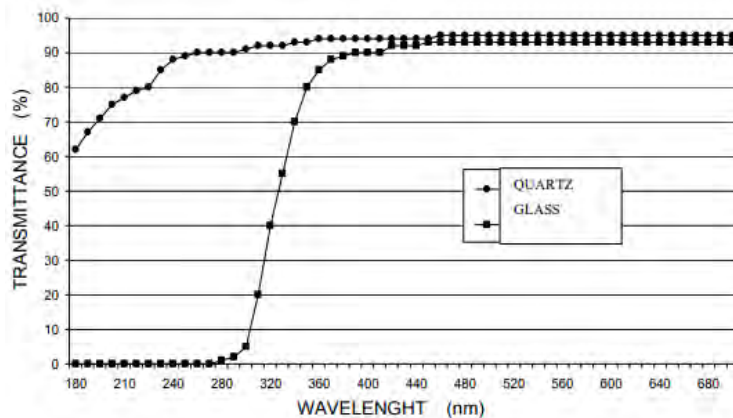
Figura 3. Schema del processo di fotolisi catalizzata con semiconduttori (A) e con un agente sacrificale (B), da [23].



2.1. La trasmissione ottica nel reattore

Data l'importanza del contenuto spettrale della luce a cui la soluzione reagente è esposta, nello stato dell'arte analizzato sono stati condotti degli studi sul materiale che compone la copertura trasparente dei reattori [21]. A seguito di analisi spettrofotometriche di trasmissione (figura 4), il vetro al quarzo è stato preferito al vetro commerciale per la maggior trasmissione alle lunghezze d'onda $\lambda < 400nm$.

Figura 4. Grafico della trasmissione ottica % del medesimo campione al quarzo (punti) e al vetro (quadrati), da [21].

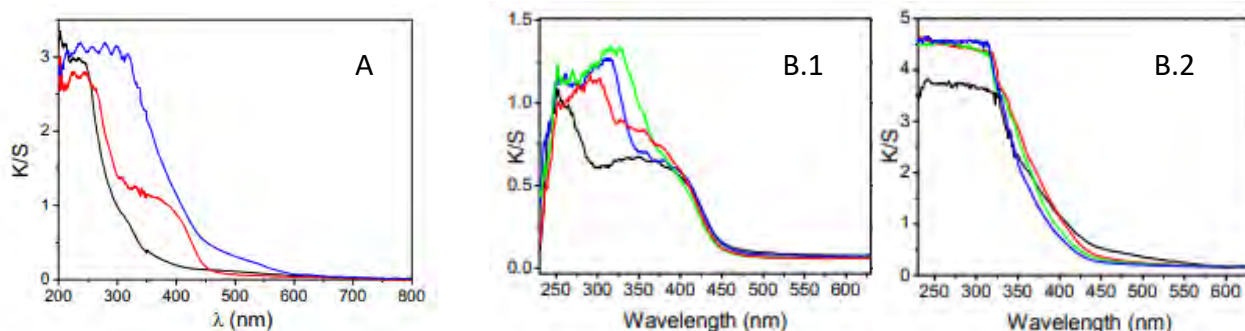


2.2. L'influenza dei foto catalizzatori sul water-splitting: differenze nei rendimenti

Nella letteratura sulla foto-sonolisi dell'acqua presa in esame con risultati di prove sperimentali per la sola fotolisi catalizzata, due sono i confronti che sono stati svolti tra configurazioni diverse di catalizzatori sintetizzati:

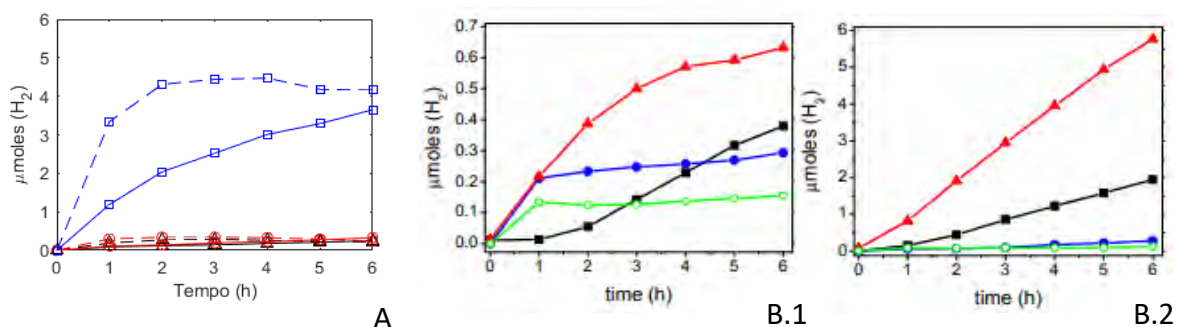
- In Nicolini et al. [23] e in Gentili et al. [22], nel 2009 sono stati messi a confronto tre configurazioni di fotocatalizzatori composti da Lantanio *La*, Gallio *Ga* e Indio *In*. Il processo di sintesi prevede che i reagenti (La_2O_3 , Ga_2O_3 , In_2O_3 , in purezza al 99,99%) vengano meccanicamente mescolati negli appropriati rapporti molari per con macinazione a mola e calcinati a 1373 K per 24 h per ottenere $LaGa_{0.5}In_{0.5}O_3$ e $La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$. In aggiunta, quest'ultima configurazione è stata soggetta a un processo di *doping* a zolfo *S* mettendo la polvere di $La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ in tiourea in rapporto molare 1:4 e sottoponendo la miscela fisica a calcinazione a 773 K per 5 h, ottenendo $S:La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$. Le tre configurazioni sono state sottoposte ad esami di assorbimento dello spettro UV visibile per mezzo di uno spettrofotometro Cary 4000 (equipaggiato con un dispositivo per la riflettanza diffusa DRA900). I risultati delle misure (Figura 5 A) mostrano un incremento dello spettro di assorbimento verso il rosso e la regione del visibile con $\lambda < 450 nm$, diminuendo il contenuto di *La* e *Ga* a favore dell'*In*. Il *doping* di zolfo porta una ulteriore estensione dello spettro assorbito ($\lambda < 600 nm$), creando livelli energetici oltre la banda di valenza definita dagli atomi dell'ossigeno. Questi livelli intermedi conferiscono al catalizzatore la capacità di assorbire una più ampia porzione dello spettro solare;
- In Penconi et al. [25], nel 2015, la configurazione risultata migliore in Gentili et al.[22] ($La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$) è stata confrontata con altre configurazioni sostituendo il lantanio con il gadolinio *Gd* ($Gd_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$), ittrio *Y* ($Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$) e itterbio *Yb* ($Yb_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$). I processi di sintesi sono i medesimi di [22] ed entrambe le configurazioni sono state sintetizzate con e senza l'aggiunta di atomi di zolfo. I risultati delle misure di assorbimento dello spettro UV-visibile senza *doping* allo zolfo (Figura 6 B.1) e con *doping* (Figura 6 B.2) mostrano un miglioramento dello spettro assorbito con uno *shifting* verso il rosso con i nuovi materiali testati e un miglioramento del 20% nel coefficiente di assorbimento dello spettro luce, ma nessuna modifica dei *band gaps*.

Figura 5. Grafici dei spettri di assorbimento delle soluzioni solide riportate in unità Kubelka-Munk per: (A) $LaGa_{0.5}In_{0.5}O_3$ – (nero), $La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ – (rosso) e $S:La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ – (blu) da [22]. (B.1) $La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ – (nero), $Gd_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ – (blu), $Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ – (rosso) e $Yb_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ – (verde). (B.2) i medesimi composti di (B.1) con aggiunta di atomi di zolfo S , da [25].



In Gentili et al. [22] (Figura 6 A), la produzione di μmol di H_2 per fotolisi nelle prime 6 ore è stata monitorata per una soluzione di 200 mL e 1100 mL di acqua ed etanolo (10% volume) con 0.4 g di fotocatalizzatori in polvere dispersi nella soluzione, mentre in Penconi et al. [25] (Figura 6 B_1-2) la produzione è monitorata per una soluzione di 300 mL di acqua ed etanolo (20% volume) con 0.4 g di fotocatalizzatori dispersi. Nel primo caso di Figura 6 A [22], è evidente l'influenza del volume della soluzione sulla produzione di idrogeno, sebbene tale differenza tenda ad affievolirsi dal 70% (1 h) al 12% alle 6 ore di esposizione, mentre il contributo di *doping* allo zolfo del catalizzatore $La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ comporta un aumento della produzione dalle 10 (1h) alle 17 (6h) volte maggiore. La medesima differenza in termini di produzione di idrogeno con catalizzatori dopati allo zolfo è riportata anche dalle misure di Penconi et al.[25]. Oltretutto, le performance della soluzione con fotocatalizzatori dispersi $Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ si attesta come migliore nei confronti con le misure delle altre configurazioni con una produzione di $0.14 \pm 0.05 \mu\text{moles } (H_2)/h$ (rispetto a 0.08 ± 0.03 del $La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$) e una produzione di $1.0 \pm 0.4 \mu\text{moles } (H_2)/h$ per la configurazione dopata $S:Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ (tre volte superiore al $0.36 \pm 0.1 \mu\text{moles } (H_2)/h$ di $S:La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$).

Figura 6. Produzione di idrogeno (μmoles) in funzione del tempo (ore, h) per i casi sperimentali di fotolisi catalizzata analizzati: (A) $LaGa_{0.5}In_{0.5}O_3$ (in nero), $La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ (in rosso) e $S:La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ (in blu). In volumi della soluzione di 200 mL (linea tratteggiata) e 1100 mL (linea continua), dati da [22]. (B.1) nella configurazione non dopata allo zolfo e in (B.2) nella configurazione dopata per $La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ (in nero), $Gd_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ (in blu), $Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ (in rosso) e $Yb_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ (in verde), da [25].



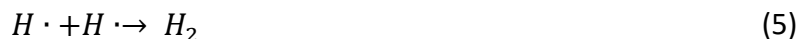
3. Sonolisi

La sonolisi è un processo di *splitting* la cui causa è associata alla sollecitazione meccanica nel mezzo dovuta alla presenza di *stream* acustico, generalmente a frequenza ultrasonica US ($f > 20 \text{ kHz}$) [19, 29]. Non l'intero spettro degli ultrasuoni è associato ai processi sono-chimici ma una particolare gamma definita *Power Ultrasound*, con frequenza compresa tra i $20 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$ e con una potenza di almeno 10 W (Figura 7A) [19]. La propagazione degli ultrasuoni in una soluzione liquida può determinare i seguenti fenomeni:

- Riscaldamento della soluzione dovuta alla dissipazione di energia meccanica e fenomeni di nebulizzazione [30] con la possibilità di generare fontane acustiche al livello dell'interfaccia gas-liquido con temperature locali di $250 \text{ }^\circ\text{C}$ [31];

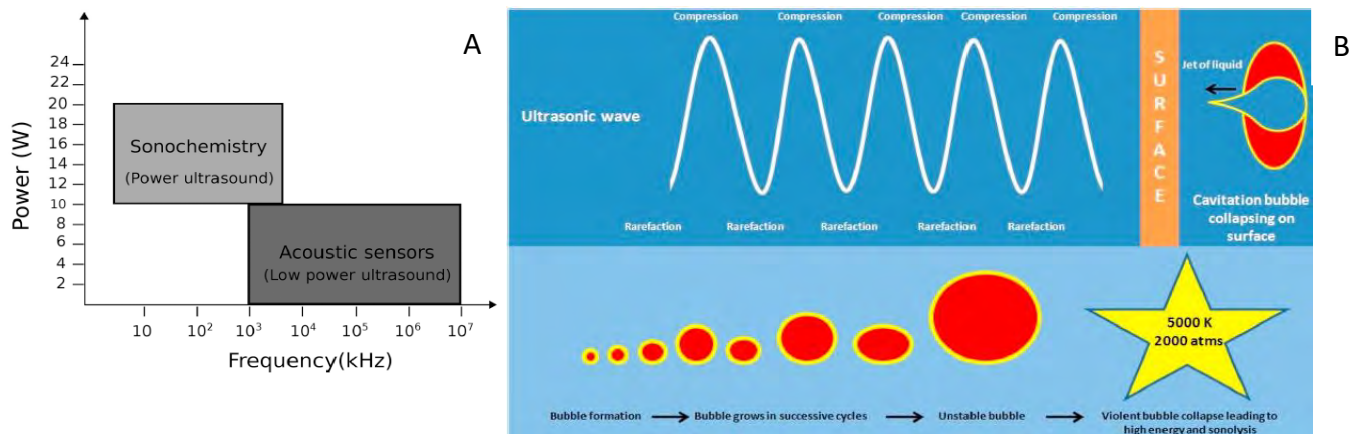
- generazione di piccole bolle, che si espandono durante le fasi di rarefazione della pressione dovute ai ventri dell'oscillazione meccanica ultrasonica, e che esplodono durante la compressione generando fenomeni di cavitazione [32]. Durante la cavitazione la bolla può raggiungere temperature di 5000°C e pressioni di 2000 atms (Figura 7B) [33].

Ai processi di cavitazione è in letteratura comunemente associato il fenomeno della sonolisi [30, 32, 34]. Nel caso di soluzione acquosa il processo comprende le seguenti reazioni [26]:



Per la generazione di radicali liberi $H \cdot$ e $OH \cdot$ (Eq.4), il processo di sonolisi dell'acqua in letteratura è studiato anche come metodo per la disinfezione dell'acqua in ambiente pubblico o agricolo [35].

Figura 7. (A) Utilizzo degli ultrasuoni rispetto alla sua potenza e frequenza [19]. (B) Forma d'onda sinusoidale e il meccanismo di cavitazione della bolla [34].



3.1. L'influenza della composizione chimica e del volume della soluzione

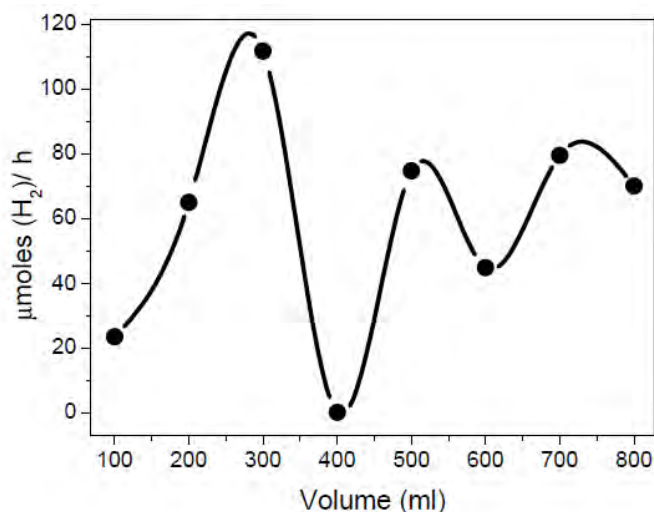
In Penconi et al. [25], sono stati misurati i ratei di produzione di idrogeno per sola sonolisi con US a frequenza 38 kHz e potenza 50 W, in: i) assenza di fotolisi catalizzata, ii) soluzioni di sola acqua, iii) solo etanolo ed acqua ed etanolo al 20% vol. I risultati, riportati in Tabella 3 attestano che la soluzione etanolo/acqua ha un rateo superiore alla sola soluzione acquosa e superiore alla somma delle due componenti separate. In soluzione etanolo/acqua la produzione di idrogeno è 1.4 volte più veloce che nella sola soluzione acquosa. Questo è dovuto alla presenza dell'etanolo che impoverisce la concentrazione di radicali OH in reazione (Eq.4-6) limitando la ricombinazione di radicali liberi H e OH (Eq.8).

Tabella 3. Ratei di idrogeno prodotto ($\mu\text{moles}/h$) sottoposti a US a 38 kHz in soluzioni di sola acqua, etanolo ed etanolo/acqua [25].

Campione	$\mu\text{moles}(H_2)/h$
Acqua	80 ± 2
Etanolo	5.5 ± 0.2
Etanolo/acqua (20% vol)	112 ± 3

Sono stati considerati volumi diversi della soluzione di etanolo/acqua per ottimizzare il processo di sonolisi e di foto-sonolisi [25]. I volumi considerati sono multipli di 225 mL e i valori relativi ai picchi di risonanza della geometria del volume di soluzione nel reattore sono graficamente individuabili (Figura 8). È stato selezionato il valore con picco di risonanza maggiore (300 mL) corrispondente a 14 cm di soluzione acquosa all'interno del reattore cilindrico (Figura 2 B).

Figura 8. Ratei di produzione di idrogeno ($\mu\text{moles}/h$) vs. il volume della soluzione (mL) con etanolo (20% vol) sottoposto ad ultrasuoni a 38 kHz da un trasduttore piezoelettrico [25].



3.2. L'influenza della potenza di emissione del trasduttore ad ultrasuoni e delle condizioni di pressione della soluzione

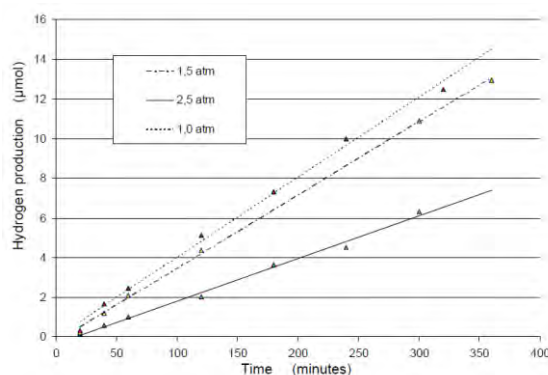
L'intensità degli US è stata esaminata in ratei della produzione di ($\mu\text{moles}/h$) [25]. Nonostante il driver per la produzione di US non consentisse una puntuale determinazione del livello di potenza, è stato riportato che in una soluzione di 300 mL di acqua con etanolo 20 % vol, sottoposta ad US a 38 kHz, il rateo di produzione di idrogeno cresce monotonamente con il livello di potenza, arrivando al rateo riportato in Tabella 3 per valori massimi della potenza del trasduttore. Misure calorimetriche nel reattore cilindrico hanno riportato una densità di potenza degli US di $26 \text{ W}/\text{dm}^3$ con una efficienza sono-chimica di $1.5 \times 10^{-10} \text{ mol} \cdot \text{J}^{-1}$. Efficienza sono-chimica SE calcolata attraverso misure sul processo di ossidazione di una soluzione acquosa di 100 mL con potassio iodato KI sottoposto a US per 30 min, e usando la relazione [25]:

$$SE = \frac{\text{mol}(I_3^-)}{E_{US}} = \frac{[I_3^-] \cdot V}{P_{US} \cdot t} \quad (9)$$

dove $[I_3^-]$ è la concentrazione di ioni I_3^- , V è il volume irradiato di potassio iodato KI , P_{US} è la potenza degli ultrasuoni stimata attraverso calorimetria e t è tempo di irradiazione.

In Cotana et al. [21], l'influenza della pressione sulla produzione di μmol di idrogeno in funzione del tempo è stata misurata sperimentalmente nel reattore parallelepipedo (Figura 2 A), con una soluzione acquosa di 100 mL di acqua bidistillata, in assenza di catalizzatori dispersi, irradiato con US a 22,5 kHz e 50 W di potenza, a livelli di pressione da 1 – 2,5 atm (Figura 9). I risultati sperimentali riportano una inversa proporzionalità tra pressione della soluzione e produzione di idrogeno, riportando livelli più alti a pressione ambientale ($7.32 \mu\text{mol}(H_2)$ dopo 3 h).

Figura 9. Produzione di idrogeno (μmoles) vs. tempo (h) in soluzione sprovvista di agente sacrificale e sottoposto ad ultrasuoni a 22.5 kHz da un trasduttore piezoelettrico [21].

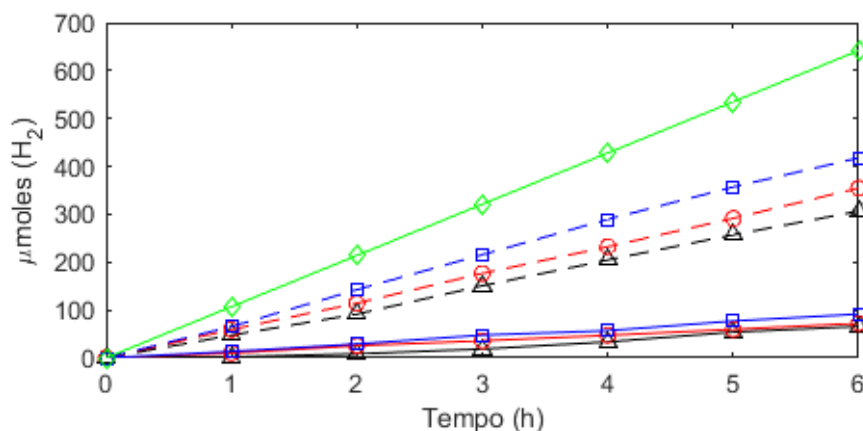


3.3. L'influenza dei catalizzatori dispersi sulla viscosità cinematica e il coefficiente di assorbimento acustico della soluzione

Sebbene i catalizzatori non abbiano apparentemente una influenza determinante nei processi di sonolisi, in letteratura [22, 23, 25] sono riportati risultati sperimentali di sonolisi con US a 38 kHz e

50 W in soluzioni acquose con foto-catalizzatori dispersi. I risultati sperimentali di produzione di idrogeno in presenza di catalizzatori $LaGa_{0.5}In_{0.5}O_3$, $La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ e $S:La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ in soluzione acquosa di 200 – 1100 mL con 10% vol di etanolo sono rappresentati in Figura 10, riportando valori più alti di produzione in presenza di $S:La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ (417.8 $\mu\text{mol}(H_2)$ dopo 6h) [22], coerentemente a quanto avviene nei processi di fotolisi (Sezione 2.2). Nella stessa Figura 10 sono riportati valori di produzione d'idrogeno in presenza di $S:Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ in 300 mL di soluzione con 20% vol di etanolo [25]. Anche se non direttamente comparabili con gli altri risultati di produzione per le differenti condizioni della soluzione (volume e % vol di etanolo), la configurazione riporta i valori di produzione del 30% più alti di $S:La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ in [22].

Figura 10. Produzione di idrogeno (μmoles) in funzione del tempo (ore, h) per i casi sperimentali per sonolisi in assenza di radiazione luminosa con i catalizzatori $LaGa_{0.5}In_{0.5}O_3$ in nero, $La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ in rosso e $S:La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ in blu (volumi della soluzione di 1100 mL in linea continua e 200 mL in linea tratteggiata) (dati da [22]) e $S:Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ in verde in di 300 mL di soluzione con 20% vol di etanolo (dati da [25]).



L'influenza dei catalizzatori sulla sonolisi è stata affrontata da Gentili et al. [22, 23] misurando la viscosità cinematica della soluzione acquosa con 10% vol di etanolo e calcolando l'assorbimento acustico α attraverso la formula in funzione della viscosità cinematica η_c [22]:

$$\alpha = \frac{5\eta_c\omega^2}{6c^3} \quad (10)$$

Dove ω è la velocità di frequenza del segnale acustico e c è la velocità di propagazione del suono nel mezzo. Risultati delle misure di viscosità cinematica e di calcolo di assorbimento acustico per mezzo di Eq.10 sono riportati in Tabella 4. I risultati mostrano una che a maggiori rendimenti di sonolisi (Figura 10) corrispondono valori inferiori della viscosità cinematica e dell'assorbimento acustico. In letteratura [22] questa relazione viene giustificata da una quantità di energia inferiore associata agli US dissipata in calore e corrispondente ad un valore più basso dell'assorbimento acustico α .

Tabella 4. Valori della viscosità cinematica η_c misurata e il coefficiente di assorbimento acustico α per i tre catalizzatori sospesi in soluzione con 10% vol di etanolo.

Campione	$\eta_c [m^2/s]$	$\alpha [s^{-1}]$
$LaGa_{0.5}In_{0.5}O_3$	0.0127	0.179
$La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$	0.0117	0.166
$S: La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$	0.0115	0.161

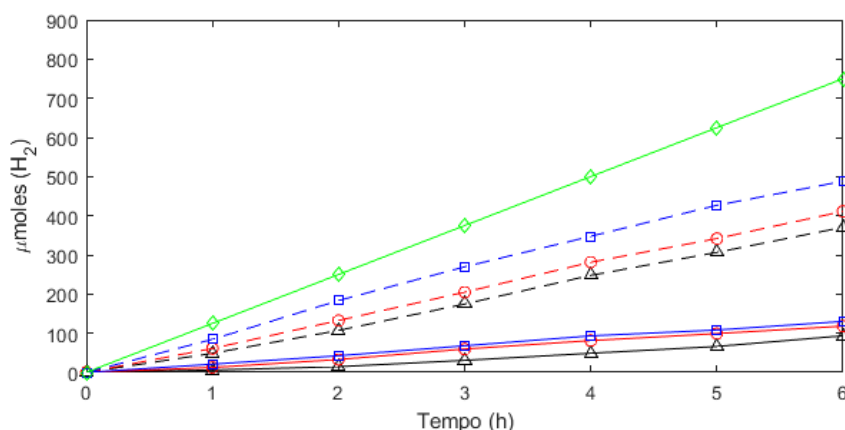
4. Foto-Sonolisi

Il processo di foto-sonolisi rappresenta la combinazione dei fenomeni di fotolisi e sonolisi introdotti nelle precedenti sezioni 2 e 3. Il *water splitting* nella soluzione viene indotto dalla contemporanea esposizione alla luce solare e agli US [19].

4.1. L'influenza dei catalizzatori dispersi

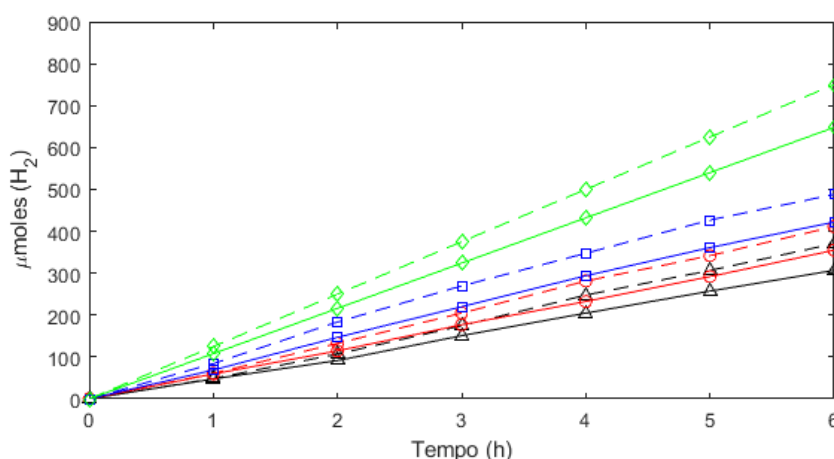
I risultati sperimentali in letteratura sulla foto-sonolisi dell'acqua [] mostrano produzioni di $\mu moles$ di idrogeno maggiori rispetto alla fotolisi e alla sonolisi (dalle 27 alle 108 $\mu moles$ di idrogeno prodotte in più dopo 6h), ma la produzione in funzione della configurazione dei foto catalizzatori e il volume della soluzione esposta è in continuità con quanto riportato nella sezione 3.3. Infatti, si riportano rendimenti più elevati per soluzioni di 200 mL rispetto ai 1100 mL, con livelli di produzione più elevati nel caso di catalizzatori $S: La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ (487,9 $\mu moles$ di idrogeno prodotte dopo 6h) e risultati più elevati vengono riportati nel caso di soluzione da 300 mL con 20% vol di etanolo e catalizzatori del tipo $S: Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ (750 $\mu moles$ di idrogeno prodotte dopo 6h).

Figura 11. Produzione di idrogeno ($\mu moles$) in funzione del tempo (ore, h) per i casi sperimentali per foto-sonolisi con i catalizzatori $LaGa_{0.5}In_{0.5}O_3$ in nero, $La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ in rosso e $S: La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ in blu (volumi della soluzione di 1100 mL in linea continua e 200 mL in linea tratteggiata) (dati da [22]) e $S: Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ in verde in di 300 mL di soluzione con 20% vol di etanolo (dati da [25]).



Risultati elevati nella produzione sono giustificabili dalla compresenza dei fattori di vantaggio già introdotti nelle precedenti sezioni (maggior efficacia dei catalizzatori, stechiometria della soluzione, volume della soluzione in compatibilità con le frequenze di risonanza nel reattore, minor assorbimento acustico della soluzione). In aggiunta, confrontando i risultati di produzione della foto-sonolisi e della somma delle produzioni separate per sonolisi e fotolisi catalizzata (Figura 12), è possibile evidenziare una differenza di produzione significativa, dell'ordine del 13,6 % che è attribuito in letteratura ad un effetto sinergico, di *coupling* tra fotolisi e sonolisi.

Figura 12. Confronto della produzione di idrogeno (μmoles) in funzione del tempo (ore, h) per i casi sperimentali di sonolisi + fotolisi catalizzata (linea continua) e foto-sonolisi (linea tratteggiata) con i catalizzatori $\text{LaGa}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{O}_3$ in nero, $\text{La}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{InO}_3$ in rosso e $S: \text{La}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{InO}_3$ in blu (in 200 mL di soluzione acquosa) [22] e $S: \text{Y}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{InO}_3$ in verde in di 300 mL di soluzione con 20% vol di etanolo [25].



4.2. Il rendimento sinergico

Gli studi sulla foto-sonolisi hanno riportato un aumento sulla produzione di idrogeno maggiore alla semplice somma della produzione per i singoli processi separati negli stessi intervalli di tempo. Per calcolare questa sinergia, in letteratura [22, 25] è stata utilizzata la relazione:

$$\text{Synergy} = \frac{\mu\text{mol}_{(\text{luce}+\text{US})} - (\mu\text{mol}_{(\text{luce})} + \mu\text{mol}_{(\text{US})})}{\mu\text{mol}_{(\text{luce}+\text{US})}} \quad (11)$$

Dove $\mu\text{mol}_{(\text{luce}+\text{US})}$ sono le micromoli di H_2 prodotti dall'azione combinata di luce solare e US, mentre $\mu\text{mol}_{(\text{luce})}$ e $\mu\text{mol}_{(\text{US})}$, corrispondono alle micromoli di H_2 prodotte dai singoli fenomeni.

Dai risultati in Tabella 5, è osservabile un contributo del *doping* dello zolfo nelle prime 3 ore di esposizione a foto-sonolisi della soluzione, con una sinergia nove volte più grande nella prima ora rispetto a soluzioni con catalizzatori non dopati allo zolfo. Dopo le 3 ore tale differenza si assottiglia su variazioni percentuali del 11%. La presenza di zolfo comporta un vantaggio sinergico [22]. La sinergia nel caso di catalizzatori $S: \text{Y}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{InO}_3$ in 300 mL di soluzione risulta inferiore al caso con catalizzatori $\text{La}_{2x}\text{Ga}_{2y}\text{In}_{2(1-x-y)}\text{O}_3$, dell'ordine del 13% e andamenti orari dell'effetto sinergico non

sono disponibili in letteratura. Ciononostante, la produzione di idrogeno è superiore per tale configurazione, sebbene con un effetto sinergico inferiore agli altri rilevati.

Tabella 5. Valori della sinergia calcolata con Eq.11 dai casi studio con catalizzatori in funzione del tempo di esposizione a foto-sonolisi per $S:/La_{2x}Ga_{2y}In_{2(1-x-y)}O_3$ [22] e $S:/Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ [25].

Campione	Tempo (h)						
	0	1	2	3	4	5	6
$LaGa_{0.5}In_{0.5}O_3$	–	0.02 ± 0.02	0.14 ± 0.01	0.135 ± 0.006	0.174 ± 0.004	0.161 ± 0.003	0.172 ± 0.003
$La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$	–	0.02 ± 0.02	0.14 ± 0.01	0.136 ± 0.005	0.174 ± 0.003	0.146 ± 0.002	0.137 ± 0.002
$S: La_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$	–	0.18 ± 0.01	0.20 ± 0.005	0.184 ± 0.004	0.154 ± 0.003	0.154 ± 0.002	0.154 ± 0.002
$S: Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$	0.13 ± 0.05						

5. Conclusioni e prospettive di ricerca future

Nel presente lavoro sono stati analizzati i processi di produzione di idrogeno attraverso metodi innovativi, attraverso fotolisi, sonolisi e foto-sonolisi. Menzionata come soluzione innovativa nel contesto di sviluppo e ricerca nelle strategie nazionali italiane, la foto—sonolisi per la produzione di idrogeno attraverso *water splitting* è stata analizzata partendo dallo stato dell'arte delle sue componenti separate (fotolisi e sonolisi).

Dalla letteratura scientifica considerata sono emersi i seguenti punti:

- La copertura trasparente del foto-sono reattore deve essere in vetro al quarzo per permettere una più ampia trasmissione della luce, specialmente nello spettro UV (Figura 4);
- La presenza di foto catalizzatori dispersi in soluzione e la presenza di un agente sacrificale sono necessari per il corretto funzionamento del processo di fotolisi. Il processo di *doping* allo zolfo dei catalizzatori è rilevante nei rendimenti di fotolisi (fino a 17 volte maggiori). I catalizzatori semi-conduttori rispondono adeguatamente come foto catalizzatori e in particolare $S: Y_{0.8}Ga_{0.2}InO_3$ riporta sperimentalmente i ratei di produzione di idrogeno più elevati ($0.14 \pm 0.05 \mu\text{moles } (H_2)/h$);
- La produzione di idrogeno per US è sensibile alla composizione chimica della soluzione. Infatti, soluzioni con acqua ed etanolo al 20 % di vol, hanno ratei di produzione più veloci del 40% rispetto a soluzioni composte da sola acqua distillata;
- Se il volume della soluzione e la geometria dello stesso nel reattore sono stabiliti dai punti di picco di risonanza (Figura 8) del volume d'acqua stesso rispetto alla frequenza degli US a cui è esposto, il rendimento aumenta sensibilmente (fino a $112 \mu\text{moles } (H_2)/h$);
- Le condizioni di pressione atmosferica per la soluzione sono le migliori in termini di rendimento per sono e foto-sonolisi [21];
- Catalizzatori che riducono la viscosità cinematica della soluzione incrementano i rendimenti di sonolisi diminuendo il coefficiente di assorbimento della soluzione (sezione 3.3);

- La foto-sonolisi presenta fenomeni di *coupling* sinergico tra sonolisi e fotolisi, con rendimenti superiori alla somma dei singoli fenomeni. Tale sinergia è dell'ordine del 13 % e il *doping* allo zolfo dei catalizzatori ha sperimentalmente mostrato vantaggi nel rendimento nelle prime 3 ore di esposizione della soluzione a US e luce solare combinata.

Potenziati prospettive future per la foto-sonolisi rispetto allo stato dell'arte attuale sono:

- Sebbene l'agente sacrificale in soluzione con l'acqua nei processi di fotolisi sia già in letteratura considerato in un'ottica di sostenibilità ambientale considerando il bio-etanolo [25], i catalizzatori presi in esame in letteratura subiscono processi di calcinazione per 24 h a 1373 K o l'impiego di terre rare. Nell'ottica di applicare la foto-sonolisi su larga scala questi risulterebbero energeticamente molto onerosi;
- Miglioramento dei rendimenti dei processi di fotolisi con catalizzatori di nuova generazione, basati su idrossidi e polimeri di coordinazione di metalli di transizione come Fe, Co e Ni, valutando anche le opportunità di estendere il raggio d'azione della fotolisi all'interno della soluzione con materiali sono luminescenti [36];
- Perfezionamento della geometria del reattore, massimizzando il volume della soluzione in funzione dei picchi di risonanza del reattore e coerentemente con gli studi già condotti e presenti nello stato dell'arte [25];
- Studio del rendimento energetico tra l'energia meccanica indotta da US nella soluzione e l'idrogeno estratto, tramite misure dirette dell'ampiezza acustica in soluzione e perfezionamento del matching di impedenza tra reattore e trasduttore US;
- Studio e approfondimento del comportamento sinergico tra fotolisi e sonolisi nell'ottica di massimizzare il rendimento di produzione di idrogeno.

References

- [1] Coutanceau C, Baranton S, Audichon T. *Hydrogen Electrochemical Production*. Academic Press Elsevier London (UK): Joe Hayton, (2018).
- [2] Kalamaras CM, Efstathiou AM. Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. *Conference Papers in Energy 2013*; 2013: 1–9.
- [3] European Commission. Communication from the commission to the European parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions a hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. COM(2020) 301 final, (2020, accessed 4 April 2023).
- [4] Turner J, Sverdrup G, Mann MK, et al. Renewable hydrogen production. *Int J Energy Res* 2008; 32: 379–407.
- [5] Levin DB, Pitt L, Love M. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *Int J Hydrogen Energy* 2004; 29: 173–185.
- [6] Konieczny A, Mondal K, Wiltowski T, et al. Catalyst development for thermocatalytic decomposition of methane to hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 2008; 33: 264–272.

- [7] Ivy J. *Summary of Electrolytic Hydrogen Production: Milestone Completion Report*. Golden, CO (US), (1 September 2004, accessed 4 April 2023).
- [8] Hauch A, Ebbesen SD, Jensen SH, et al. Highly efficient high temperature electrolysis. *J Mater Chem* 2008; 18: 2331–2340.
- [9] Lindquist SE, Fell C. FUELS – HYDROGEN PRODUCTION | Photoelectrolysis. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* 2009; 369–383.
- [10] InReport of the Conference of the Parties to the United Nations. *Paris agreement*. Vol. 4, (December 2015, accessed 4 April 2023).
- [11] Ministero dello Sviluppo Economico MISE MATTM. *Strategia Energetica Nazionale*. 2017.
- [12] Ministero dello Sviluppo Economico MISE. *Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima*. 2019.
- [13] Ministero dello Sviluppo Economico MISE. *Strategia Nazionale Idrogeno - Linee guida preliminari*. Italy, 2020.
- [14] Gruppo di Lavoro Idrogeno. *Prime indicazioni per una Strategia Italiana Ricerca Idrogeno (S I R I)*. 2020.
- [15] COUNCIL REGULATION (EU Euratom) 2020/2093. Laying down the multiannual financial framework for the years 2021 to 2027. EUR-Lex-32020R2093-EN-EUR-Lex, (2020, accessed 4 April 2023).
- [16] Fernández SG, Kubus R, Pérez-Iñigo JM. Innovation Ecosystems in the EU: Policy Evolution and Horizon Europe Proposal Case Study (the Actors’ Perspective). *Sustainability* 2019, Vol 11, Page 4735 2019; 11: 4735.
- [17] European Commission. Clean Hydrogen Partnership, https://www.clean-hydrogen.europa.eu/index_en (2021, accessed 4 April 2023).
- [18] Zarli A, Aslanides A, Richardson S, et al. *European Partnerships under Horizon Europe Built4People-SRIA/Roadmap*. September 2021.
- [19] Islam H, Burheim OS, Pollet BG. Ultrasonics - Sonochemistry Sonochemical and sonoelectrochemical production of hydrogen. *Ultrason Sonochem* 2019; 51: 533–555.
- [20] Kudo A, Miseki Y. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. *Chem Soc Rev* 2008; 38: 253–278.
- [21] Cotana F, Rossi F. Study of water photolysis for hydrogen production.
- [22] Luigi P, Penconi M, Ortica F, et al. Author ’ s personal copy Synergistic effects in hydrogen production through water sonophotolysis catalyzed by new La_{2x}Ga_{2y}In₂(1-L x L y)O₃ solid solutions. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.09.027.
- [23] Rossi F, Nicolini A, Filipponi M, et al. Study of Catalysts for Water Photosolysis to Increase the Hydrogen Production. In: *HYPOTHESIS VIII proc*. Lisbon (Portugal), 2009, pp. 1–6.
- [24] Rossi F, Nicolini A. An experimental investigation to improve the hydrogen production by water photoelectrolysis when cyanin-chloride is used as sensibilizer. *Appl Energy* 2012; 97: 763–770.
- [25] Penconi M, Rossi F, Ortica F, et al. Hydrogen Production from Water by Photolysis, Sonolysis and Sonophotolysis with Solid Solutions of Rare Earth, Gallium and Indium Oxides as Heterogeneous Catalysts. *Sustainability* 2015; 7: 9310–9325.

- [26] Archer MD, Bolton JR. FEATURE ARTICLE Requirements for Ideal Performance of Photochemical and Photovoltaic Solar Energy Converters. *Biopolymers* 1990; 94: 975.
- [27] Ahmad H, Kamarudin SK, Minggu LJ, et al. Hydrogen from photo-catalytic water splitting process: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015; 43: 599–610.
- [28] Sakata T, Kawai T. Heterogeneous photocatalytic production of hydrogen and methane from ethanol and water. *Chem Phys Lett* 1981; 80: 341–344.
- [29] Leong T, Kentish S. *The fundamentals of power ultrasound-A review The performance of perfluorinated polymers in several gas and vapor separation applications View project Gas separation by membrane technology View project THE FUNDAMENTALS OF POWER ULTRASOUND-A REVIEW*, (2011).
- [30] Laborde JL, Hita A, Caltagirone JP, et al. Fluid dynamics phenomena induced by power ultrasounds. *Ultrasonics* 2000; 38: 297–300.
- [31] Legay M, Gondrexon N, Le Person S, et al. Enhancement of heat transfer by ultrasound: Review and recent advances. *International Journal of Chemical Engineering*. Epub ahead of print 2011. DOI: 10.1155/2011/670108.
- [32] Yasui K. *Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics*. Cham: Springer International Publishing. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-68237-2.
- [33] Suslick KS. Sonochemistry. *Science (1979)* 1990; 247: 1439–1445.
- [34] Pollet Bruno. *Power ultrasound in electrochemistry : from versatile laboratory tool to engineering solution sonoelectrochemistry*. Wiley, (2012).
- [35] Lévêque J-M, Cravotto G, Delattre F, et al. *SPRINGER BRIEFS IN MOLECULAR SCIENCE ULTRASOUND AND SONOCHEMISTRY Organic Sonochemistry Challenges and Perspectives for the 21st Century*. Springer, (2018).
- [36] Ashokkumar M, Grieser F. Sonophotoluminescence: pyranine emission induced by ultrasound. *Chemical Communications* 1998; 561–562.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Organosolv lignin as renewable feedstock in polyols production using a microwave system

Tommaso Giannoni ^{1,*}, Tiziano Galmacci ¹, Mattia Gelosia ¹, Ramoon Barros Lovate ¹, Giacomo Fabbrizi ¹, Gianluca Cavalaglio ², Ippolita Mecca ² and Paola Iodice ².

¹ CIRIAF—Biomass Research Centre, University of Perugia, Via G. Duranti 63, 06125 Perugia, Italy

² Department of Civil Engineering, Pegaso Telematic University, 80143 Naples, Italy³

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: giannoni@crbnet.it

Abstract: One of the primary targets for the new lignocellulosic feedstock-based biorefinery is the simultaneous valorization of holocellulose and lignin. Some lignin-derived bioproducts have the potential to substitute traditional polymers for sustainable buildings applications. Acidified organosolv treatment is among the most promising strategy for recovering technical lignin, water-soluble hemicellulose, and cellulose pulp with increased accessibility to hydrolytic enzymes. In this work, *Cynara cardunculus* L. feedstock underwent a fractionation and liquefaction process to produce polyols. In the first step, the milled biomass was subjected to microwave-assisted extraction using an acidified ethanol/water mixture to separate lignin and hemicellulose from cellulose pulp. Removing the solvent by distillation, the lignin dissolved into ethanol was precipitated. In the second step, the precipitated lignin was subjected to liquefaction under microwave heating and modifying the experimental conditions (solvent, temperature, and concentration of catalyst). The precipitated lignin and obtained polyols were characterized using thermogravimetric analysis (TGA), and in terms of hydroxyl number and acid number. The optimal polyol showed a liquefaction yield of 98.20% that was obtained in 5 min of reaction at 155 °C with 3% of sulphuric acid. The liquefaction product showed a hydroxyl number of 581.16 mg KOH/g, suitable to be used as a precursor in polyurethane foam synthesis.

Keywords: Enzymatic hydrolysis, lignin, Polyethyleneglycol, Liquefaction, Polyol

1. Introduction

In the last few years the chemical modification of lignin for its use in the preparation of polyurethanes, acrylates, epoxies, polymer blends, and composites has received considerable

attention [12, 13]. Liquefaction is regarded as an efficient way to convert the biomass and/or technical lignin into polyols with high content of reactive hydroxyl groups. This process is usually carried out at high temperatures with the use of reagents (primary, secondary, and tertiary alcohols) and catalysts (strong acids) with sufficient reactivity toward biomass components [14-16] to produce polyols for polyurethane foam preparations and as components of adhesives [17-19].

Organosolv and liquefaction processes are usually carried out with conventional external heating systems such as water, oil, salt bath, fluidized sand bath, and electrical furnace [20, 21]. These

heating systems are relatively slow and heat is not transfer efficiently due to the dependence on the conductivity. The use of microwave systems is emerging as an alternative heating mode

allowing to achieve fast heating in the bulk material [22]. In addition, this technique allows operating under high pressure in closed vessels and reduces energy consumption and operating times [23].

In this work, the cardoon stem was subjected to a GVL-mediated organosolv step to produce lignin, which was used as a building block in the liquefaction process. Both steps was performed using microwave heating. In the first step were used experimental conditions from a previous works performed by the same authors [24]. In the second step, two different liquefaction processes, previously described by other authors [25], were set side by side to establish the procedure that better matches the OV lignin from cardoon. Organosolv lignin and the obtained polyol were characterized by thermogravimetric analysis (TGA) and in terms of hydroxyl content and acid number.

2. Materials and methods

2.1 Reagents and equipment

Matrica S.p.A (Porto Torres, Italy) kindly provided dried residues of *Cynara cardunculus* L. stems, which were milled using a laboratory rotary blade mill (RETSCH, Haan, Germany) to produce a powder with an average particle size of 1 mm. This powder served as the raw material (RM) for the experiments. All reagents used in the study were of analytical grade and purchased from Sigma-Aldrich (Saint Louis, MO, USA). Deionized water and GVL were used as solvents. The HB43-S Halogen Classic plus (Mettler Toledo, Columbus, OH, USA) was used to perform moisture analysis of solid samples, while monosaccharide concentrations were analyzed using ultra-high performance liquid chromatography (UHPLC) equipped with a Bio-Rad Aminex HPX-87H column (Biorad, CA, USA) and a refractive index detector (ERC RefractoMax 520, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA) set at 50°C. The mobile phase consisted of a 0.01 N H₂SO₄ water solution. The fractionation of biomass and liquefaction of lignin were conducted using an Ethos One Microwave-assisted extractor (Milestone srl, Sorisole (BG)—Italy).

2.2 Raw material and lignin extraction process

The RM underwent microwave-assisted organosolv fractionation using an acidified ethanol/water solution in order to produce a cellulose-rich pulp and technical lignin. The procedure was previously described by Giannoni et al.[24]. Briefly, 2.5g of RM and an acidified ethanol/water solution with a

ethanol concentration of 60% (w/w) and H₂SO₄ concentration of 2.2% (w/w) were added into a PTFE vessel, using a 1:10 solid to liquid ratio. The reaction was carried out at 140 °C for 30 minutes with constant stirring. After the reaction time, the cellulose-rich pulp was separated from the liquid containing the dissolved lignin by filtration. The lignin was isolated from the organosolv liquor by adding seven volumes of acidified water to the liquid fraction, followed by centrifugation and oven drying at 50°C. The lignin content of the liquor was determined by weighing the mass of precipitated organosolv-lignin (OL) from the liquid fraction. The OL was characterized following the NREL laboratory to determine the residual holocellulose[26].

2.3 Liquefaction of OL

In the first method, reagent grade PEG with an average molecular weight (M_w) of 600 and glycerol, were used as solvents, and sulfuric acid 98% was used as the catalyst in the liquefaction reaction. PEG #600 was selected over other average molecular weight PEGs due to its higher liquefaction efficiency (97%) [25]. A mixture of PEG #600 and glycerol (80/20 w/w) was used as the solvent, and the liquefaction reactions were carried out in the microwave-assisted extractor under 155 °C and 3% of catalyst concentration for 5 min. In the second method, reagent grade propylene glycol, ethanol and glycerol, were used as solvents, and sulfuric acid 98% was used as the catalyst in the liquefaction reaction. A mixture of glycerol, propylene glycol and ethanol (8:2:10) was used as the solvent, and the liquefaction reactions were carried out in the microwave-assisted extractor under 170 °C and 1% of catalyst concentration for 30 min [27]. For both methods, during the liquefaction process, a constant stirring was maintained and the reaction mixtures were loaded into the vessel with the organosolv-lignin using a solvent ratio of 15/85 w/v.

After the liquefaction process, the pressurized vessel was cooled for 15 minutes before being opened safely. The liquefaction product was then diluted with dioxane/water (80/20 v/v) and filtered to remove remaining solids, which were dried to a constant mass. The liquefaction yield (Y) was calculated as the weight percentage based on the starting sample material using equation (1).

$$[Y = \left(1 - \frac{M}{MI}\right) * 100] \quad (1)$$

where MI is the mass of initial organosolv lignin and M is the mass of the residue insoluble in dioxane/water obtained after the liquefaction process.

The polyols obtained by the first and second liquefaction method were labelled as LL1 and LL2, respectively.

2.4 Hydroxyl number and acid number

To determine the hydroxyl numbers (Hn)[28] of the liquefied organosolv lignin, a sample of 0.5-1.0 g was dissolved in 25 mL of a phthalation reagent and heated at 115°C for 1 hour under reflux. Subsequently, 50 mL of pyridine was added through the condenser, and the mixture was back-titrated with 0.5 M sodium hydroxide solution using 1% phenolphthalein solution in pyridine as the indicator. The phthalation reagent was made by dissolving 115 g of phthalic anhydride in 700 mL of pyridine.

The hydroxyl number, defined as mg KOH/g of sample, was calculated as follows:

$$[Hn = \left(\frac{(B-A)*M*56.1}{w} \right) + Acid\ Number] \quad (1)$$

A and B were defined as the volume of the 0.5 M sodium hydroxide solution required for the titration of the sample (mL) and the volume of the sodium hydroxide solution required for the titration of the blank solution (mL), respectively. M was the molarity of the sodium hydroxide solution, and w was the amount of the sample (g) being analyzed. If the sample was acidic, the hydroxyl number was corrected accordingly, as the acid uses the phthalation reagent during the analysis. To determine the acid number, a total of 0.4 g of the sample was weighed into a 400 mL Erlenmeyer flask and dissolved in 50 mL of a solvent mixture consisting of dioxane and water (4:1 v/v). Then, 0.5 mL of phenolphthalein indicator solution (1% in ethanol) was added, and the mixture was titrated with 0.1 M KOH solution in ethanol to the equivalent point. The acid number (mg KOH/g of sample) was calculated using equation (5):

$$[Acid\ Number = \left(\frac{(C-B)*M*56.1}{w} \right)] \quad (1)$$

where C was the titration volume of the potassium hydroxide solution (mL), B was the titration volume of the blank solution (mL), M was the molarity of the potassium hydroxide solution, and w was the amount of the sample (g) being analyzed.

2.5 Thermogravimetric analysis

Thermal degradation of the samples was investigated using thermogravimetric analysis (TGA). Samples of 5 mg were heated from 25°C to 800°C at a rate of 10°C/min, while a constant nitrogen flow was maintained as an inert atmosphere throughout the experiment.

3. Result and discussion

3.1 Raw material and organosolv lignin characterization

Given the natural seasonal variations in biomass composition, it is essential to connect process performance with the experimental material actually used. To this end, Table 1 presents the chemical composition of the cardoon stalks utilized in this study. These stalks exhibit hemicellulose and lignin content comparable to that of other cardoon stalks employed in biochemical conversion processes, with only a slightly lower cellulose content [29-31]. The hemicellulose, composed almost entirely of xylan heteropolysaccharide, is primarily comprised of xylose, the most abundant component (>93%). The low lignin content (14.2%) and extractives value (7.6%) suggest a high degree of accessibility and reactivity of biomass to organosolv processes [32]. As a result, about 67% of the initial lignin was extracted and precipitated from the organosolv solution. The composition analysis of OL derived from cardoon residue revealed that it comprised of 88.9% acid-insoluble lignin, with total sugars making up 3.5% (including 1% glucose and 2.5% xylose).

Table 1. Cardoon composition

Cellulose	Hemicellulose	Acetyl group	Pectin	Lignin ^a	Extractives	Ash
30.5% ± 0.15	17.2% ± 0.07	5.0% ± 0.12	4.7% ± 0.33	14.2% ± 0.18	7.6% ± 0.16	8.8% ± 0.19

^a lignin as acid-insoluble lignin

Figure 1 shows the cardoon biomass before and after the organosolv process. The brownish appearance of OL confirmed that holocellulose was efficiently removed from raw material.

Figure 1. Raw material before the organosolv process (a) and OL obtained (b)

3.2 Liquefaction processes comparison

Two dependent variables were considered to compare the two liquefaction process, liquefaction yield (%) and H_n (mg KOH/g). The results of 2 experiments are shown in Table 2.

Table 2. Yield of the liquefaction process and the Hydroxyl Number of the obtained polyols

Sample	H _n (mg KOH/g)	Acid Number (mg KOH/g)	Y (%)
LL1 Blank ^a	529.68	63.48	-
LL1	581.68	348.63	98.2
LL2 Blank ^a	756.51	21.40	-
LL2	1264.05	716.10	52.6

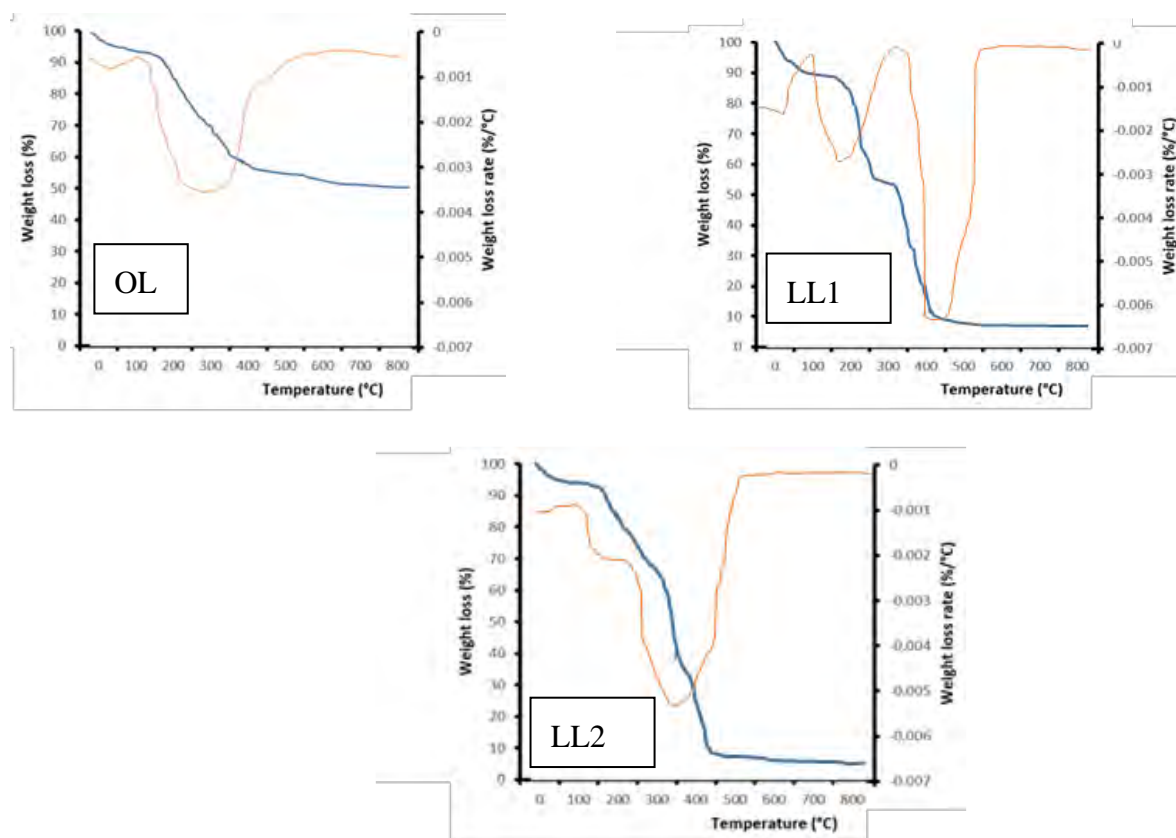
Based on the figures above a maximum hydroxyl number of 1264.05 was obtained for sample LL2 using the second method of liquefaction. The same sample showed a liquefaction yield of 52.6%. On the contrary, the sample LL1 showed a hydroxyl number approximately half of LL1 and liquefaction yield of 98.2%. The H_n of polyols was higher than blank solvents in both case and its value was for almost 60% caused by the solvents employed in the liquefaction process. Ultimately, liquefying 1g of OL produced polyols with the same number of hydroxyl group regardless of the liquefaction method employed. However, since the main goal of the study was the liquefaction of OL, the first method should be preferred to the second one.

3.3 Thermogravimetric Analysis (TGA)

The rates of change in weight (DTG) curves under N₂ atmosphere of liquefied lignin (LL1 and LL2) and OL are shown in Figure 2.

Organosolv lignin showed a low weight loss around 70 °C that was associated with the moisture presented in the lignin samples. The high quality of the lignin was checked by the low hemicelluloses contamination presented between 185 and 260 °C, it confirms the composition analysis in sugars (2.5%). Finally, lignin degradation happened slowly in a wide range of temperatures with a maximal mass loss rate between 300 and 400 °C, this fact being associated with the complex structure of lignin with phenolic hydroxyl, carbonyl groups, and benzylic hydroxyl, which are connected by straight links [33]. According to Briones et al., 2012 [34], DTG analysis of pure PEG and Glycerol presented a glycerol decomposition from 153 to 267 °C and PEG decomposition from 267 to 392 °C. DTG curves of optimized polyols presented similar pattern with peaks ranging from 155 to 287 °C and 287 to 489 °C (LL2); from 154 to 310 °C and from 310 to 464 °C (LL1). So, it could be assumed that the two peaks presented in the polyols curves are due to the presence of glycerol and PEG in the final product. These results confirm the combination of the lignin and liquefying solvents, but the introduction of the chemicals reactants retarded the degradation temperature of the liquefied product.

Figure 2. TGA (blue) and DTG (orange) curves of the organosolv lignin and the polyols LL1 and LL2.



4. Conclusion

The conventional heating systems could be replaced by the microwave system, which offers reduced reaction times and direct heat penetration into the material's bulk. Two different microwave heating processes were set side by side for optimizing polyol production from lignin obtained by organosolv treatment of cardoon stalks. Both liquefaction processes produced polyols with a suitable hydroxyl number (581.68 mg KOH/g and 1264.05 mg KOH/g), that can be used as a precursor in polyurethane foam synthesis, and the first liquefaction method achieved a yield of 98%. The TGA showed the partial introduction of liquefying solvents into the polyols, which retarded the degradation temperature of the liquefied products.

In future research, it would be desirable to assess the synthesis of polyurethane foams using polyols derived from liquefied lignin. Furthermore, evaluating the acoustic, mechanical, and thermal properties of the resulting polyurethane foams would be beneficial.

Funding: This study was co-funded by CUP FR 2022 0014 the project: "SOLUZIONI INNOVATIVE COMPATIBILI PER LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO MEDIANTE L'IMPIEGO DI BIOMATERIALI E DI BIOCOMBUSTIBILI".

References

1. Friend, A.D.J.J.o.e.b., *Terrestrial plant production and climate change*. 2010. **61**(5): p. 1293-1309.
2. Hardham, A.R., D.A. Jones, and D.J.C.o.i.p.b. Takemoto, *Cytoskeleton and cell wall function in penetration resistance*. 2007. **10**(4): p. 342-348.
3. García, A., et al., *Characterization of lignins obtained by selective precipitation*. 2009. **68**(2): p. 193-198.
4. Elsayed, M., et al., *Acetogenesis and methanogenesis liquid digestates for pretreatment of rice straw: a holistic approach for efficient biomethane production and nutrient recycling*. 2019. **195**: p. 447-456.
5. Alvira, P., et al., *Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review*. 2010. **101**(13): p. 4851-4861.
6. Wan, C. and Y.J.B.a. Li, *Fungal pretreatment of lignocellulosic biomass*. 2012. **30**(6): p. 1447-1457.
7. Yang, B., C.E.J.B. Wyman, Bioproducts, and B.I.f.a.s. economy, *Pretreatment: the key to unlocking low-cost cellulosic ethanol*. 2008. **2**(1): p. 26-40.
8. Chakar, F.S., A.J.J.I.c. Ragauskas, and products, *Review of current and future softwood kraft lignin process chemistry*. 2004. **20**(2): p. 131-141.
9. Calvo-Flores, F.G. and J.A.J.C. Dobado, *Lignin as renewable raw material*. 2010. **3**(11): p. 1227-1235.
10. Meng, X., et al., *Effects of the advanced organosolv pretreatment strategies on structural properties of woody biomass*. 2020. **146**: p. 112144.
11. Grangeiro, L.C., et al., *New trends in biogas production and utilization, in Sustainable Bioenergy*. 2019, Elsevier. p. 199-223.

12. Lindberg, J.J., T.A. Kuusela, and K. Levon, *Specialty polymers from lignin*. 1989, ACS Publications.
13. Montané, D., J. Salvadó, and X. Farriol, *Fractionation of wheat straw via steam-explosion pretreatment. Characteristics of the lignin obtained by alkali delignification of the steamed straw*. 1997.
14. Kobayashi, M., et al., *Analysis on residue formation during wood liquefaction with polyhydric alcohol*. 2004. **50**: p. 407-414.
15. Kržan, A., M. Kunaver, and V.J.A.C.S. Tišler, *Wood liquefaction using dibasic organic acids and glycols*. 2005. **52**: p. 253-258.
16. Zhang, T., et al., *Qualitative analysis of products formed during the acid catalyzed liquefaction of bagasse in ethylene glycol*. 2007. **98**(7): p. 1454-1459.
17. Imam, S.H., et al., *Environmentally friendly wood adhesive from a renewable plant polymer: characteristics and optimization*. 2001. **73**(3): p. 529-533.
18. Kunaver, M., et al., *Application of liquefied wood as a new particle board adhesive system*. 2010. **101**(4): p. 1361-1368.
19. Tohmura, S.I., G.Y. Li, and T.F.J.J.o.a.p.s. Qin, *Preparation and characterization of wood polyalcohol-based isocyanate adhesives*. 2005. **98**(2): p. 791-795.
20. El-barbary, M.H., N.J.I.C. Shukry, and Products, *Polyhydric alcohol liquefaction of some lignocellulosic agricultural residues*. 2008. **27**(1): p. 33-38.
21. Lee, S.H., M. Yoshioka, and N.J.J.o.A.P.S. Shiraishi, *Liquefaction of corn bran (CB) in the presence of alcohols and preparation of polyurethane foam from its liquefied polyol*. 2000. **78**(2): p. 319-325.
22. Zheng, Z., et al., *Rapid liquefaction of wood in polyhydric alcohols under microwave heating and its liquefied products for preparation of rigid polyurethane foam*. 2011. **5**(1).
23. Stramaglia, S., et al., *Synergetic and redundant information flow detected by unnormalized Granger causality: Application to resting state fMRI*. 2016. **63**(12): p. 2518-2524.
24. Giannoni, T., et al., *Fractionation of *Cynara cardunculus* L. by Acidified Organosolv Treatment for the Extraction of Highly Digestible Cellulose and Technical Lignin*. 2021. **13**(16): p. 8714.
25. Sequeiros, A., et al., *Lignin liquefaction under microwave heating*. 2013. **130**(5): p. 3292-3298.
26. Sluiter, J.B., et al., *Compositional analysis of lignocellulosic feedstocks. 1. Review and description of methods*. 2010. **58**(16): p. 9043-9053.
27. Briones, R., et al., *Polyols obtained from solvolysis liquefaction of biodiesel production solid residues*. 2011. **175**: p. 169-175.
28. Briones, R., et al., *Polyol production by chemical modification of date seeds*. 2011. **34**(1): p. 1035-1040.
29. Antunes, A., et al., **Cynara cardunculus* L.: chemical composition and soda-anthraquinone cooking*. 2000. **12**(2): p. 85-91.
30. Ladeira Ázar, R.I., et al., *Effect of lignin content on cellulolytic saccharification of liquid hot water pretreated sugarcane bagasse*. 2020. **25**(3): p. 623.

31. Zhao, X., et al., *Biomass recalcitrance. Part I: the chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose*. 2012. **6**(4): p. 465-482.
32. Wang, Z.-W., et al., *Effects of hydrothermal treatment on enhancing enzymatic hydrolysis of rapeseed straw*. 2019. **134**: p. 446-452.
33. Poletto, M., et al., *Thermal stability and pyrolysis kinetics of organosolv lignins obtained from Eucalyptus globules*. 2008. **27**: p. 150-156.
34. Briones, R., et al., *Valorization of some lignocellulosic agro-industrial residues to obtain biopolyols*. 2012. **87**(2): p. 244-249.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Life cycle analysis of heat production from biomass of SRC and perennial grasses plantations in Ukraine

Oleksandra Tryboi ^{1,*}

¹ Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Marii Kapnist str., 2a, Kyiv, Ukraine.
tryboiov@nas.gov.ua, oleksandra.tryboi@gmail.com

* E-Mail: oleksandra.tryboi@gmail.com

Abstract: The purpose of the work is to analyse the life cycles of heat production in commercial biomass boilers from chopped and pelletized short rotation coppice (*Salix Viminalis*) and perennial grass (*Miscanthus x giganteus*) in Ukraine, taking into account the cultivation period and to compare them with the traditional use of natural gas for heat production in commercial gas boilers. The analysis is based on the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, where cumulative energy demand (CED) and energy yield coefficient (EYC) of the system, as well as GHG emissions reduction are analysed regarding the product, which is heat. Biomass value chains were analysed regarding the maximum preferable transportation distances needed to transport the harvested biomass and solid biofuels to the heat production facility, still facing the sustainability requirements of RED II. The results of the study show that the most energy intensive stages belong to production of pellets and operation of the biomass boiler 500 kW, as well as transportation. Maximum transportation distances by auto transport that allow to receive five times more heat energy than consumed non-renewable energy within the life cycle of biofuels in form of chips are 100 km for *Salix Viminalis* and 200 km for *Miscanthus x giganteus*. Maximum transportation distances by auto transport for pellets that allow receiving two times more heat energy than consumed non-renewable energy within the life cycle are 500 km for *Salix Viminalis* and 800 km for *Miscanthus x giganteus* pellets. Still the requirement of 70% emission reduction compared to the fossil fuel equivalent system (natural gas) is reached for transportation distances for *Salix Viminalis* chips of 180 km and 80 km for pellets, and for *Miscanthus x giganteus* of 325 km for chips and 200 km for pellets.

Keywords: LCA; Heat production; SRC; *Salix Viminalis*; perennial grass; *Miscanthus x giganteus*; GHG emission reduction; sustainability.

1. Introduction

In Ukraine, significant part of the consumed energy is heat energy representing 15% of the Final Energy Consumption (FEC) compared to 20% for electricity [1]. The major fuel for heat production is natural gas, followed by coal. The share of biomass for heat production increased during the recent years following the targets set by the National Renewable Energy Action Plan until 2020 [2]. However, the target of 12.4% in Heating and cooling sector was not met [3]. The main reason is the subsidized price of natural gas for municipal and household consumption, which made it extremely hard for biomass fuels to compete. Nevertheless, the recent events connected with the Russian invasion to Ukraine and connected growth of the natural gas prices showed that not only cheap prices should be considered, but also the security of supply. In this regard, energy crops cultivated locally on marginal and underutilized lands represent an interesting option as a biomass feedstock for heat production of municipal buildings of the Ukrainian cities.

Statistical analysis of the last 10-15 years shows that there are about 1-4 million hectares of underutilized lands that are not used for food production due to its marginality [4, 5, 6]. Lands, where food production is not economically feasible can be suitable for cultivating less demanding energy crops for further energy production. Energy crops produced for biomass can bring economic viability to such marginal lands and regions. There are more than 4000 ha of energy crops already cultivated in Ukraine, which include mainly SRC willow and Miscanthus species [7].

A possible restraining factor for the widespread cultivation of energy crops in Ukraine is the unresolved issue of the energy efficiency of the life cycle of growing energy crops and their use for heat production, as well as the environmental sustainability of such bioenergy value chains. The Life Cycle Assessment (LCA) methodology can help evaluate the energy and environmental performance of 'energy crops-to-heat energy' value chains and determine optimal requirements for their utilization. Moreover, they will be compared with the traditional heat production in commercial gas boilers.

2. Materials and Methods

The analysis uses the LCA methodology according to ISO 14040:2006 that includes the definition of the goal and scope of the work, as well as the functional unit, inventory analysis and impact assessment.

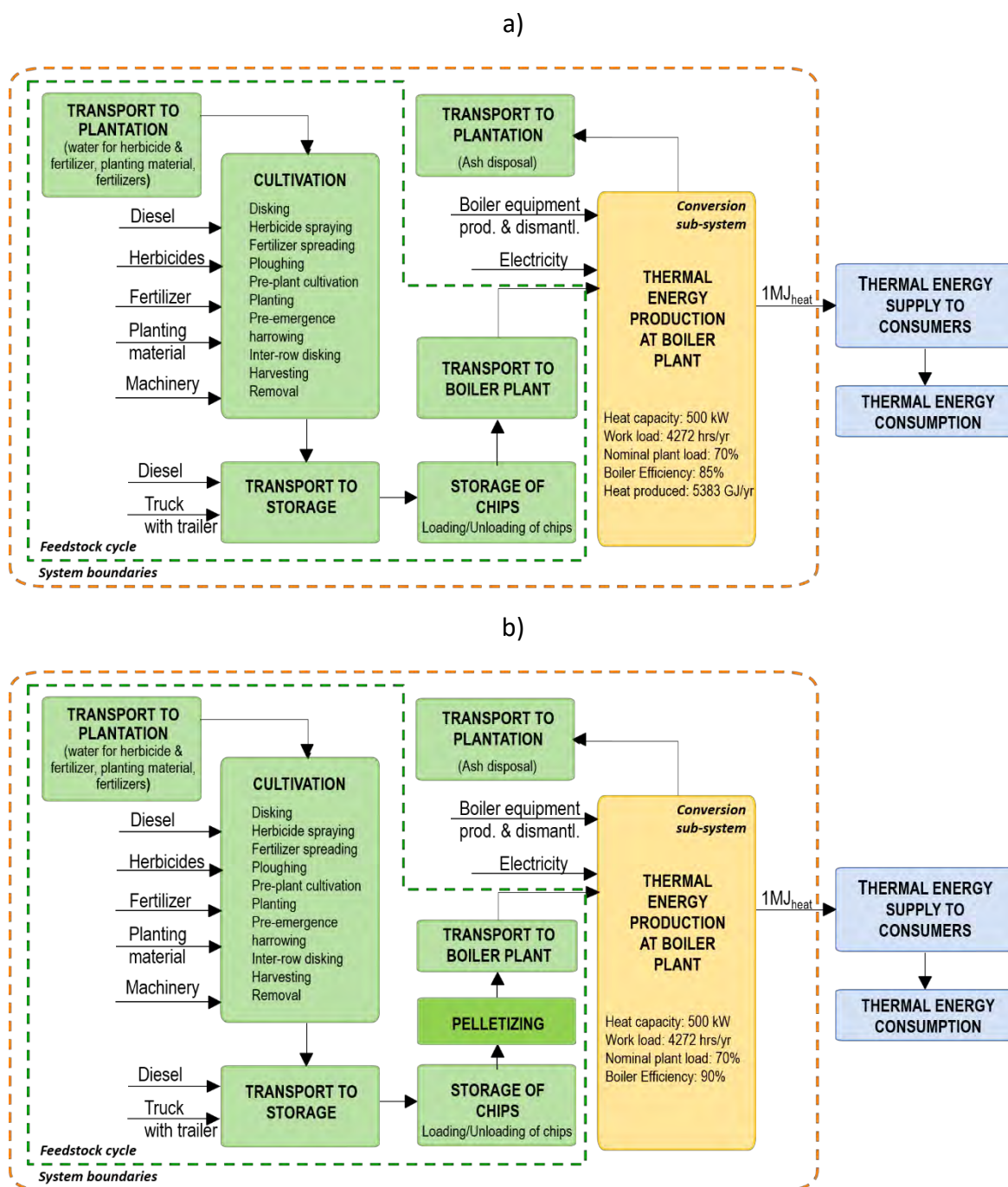
2.1. *Defining the Goal and Scope, and Functional unit.*

The Goal of the analysis is to assess the cumulative energy demand, including from non-renewable sources, and greenhouse gas (GHG) emissions in the life cycles of heat production in commercial biomass boilers from chopped and pelletized short rotation coppice (*Salix viminalis*) and perennial grass (*Miscanthus x giganteus*) in Ukraine, taking into account the cultivation period and to compare them with each other and with the traditional use of natural gas for heat production in commercial gas boilers. The product of the analysed systems is heat. Biomass value chains were analysed regarding the maximum preferable transportation distances needed to transport the harvested biomass and solid

biofuels to the heat production facility, still facing the sustainability requirements of RED II. The functional unit is 1 MJ of thermal energy produced in the 500 kW boiler (average for the life cycle of 20 years), which is used for inventory analysis and impact assessment.

System boundaries are presented on the Fig.1. The scope of the analysis considers the system that includes the biomass Production stage followed by the Transport and Storage stage and, in the case of pellets, the Pelletizing stage, and finally, the Conversion stage of biomass fuel combustion for thermal energy production.

Figure 1. Life cycle boundaries of the energy-crops-to-heat value chain (a), including pelletizing (b).



2.2. System description and Inventory.

Biomass production includes agricultural operations for cultivating SRC (*Salix Viminalis*) and perennial grass (*Miscanthus x giganteus*) and harvesting biomass with simultaneous chipping. Cultivation of SRC (*Salix Viminalis*) and perennial grass (*Miscanthus x giganteus*) considers the following plantation characteristics presented in Table 1.

Table 1. Plantation characteristics of *Salix Viminalis* and *Miscanthus x giganteus*.

Plantation feature	SRC (<i>Salix Viminalis</i>)	Perennial grass (<i>Miscanthus x giganteus</i>)
Density	15 000 cuttings/ha	20 000 rhizomes/ha
Cultivation period	20 years	20 years
Harvesting frequency	3 years	annually
Average yield	18.60 t/ha/year	18.85 t/ha/year

Agricultural operations of the cultivation cycle are shown in Table 2 and Table 3. Data on agricultural operations used in the cultivation stage is based on consultations with operating producers of *Salix Viminalis* and *Miscanthus x giganteus* in Ukraine.

Table 2. Agricultural operations for *Salix Viminalis* cultivation.

Agriculture operations	Years																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Disking	x																			
Herbicide spraying	xxx																			
Fertilizer spreading	x																			
Ploughing	x																			
Pre-plant cultivation	x																			
Planting	x																			
Inter-row cultivation	x																			
Inter-row disking	xx																			
Harvesting			x			x			x			x			x			x		x
Fertilizer spreading			x			x			x			x			x			x		
Removal																				x

Table 3. Agricultural operations for *Miscanthus x giganteus* cultivation.

Agriculture operations	Years																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Disking	x																			
Herbicide spraying	xxxx																			
Fertilizer spreading	xx																			

Ploughing	x																		
Pre-plant cultivation	x																		
Planting	x																		
Pre-emergence harrowing	xx																		
Inter-row disking	xx																		
Harvesting	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Removal																			x

Salix cultivation process covers a period of 20 years with a 3-year harvesting cycle. Biomass yield is considered to equal 60 t per hectare per harvest from the second to the sixth harvests, except for the first and the last harvests, which are 40% less. The average annual yield of biomass production equals to 18.60 tons per hectare per year.

Miscanthus cultivation process covers the period of 20 years with annual harvesting cycle, starting from the first year. Biomass yield is considered to equal 20 t per hectare per year for 18 harvests of the life cycle, except the first and the second ones, which are 75% and 40% less respectively. The average annual yield of biomass production equals to 18.85 tons per hectare per year.

Yields of Salix and Miscanthus are presented fresh, considering that Salix's moisture content at harvest is 50% and the moisture content of Miscanthus at harvest is 20% (Table 4).

Table 4. Moisture content of biomass produced and consumed for thermal energy production and required Cultivation area.

Name of the item		Miscanthus chips	Miscanthus pellets	Salix chips	Salix pellets
Biomass consumption in boiler	W%	15	10	40	10
Biomass received at harvest	W%	20	20	50	50
Cultivation area <i>(rounded up to whole ha)</i>	ha	26	23	42	40

Inventory analysis describes all the inputs and outputs of materials and energy across the system boundaries. The input to the system at such stages as cultivation, harvesting with chipping, transporting and storage, and disposal of products of combustion contains consumption of diesel, pesticides and fertilizers (Table 5, Table 6 and Table 7). Additionally, primary energy consumed for producing materials and machinery was included, considering the amounts of consumed materials and time spent by machinery and trucks for agricultural and transport operations within the lifecycle.

Biomass fuel input was calculated based on the capacity of the boiler (500 kW), taking into account the work load (4272 h/year), nominal plant load (70%), and boiler efficiency (85% for boiler on chips and 90% for pellets boiler). Additionally, 5% heat losses before supply to consumers were considered.

Table 5. Diesel consumption in the agricultural operations at Miscanthus and Salix plantations, calculated based on the functional unit (1 MJ).

Agricultural operation	Machinery	Miscanthus chips	Miscanthus pellets	Salix chips	Salix pellets
		Diesel, kg/MJ	Diesel, kg/MJ	Diesel, kg/MJ	Diesel, kg/MJ
Disking	tractor (60 kW) + heavy disc harrow	1,513	1,338	2,443	2,327
Herbicide spraying	tractor (60 kW) + field sprayer	1,297	1,147	2,094	1,995
Fertilizer spreading	tractor (60 kW) + fertiliser spreader	0,540	0,478	0,873	0,831
Ploughing	tractor (60 kW) + plough 3-case hinged	4,322	3,823	6,981	6,649
Pre-plant cultivation	tractor (60 kW) + cultivator	0,972	0,860	1,571	1,496
Planting	tractor (65 kW) + potato planter hinged	1,988	1,759	3,211	3,059
Pre-emergence harrowing	tractor (65 kW) + tooth harrow	0,864	0,765	1,396	1,330
Inter-row disking	tractor (60 kW) + stubble disc cultivator	3,025	2,676	4,887	4,654
Harvesting	tractor (135 kW) + SRF harvester	62,277	55,092	100,602	95,811
Removal	tractor (60 kW) + heavy disc harrow	1,513	1,338	2,443	2,327

Table 6. Pesticides consumption in the agricultural operations at Miscanthus and Salix plantations, calculated based on the functional unit (1 MJ).

Pesticide type	Active ingredient	Miscanthus chips	Miscanthus pellets	Salix chips	Salix pellets
		Consumption, kg/MJ	Consumption, kg/MJ	Consumption, kg/MJ	Consumption, kg/MJ
Herbicide	Glyphosate	0,730	0,646	1,179	1,123
Herbicide	2,4-D acid (complex 2-ethylhexyl ether)	0,173	0,153	-	-
Herbicide	Florasulam	0,0024	0,0021	-	-
Herbicide	Pendimethalin	-	-	0,813	0,774
Insecticide	Imidacloprid	-	-	0,123	0,117

Table 7. Fertilizers consumption in the agricultural operations at Miscanthus and Salix plantations, calculated based on the functional unit (1 MJ).

Fertilizer name	Active ingredient	Miscanthus chips	Miscanthus pellets	Salix chips	Salix pellets
Di-amonium-phosphate	9%N, 30%P	-	-	410,67	391,12
NPK	16%N, 16%P, 16%K	95,33	84,33	-	-
Potassium-Magnesium	K ≥ 44...48%, Mg – 4...7%, S ≤ 3%, Na+Cu+Zn+Ca ≤ 20%	-	-	280,08	266,74
UAN-32	32%N	-	-	463,24	441,18
Urea	46.2%N	25,42	22,49	-	-

Transport operations of the cultivation stage considered transporting from and to the local storage by tractors with trailers on a fixed distance of 5 km according to [8]. Transporting of the produced chips to the boiler plant or the pelletizing facility with the following transporting of pellets to the boiler plant considered using double-trailer trucks with a total load capacity of 34 t and a load factor of 34% for Miscanthus chips and a 73% load factor for Salix chips. Transport distance for chips and pellets by truck was a variable to analyse the impact on energy efficiency and GHG emissions reduction of the assessed value chains.

2.2. LCA Methodology and Sustainability criteria

The comparison of energy efficiency of the assessed 'energy crops-to-thermal energy' value chains is based on the Energy Yield Coefficient (EYC and EYC_{NR}) [8, 9] that represents the efficiency of biomass energy conversion taking into account Cumulative Energy Demand (CED) and Cumulative Energy Demand of non-renewable energy sources (CED_{NR}) along their value chains. EYC_{NR} (CEP/CED_{NR}) indicator considers consumption of only non-renewable energy and not accounting RES, like biomass. For energy installations on RES, EYC_{NR} will always be more than 1 and for energy installations on fossil fuels – less than 1. According to the recommendations of the International Energy Agency (results of the fulfilment of Task 32 in the Bioenergy section), in order to achieve sustainable development of bioenergy in the future, the EYC_{NR} for renewable energy plants should be at least more than 2, the recommended value is more than 5. Greenhouse gas emissions reduction is one of the most important indicators when assessing the impact of bioenergy technologies on the environment. Although biomass is considered a CO₂-neutral fuel, during its harvesting, storage, transportation, pre-treatment and utilization operations, fossil fuel energy is consumed, which in turn leads to greenhouse gas emissions. For energy crops, the cultivation stage is added to this list. Carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) are the main greenhouse gases emitted during the life cycle of energy systems. The amount of emissions of all greenhouse gases is reduced to the equivalent amount of CO₂ emissions through the corresponding coefficients. Greenhouse gas emissions reduction (savings) was calculated based on the methodology presented at [10] for heat production installations based on biofuels. Criteria applied in the assessment according to [10] considers the GHG emissions reduction compared

to fossil fuel comparator minimum 70% for electricity, heating and cooling, produced at installations on biofuels that started operation from 01.01.2021 to 31.12.2025.

3. Results and Discussion

The results of the assessment of the energy efficiency of the life cycle of the production of thermal energy from chips and pellets of SRC and perennial grass in a 500 kW boiler are presented in Table 6.

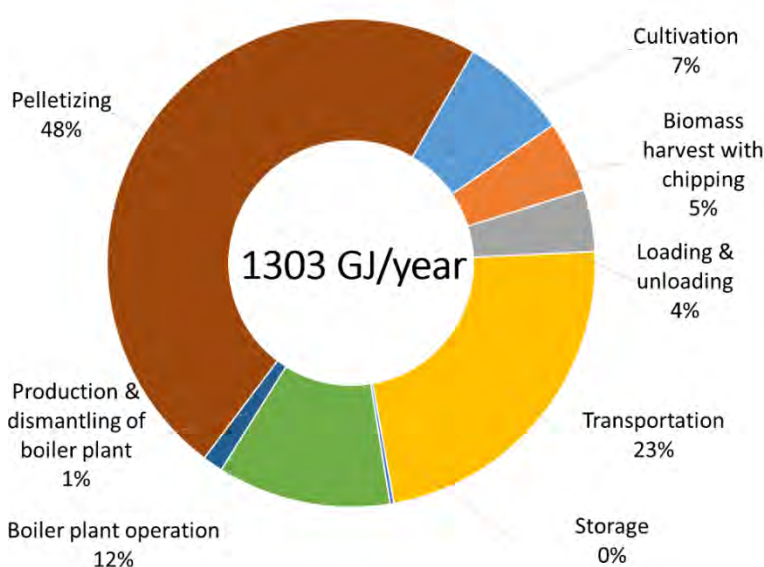
Table 6. Life cycle energy efficiency of thermal energy production from solid biofuel from *Miscanthus x Giganteus* and *Salix Viminalis* in a 500 kW boiler.

Primary energy consumption, GJ/year	Miscanthus chips			Miscanthus pellets			Salix chips			Salix pellets		
	Biofuel consumption	6333			5981			6333			5981	
Soil tillage operations	3,5			3,1			6,7			6,4		
Planting	5,5			4,9			10,5			10,0		
Fertilizer spreading	30,0			26,5			75,2			71,6		
Herbicide application	1,1			0,9			2,9			2,8		
Transporting by tractor (water for herbicides & fertilizers, planting material, fertilizers, biomass)	42,3			37,4			32,6			31,1		
Harvesting with chipping	40,5			35,8			33,6			32,0		
Loading & unloading	30,5			50,6			49,5			53,6		
Pelletizing (with biomass used for drying)	-			504,6			-			626,4		
Storage	3,8			3,8			2,6			3,4		
Boiler plant operation	288,6			149,5			288,6			149,5		
Production & dismantling of boiler plant	19,9			17,0			19,9			17,0		
Transport	Transporting distance, km											
	50	200	700	50	90	800	50	100	400	50	100	500
	134	537	1880	108	195	1734	230	461	1843	150	299	1495
CED _{NR} , GJ/year	600	1003	2346	939	1004	2564	753	983	2365	1162	1312	2487
CEP, GJ/year	5114											
EYC _{NR} (CEP/CED _{NR})	8,5	5,1	2,2	5,4	5,0	2,0	6,8	5,2	2,2	4,4	3,9	2,1

The obtained results indicate a sufficiently high energy efficiency of these life cycles. The energy yield coefficient EYC_{NR} reaches the value limit of 2 when transporting biofuel to the boiler plant at a distance of about 400 km for *Salix* chips, 700 km for *Miscanthus* chips, 500 km for *Salix* pellets, and 800 km for *Miscanthus* pellets. During the transportation of biofuels for shorter distances, EYC_{NR} will

approach the most recommended value of more than 5. The results obtained for pellets from energy plants are slightly worse than for chips, which is explained by the presence in the life cycle of additional energy costs of pelletizing (Fig. 2).

Figure 2. Cumulative Energy Demand of non-renewable energy by life cycle stages of thermal energy production from Salix pellets in a 500 kW boiler with 100 km transportation.



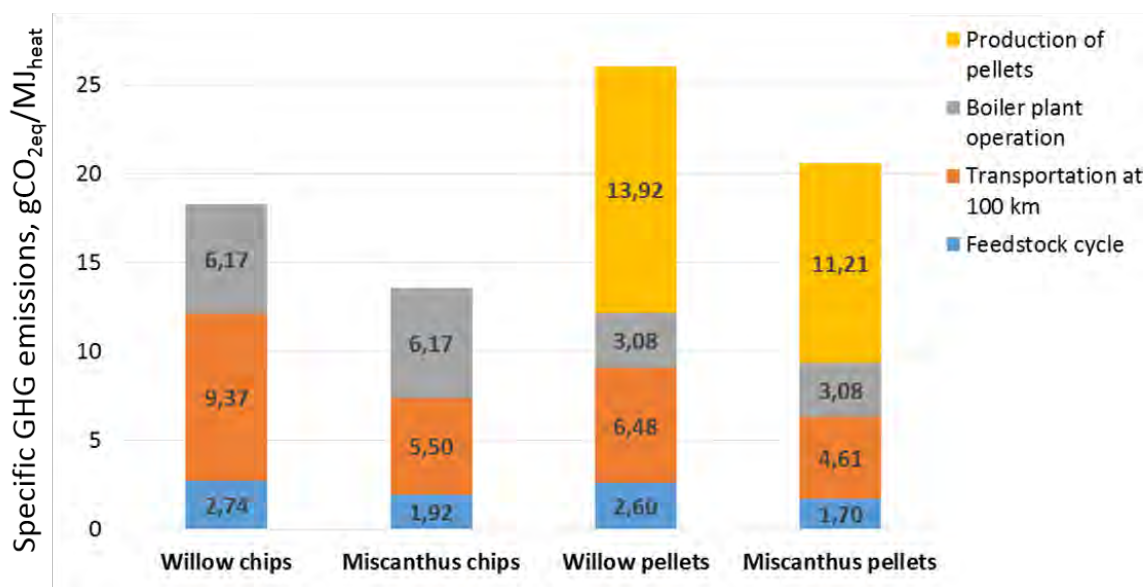
The results of the assessment (Table 7) show that for boilers of relatively small capacity, the specified requirements are met only with a limited distance of transporting of biofuel to the heat production facility. So, for a 500 kW boiler plant, the 70% GHG emissions savings requirement is fulfilled only when transporting distance for chips/pellets to energy plants is within 100-150 km. Although this requirement does not apply to installations < 20 MW_{th}, such a comparison is useful from the point of view of finding ways to further reduce greenhouse gas emissions at different stages of the life cycle of heat production from biomass of cultivated SRC and perennial grasses.

Table 7. GHG emissions reduction in the production of heat from solid biofuel from energy crops in a 500kW boiler.

Energy crop	Transporting distance, km								
	0	50	100	150	200	250	300	400	500
Miscanthus chips	89,7%	86,8%	83,8%	80,9%	77,9%	75,0%	72,0%	66,2%	60,3%
Miscanthus pellets	80,2%	77,8%	75,5%	73,1%	70,7%	68,3%	66,0%	61,2%	56,5%
Salix chips	88,3%	83,3%	78,2%	73,2%	68,1%	63,1%	58,1%	48,0%	37,9%
Salix pellets	75,5%	72,2%	68,9%	65,7%	62,4%	59,1%	55,8%	49,3%	42,8%

For thermal energy production from pellets, the largest emissions of greenhouse gases happen at the pelletizing stage – 13,9 gCO_{2eq}/MJ for Salix and 11,2 g CO_{2eq}/MJ for Miscanthus (Fig.3).

Figure 3. Specific GHG emissions by life cycle stages of thermal energy production from solid biofuel from energy crops in a 500 kW boiler.



4. Conclusions

Life cycle assessment of four value chains of heat production from energy crops (Miscanthus chips, Miscanthus pellets, Salix chips, Salix pellets) revealed that the most energy intensive stages belong to production of pellets and operation of the biomass boiler plant 500 kW, as well as transportation. Maximum transportation distances by auto transport that allow to receive five times more heat energy than consumed non-renewable energy within the life cycle of biofuels in form of chips are 100 km for Salix and 200 km for Miscanthus. Maximum transportation distances by auto transport for pellets that allow receiving two times more heat energy than consumed non-renewable energy within the life cycle are 500 km for Salix and 800 km for Miscanthus. The requirement of 70% emission reduction compared to the fossil fuel equivalent system is reached for transportation distances for Salix chips of 180 km and 80 km for pellets, and for Miscanthus of 325 km for chips and 200 km for pellets.

References

1. State Statistics Service of Ukraine, Energy balance of Ukraine for 2020, Express-release, 30.11.2021. Available online: <https://ukrstat.gov.ua/express/expr2021/11/147.pdf>
2. Natsional'nyy plan diy z vidnovlyuvanoyi enerhetyky na period do 2020 roku [National Renewable Energy Action Plan until 2020] (Ukr.) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80#n10>
3. Shafarenko Yu. Vidnovlyuvana enerhetyka, yak shlyakh do staloho rozvytku rehioniv ta Ukrayiny v tsilomu. Prezentatsiia na onlayn-seminari "Spryannya enerhetychniy bezpetsi ta stalomu rozvytku mistsevyykh hromad v Kharkivs'kiy oblasti" [Renewable energy as a way to sustainable

development of regions and Ukraine as a whole. Presentation at the online seminar "Promoting energy security and sustainable development of local communities in the Kharkiv region"], 20.05.2021, Kyiv. (Ukr.)

https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2021/05/shafarenko_re_20052021_3.pdf

4. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Tryboi A.V. Perspektivy vyrashhivaniya i ispol'zovaniya energeticheskikh kul'tur v Ukraine. Chast' 2 [Prospects for growing and use of energy crops in Ukraine. Part 2] // Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat engineering], 2015, V.37, No5, pp. 58-67. (Rus.)
5. Khawaja, C.; Janssen, R.; Rutz, D.; Colangeli M.; et al. Promoting sustainable use of underutilized lands for bioenergy production through a web-based platform for Europe. In Proceedings of the 27th European Biomass Conference and Exhibition, Lisbon, Portugal, 27–30 May 2019; pp. 1921–1924.
6. Shafarenko Yu. Zakonodavcha polityka shchodo pidtrymky vyroshchuvannya enerhetychnykh roslyn. Prezentatsiia na vebinari "Enerhetychni kultury dlia bioenerhetychnykh proiektiv: perspektyvy dlia Ukrainy" [Legislative policy to support the energy crops growing. Presentation at the webinar "Energy crops for bioenergy projects: prospects for Ukraine"], 09.09.2020, Kyiv. (Ukr.)
https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/09/Shafarenko_SAE_09092020.pdf
7. Ukraine Forth Progress Report on promotion and use of energy from renewable sources 2018-2019, 2020. https://www.energy-community.org/dam/jcr:342ac109-35d4-4233-8d7e-74d2d534ab9f/UE_RES_PR_122020.pdf
8. Tryboi O.V. Efficient biomass value chains for heat production from energy crops in Ukraine. *ENERGETIKA* 2018, Volume 64, No2, pp. 53–61.
9. Nussbaumer T., Oser M. Evaluation of biomass combustion based energy systems by cumulative energy demand and energy yield coefficient. Report for International Energy Agency and Swiss Federal Office of Energy, 2004. Available online: <https://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/24/2017/03/Nussbaumer IEA CED V11.pdf>
10. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Narrative Medicine to counteract the spread of zoonosis on natural and anthropized areas due to the effects of climate change and globalization

Raoul Ciappelloni^{1*}, Maria Luisa Marenzoni², Eros Rivosecchi¹, Matteo Rocetti¹,
Andrea Domenichini³, Marco Servili⁴, Angelo Carfagna⁵, Stefania Mancini⁶, Angelika Riganatou⁷,
Luciano Sonaglia⁸, Mehmet Erman Or⁹, Bengü Bilgiç⁹, Md Tanvir Rahman¹⁰

¹ Istituto Zooprofilattico Sperimentale dell'Umbria e delle Marche, Perugia. Italia.

² Dipartimento di Medicina Veterinaria, Università degli Studi di Perugia, Italia.

³ AUSL Romagna UO Sanità Animale e Igiene degli Allevamenti e Produzioni Zootecniche, Rimini. Italia.

⁴ Medico Veterinario ex ASUR Marche, Ascoli, Italia

⁵ Medico Veterinario ex Servizio Veterinario Sanità Animale Camerino, Italia.

⁶ Medico Veterinario Libero Professionista, Perugia. Italia.

⁷ AST, Igiene degli Alimenti di Origine Animale, Fermo. Italia.

⁸ Medico Veterinario Libero Professionista, Perugia. Italia.

⁹ Veterinary Faculty, Department of Internal Medicine, Istanbul University-Cerrahpasa, Turchia.

¹⁰ Department of Microbiology and Hygiene, Bangladesh Agricultural University, Mymensingh, Bangladesh

* raoul@ciappelloni.it

Abstract: This communication concerns the launch of a Narrative Medicine editorial project ("Micro Epidemic One Health" (Italian Ministry of Health Research - IZS UM 04/20 RC) intended to publish stories on zoonoses (infections transmitted from animals to humans and vice versa), through a Web annex named "Stories of Zoonoses" to the Open Access e-Journal Public Veterinary Health - SPVet.it (<https://spvet.it>). The "Stories of Zoonosis online platform" (<https://storiedizoonosi.spvet.it>) is easily accessible using a personal computer, tablet or smartphone, through a common Web interface via the Internet. Narratives published in this Cloud concern case studies, directly drawn from Health Service Practitioners field experience. Taken together, they constitute an "in progress" Open anthology on zoonoses diseases (all stories are under a Creative Commons Attribution 4.0 International license), directly connected to peer-reviewed scientific literature, endowed with peers' annotations/integrations and biomedical Open Data. Narrations have been drafted to encourage different levels of use. They may be used for self-learning purposes

and training of specialists in Human and Veterinary Medicine and for developing a high Public Health culture in the Society in order to prevent the spread of zoonoses. Finally, but no less portant, this Project represents a form of intergenerational solidarity and coaching between Healthcare Professionals of different ages, allowing young Doctors to benefit from the experience of older colleagues.

keywords: zoonoses, narrative medicine, veterinary, one health, storytelling.

1. Introduction

This communication presents the editorial project of Narrative Medicine "Micro Epidemic One Health", initiated in 2021 as a research project of the Italian Ministry of Health, by the Experimental Zooprophyllactic Institute (IZSUM) and the Department of Veterinary Medicine of the University of Perugia Italy. It stems from a previous initiative of IZSUM in 2019 aimed at creating, with different partners, an activity based on storytelling and serious games on zoonoses. Micro Epidemic One Health aims to create the first anthology of stories about zoonoses (diseases that can be transmitted between animals and humans), mainly based on case studies drawn from the experience of Veterinary doctors, Professionals, and Healthcare workers. This approach aims to address two important issues for public health. Firstly, in a perspective of participatory health management, it is important to focus the attention of Healthcare Operators and the general public on emerging diseases such as zoonoses. This is even more crucial considering that phenomena such as globalization of markets and climate change are making these infectious diseases increasingly present, widespread, and aggressive. The events related to the Covid-19 pandemic, which if not considered a zoonosis in the strict sense can be defined as "reverse zoonosis" [1], [2] or "emerging infectious disease (EID)" of probable animal origin [3], have shown that alternative documentation systems are necessary to manage such emergencies, which are highly accessible and facilitate the acquisition of biomedical information [4], [5].

This topic is of considerable importance as "eight out of ten Italians have never heard the term zoonosis" [6]. Therefore, information on emerging and re-emerging infectious diseases, closely related to the relationship between humans and the animal world, the natural and anthropized environment, is currently of great interest not only to medical personnel but also to Civil Society as a whole.

Secondly, having easily accessible documentary material, such as stories and interviews, is essential to promote (and in some cases recreate) information exchange between experienced healthcare professionals and younger Healthcare Operators. This is also useful for creating educational resources for post-graduate training and onboarding into the healthcare system. Furthermore, it can be observed that some zoonoses, due to successful eradication plans implemented in the past, are now less prevalent in certain areas and may be difficult to detect by healthcare professionals with limited operational experience.

Therefore, the "storytelling" of professional experience by experienced doctors becomes a preferred method for conveying data, intervention methods, operational precautions, and the

application of regulations and norms to an audience of experts and interested parties, especially in complex and uncertain cases.

Electronic publishing can thus promote an intervention situated in a "circular health" perspective [7], leaving room for an informative approach that recognizes the importance of less structured communication and "Grey Literature" [8], where the personal experiences of Healthcare Operators active in the territory can be valued.

2. The Micro Epidemic One Health Platform

The Micro Epidemic One Health Project is an initiative of collaborative writing/editing "in continuous update" on the stories of zoonoses. The anthology is open to those who, in various capacities, participate in collecting these specific narratives to share them, submit them to critical review, link them to peer-reviewed scientific literature in a context inspired by crowdsourcing.

This "expanded scientific communication on zoonoses" is qualified to give space to visual storytelling, multi-channel communication, and production of open data. The project's Web platform is located at <https://storiedizoonosi.spvet.it/> and is made available online as an attachment to the SPVet.it Scientific Journal (<http://spvet.it>). The user interface (beta version) is shown in Figure 1.

The Content Management System allows for the publication of stories without the need for particular web programming skills, making the system suitable for wide interaction with the project's community of interest.

Figure 1. Micro Epidemic One Health - "Stories of Zoonoses", Graphical User Interface.

DEBUG VERSIONE 1.0 - PUBBLICAZIONE PROVVISORIA IN FASE DI TEST. La versione funzionante sarà disponibile il 15 Aprile 2023.
ALLEGATO ALLE JOURNAL SPVET.IT [ISSN 1592-1581] - redazione-spvet@izsum.it - redazione-spvet@izsum.it Tel. 075-341207.

Open Access Repository - Open Journal Società Pubblica Veterinaria <https://open.it> <https://edizioni.spvet.it> (ISSN 1592-1581). Sede - Via G. Salvemini n.1 - 06126 Perugia (Pg); Telefoni: Redazione 075-341207 / email: redazione-spvet@izsum.it / edizioni@izsum.it Istituto Zooprofilattico Sperimentale dell'Umbria e delle Marche "Togo Rosati", Srf: www.izsum.it www.cispa.gov.it

Home [Inserimento di una nuova storia di zoonosi](#) [Motore di Ricerca](#) [Login](#) [Registrati](#)

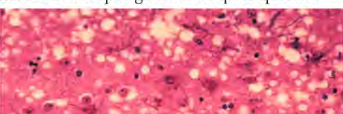
STORIA PUBBLICATA VETERINARIA [Home](#) [Inserimento di una nuova storia di zoonosi](#) [Motore di Ricerca](#) [Login](#) [Registrati](#)

STORIE DI ZOOZOSI

Avete raggiunto il repository narrativo dedicato ai «casi di Zoonosi». Qui troverete, in forma di racconto, esperienze raccolte dalla voce degli Operatori del Servizio Sanitario che hanno affrontato questi casi di studio, con l'aggiunta di commenti di esperti, informazioni di contesto, riferimenti alla letteratura scientifica e strumenti per partecipare in crowdsourcing alla elaborazione delle «storie di zoonosi» e del software gestionale associato. Questa antologia è stata promossa nell'ambito del [Progetto Micro Epidemic One Health](#) per sostenere la ricerca, lo studio, l'aggiornamento professionale ed ampliare la condivisione di informazioni biomediche sulle malattie che si trasmettono dagli animali all'uomo. [Presentazione dell'iniziativa «Storie di Zoonosi»](#).

Scegli zoonosi:

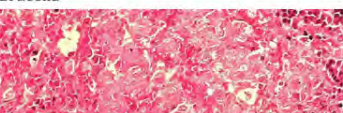
BSE - Bovine Spongiform Encephalopathies



La BSE - Bovine Spongiform Encephalopathies è una grave patologia neurodegenerativa facente parte delle encefalopatie spongiformi trasmissibili (TSE). Attualmente è conosciuta in tre forme: BSE classica, BSE atipica di tipo H e di tipo L. Colpisce, con esito mortale, i bovini ed anche l'Uomo (variante di Creutzfeldt-Jakob, diagnosticata nel 1996). La BSE è causata da una proteina Prionica (PrP), assimilabile dall'animale con la razione alimentare. Pur essendo possibile un decorso della malattia asintomatico, le principali manifestazioni della BSE nel bovino sono evidenti e comprendono: alterazioni comportamentali, incoordinazione motoria, difficoltà di deambulazione, perdita di peso, ridotta produzione di latte. Dal 1989 la Commissione europea e gli Stati membri dell'UE hanno attuato misure per la gestione dell'Encefalopatia spongiforme bovina.

[Vai alle storie di zoonosi](#)

Brucella

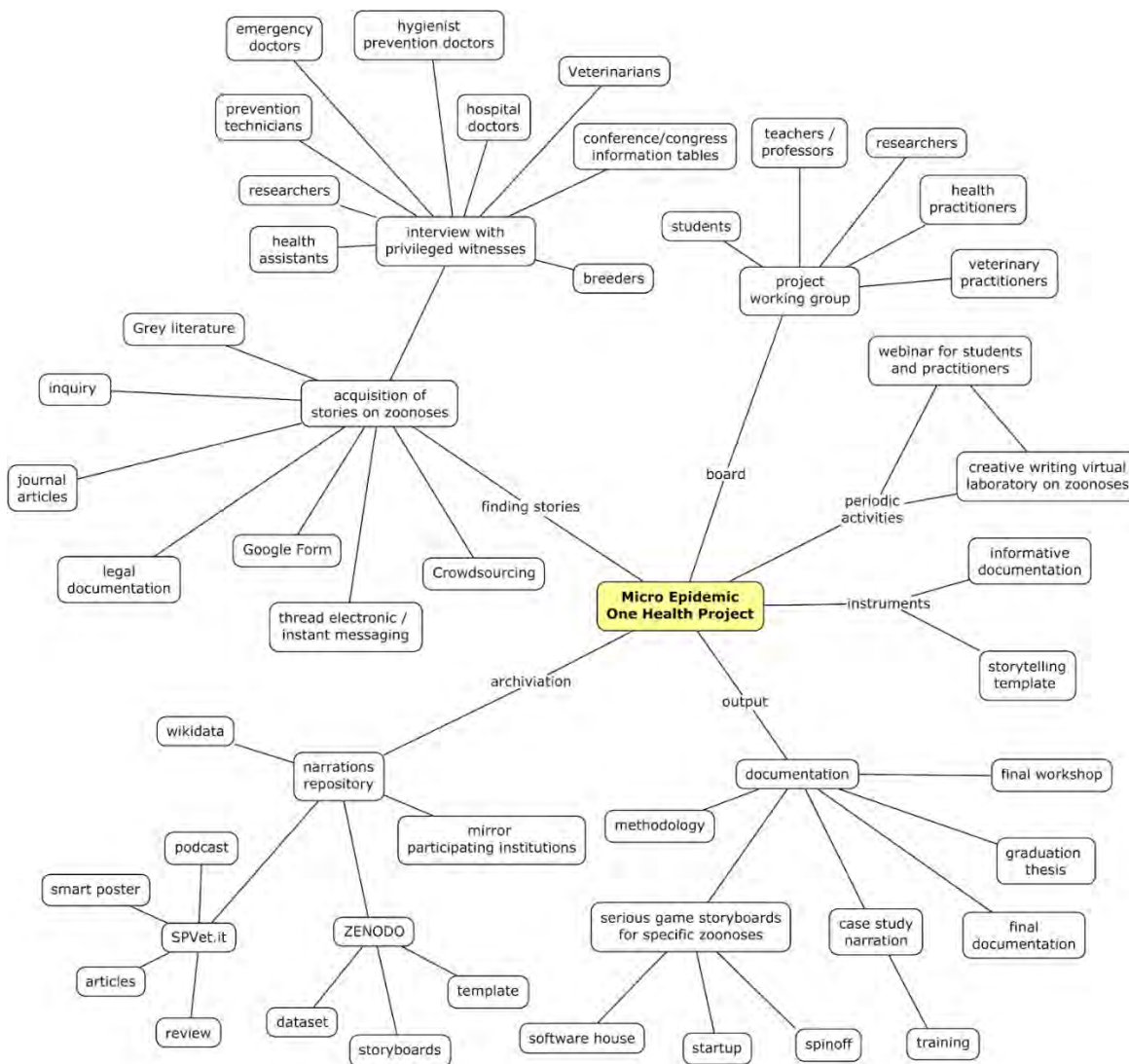


La *Brucella* spp. è un batterio Gram negativo, aerobico, di piccole dimensioni e forma sferica, agente infettivo di una malattia storicamente nota come "febbre malsesa". Le specie di *Brucella* più comuni sono *B. melitensis* (da ovini e caprini), *B. suis* (da suini), *B. abortus* (da bovini) e *B. canis* (da cani). Colpisce principalmente gli animali e nel bovino causa mastite ed aborto. L'uomo si infetta per contatto con escrezioni e secrezioni di animali malati, per ingestione di alimenti contaminati (tipicamente carne poco cotta, latte crudo, formaggi freschi, burro e panna contaminati) e inalando aerosol contenenti il batterio. Raramente l'infezione si propaga per trasmissione da persona a persona. I soggetti, soprattutto se deboli e con sistema immunitario compromesso, contraggono la brucellosi evidenziando una sintomatologia non specifica simil- influenzale, caratterizzata da febbre che può divenire ricorrente, malessere generalizzato, sudorazione notturna e debolezza.

[Vai alle storie di zoonosi](#)

The Figure 2, illustrates the project's structure and its components, as well as the actors involved. The sources of information can be represented by both narrators who share their experiences and various sources such as electronic forms used in research and education projects, monitoring of electronic messaging, grey literature, and others.

Figure 2. Mindmap outlining the structure of the Micro Epidemic One Health Project (2023).



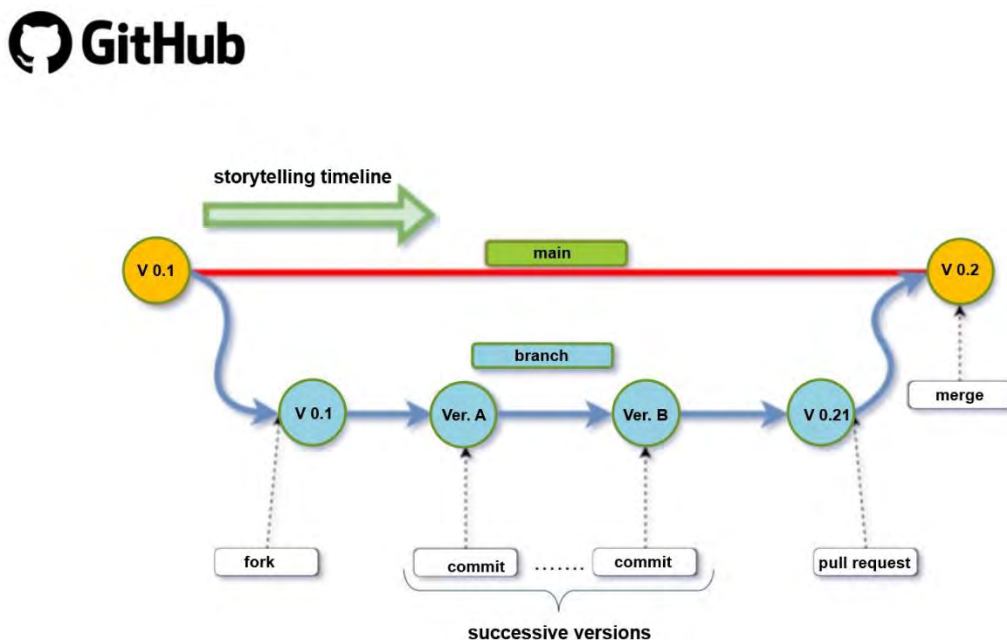
Micro Epidemic One Health Project. Italian Ministry of Health code [IZS UM 04/20 RC] 2023
 e-Journal SPVet.it (<https://spvet.it> / <https://indice.spvet.it> / <https://storiedizoonosi.spvet.it>)

The "Stories of Zoonoses" platform uses the PHP Web programming language, the development framework Laravel with Model View Controller architecture, and the support of a PostgreSQL database management system. The system uses GitHub hosting service (<https://github.com/>), for collaborative software development. The platform is easily accessible from personal computers, tablets, or smartphones through a common web interface. Each participant in the software development can use their local repository (a copy of the central one) to make changes / corrections that they consider

appropriate and subsequently propose their implementation in the remote system. The "Stories of Zoonoses - Micro Epidemic One Health" repository fulfills two functions (managed by the editorial board of the project):

1. Reading, editing, and inserting code for the evolution of the computer system, covered by the Apache 2.0 License, with the aim of:
 - allowing the software to be freely used for personal study;
 - enabling anyone (by developing appropriate documentation) to copy and implement it for their own purposes (participation in technical-scientific editorial networks, publication, and further development).
2. Inserting, integrating/commenting, and linking to external informative resources of new stories that together constitute an Anthology of freely accessible tales / interviews on zoonoses. It should be noted that each published story is covered by the "Creative Commons Attribution 4.0 International License". This opens up the use of narratives for publishing, teaching, and training by writing groups involved in the MEOH Project or similar activities.

Figure 3. Software development process in the "Stories of Zoonoses - Microepidemic One Health" Platform. To create a new branch of a repository for which one is not an administrator or collaborator, it is necessary to start a procedure (fork) in which the file is modified. In the end, this can be merged into the main code by uploading it (merge).



This organization represents a fundamental aspect of the Micro Epidemic One Health Project and makes the platform susceptible to continuous development aimed at creating networks of remote designers and writers for collaborative elaboration.

Regarding the elaboration of stories, interviews, and other texts that compose the anthology (such as narrative review articles, story integrations, and podcasts), all these documents were written following the general protocols published in Section 2 of the Project Documentation page (annexed to

SPVet.it Version 1.5 - <https://spvet.it/microepidemic.html>). The protocols were published to be subjected to social peer review through an interaction based on Google Forms.

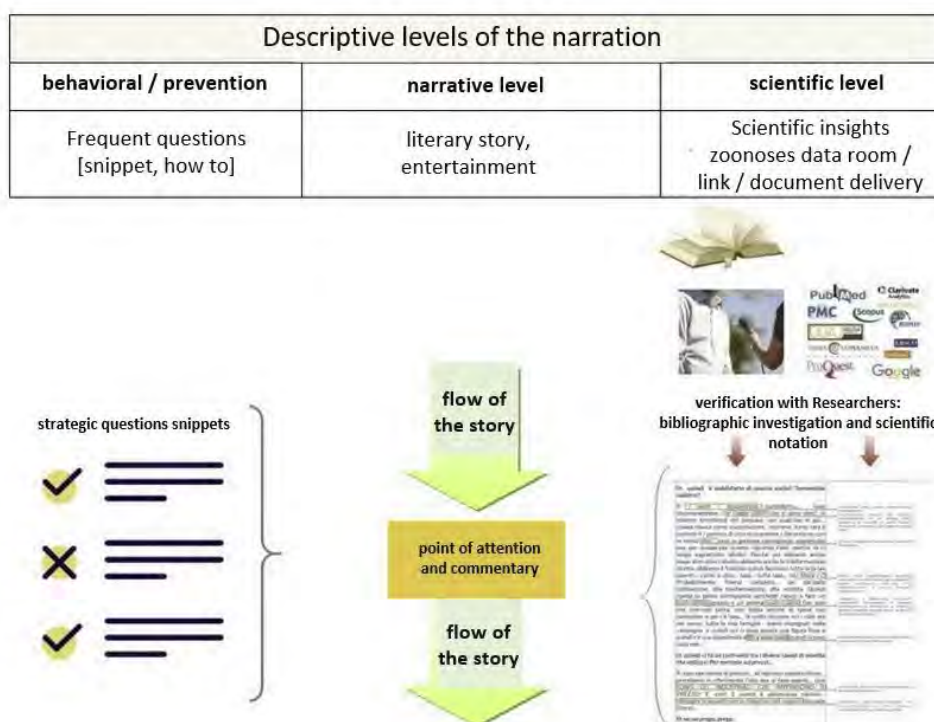
The stories follow the document: "Basic Methodological Protocol for collecting 'Zoonosis Stories' in the form of interviews / narratives" (<https://spvet.it/microepidemic/MEOH-02.html>).

They are all directly linked to peer-reviewed scientific literature and available biomedical Open Datasets.

3. Interface for accessing zoonosis stories

All stories have been organized to allow multiple levels of access as exemplified in Figures 4 and 5.

Figure 4. Multilevel usage of the literature issued in the MEOH Project. Specific informative demands, for different readers, are satisfied. (from "Sanità Pubblica Veterinaria", n. 124, February 2021)

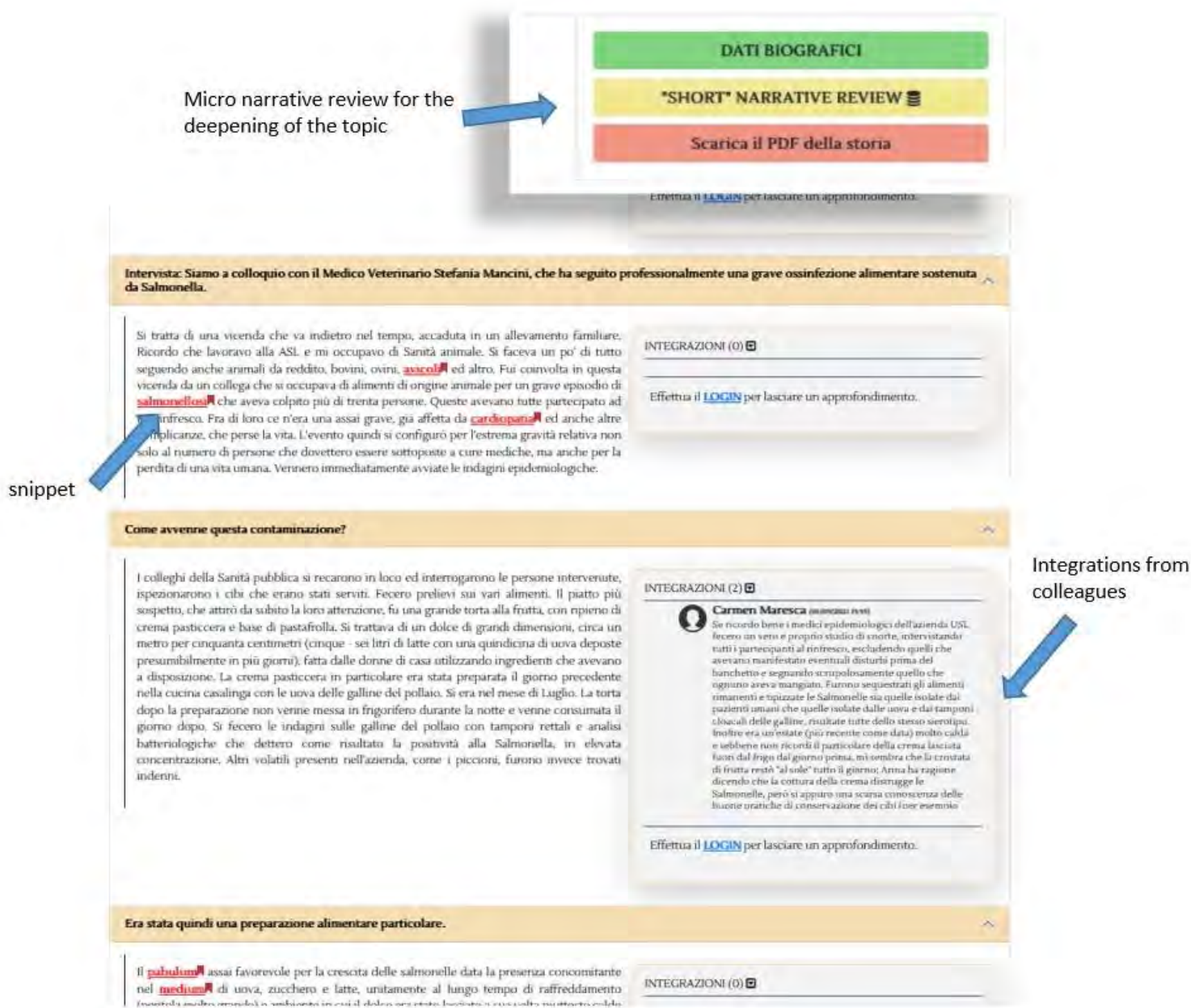


Here, it can be seen that the reader can use each document in several ways:

- as a simple text to read;
- as a basic information source, using Google "snippets" (links scattered throughout the story) that help clarify points that may be difficult to understand for non-experts. The snippets activate small pop-up windows, with texts, sometimes accompanied by images, that help readers better understand the information conveyed by the story. They are designed for use by Students, People interested in zoonoses, and Policymakers;
- as a real case study, in which for significant steps, the reader can find (or request) "integrations" or "in-depth analyses," observations from professionals who have already faced and solved similar issues. Micro-reviews following the Protocol on the development of narrative reviews for Zoonosis

Stories are also available (Version 1.3 - <https://spvet.it/microepidemic/MEOH-03.html>) that discuss the latest literature specifically analyzing the theme of the story. In this way, this documentation can be proposed for personal study and in-depth analysis by Doctors, Veterinarians, and Healthcare Operators, in order to address a particular professional problem. Figure 5 shows the layout of the pages of the Anthology that allows this use.

Figure 5. The stories on zoonotic diseases can be read at different levels. In a simpler way by using Snippets, or in a qualified way, by using integrative notes and narrative reviews of the scientific literature.



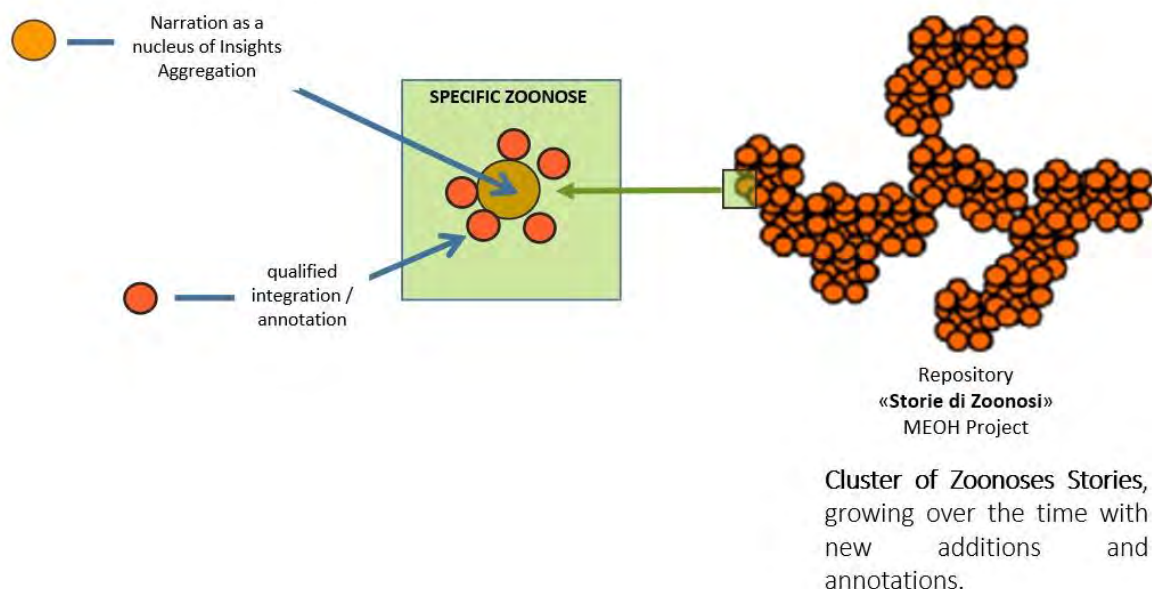
Box. 1. The Micro Epidemic One Health - "Stories of Zoonoses" interface.**MEOH digital paratext interface provides:**

- Links to relevant scientific publications, positioned along the text,
- Footnotes that constitute additions / comments on paragraphs or particular periods of the narration, written by readers experts,
- Pages dedicated to micro-reviews on the specific story, accessible through the Zotero Web cloud,
- Links to online training resources on the use of Micro Epidemic OH interface,
- Colophon box with information relating to the publication: typographical notes, date, printer, editorial contacts and copyright, particularly, the use of Creative Commons licenses (mainly CC BY / CC BY SA),
- Notes in the form of pop-ups ("snippets") on technical terms related to biomedical jargon to readers without medical skills,
- Sitography, links to the Websites from the MEOH interface,
- Images (still / animated / video clip) provided by storytellers. Subject to validation, images, videos and podcasts can be provided by readers (e.g. Veterinarians and Citizen scientists) who have acquired this documentation during their activity.

4. A "center of aggregation" for Zoonosis Stories

During the Project, healthcare professionals (Veterinarians who have worked in the Health Service and researchers) have been invited to tell, in a qualified way, a case study on a specific zoonosis that they have personally followed. This can ultimately constitute a sort of "center of attraction" for zoonosis stories, as shown in Figure 6, where the platform represents an aggregation that grows over time with new additions (zoonoses, annotations, scientific information)".

Figure 6. Micro Epidemic One Health Environment for the basic type of zoonoses: viral, bacterial, parasitic, mycotic, or unconventional (prions) as in Chromel B.B., [12].



It should be noted that thanks to the "Open" organization of the Platform created within the Micro Epidemic One Health Project, the dissemination of the collected zoonosis stories can benefit significantly from the active promotion by the readers themselves, in the sense given to this dynamic (spreadability) by Henry Jenkins, which indicates a self-propelling capacity of literature spread through various media, particularly thanks to the involvement of the users themselves.

Through the Micro Epidemic One Health platform, readers can personally take part in the text review process, even proposing updates or expressive improvements. The hope is that a "user-circulated content" [13] with continuous updates, as happens within a Fandom community, centered on zoonoses, can thus come to life. The development of this editorial system is particularly desirable in the context of documentation for educational purposes, and particularly for fulfilling the obligations of professional updating for Physicians and Veterinarians.

5. Conclusion

Zoonoses have been part of the human experience since the beginning of our species. Narrating them can help to counter their spread, which is evident to all as a consequence of climate change and the mass movements of humans, animals, and goods around the planet.

The consent received for this initiative has highlighted how storytelling can connect different needs, including scientific information. For example, this literature can also be used as a cultural product and for recreational purposes. In this regard, we mention the experience carried out in this project for the development of "textual serious games" based on events related to infectious diseases, with the aim of using this storytelling for the training of Students and Healthcare Practitioners.

The use of artificial intelligence for the generation of stories on zoonoses, carried out in this project with the production of an educational tale about Leptospirosis by ChatGPT-OpenAI, [14], represents a research area of great interest, not only to test the expressive potential of intelligent bots but also for the creation of interactive literature with various purposes, such as recreation and the simulation and analysis of possible epidemic events.

Vet stories, with their *lightness, communicative speed, accuracy, visibility* of meanings, *multiplicity* of sharing on the Internet, and *consistency* with the available scientific knowledge, represent an important "place of primary aggregation" and self-information for anyone interested in zoonotic diseases. Moreover, this literature, available through smartphones and tablets, with different levels of detail, is increasingly strategic for implementing effective prevention policies for emerging zoonoses.

6. Bibliography

1. Pramod, R.K.; Nair, A.V.; Tambare, P.K.; Chauhan, K.; Kumar, T.V.; Rajan, R.A.; Mani, B.M.; Asaf, M.; Pandey, A.K. Reverse zoonosis of coronavirus disease-19: Present status and the control by one health approach. *Veterinarian World* **2021**, *14*, 2817-2826.
2. Koepfel, K.N.; Mendes, A.; Strydom, A.; Rotherham, L.; Mulumba, M.; Venter, M. SARS-CoV-2 Reverse zoonoses to pumas and lions, South Africa. *Viruses* **2022**, *14*, 120.

3. Haider, N.; Rothman-Ostrow, P.; Osman, A.Y.; Arruda, L.B.; Macfarlane-Berry, L.; Elton, L.; Thomason M.J.; Yeboah-Manu D.; Ansumana R.; Kapata N.; Mboera L.; Rushton J.; McHugh T.D.; Heymann D.L.; Zumla A.; Kock R.A. COVID-19-Zoonosis or emerging infectious disease? *Frontiers in Public Health* **2020** 26, 596944.
4. Ågerfalk, P.J.; Conboy, K.; Myers, M. D. Information systems in the age of pandemics: COVID-19 and beyond. *European Journal of Information Systems* **2020** 29(3), 203-207.
5. Bari, A.; Khubchandani, A.; Wang, J.; Heymann, M.; Coffee, M. COVID-19 early-alert signals using human behavior alternative data. *Social Network Analysis and Mining* **2021**, 11, 1-17.
6. ANSA. Covid: 8 italiani su 10 non hanno mai sentito 'zoonosi'. **2022**.
https://www.ansa.it/canale_salutebenessere/notizie/medicina/2021/04/30/covid-8-italiani-su-10-non-hanno-mai-sentito-zoonosi_a355b2ed-3779-4b1c-a2f8-03b04adc7787.html(accessed on 31/03/2023)
7. Capua L. Salute circolare - Una rivoluzione necessaria. Editrice Egea **2019**, Milano.
8. Ciappelloni, R.; Fruttini, L.; Montanucci, N.; Heymann, A. J. Destrutturazione controllata delle modalità di accesso alla Library 2.0; per facilitare la formazione di docenti; ricercatori; studenti e operatori del Sistema Sanitario. Atti DIDAMATICA, **2012** Taranto.
9. Pe-Than, E.P.P.; Dabbish, L.; Herbsleb; J.D. Collaborative writing on GitHub: a case study of a book project. In Companion of the 2018. ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing **2018**, 305-308.
10. Longo, J.; Kelley, T.M. (2015). Use of GitHub as a platform for open collaboration on text documents. In Proceedings of the 11th International Symposium on Open Collaboration (pp. 1-2).
11. Merelo, J.J. (2013). Top ten reasons GitHub is a great tool for creative writers.
<https://ijmerelo.medium.com/top-ten-reasons-github-is-agreat-tool-for-creative-writers-d0e8b27de71d> (accessed on 31/03/2023)
12. Chomel, B.B. Zoonoses. *Encyclopedia of Microbiology* **2009**, 820–9. Epub 2009 Feb 17. PMCID: PMC7149995.
13. Jenkins, H.; Ford, S.; Green, J. (2013). Spreadable Media: Creating Value and Meaning in a Networked Culture. NYU Press USA.
14. Ciappelloni, R.; Marenzoni, M.L.; Costarelli, S. Caso di studio sull'applicazione dell'Intelligenza Artificiale (AI) alla Medicina Narrativa per la scrittura di una flash fiction sulla Leptospirosi nell'ambito del Progetto "Storie di Zoonosi" - Case study on the Artificial Intelligence (AI) application to Narrative Medicine for writing flash fiction on *Leptospirosis* within the Project "Stories of Zoonosis". *Sanità Pubblica Veterinaria* **2023**, n.136. <https://spvet.it/archivio/numero-136/edi136.html> (accessed on 31/03/2023)

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

L'altro: l'aspetto relazionale nella giurisprudenza climatica

Cristiana Angelini^{1*}

¹ Università degli Studi di Perugia

* E-Mail: cristiana.angelini@studenti.unipg.it

Abstract: Il cambiamento climatico ha reso palese come le sorti degli esseri umani, presenti e futuri, vicini e lontani, siano interconnesse e interdipendenti. Questo fenomeno ha altresì reso manifesto come la salubrità del sistema naturale sia preconditione per l'esercizio dei diritti umani, primo fra tutti il diritto alla vita, così come indicato nella Risoluzione 48/13 del Consiglio dei diritti umani delle Nazioni Unite.

D'altra parte, i rapporti IPCC, in particolare quello del 2022 inerente a "Impacts, Adaptation and Vulnerability", hanno mostrato come la distribuzione delle conseguenze del cambiamento climatico fra i soggetti sia differenziata e iniqua. Vulnerabilità preesistenti sono infatti esacerbate dalle conseguenze nefaste del cambiamento climatico e al contempo nuove forme di vulnerabilità si concretizzano con il progredire del fenomeno. Quest'ottica relazionale e di confronto è emersa nel diritto, sia in dottrina sia all'interno della giurisprudenza climatica nazionale e internazionale. Espressione di ciò è l'utilizzo di strumenti giuridici diversi, come il principio di non discriminazione (caso *Duarte Agostinho et al c. Portogallo et al.*), di equità inter- e intragenerazionale, di solidarietà e di vulnerabilità (caso *Daniel Billy et al c. Australia*). Attraverso l'analisi dei recenti sviluppi del diritto internazionale e della giurisprudenza climatica, il contributo si interroga quindi sull'evoluzione del paradigma classico dei diritti umani. Tale disamina, utilizzando i concetti di alterità e interconnessione, intende sottolineare le potenzialità di un approccio ai diritti umani che garantisca il contemporaneo benessere dell'uomo e della natura, intesi non come poli distinti e opposti, ma come elementi di un sistema integrato di convivenza e scambio.

Keywords

Ambiente salubre; cambiamento climatico; Comitato ONU; Corte EDU; diritto internazionale; diritti umani; giurisprudenza climatica; IPCC; vulnerabilità;

1. La relazione simbiotica fra diritti umani e condizioni naturali

1.1. Introduzione e analisi dell'evolversi delle prospettive nelle fonti di diritto internazionale ambientale

Il 21 ottobre 2022, durante la prima conferenza stampa dall'assunzione del mandato quale *Special Rapporteur* delle Nazioni Unite per la promozione e protezione dei diritti umani nel contesto del cambiamento climatico, il Prof. Ian Fry ha definito il cambiamento climatico come "[...] *the largest most pervasive threat to the natural environment and societies we have ever experienced*" [1].

D'altra parte, è noto ormai come l'eziologia di questo fenomeno e il suo aggravarsi sia imputabile in larga parte alle attività umane, come ribadito nell'ultimo *Synthesis Report* dell'IPCC, par. A.1.[2].

Risulta dunque lecito interrogarsi circa la percezione del legame fra uomo e natura, in questo caso nell'ambito del diritto internazionale, con particolare riguardo alla rilevanza della salubrità dell'ambiente per l'essere umano e per il godimento dei propri diritti. Queste riflessioni intendono sottolineare le evoluzioni incorse in particolare negli ultimi cinquant'anni, per mostrare come benessere umano e naturale possano allinearsi, a dispetto della tradizionale dicotomia fra visione ecocentrica e antropocentrica.

Il legame tra diritti umani e ambiente è stato perfettamente riassunto dalle parole dello *Special Rapporteur* delle Nazioni Unite sui diritti umani e ambiente David R. Boyd, il quale ha affermato: "[...] *human beings are part of nature, and our human rights are intertwined with the environment in which we live. Environmental harm interferes with the enjoyment of human rights, and the exercise of human rights helps to protect the environment and to promote sustainable development*" [3].

Quanto affermato da Boyd condensa riflessioni dottrinali e stratificazioni normative a livello di diritto internazionale e interno, che si sono susseguite nel tempo a partire dagli anni Settanta. Pur non essendo né possibile né utile in questa sede procedere ad una disamina completa, occorre tuttavia segnalare alcuni passaggi fondamentali.

Come è noto, la Dichiarazione di Stoccolma ha svolto il ruolo di apripista per lo sviluppo del diritto internazionale ambientale, focalizzandosi per prima sull'importanza di un certo livello di salubrità ambientale per il mantenimento di condizioni di vita dignitose, prodromiche per un efficace esercizio dei diritti umani, a simultaneo vantaggio delle presenti e delle future generazioni (Principio 1) [4].

In seguito, al termine della Conferenza ONU su ambiente e sviluppo [5], all'interno della quale è stata adottata anche la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici [6], il Principio 3 della Dichiarazione di Rio [7] e il Report alla base di questa [8] hanno fatto emergere sfaccettature ulteriori, frutto di nuove sensibilità.

In primo luogo, è stata sottolineata la frattura fra modello di sviluppo economico in uso e sostenibilità ambientale nel lungo periodo, evidenziando quindi un contrasto fra attività umane e tutela ambientale. Da questo è derivata in maniera diretta la definizione di equità e responsabilità intergenerazionale, nella quale gli interessi delle future generazioni sono allineati con quelli del sistema naturale, a garanzia della stabilità delle precondizioni per l'esercizio dei diritti umani nel tempo.

In secondo luogo, nella Dichiarazione è stato sollevato un terzo punto attinente alla condizione di disparità nel livello di sviluppo fra i diversi Stati in rapporto alla differente contribuzione alla produzione

di gas effetto serra (Principio 7). Questo stato di disuguaglianza, nonostante l'universalità dell'appello alla tutela del sistema climatico, ha portato a identificare un contrasto fra ambiente e diritto allo sviluppo, fra Paesi più e meno industrializzati, nonché fra tutela dell'equità intergenerazionale e intragenerazionale (fra i più poveri delle generazioni presenti e le generazioni future).

Quanto detto ha permesso di inserire all'interno della discussione sul rapporto fra essere umano e ambiente anche una questione di giustizia redistributiva, di per sé inerente in via esclusiva alla specie umana.

Il risultato di questi nuovi sviluppi è stato la definizione del principio multidimensionale di sviluppo sostenibile, che ha rappresentato una soluzione di compromesso capace di incrociare diritti economico-sociali e di tutela ambientale in chiave diacronica. Oltre a ciò, il concetto di sviluppo sostenibile si è fatto portatore di una visione onnicomprensiva e interrelata, di cui è espressione l'Agenda 2020-30 dell'Organizzazione delle Nazioni Unite [9]. Questo atto di *soft law* ha infatti avuto il merito di aver sviluppato tutti i punti precedentemente elencati inquadrandoli in un panorama onnicomprensivo. La Risoluzione suddetta ha fissato 17 *Goals*, caratterizzati da un imprescindibile carattere di interconnessione e interdipendenza (par. 5 della Risoluzione), in cui obiettivi di contrasto al cambiamento climatico (*Goal* n. 13) e più generalmente di preservazione dell'ambiente si incrociano con quello socioeconomico di azzeramento della povertà (*Goal* n. 1) o con altri apparentemente distanti, come quello relativo alla parità di genere (*Goal* n. 5).

In linea con ciò, il rapporto IPCC (*Summary for Policymakers*) "*Impact, Adaptation and Vulnerabilities*", pubblicato nel 2022, ha dedicato due sezioni (C e D) all'interrelazione fra scelte politiche future non direttamente attinenti agli obiettivi di mitigazione e conseguenze ecosistemiche [10]. Il rapporto ha inteso sottolineare i benefici congiunti fra meccanismi di salvaguardia del sistema climatico (attraverso risposte mitigative e di adattamento) e obiettivi di sviluppo sostenibile dell'Agenda 2020-30. Inoltre, la sezione D ha scelto il termine *sviluppo climaticamente resiliente* per evidenziare come il raggiungimento degli obiettivi di giustizia, di equità e di inclusione sia cruciale per ridurre le emissioni, evitare gli eventi climatici estremi, garantire le possibilità di adattamento resiliente, nonché per evitare fenomeni di mal adattamento.

1.2. Il riconoscimento nel diritto internazionale di un diritto umano ad un ambiente salubre e il legame con il diritto alla vita

L'ultima tappa del percorso ermeneutico-evolutivo poc'anzi rapidamente descritto sembra essere l'affermazione di un diritto umano ad un ambiente salubre, inteso come riconoscimento del diritto a godere di un ambiente dotato di un certo livello di salubrità. Questo sviluppo rappresenta un passaggio ulteriore nella concezione del rapporto fra uomo e natura e potrebbe porsi quale punto di incontro fra visione ecocentrica e antropocentrica. Sebbene infatti la prospettiva non cambi e l'uomo rimanga "la lente" attraverso cui guardare all'esistente, si riconosce, differentemente dal passato [11], la necessità per il benessere della specie umana del benessere dell'intero sistema naturale, portatore di un valore di per sé stesso.

Nonostante vi sia ancora discussione circa la natura [12] e i contorni [13] di tale diritto, il suo inserimento nell'ordinamento giuridico è stato ritenuto elemento capace di promuovere migliori condizioni ambientali [14] e influenzare positivamente l'esercizio di tutti i diritti umani [15], anche in dimensioni non immediatamente riconducibili all'ambiente [16].

Ad oggi più di 150 Stati hanno incorporato questo diritto nei propri ordinamenti ed è stato recentemente riconosciuto quale diritto umano universale dall'ONU. Più precisamente, l'8 ottobre 2021, il Consiglio per i diritti umani dell'ONU ha riconosciuto il diritto umano ad un ambiente sicuro, pulito, sano e sostenibile, con la Risoluzione 48/13[17], mentre l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha operato il medesimo riconoscimento il 28 luglio 2022 con la Risoluzione 76/300[18].

Tuttavia, quanto dichiarato dall'Assemblea Generale differisce parzialmente ma significativamente rispetto a quanto espresso dal Consiglio per i diritti umani. Il testo della Risoluzione della prima oltre a rappresentare, come detto, il frutto di un compromesso fra Paesi industrializzati e Paesi in via di sviluppo [19], mostra una reticenza degli Stati a riconoscere al diritto ad un ambiente salubre il ruolo primario di preconditione per l'esercizio di tutti gli altri diritti. In particolare, se nella Risoluzione del Consiglio per i diritti umani è stato riconosciuto come il degrado ambientale, il cambiamento climatico e lo sviluppo insostenibile costituiscano una delle minacce più pressanti e gravi per la capacità delle generazioni presenti e future di godere dei diritti umani, compreso il diritto alla vita, quest'ultimo riferimento non è rinvenibile nella Risoluzione 76/300. D'altra parte, nel testo dell'Assemblea Generale, accanto al riconoscimento del diritto ad un ambiente pulito, sano e sostenibile quale diritto umano, è assente alcun riferimento al ruolo di esso rispetto agli altri diritti umani, diversamente da come aveva fatto precedentemente il Consiglio per i diritti umani, che lo aveva definito come “[a] *human right that is important for the enjoyment of human rights*”.

Tale assenza risulta significativa alla luce della recente prassi degli organi di monitoraggio ONU dei diritti umani, riguardante proprio il diritto alla vita in relazione agli effetti del cambiamento climatico, come ad esempio nel caso *Ioane Teitiota c. Nuova Zelanda* [20].

Nella comunicazione presentata di fronte al Comitato ONU dei diritti umani, Ioane Teitiota lamentava la violazione del diritto alla vita, proprio e dei suoi familiari, in conseguenza all'ordine di rimpatrio emesso dallo Stato neozelandese dopo l'emigrazione forzata dall'isola di *Tarawa* per sfuggire agli effetti drammatici del cambiamento climatico (salinizzazione delle fonti di acqua dolce, erosione delle coste e delle aree abitabili, inquinamento delle falde acquifere e sovrappopolazione). L'istante chiedeva quindi al Comitato ONU di garantire il rispetto del proprio diritto alla vita ex. art. 6 del Patto sui diritti civili e politici (di qui in avanti il Patto) [21], intendendolo come diritto a condurre una *vita digna*. Tale interpretazione era stata precedentemente enucleata nel Commento generale n. 36 emesso dallo stesso Comitato ONU [22], costituente strumento interpretativo del Patto. In tale Commento il Comitato ONU aveva chiarito che, essendo il diritto alla vita *condicio sine qua non* per l'esercizio di tutti gli altri diritti, necessita di un'interpretazione estensiva, pena il rischio di un danno irreparabile. Aveva affermato quindi che gli Stati sono tenuti ad adottare misure non solo per prevenire situazioni che possano rappresentare una minaccia diretta alla sopravvivenza, ma anche per garantire il godimento del diritto a vivere con dignità. Aveva inoltre inserito il degrado dell'ambiente, il

cambiamento climatico e lo sviluppo non sostenibile tra le condizioni che possono incidere nel godimento di una vita dignitosa.

Sebbene nel caso di specie il Comitato ONU non abbia riconosciuto sussistente la violazione nel merito (per il mancato raggiungimento del livello di gravità della violazione), ha riconosciuto però come il cambiamento climatico e lo sviluppo insostenibile rappresentino «[...] alcune delle minacce più pressanti e gravi alla capacità delle generazioni presenti e future per godere del diritto alla vita» (par. 9.4), stabilendo quindi in via di principio, in linea con il Commento generale, la possibilità di una declaratoria di responsabilità dello Stato, con riguardo agli effetti a breve e a lungo termine del cambiamento climatico, in quanto lesivi del diritto alla vita dignitosa.

È in questo senso che la non menzione del diritto alla vita da parte dell'Assemblea Generale nella Risoluzione 76/300, rispetto a quanto precedentemente assunto dal Consiglio per i diritti umani risulta particolarmente significativa, così come la non ulteriore specificazione del rapporto fra il diritto ad un ambiente salubre e gli altri diritti. In caso contrario, quanto dichiarato dall'Assemblea Generale avrebbe infatti potuto essere inteso quale conferma di questo orientamento, che imputa alla salubrità dell'ambiente (intesa anche nella sua componente climatica) un ruolo preminente, indicandola quale preconditione per il godimento effettivo del diritto alla vita, il quale è a sua volta presupposto per l'esercizio fruttuoso di tutti gli altri diritti.

Anche nel contesto della Convenzione europea dei diritti dell'uomo[23] (di qui in avanti Convenzione EDU), la quale non prevede fra i suoi diritti quello ad un ambiente salubre, l'Assemblea parlamentare del Consiglio d'Europa ha approvato il 29 settembre 2021 una Risoluzione destinata al Comitato dei ministri per l'elaborazione di un nuovo protocollo addizionale[24] che riconosca il diritto a un ambiente pulito, sano, sicuro e sostenibile sia fra i diritti della Convenzione EDU che fra quelli della Carta sociale europea[25].

L'Assemblea parlamentare ha infatti osservato come la protezione indiretta fornita dalla giurisprudenza della Corte (in particolare attraverso il diritto alla vita e il diritto al rispetto della vita privata e familiare)[26] abbia favorito un approccio antropocentrico e utilitaristico all'ambiente, impedendo agli elementi naturali di essere protetti per se stessi, e ha sottolineato come invece il riconoscimento di un diritto autonomo all'ambiente incoraggerebbe a riconoscere, nel tempo, il valore intrinseco della natura e degli ecosistemi, alla luce dell'interrelazione tra le società umane e la natura stessa.

Insieme alla risoluzione, il Parlamento ha anche elaborato una proposta per un nuovo protocollo, che riunisce i principi del diritto dell'ambiente (precauzione, prevenzione, non regressione, equità e solidarietà) [27] e presenta elementi innovativi. Nel preambolo vengono infatti identificate le nuove generazioni fra i destinatari di questo nuovo diritto, e viene espresso un approccio ai diritti umani che incorpora il concetto di responsabilità e quello di diritto collettivo (Sezione 1, art. 1). Va sottolineato tuttavia che, seppur in momenti storici differenti, l'Assemblea Parlamentare aveva già per due volte emesso questo tipo di raccomandazioni [28], ricevendo in entrambi i casi repliche negative da parte del Comitato dei Ministri [29].

2. La condizione di vulnerabilità quale parametro relazionale dei diritti umani e il rapporto con tutela dell'ambiente

2.1. Ambivalenza e complessità del concetto di vulnerabilità

Nell'intreccio fra sistema naturale e sistema umano si collocano i meccanismi di interconnessione fra gli stessi esseri umani, anche con riferimento al cambiamento climatico e alla sua evoluzione.

Infatti, come espresso nel già citato rapporto IPCC *"Impact, Adaptation and Vulnerabilities"* (Sezione B), gli effetti del cambiamento climatico non si riversano sui soggetti in maniera equa né sotto il profilo spazio-temporale, né sotto quello qualitativo, ma esasperano le disuguaglianze già esistenti e ne creano di nuove. In questo senso alcuni soggetti, che spesso vivono condizioni di vulnerabilità preesistenti, sia loro proprie (si pensi ai bambini) [30] sia pertinenti la realtà circostante (si pensi a circostanze contingenti o endemiche sociali, economiche o ambientali), si trovano ad essere i primi testimoni della retrocessione di diritti derivante dall'avanzamento del cambiamento climatico.

Tuttavia, in diritto la condizione di vulnerabilità può divenire altresì elemento "favorevole" all'accoglimento delle domande di giustizia avanzate, qualora correttamente sollevata di fronte a Corti o organi quasi giudiziali di tutela dei diritti umani. Da un lato l'appartenenza ad una categoria considerata vulnerabile può essere riconosciuta quale condizione per godere di diritti sanciti da accordi internazionali preordinati a tutelare specifici gruppi, quali le donne, i minori, o gli anziani. Questo avviene nel caso in cui un gruppo sia considerato titolare di caratteristiche che intrinsecamente e in maniera automatica necessitano di una tutela rafforzata (si veda ad esempio quanto espresso nel preambolo della Convenzione ONU sui diritti del fanciullo) [31].

Alternativamente, la vulnerabilità può costituire elemento di valutazione nei sistemi di tutela destinati alla generalità degli individui, tendenzialmente capace di agevolare l'accoglimento della richiesta. Può infatti favorire sia l'ammissibilità della domanda che l'alleggerimento del livello di gravità della violazione richiesto nel merito, elementi entrambi molto complessi, in particolare nelle cause ambientali e soprattutto in quelle climatiche [32].

Dal punto di vista ermeneutico, nella prima accezione citata, l'appartenenza alla categoria può invece incorrere nel rischio di diventare uno "stigma" [33] che definisce complessivamente l'identità di un individuo, invece che una delle molteplici condizioni di vulnerabilità in cui lo stesso può trovarsi per un periodo più o meno lungo della propria vita. Da ciò derivano due potenziali conseguenze negative in ordine all'effettiva protezione dei diritti umani: da un lato, quello della mancata valutazione per l'individuo appartenente al gruppo delle possibili coesistenti condizioni di vulnerabilità ulteriori e intersettoriali, dall'altro quello dell'esclusione dalla tutela specifica offerta dallo strumento internazionale per chi non è riconosciuto possedere tutte le precondizioni per l'appartenenza alla categoria assunta quale vulnerabile [34].

Differentemente, la seconda accezione citata con riferimento all'attività interpretativa degli organismi internazionali di tutela dei diritti umani valuta l'esistenza della condizione di vulnerabilità tramite l'analisi della globalità degli elementi, anche intercorrenti, esistenti nel caso concreto per l'individuo. Tale prassi offre il vantaggio di trasmettere l'idea di vulnerabilità quale condizione

contingente potenzialmente attribuibile a ciascun individuo, poiché ontologicamente connessa alla stessa fragilità umana [35].

Tuttavia, è opportuno sottolineare come in entrambi i casi la categoria giuridica della vulnerabilità incorpori un imprescindibile aspetto relazionale [36], a tal punto che una sua valutazione è possibile solo fintanto che rimane una condizione separata rispetto a quello che è considerato l'orizzonte comune preso come termine di confronto. Nel momento in cui questa differenza viene a sfumare, specificatamente perché i presupposti scatenanti la condizione di vulnerabilità si espandono in maniera indefinita, allora nessuna protezione ulteriore sarà garantita, e non rimarrà che constatare una generale retrocessione dei diritti di tutti.

2.2. *L'utilizzo della vulnerabilità nella giurisprudenza climatica nei sistemi internazionali di tutela dei diritti umani*

Quanto detto può apparire relativamente astratto, ma assume in realtà una grande importanza con riguardo al contenzioso strategico climatico [37], in cui proprio i soggetti vulnerabili, che hanno percepito per primi e maggiormente l'urgenza del taglio delle emissioni, si sono resi portatori di istanze di preminente interesse pubblico, come quelle a tutela del clima e dell'ambiente. L'accoglimento di queste domande di giustizia, oltre che agli attori, ha il potenziale di portare benefici alla generalità degli individui, e non solo per la specifica riduzione delle emissioni introdotte in atmosfera.

Infatti, se è pur vero che le conseguenze del degrado ambientale e del riscaldamento globale sono disseminate in maniera ineguale, è anche vero che sono destinate a colpire tutti, in assenza di un intervento massiccio e immediato, andando così a espandere e moltiplicare le vulnerabilità e minando le precondizioni stesse per ritenere possibile e ragionevole la garanzia di un certo livello di godimento di diritti.

I casi a riguardo sono molteplici, ma per rimanere sul piano internazionale sono rilevanti certamente il recente caso *Daniel Billy et al c. Australia* [38], presentato di fronte al già citato Comitato ONU, nonché il caso *Sacchi et al. c. Argentina et al.*[39] valutato dal Comitato ONU per i diritti del fanciullo e il caso *Duarte Agostinho et al. c. Portogallo et al.*[40], pendente di fronte alla Corte EDU.

Questi tre casi presentano ciascuno specificità diverse, ma sono accomunati dal fatto di essere stati promossi da soggetti che hanno fatto leva sulla propria condizione di vulnerabilità per l'accoglimento delle loro istanze. A prescindere dall'epilogo (un accoglimento, una pronuncia di inammissibilità e un caso ancora pendente), questi casi costituiscono avamposti di tutela in favore di tutti, promossi da chi è più colpito nel godimento dei propri diritti.

2.2.1. Il caso *Daniel Billy et al c. Australia*

Nel caso *Billy* le popolazioni indigene residenti nelle isole dello Stretto di Torres lamentavano la violazione da parte dell'Australia degli articoli 6 (diritto alla vita), 17 (diritto al rispetto della vita privata e familiare), 24 (diritto del bambino a misure di protezione) e 27 (diritti culturali) del Patto, a causa dell'incapacità dello Stato di attuare misure di mitigazione delle emissioni, nonché misure di adattamento capaci di garantire in futuro la vita sulle isole interessate. Gli istanti affermavano infatti

che l'innalzamento del livello del mare e la morte dei coralli conseguente al cambiamento climatico avevano reso difficile l'accesso alle fonti di alimentazione, oltre che la prosecuzione e la trasmissione degli stili di vita tradizionali, fino a minacciare la stessa vita sull'isola, con la prospettiva di migrazione forzata nel termine di 10-15 anni.

Il Comitato, diversamente da quanto espresso nel caso *Teitiota*, ha accolto nel merito le doglianze dagli autori della comunicazione con riguardo agli articoli 17 e 27 del Patto, riconoscendo per la prima volta uno Stato quale responsabile per le conseguenze del cambiamento climatico.

Tuttavia, come nel caso *Teitiota*, non è stato ritenuto sufficiente quanto allegato dagli istanti per suffragare l'ipotesi di violazione dell'art. 6. Nonostante il richiamo al Commento generale n. 36, è stata infatti data una interpretazione non estensiva del diritto alla vita, qualificando la possibile emigrazione forzata come ipotesi futura e troppo incerta, e comunque legata alla violazione del diritto al proprio patrimonio culturale piuttosto che al diritto a vivere dignitosamente, che potrebbe ritenersi comunque protetto attraverso una ricollocazione sicura [41].

Nonostante ciò, questo caso è stato ritenuto significativo poiché potenzialmente mutuabile presso altri sistemi giudiziari e quasi giudiziari di tutela dei diritti umani (attraverso il così detto *judicial borrowing*)[42] per riconoscere una responsabilità statale nei confronti degli individui per l'inadempimento degli obblighi internazionali in ordine al contrasto al cambiamento climatico[43].

L'elemento della vulnerabilità è stato cruciale nelle valutazioni del Comitato, sia nei profili di ammissibilità che nel merito. L'organo giudicante ha infatti ritenuto soddisfatto il requisito dello *status* di vittima considerando le informazioni fornite dagli istanti sulla base della loro "estrema vulnerabilità" [44], e su questo stesso fondamento ha riconosciuto violati gli articoli 17 e 27 del Patto. Il Comitato ha rinvenuto più elementi di vulnerabilità intercorrenti fra loro: da un lato la vulnerabilità del territorio agli effetti del cambiamento climatico e l'estrema limitatezza delle possibilità di ricollocamento interno, dall'altro l'estrema dipendenza della popolazione indigena dal territorio e dalla sua stabilità, sia per la propria sopravvivenza [45], sia per la prosecuzione della propria vita culturale e per la trasmissione delle conoscenze tradizionali. Proprio in virtù di tali elementi è stato ritenuto che il ritardo nella messa all'opera delle misure di adattamento previste dall'Australia fosse elemento sufficiente a ritenere lo Stato inadempiente nei suoi obblighi positivi di protezione.

2.2.2. I casi *Sacchi et al. c. Argentina et al.* e *Duarte Agostinho et al. c. Portogallo e al.*

Altro utilizzo del parametro giuridico di vulnerabilità è rinvenibile nei casi *Sacchi* e *Duarte*. È necessario premettere che i due casi, seppur accomunati da alcune similarità, presentano fondamentali differenze: in primo luogo il caso *Sacchi* è stato presentato presso un organo di monitoraggio ONU (il Comitato dei diritti del fanciullo), mentre il caso *Duarte* è pendente di fronte alla Corte europea dei diritti dell'uomo. In secondo luogo, il caso *Sacchi* è già stato deciso con una pronuncia di inammissibilità per mancato esaurimento dei mezzi di ricorso interno, mentre il caso *Duarte*, devoluto alla Grande Camera ex art. 43 della Convenzione EDU, risulta ancora pendente.

Nonostante ciò, entrambi i casi seguono un *fil rouge* comune: la violazione da parte di una pluralità di Stati degli obblighi di tutela dei diritti umani internazionalmente previsti, declinati in chiave

diacronica e intergenerazionale. Sono dunque rilevanti per vedere come l'ottica relazionale si possa estendere nel tempo attraverso l'utilizzo dei parametri di equità e attraverso il principio di non discriminazione, nonché come le istanze dei giovani delle generazioni presenti, fondendosi nell'orizzonte temporale e di interessi con le generazioni future, possano costruire "un ponte" per il riconoscimento dei diritti di quest'ultimi e per la contemporanea stabilità del sistema climatico[46].

Nel caso *Sacchi*, sedici ragazzi hanno lamentato la violazione del proprio diritto alla vita (art. 6), alla salute (art. 24), alla prioritizzazione del superiore interesse del minore (art. 3), nonché ai diritti culturali (art. 30) alla luce della citata Convenzione ONU sui diritti del fanciullo, a causa dell'inazione di cinque Stati al contrasto al cambiamento climatico. Il Comitato, nel caso *de quo*, in maniera prevedibile[47], ha ritenuto la comunicazione inammissibile per il mancato esperimento di tutti i possibili mezzi di ricorso interno ma ha al contempo chiarito che le allegazioni dei minori sarebbero state sufficienti ad integrare gli ulteriori requisiti procedurali di giurisdizione e *status* di vittima .

L'utilizzo della propria condizione di fanciulli, quali soggetti vulnerabili, nel caso di specie è stata significativa e multifaccettata[48]. In primo luogo, l'appartenenza alla categoria di minori ha costituito elemento per l'accesso alla tutela offerta dalla Convenzione. In secondo luogo, l'allegazione della violazione dell'art. 3 ha imposto (seppur non nel merito) una valutazione al Comitato di ampio raggio, poiché potenzialmente attinente alle valutazioni politiche dei decisori pubblici in qualsiasi materia e con un ampio orizzonte temporale[49]. Oltre a ciò, i fanciulli hanno invocato la loro natura di esseri viventi ancora in via di sviluppo, al fine di riconoscere una violazione più grave dei propri diritti sia nel tempo presente che in quello futuro, in linea anche con le previsioni di aggravamento delle conseguenze del cambiamento climatico e nella prospettiva dell'attuazione di misure di adattamento che potrebbero in futuro essere ritenute necessarie.

D'altra parte i ragazzi hanno reclamato un ruolo di partecipazione attiva nei processi decisionali attraverso il richiamo all'art. 12 della Convenzione (non inserito tuttavia nel catalogo dei diritti violati), in virtù della loro condizione di soggetti maggiormente vulnerabili e quindi maggiormente interessati.

Similmente nel caso *Duarte* attualmente pendente, sei ragazzi hanno lamentato la violazione da parte di 33 Stati degli obblighi positivi in capo ad essi con riguardo agli Articoli 2 (diritto alla vita) e 8 (diritto al rispetto della vita privata e familiare) della Convenzione EDU, letti in combinato con l'art. 14 (divieto di discriminazione, in conseguenza al mancato rispetto degli impegni di riduzione delle emissioni per il contenimento del riscaldamento globale sotto i due gradi centigradi. In particolare, i ricorrenti hanno fatto riferimento agli incendi occorsi in Portogallo nel 2017 e alle loro conseguenze dannose, oltre che in generale all'aggravamento del cambiamento climatico e alle ripercussioni sulla loro salute psicofisica, anche in prospettiva futura. Nonostante possano essere svolte considerazioni simili a quelle del caso *Sacchi*, le due peculiarità rilevanti del caso di specie attengono all'utilizzo diretto del principio di non discriminazione in chiave intergenerazionale, nonché alla richiesta della Corte *motu proprio* di argomentare anche sull'art. 3 (divieto di tortura e trattamenti inumani o degradanti) della Convenzione EDU.

Sotto il primo profilo, i ricorrenti hanno sostenuto come la negligenza statale stia provocando un iniquo spostamento dei pesi relativi all'adozione delle misure di mitigazione e adattamento verso le

generazioni future, alla luce delle conoscenze scientifiche e tecniche attuali e data la minor contribuzione dei giovani all'aggravamento del cambiamento climatico.

Con riferimento invece al secondo profilo, la richiesta della Corte di argomentare non solo sulle presunte violazioni allegate, ma anche sull'art. 3 (nonché sull'art. 1 del Protocollo addizionale n. 1 - diritto di proprietà)[50] ha fatto sostenere ad alcuni studiosi che l'elemento della vulnerabilità potrebbe giocare un ruolo importante nel giudizio sul merito attinente al livello di gravità necessario per ritenere integrata una violazione del divieto di trattamenti inumani e degradanti[51], con particolare riferimento allo stato di ansia climatica vissuto dai ricorrenti, e anche alla luce della precedente giurisprudenza della stessa Corte sul medesimo articolo[52].

La Corte europea quindi, se supererà le criticità in ordine all'ammissibilità, considerando i minori come più vulnerabili agli effetti negativi del cambiamento climatico, e valutando contemporaneamente la situazione contingente e specifica del Portogallo, potrebbe abbassare nel merito la soglia di gravità richiesta rispetto a quanto accadrebbe con riferimento ad una persona adulta, favorendo un esito del giudizio favorevole ai ricorrenti.

3. Conclusioni

Questo contributo si è mosso nell'ampia cornice entro la quale il diritto affronta il delicato rapporto fra essere umano e ambiente, per sottolinearne gli aspetti di reciprocità e interconnessione.

Partendo dall'analisi delle fonti del diritto internazionale, si è mostrato come la concezione di tale rapporto sia diventata negli ultimi 50 anni sempre più composita ed abbia palesato l'esistenza di un legame inscindibile e duplice fra salubrità del sistema naturale e diritti umani, dove l'uno beneficia del miglior stato dell'altro.

Si è sottolineata inoltre la contemporanea emersione della questione relativa al modello di sviluppo e consumo attualmente in uso, individuato quale ostacolo alla garanzia dell'universalità dei diritti umani in chiave intra- e intergenerazionale, oltre che alla tutela dell'ambiente. All'interno dell'Agenda 2020-30 il concetto di sviluppo sostenibile, espressione di una nuova visione integrante sviluppo economico-sociale e sostenibilità ambientale nel lungo periodo, è stato individuato, anche sulla base di quanto affermato nei rapporti dell'IPCC, quale conferma del rapporto simbiotico fra la globalità dei diritti umani e l'ambiente.

Tale excursus è risultato prodromico a introdurre il fenomeno del riconoscimento a livello internazionale dell'esistenza di un diritto umano ad un ambiente salubre, ritenuto e trattato quale ultimo passaggio logico di questo processo ermeneutico. Sono state messe in evidenza le potenzialità di questo nuovo approdo quale sintesi fra le prospettive antropocentriche e quelle ecocentriche, spesso contrapposte in dottrina. Si è argomentato infatti come, sebbene inserito nel catalogo dei diritti umani, il diritto ad un ambiente salubre potrebbe far mutare la coscienza dell'uomo rispetto al proprio ruolo nel sistema naturale, inserendolo all'interno e in connessione con esso, e non al di sopra e distaccato da esso.

Attraverso l'analisi delle recenti Risoluzioni ONU e della prassi dei Comitati ONU, si è puntualizzato come tuttavia permangano a livello internazionale reticenze e dubbi sul ruolo da riconoscere a tale

diritto con riferimento agli altri già convenzionalmente stabiliti, in particolare in relazione al diritto alla vita.

Nella seconda parte del contributo si è voluto analizzare invece il concetto di vulnerabilità nel diritto internazionale dei diritti umani, identificato come un parametro giuridico caratterizzato da un intrinseco carattere relazionale e collettivo, legato indissolubilmente alla condizione di fragilità umana. Si è mostrato, attraverso l'analisi delle considerazioni dei Comitati ONU, nonché di un caso pendente di fronte alla Corte EDU, come la vulnerabilità possa fungere da strumento capace di portare contemporanei benefici non solo ai soggetti coinvolti, ma anche alla generalità degli individui (anche futuri) e all'ambiente.

L'appello alla condizione di vulnerabilità sta infatti progressivamente fungendo da fondamento per la costruzione di avamposti di tutela dei diritti umani, in questo caso in ambito climatico, prima che l'aggravamento del cambiamento climatico e delle sue manifestazioni comporti una generale retrocessione dei diritti avverso cui alcun mezzo di tutela sia più esperibile.

Complessivamente, l'obiettivo del contributo è stato quello di sostenere come il diritto internazionale relativo ai diritti umani stia mutando la propria prospettiva, privilegiando una lettura relazionale dei suoi strumenti, in particolare per quanto riguarda i rapporti degli esseri umani fra loro e con l'ecosistema di cui fanno parte.

Bibliografia

1. Conferenza stampa, 21 ottobre 2022. Consultabile al sito <https://media.un.org/en/webtv> (ultimo accesso 30.03.2023).
2. IPCC, Sixth Assessment Report, AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023, 2023.
3. The Office of the High Commissioner for Human Rights (OHCHR), Report of the Special Rapporteur on the Issue of Human Rights Obligations Relating to the Enjoyment of a Safe, Clean, Healthy and Sustainable Environment, UN Doc. A/HRC/37/59, 24 gennaio 2018.
4. Dichiarazione di Stoccolma sull'ambiente umano, UN Doc. A/CONF.48/14/Rev.1, Stoccolma, 16 giugno 1972.
5. Conferenza delle Nazioni Unite su ambiente e sviluppo (Earth Summit), UN Doc. A/CONF.151/26/Rev.1(vol.I), Rio De Janeiro, 3-14 giugno 1992.
6. Convenzione quadro della Nazioni Unite sul cambiamento climatico (UNFCCC), 4 giugno 1992, in vigore dal 21 marzo 1994.
7. Dichiarazione di Rio sull'ambiente e lo sviluppo, UN Doc. A/CONF.151/26/Rev.1, Rio de Janeiro, 14 giugno 1992.
8. Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo (WCED), Our Common Future, UN Doc. A/42/427, 4 agosto 1987.
9. Assemblea Generale ONU, Risoluzione 70/1, Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development, UN Doc. A/RES/70/1, 25 settembre 2015.
10. IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, et al (eds.), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to

- the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska et al (eds.), Cambridge, UK e New York, NY, USA, 2022.
11. Shelton D., Human Rights and the Environment: What Specific Environmental Rights Have Been Recognized?. *Denv. J. Int'l L. & Pol'y* **2006**, 35, 129-171.
 12. Palmisano G., The Right to a Healthy or Decent Environment as a Social Right: Acquis and Future Prospects of the European Social Charter System, *Roma Tre Law Rev.* **2020**, 2, 7-24.
 13. Shelton D., Human Rights, Environmental Rights, and the Right to Environment. *STAN. J. INT'L L.*, **2001**, 28, 103-138.
 14. May J., The Case for Environmental Human Rights: Recognition, Implementations, and Outcomes. *Cardozo Law Review* **2021**, 42, 983-1037.
 15. Boyd R.D., *The Environmental Rights Revolution: a Global Study of Constitutions, Human Rights, and the Environment*, I ed.; UBC Press: Toronto, Canada, 2011.
 16. May J.; Daly E., Vindicating Fundamental Environmental Rights Worldwide. *Or. Rev. Int. Law* **2009**, 11, 365-440.
 17. Consiglio ONU per i diritti umani, Risoluzione 48/13, The Human Right to a Clean, Healthy and Sustainable Environment, UN Doc. A/HRC/RES/48/13, 18 ottobre 2021.
 18. Assemblea Generale ONU, Risoluzione 76/300, The Human Right to a Clean, Healthy and Sustainable Environment, UN Doc. A/RES/76/300, 28 luglio 2022.
 19. Pauciulo D., Il diritto umano a un ambiente salubre nella risoluzione 76/300 dell'Assemblea Generale delle Nazioni Unite, *Riv. dir. internaz.* **2022**, 4, 1118-1125.
 20. Comitato ONU per i diritti umani, *Ioane Teitiota c. Nuova Zelanda*, Views del 7 gennaio 2020.
 21. Patto internazionale sui diritti civili e politici (ICCPR), New York, 16 dicembre 1966, in vigore dal 23 marzo 1976.
 22. Comitato ONU dei diritti umani, Commento generale 36 sull'articolo 6 del Patto internazionale sui diritti civili e politici, sul diritto alla vita, UN Doc. CCPR/C/GC/36, 2018.
 23. Convenzione europea per la protezione dei diritti umani e delle libertà fondamentali, Roma, 4 novembre 1950, in vigore dal 3 settembre 1953.
 24. Assemblea parlamentare del Consiglio d'Europa, Risoluzione n. 2396 (2021), Anchoring the Right to a Healthy Environment: Need for Enhanced Action by the Council of Europe, 29 settembre 2021.
 25. Carta sociale europea (riformata), Strasburgo, 3 maggio 1996, in vigore dal 1° luglio 1999.
 26. Pisillo Mazzeschi R., *Diritto internazionale dei diritti umani-Teoria e prassi*, I ed.; Giappichelli: Torino, 2020.
 27. Assemblea parlamentare del Consiglio d'Europa, Raccomandazione n. 2211 (2021), Anchoring the Right to a Healthy Environment: Need for Enhanced Action by the Council of Europe, 29 settembre 2021.
 28. Assemblea parlamentare del Consiglio d'Europa, Raccomandazione 1431 (1999), Future Action to be Taken by the Council of Europe in the Field of Environment Protection, 4 novembre 1999; Assemblea parlamentare del Consiglio d'Europa, Raccomandazione 1883 (2009), Challenges Posed by Climate Change, 29 settembre 2009.

29. Comitato dei ministri del Consiglio d'Europa, Risposta alla raccomandazione 8892 (2000), 20 novembre 2000; Comitato dei Ministri del Consiglio d'Europa, Risposta alla raccomandazione 12298 (2010), 19 giugno 2010.
30. Haydon D., Children's Rights. The Effective Implementation of Rights-based Standards. In *Vulnerable Children and the Law*, I ed.; Sheehan R., Rhoades H, Stanley N., Eds.; Jessica Kingsley Publisher: Londra e Philadelphia, 2012; pp. 23-40.
31. Convenzione ONU sui diritti del fanciullo, New York, 20 novembre 1989, in vigore dal 2 settembre 1990.
32. Lavorel S., L'Émergence d'une Responsabilité Climatique des Etats?. In *Quel(s) Droit(s) Pour le Changement Climatique?*; Schaub, Cournil, Eds; Sorbonne, Collection de l'Institut des sciences juridique et philosophique de la Sorbonne: Sorbona, Francia, 2018; Volume 47, pp. 157-183.
33. Bernardini M.G., Il soggetto vulnerabile. Status e prospettive di una categoria (giuridicamente) controversa. *Rivista di filosofia del diritto* **2017**, 6, 2, 365-384. Consultabile al sito <https://www.rivisteweb.it/issn/2280-482X> (ultimo accesso 30.03.2023).
34. Pariotti E., Vulnerabilità e qualificazione del soggetto: implicazioni per il paradigma dei diritti umani. In *Vulnerabilità. Analisi multidisciplinare di un concetto*, I ed.; Giolo O., Pastore B, Eds.; Carocci: Roma, Italia, 2018; pp. 147-160.
35. Dichiarazione di Barcellona sulle proposte politiche alla Commissione europea sui principi etici fondamentali in bioetica e biodiritto, (adottato a novembre 1998 dai partners del progetto BIOMED II), 1998.
36. Lorubbio V., Vulnerability as Universal Ecosystem Condition: a European Comparative Perspective. *Federalismi.it*, 2021, 22, 154-169. Consultabile al sito <https://federalismi.it/> (ultimo accesso 30.03.2023).
37. Ramsden M; Gledhill K., Defining Strategic Litigation, *C. J. Q.* **2019**, 4, 407-439.
38. Comitato ONU per i diritti umani, *Daniel Billy et al. c. Australia*, Views del 22 settembre 2022.
39. Comitato ONU sui diritti del fanciullo, *Sacchi et al. c. Argentina et al.*, Views del 10 agosto 2021.
40. Corte europea dei diritti dell'uomo, *Duarte Agostinho et al. c. Portogallo et al.*, ricorso n. 39371/20, del 13 novembre 2020.
41. Kahl V., Rising Before Sinking: The UN Human Rights Committee's Landmark Decision in Daniel Billy et al. v. Australia. *VerfBlog*, 03 ottobre 2022. Consultabile al sito <https://verfassungsblog.de/> (ultimo accesso 30.03.2023).
42. Ciuffoletti S., Il discorso giurisprudenziale sui diritti connessi alla protezione dell'ambiente. *Jura Gentium*, 2019, 16, 183-231.
43. Daly E., The UNHRC's Torres Strait Islands Decision: A Major Advance, and a Roadmap for the Future. *GNHRE Blog*, 03 ottobre 2022. Consultabile al sito <https://gnhre.org/> (ultimo accesso 30.03.2023).
44. Voigt C., UNHRC is Turning up the Heat: Human Rights Violations Due to Inadequate Adaptation Action to Climate Change. *EJIL:Talk!*, 26 settembre 2022. Consultabile al sito <https://www.ejiltalk.org/> (ultimo accesso 30.03.2023).

45. Comitato ONU dei diritti umani, *Portillo Cáceres et al c. Paraguay*, Considerazioni del 25 luglio 2019.
46. Bakker C., Baptism of fire? The First Climate Case before the UN Committee on the Rights of the Child. *Questions of International Law*, 31 gennaio 2021. Consultabile al sito <https://www.qil-qdi.org/> (ultimo accesso 30.03.2023).
47. La Manna M., Cronaca di una decisione di inammissibilità annunciata: la petizione contro il cambiamento climatico Sacchi et al. non supera il vaglio del Comitato sui diritti del fanciullo. *SIDIBlog*, 15 novembre 2021. Consultabile al sito <http://www.sidiblog.org/> (ultimo accesso 30.03.2023).
48. Briony E., Human Rights and Climate Change Symposium - Panel six: Climate Change and The Rights of a Child. University of Essex, 11 giugno 2021. Consultabile al sito <https://www.essex.ac.uk/> (ultimo accesso 30.03.2023).
49. Ippolito F., The Best Interests of the Child: Another String to the Environmental and Climate Protection Bow?. *Questions of International Law*, 28 febbraio 2022. Consultabile al sito <https://www.qil-qdi.org/> (ultimo accesso 30.03.2023).
50. Protocollo Addizionale n. 1 alla Convenzione europea per la salvaguardia dei diritti umani e delle libertà fondamentali, Parigi, 20 marzo 1952, in vigore dal 18 maggio 1954.
51. Heri C., The ECtHR's Pending Climate Change Case: What's Ill-Treatment Got To Do With It?. *EJIL:Talk!*, 22 dicembre 2020. Consultabile al sito <https://www.ejiltalk.org/> (ultimo accesso 30.03.2023).
52. Mavronicola N., The Future is a Foreign Country: State (In)action on Climate Change and the Right Against Torture and Ill-Treatment. *Europe of Rights and Liberties/Europe des droits & Libertés*, **2022**, 2, no. 6, 211-237.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Approach to energy analysis using Building Information Modeling (BIM) software

Annamaria Ciccozzi ^{1,*}, Tullio de Rubeis ¹, Giovanni Pasqualoni ¹, Domenica Paoletti ¹ and Dario Ambrosini ¹

¹ University of L'Aquila, Department of Industrial and Information Engineering and Economics
67100 L'Aquila, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail:
annamaria.ciccozzi@graduate.univaq.it

Abstract: To date, the design of low-energy buildings remains one of the main issues globally. The construction sector accounts for approximately 36% of global primary energy consumption, contributing to almost 40% of the total CO₂ emissions worldwide. However, significant energy savings can be achieved if buildings are correctly designed. Therefore, it is crucial to integrate energy efficiency issues into the entire building design process, starting from the preliminary stage. Recent innovations have allowed the construction industry to invest in cutting-edge technologies and adopt new processes. In particular, applying the Building Information Modeling (BIM) methodology has introduced important changes in the design process. BIM makes it possible to optimize construction processes, from the design phase to the management phase. It is capable of providing information regarding the architectural and structural characteristics of the building, the materials, and the construction systems used, all according to the desired level of detail. Furthermore, the possibility of exchanging information with other software makes BIM a tool with great potential. This work explores the abilities of BIM in the architectural and energy field through the modeling of a specific case study, i.e., an academic building. In particular, the model was used for solar analyses, useful for identifying the most suitable surfaces for the installation of photovoltaic modules. The results demonstrated that the energy efficiency of a building is closely linked to its orientation and construction characteristics. In fact, the most favorable surfaces for the installation of the modules resulted in the two roof pitches exposed to the South-West, with an incident solar radiation value of 903 kWh/m².

Keywords: Building Information Modelling (BIM); energy efficiency; sustainable building, incident solar radiation, energy simulation.

1. Introduction

In recent years, the interest in environmental sustainability has involved the construction sector, bringing attention to the issue of energy efficiency in buildings. Currently, the building sector is the largest consumer of energy. In fact, according to statistics supplied by the European Commission (EC) Directorate General of Energy, it is responsible for 36% of energy consumption and 40% of carbon emissions worldwide [1]. One of the measures proposed by the European Commission provides that by 2030 new buildings must be zero-emissions [2, 3]. For this reason, it is important to review the way buildings are designed, introducing energy aspects already in the preliminary stages of the project. In this scenario, Building Information Modeling (BIM) helps to control different aspects of the design process, allowing the integration of energy characteristics with architectural ones. Building Information Modeling is a data-rich, object-oriented, intelligent, and parametric digital representation of the facility, which can be used to extract and analyze information to help designers make decisions and improve the process of delivering the facility [4, 5]. Preliminary thermal, daylighting, and energy modeling can be involved in the first design phase, determining the project goals and requirements (site development, building orientation, massing, and form, the initial building services, and the structure system) already in the conceptual stage. Although BIM has aroused strong interest among researchers in the past decade, the studies on its applications for the development of green buildings are not numerous [6]. Among these, Krygiel and Nies [7] summarised the overall applications of BIM during the building design process, including the orientation optimization of buildings to reduce building energy consumption, analysis of the building's massing (assess the form of the building and optimize the building envelope, such as the ratio of equivalent transparency), daylight analysis, investigation of water harvesting potential. Azhar et al. [8] analyzed the potential of BIM for environmental sustainability studies. The aim of the work of Maltese et al. [9] is to provide stakeholders with tools and procedures allowing them to extract rating protocols data from the BIM model in order to forecast the sustainability rating in every step of the design phase and of the operational life of the building. Mah et al. [10] proposed a BIM model to measure the CO₂ footprint in a house construction process and to provide recommendations for improving the construction activity schedule and to reduce associated emissions. Larsen et al. [11] proposed a new approach for analyzing the energy performance of retrofit projects using BIM and 3D laser scanning. Lagüela et al. [12] presented a hybrid method based on BIM and other information technologies to support energy rehabilitation processes ranging from energy usage diagnoses to retrofitting decision-making. Shen et al. [13] used BIM for sustainable design and project-based energy simulations.

Predicting the energy performance of a building during the operational phase is very important in order to preliminarily verify the correctness of the choices made during the design.

This work, through the modeling of a sample building for academic use, explores the potential of BIM in the architectural and energy fields. In fact, after modeling the building, analyses of the incident solar radiation were conducted to identify the most suitable surfaces for the installation of photovoltaic modules. The contribution offered by the study is particularly relevant in a context where renewable energy sources are becoming increasingly important for reducing energy consumption. The results obtained demonstrate that BIM has a strong potential that is just waiting to be explored.

2. Materials and Methods

Although many studies have been conducted on BIM in recent years, its applications in the energy field are still very limited. Since the utility of BIM in the construction sector has been widely recognized, it is necessary to explore its potential in green buildings [6].

Solar energy deployment is gaining greater attention as a sustainable source of energy that could alleviate aspects of the current climate crisis [14]. Renewables play a crucial role in efforts to decarbonise energy supplies and avert negative impacts associated with climate change [15]. The need for increasing the share of electric energy produced by renewable resources has pushed, over the last years, the installation of photovoltaic (PV) plants [16,17]. The introduction of photovoltaic systems in buildings offers advantages to the environment by reducing the emission of polluting particles into the air and, at the same time, allows the building's electricity consumption to be significantly reduced. The lack of awareness about the photovoltaic potential of the various building's surfaces is one of the most important obstacles to the diffusion of photovoltaic systems in the construction sector [18, 19]. There are several estimation methods to deal with this issue. These methods try to evaluate various factors such as the intensity of the solar incident, the availability of usable roof area, and the shadows cast by nearby objects [20].

The present work exploits the potential of BIM to offer a useful methodology for the preliminary design of a photovoltaic system. Through BIM modeling, detailed shading and incident solar radiation analyses were performed on a sample building for academic use.

2.1. Methodology

The aim of the contribution is to explore BIM both in the architectural and energy fields. To pursue this goal, the methodology used can be basically divided into two phases:

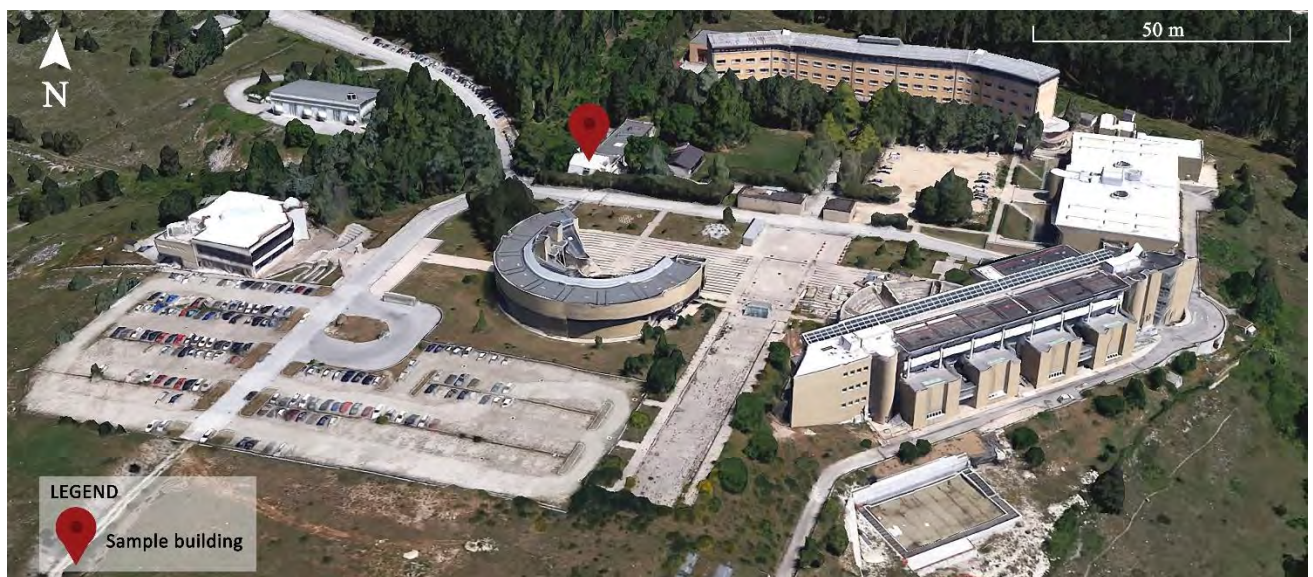
- the first is represented by the choice of the sample building and its modeling on a BIM software;
- the second focuses on the analysis of incident solar radiation and shading.

3. BIM modeling: the case study of the "Solar House"

The sample building chosen for the experimentation is the Las.E.R Laboratory (Laser and Electro-optical Research in engineering metrology) of the University of L'Aquila, which hosts research activities currently focused on topics such as the study of heat transmission, the application of thermography for building energy efficiency and building energy efficiency in general [21].

The building is located in Monteluco di Roio, L'Aquila, near a wooded area characterized by a dense presence of trees. It is part of a complex of university buildings housing the Departments of Industrial Engineering, Information Economics (DIIE) and Civil, Building-Architecture and Environmental Engineering (DICEAA) of the University of L'Aquila (Figure 1).

Figure 1. Sample building's location.



The building (Figure 2), built in the 70s, is in reinforced concrete. It consists of three floors. In detail, the basement houses the laboratories, the ground floor the maintenance company and the first floor the offices of the research group involved in the issues of energy efficiency in the construction sector. The structure is characterized by a pitched roof designed for the insertion of photovoltaic and thermal panels. Hence the nickname "Solar House". Notwithstanding the above, there are currently no roof panels. For this reason, the proposed study aims to analyze the effective predisposition of the building for the integration of a hypothetical photovoltaic system.

Figure 2. "Solar house" boxed in red. (a) "Solar House" front. (b) "Solar House" back.



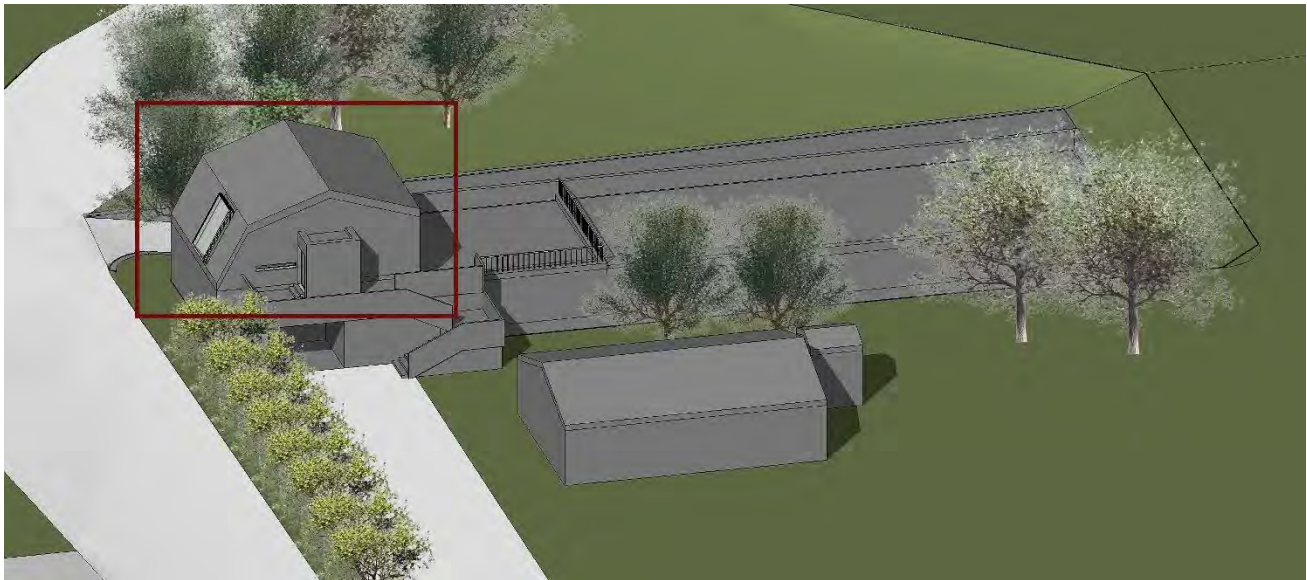
(a)



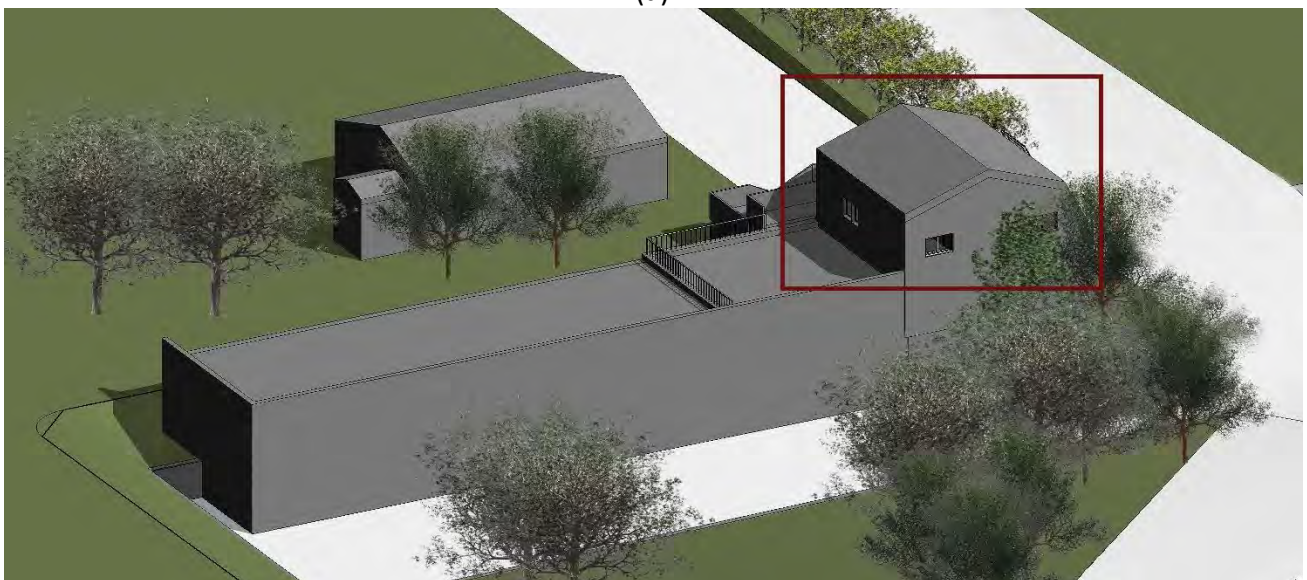
(b)

At the basis of the design of a photovoltaic system, there must be an assessment of the feasibility of the system. For this purpose, it is necessary to carry out preliminary studies which certainly include solar analyses. The various analyses were conducted through the use of BIM software, i.e., Autodesk Revit. The building has been modeled in detail and inserted into the context in which it is located (Figure 3). Subsequently, the coordinates of the site were entered to make the simulations as realistic as possible. The analyses mainly focused on the top floor of the “Solar house”, framed in red in Figure 3.

Figure 3. BIM model. (a) South-East view. (b) North-West view.



(a)

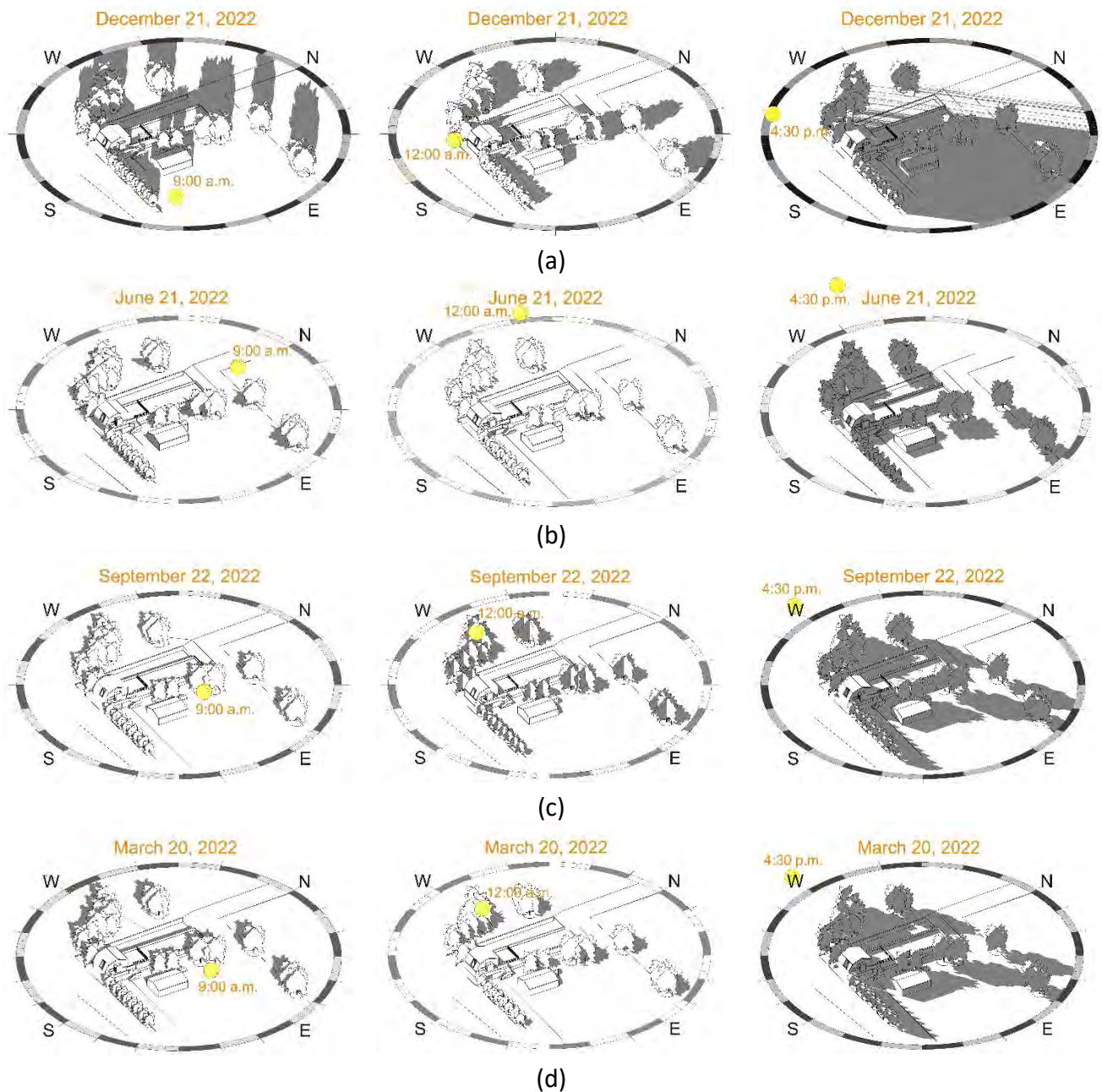


(b)

3. Solar analyses and Results

Through a simulation of the path of the sun, the shading affecting the building was studied. In detail, the analyses were conducted in the winter and summer solstices and in the autumn and spring equinoxes in 2022. The purpose of the simulation was to identify the parts of the building most exposed to sunlight and most favorable to inserting the panels. Figure 4 shows the results obtained from the shading analysis.

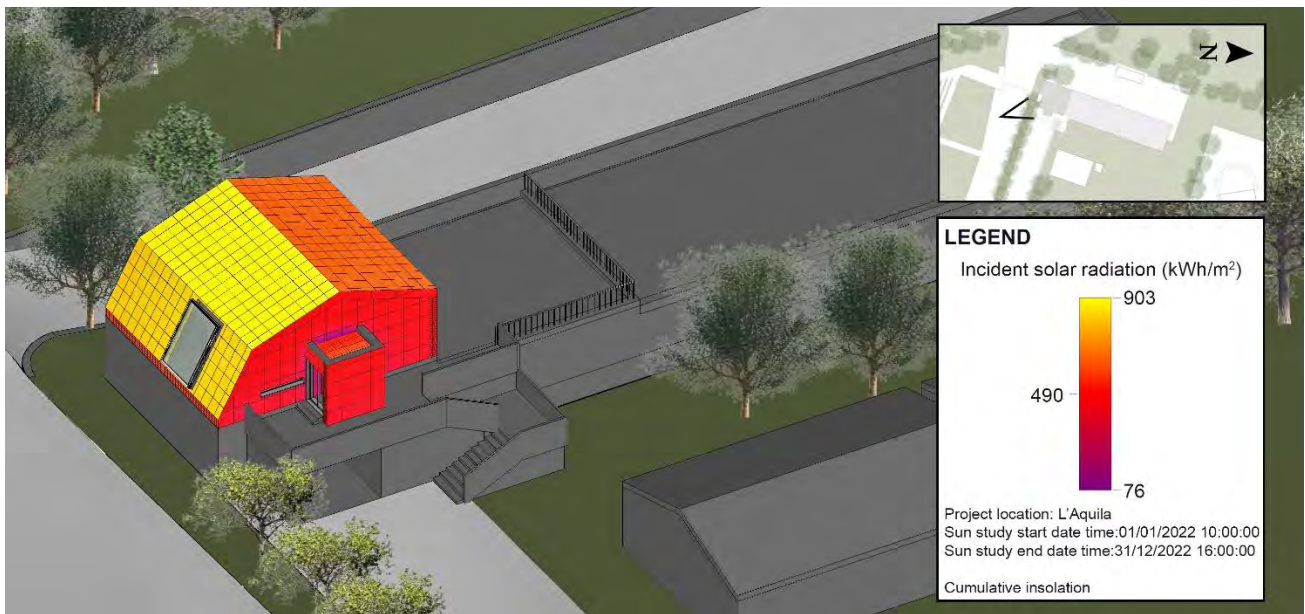
Figure 4. Shading analysis. (a) Winter solstice. (b) Summer solstice. (c) Autumn equinox. (d) Spring equinox.



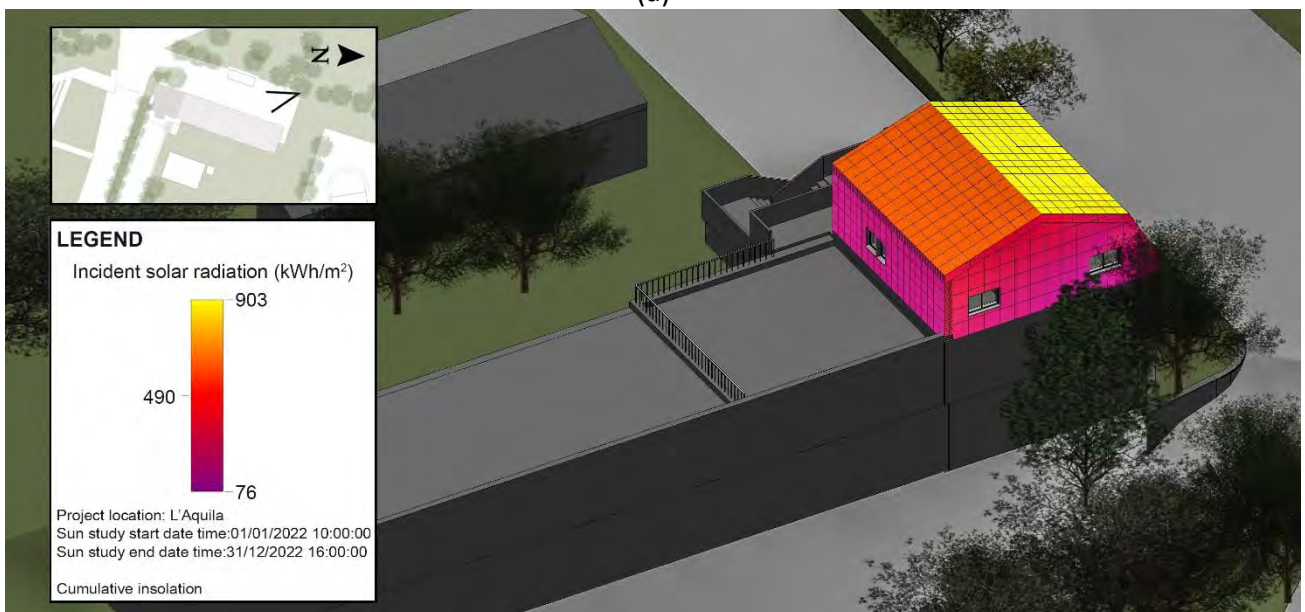
The amount of energy produced by a photovoltaic system strongly depends on the climatic conditions of the locality where it is installed. In practice, the energy potential of a certain location is expressed by means of the average annual insolation, which provides the amount of solar energy that affects an area of 1 m² over the course of a year.

The analysis of the incident solar radiation was performed in order to identify the more or less suitable surfaces for the installation of the photovoltaic modules, in relation to their predisposition to produce electricity. Figure 5 shows the results of the analysis of the incident solar radiation.

Figure 5. Incident solar radiation analysis. (a) South-East view. (b) North-West view.



(a)



(b)

Thanks to the modeling of the context in which the building is located, the study was carried out very accurately, also taking into consideration the shadows caused by nearby trees and buildings.

The results obtained show a close correlation between the two analyses, from which it emerges that the most suitable surfaces for the installation of the photovoltaic system are the two slopes of the roof exposed to the South-West, with an incident solar radiation value of 903 kWh/m².

4. Conclusions

The construction sector is facing major challenges arising from high energy consumption. Statistics supplied by the EC are alarming and require immediate and efficient solutions.

Recent innovations have allowed the construction industry to adopt cutting-edge technologies. Among these new methodologies is BIM, which has established itself in the last two decades. Integrating graphical and non-graphical information, it enables construction stakeholders to work collaboratively for efficient project delivery throughout the lifecycle of construction projects.

The energy performance of buildings strongly depends on the local meteorological conditions and on the construction characteristics of the envelope. During the design phase, correct and detailed modeling of the building can be crucial for the identification of suitable intervention strategies for the case in question.

In this work, the potential of Autodesk Revit has been used to conduct solar analyses on an academic building. The results showed that the energy performance of a building greatly depends on its orientation and construction characteristics. In fact, the most favorable surfaces for the installation of photovoltaic panels resulted in the pitches of the roof being exposed to the South-West and not covered by any shading element. In particular, on the aforementioned surfaces, the value of incident solar radiation resulting from the analyses is 903 kWh/m². The study conducted demonstrates that BIM represents an excellent solution to facilitate the integration and management of information during the design phase of a building or its components, offering the opportunity to make the best use of the available design data for sustainable design and performance analysis. Furthermore, the interoperability feature of BIM makes it an extremely flexible and dynamic software. In the future, the work begun with this contribution will be able to expand by deepening the theme of interoperability between Building Information Modeling (BIM) and Building Energy Model (BEM) software, increasingly refining the design in relation to the issue of energy saving.

References

1. European Commission. Clean Energy for all Europeans Package; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2019.
2. Verso un settore edilizio a zero emissioni: le nuove proposte della Commissione. Available online: <https://asvis.it/rubrica-europa-e-agenda-2030/1339-10917/verso-un-settore-edilizio-a-zero-emissioni-le-nuove-proposte-della-commissione> (accessed on 9 March 2023).
3. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the energy performance of buildings. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal->

- content/EN/TXT/?uri=COM:2021:802:FIN&qid=1639818893678 (accessed on 9 March 2023).
4. Ernstrom, B.; Hanson, D.; Hill D.; Clark, J.; Holder, M.; Turner, D.; Sundt, D.; Barton, L.; Barton, T. The contractors' guide to BIM. Associated General Contractors of America; 2006.
 5. Gao, H.; Koch, C.; Wu, Y. Building information modelling based building energy modelling: A review. *Applied Energy* **2019**, *238*, 320–343.
 6. Yujie, L.; Zhilei, W.; Ruidong, C.; Yongkui, L. Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. *Automation in Construction* **2017**, *83*, 134-148.
 7. Krygiel, E.; Brad, N. Green BIM: successful sustainable design with building information modeling. *John Wiley & Sons*, New Jersey, USA, 2008.
 8. Azhar, S.; Brown, J.; Farooqui, R. BIM-Based Sustainability Analysis: An Evaluation of Building Performance Analysis Software. In Proceedings of the 45th ASC Annual Conference, Gainesville, FL, USA, 1–4 April 2009; Vol. 1, pp. 1–4.
 9. Maltese, S.; Tagliabue, L.C.; Re Cecconi, F.; Pasini, D.; Manfren, M.; Ciribini, A.L.C.; De Angelis, E. Sustainability Assessment through Green BIM for Environmental, Social and Economic Efficiency. In Proceedings of the International High—Performance Built Environment Conference—A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series (SBE16), Sydney, Australia, 17–18 November 2016.
 10. Mah, D.; Manrique, J.D.; Yu, H.; Al-Hussein, M.; Nasser, R. House construction CO2 footprint quantification: a BIM approach. *Construction Innovation* **2011**, *11* (2), 161-178.
 11. Larsen, K.E.; Lattke, F.; Ott, S.; Winter, S. Surveying and digital workflow in energy performance retrofit projects using prefabricated elements. *Automation in Construction* **2011**, *20* (8), 999-1011.
 12. Lagüela, S.; Díaz-Vilariño, L.; Martínez, J.; Armesto, J. Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes. *Automation in Construction* **2013**, *31*, 230-240.
 13. Shen, Z; Jensen, W; Wentz, T; Fischer, B. Teaching sustainable design using BIM and project-based energy simulations. *Education Sciences* **2012**, *2*(3), 136–149.
 14. Mansouri Kouhestani, F.; Byrne, J.; Johnson, D.; Spencer, L.; Hazendonk, P.; Brown, B. Evaluating solar energy technical and economic potential on rooftops in an urban setting: the city of Lethbridge, Canada. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* **2019**, *10*, 13–32.
 15. Mueller, S.; Frankl, P.; Sadamori, K. Next Generation Wind and Solar Power from Cost to Value. International Energy Agency, Paris, 2016.
 16. Muttillio, M.; Nardi, I.; Stornelli, V.; de Rubeis, T.; Pasqualoni, G.; Ambrosini, D. On field infrared thermography sensing for PV system efficiency assessment: Results and comparison with electrical models. *Sensors* **2020**, *20*(4), 1055.
 17. Nardi, I.; Ambrosini, D.; de Rubeis, T.; Paoletti, D.; Muttillio, M.; Sfarra, S. Energetic performance analysis of a commercial water-based photovoltaic thermal system (PV/T) under summer conditions. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 923 (2017) 012040.
 18. Castellanos, S.; Sunter, D.A.; Kammen, D.M. Rooftop solar photovoltaic potential in cities: how scalable are assessment approaches? *Environmental Research Letters* **2017**, *12*(12), 125005.

19. Strupeit, L.; Palm, A. Overcoming barriers to renewable energy diffusion: business models for customer-sited solar photovoltaics in Japan, Germany and the United States. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *123*, 124–136.
20. Gooding, J.; Edwards, H.; Giesekam, J.; Crook, R. Solar City indicator: a methodology to predict city level PV installed capacity by combining physical capacity and socio-economic factors. *Solar Energy* **2013**, *95*, 325–335.
21. Department of Industrial and Information Engineering and Economics T.O.E. Thermal Sciences and Optical Engineering. Available online: <https://laser.diiie.univaq.it/index.php?id=2835> (accessed on 9 March 2023).

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Recycling biomass ashes on the road pavements: a multimethod approach

Elia Pandolfi Balbi^{1,*}, Costanza Cambi¹, Cristina Montanari¹, Maximiliano Fastelli¹, Gianluca Cerni²,
Alessandro Corradini², Franco Cotana^{3,4}, Corrado Bocci⁵, Paola Comodi¹

¹ Dipartimento di Fisica e Geologia. Università degli Studi di Perugia. Via Pascoli s.n.c. 06123 Perugia

² Dipartimento di Ingegneria civile ed ambientale. Via G. Duranti 93. 06125 Perugia

³ Dipartimento di Ingegneria. Via G. Duranti 93. 06125 Perugia

⁴ CIRIAF - Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente "Mauro Felli". Via G. Duranti, 67 – 06125 Perugia

⁵ PAVI s.r.l. Via Lc Spaccamiglio 06034 Foligno (PG).

* Elia Pandolfi Balbi E-Mail: eliapando1@hotmail.com

Abstract: Recent international climate commitments promote the use of renewable energy sources to make waste recycling possible and reduce fossil fuels utilization. Following these goals, biomass-fuelled thermal power plants, considered a zero CO₂-emission sources, are expected to increase. Nevertheless, the large amount of biomass combustion ash is a major problem that needs to be addressed by encouraging reuse. In this research, it is investigated the possible use of two biomass ashes deriving from the combustion of wood chips, as stabilizing agent of a clay soil from Central Italy, as an alternative to traditional lime treatment. Samples were mineralogically and physically characterized by using X-Ray powder diffraction and by determining their grain size distribution and plasticity characteristics. Clay ash mixtures were prepared since the results on the Initial Consumption in Lime test. The effects of the ashes addition was evaluated in the modification field and compared with those obtained by standard lime treatment. Such comparison was finally extended to both densification and mechanical properties of samples, which were investigated through Proctor and unconfined compressive strength tests. It is shown that the addition of ashes determines a reduction of soil plasticity and a shift toward coarser sizes of the grain distribution, similar to those obtained by adding lime. The compaction properties of treated mixtures behave similarly, regardless of the stabilising agent used. Finally, the comparative analysis demonstrates that the biomass ash stabilizing process provides a positive impact on the compressive behaviour (strength and stiffness) of mixtures after 7 curing days.

Keywords: biomass ashes, clay, lime, reuse, stabilization, mineralogical analyses

1. Introduction

It is well known that clayey soils, due to their poor mechanical and physical characteristics, must be rejected, in their natural state, in the field of earth constructions, such as pavement roads, embankments, railways etc. Nonetheless, since many years, there is a growing interest in techniques that can improve clayey soils characteristics [1] by using chemical treatments, so to avoid both the discard of such soils and the use of new quarry materials, which implies great environmental and economic concerns. Such techniques require the use of binders able to react with clayey soils. Traditional and widely used binders are lime and cement, whose reaction with clay particles have been widely investigated both in the short and in the long term since many years [2–8]. It is well known that the addition of lime in a clayey soil induces two different processes, modification and stabilization. Modification occurs mainly in the short term and it is due to a cation exchange process in clay particles, which determines their flocculation and consequent reduction of plasticity, accompanied by an increase in grain size. Stabilization is a long-term process determined by the developing, in a highly alkaline environment, of pozzolanic reactions which induce the formation of new cementitious compounds such as Calcium-Silicates-Hydrates (C-S-H) and Calcium-Aluminate-Hydrate (C-A-H).

The production of traditional binders represents itself an environmental concern as they come from industrial energy intensive production processes, which determine the emission of significant amount of greenhouse gases (e.g., CO₂). There is therefore the need for alternative and less polluting stabilizing binders, hopefully to be individuated among discard products, in the framework of a circular economy.

Fly ashes, rich in alumino-silicate and calcium, are among the waste materials frequently used in stabilizing processes as they act as cementing agents determining a mechanical improvement of clayey soils and allowing their use as construction materials in earthworks. Such materials, particularly when properly activated, can induce pozzolanic activity of the same kind of that determined by lime and cement, promoting the formation of cementitious compounds responsible for mechanical improvement of treated soils [9–12]. A particular kind of fly ash derive from the combustion of thermal power plants materials and have a wide range of compositions[13]. Due to the need of reducing the dependence on traditional fuels, the use of biomasses as energy sources has increased in recent years and it is expected to increase further [13]. This will determine an increase of combustion waste which could be hopefully re-used. Besides the use of such waste in agriculture, promising results have been obtained by using these products in concrete manufacture [14](Agrela et al., 2019) and, more recently, as possible clayey soil binders [13,15,16]. In this work the effects of the treatment of a clayey soil by using two different biomass ashes are investigated by using a multidisciplinary approach. Both the ashes and the soil have been characterized on the mineralogical and physical point of view. The effects of the treatment have been mainly evaluated by investigating physical modifications induced by the ashes addition. Finally, a comparative analysis has been carried out among the untreated clay and three mixtures in which set percentages of lime or biomass ashes have been employed as stabilizing agents of the natural soil. Thus, densification and mechanical properties of such materials have been studied through Proctor and unconfined compressive strength (UCS) tests. As far as UCS test is concerned, samples have been tested after 7 days of curing.

2. Materials and methods

2.1 Materials

Two different biomass ashes and a clayey soil were used in this experimentation. Table 1 reports code and origin of each of them.

Table 1. Sample codes and origin.

Code	Type of material	Origin
C	Clayey soil	Natural quarry clay
A1	Biomass ash	Motorbike dealer heating system
A2	Biomass ash	Domestic biomass heating system system plan

Both clay and ashes were ground in a mortar until passing the sieve 450 μm before starting the experimentation.

Physical, chemical, and mineralogical characteristics of clay and ashes in their natural state were defined.

Variations of physical parameters of clay/ashes mixtures with respect to untreated clay were also determined. The clay and the two ashes were mixed with each other in different proportions according to the results of the ICL test (Initial Consumption of Lime), which was also run on a Clay/Lime mixture, used as a reference. Hydrated lime containing more than 95% of portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) was used for preparing the Clay/Lime mixture.

2.2 Experimental techniques

2.2.1 XRPD analyses

X-ray powder diffraction analyses were performed at room temperature on side load randomly oriented powder by means of a Phillips PW-1830, equipped with a graphite monochromator on the outgoing rays, and using $\text{CuK}\alpha$ radiation ($\lambda = 1.5406$). The voltage and current intensity of the generator were 40 kV and 30 mA respectively, the step size was 0.02° , and the acquisition time was 20 s for each step. The diffraction patterns were collected in a Bragg–Brentano geometry ($\theta-2\theta$), so that $5^\circ < 2\theta < 80^\circ$. The Rietveld method [17], as implemented in Quanto software [18], was used for quantitative mineralogical analysis of samples. 10% by weight of crystalline silicon (Si) was added as external standard for the determination of the amorphous content. The quantification of the amorphous content was performed following Balić-Žunić [19]. The background was fitted with a Chebyshev polynomial function and diffraction peaks were modeled with a pseudo-Voigt function. Scale factor, lattice constants, and coefficients for the peak shapes were refined for each phase. The starting atomic coordinates and cell parameters were taken from the Crystal Open Database (COD) [20–26].

2.2.2 ICL Test

The ICL test [27] (Eades and Grim 1966) is one of the most common methods used to determine, in a soil/lime mixture, the minimum weight percentage of lime necessary for the occurrence of pozzolanic reactions. These last, by producing new cementitious compounds, give rise to the so-called stabilization process which induces the improvement of mechanical characteristics. According to this test, the minimum lime weight percentage inducing stabilization is defined as the amount able to bring the pH of a lime-clay-water solution up to 12.4, corresponding to the pH of a lime saturated solution.

The test was performed on a clay-lime (C/L) mixture and on mixtures of the clay with each ash (C/A1; C/A2) according to the ASTM D6276-99a standard [28]. To reach the required pH value, it was admitted that the weight percentage of added ashes could be higher than the maximum usually admitted for lime (6%). In fact, ashes are a waste material so that the need for a higher amount to add seems to represent an advantage rather than a point of weakness.

2.2.3 Specific gravity

Grains density, and consequently Specific Gravity (G_s), of C, A1 and A2 was determined by means of the automatic gas pycnometer Ultrapyc 5000 of Anton Paar.

2.2.4 Plasticity limits

Liquid and plastic limits (W_L and W_P) and Plasticity indexes (IP) were determined according to the ASTM D4318 [29] standard on both untreated clay (C) and on the Clay/Lime and Clay/Ashes mixtures. As this standard requires the soil/water mixtures prepared for testing to stand for at least 16 hours before executing the tests, it was guaranteed that the curing time of the treated clay was long enough for the possible cation exchange process to occur and possible modification of plasticity characteristics to be detected.

2.2.5 Grain size distribution

The grains size distribution curve of each material was determined by dry sieve analysis and conventional sedimentation analysis of the finer fraction, according to the ASTM D422 standard [30]. In the sedimentation analysis, the G_s of mixtures made of clay and stabilizing agents (lime and ashes) was determined as the weighted average of the G_s of each component. In this case also, the procedure to prepare the samples required by the standard guarantees that the clay treated with lime or ashes is cured long enough for the process of cation exchange to occur, possibly modifying the grain size distribution.

As the process determining the expected change in grain size distribution derives from the particles flocculation induced by cation exchange, the sedimentation analysis was performed without the addition of the anti-flocculating agent, which would have hidden such effects. In order to make results comparable, this procedure was used on both natural and treated clay.

2.2.6 Proctor test

In this experimental work, treated samples were obtained by mixing the C clay with specific percentages of lime or biomass ashes based on ICL test results. Thus, three different treated blends were obtained, namely C/L, C/A1, and C/A2 mixtures. Both the untreated and treated blends were hence investigated to determine their maximum dry densities (MDD) and optimum moisture contents (OMC) by carrying out a standard Proctor compaction procedure in compliance with UNI EN 13286-2 [31]. For each mixture, at least six samples were prepared with different water contents, which were added the day before compaction to guarantee adequate absorption. Over curing, samples were kneaded repeatedly to facilitate moisture homogenization. Finally, the set amount of lime or ash was added and thoroughly mixed to the C clay prior to compaction. The compaction test was performed using a cylindrical mould of 116.6 mm height and 101.6 mm diameter. Each sample was compacted in 3 layers by applying 25 blows through a 2.5 kg rammer dropped from a height of 305 mm.

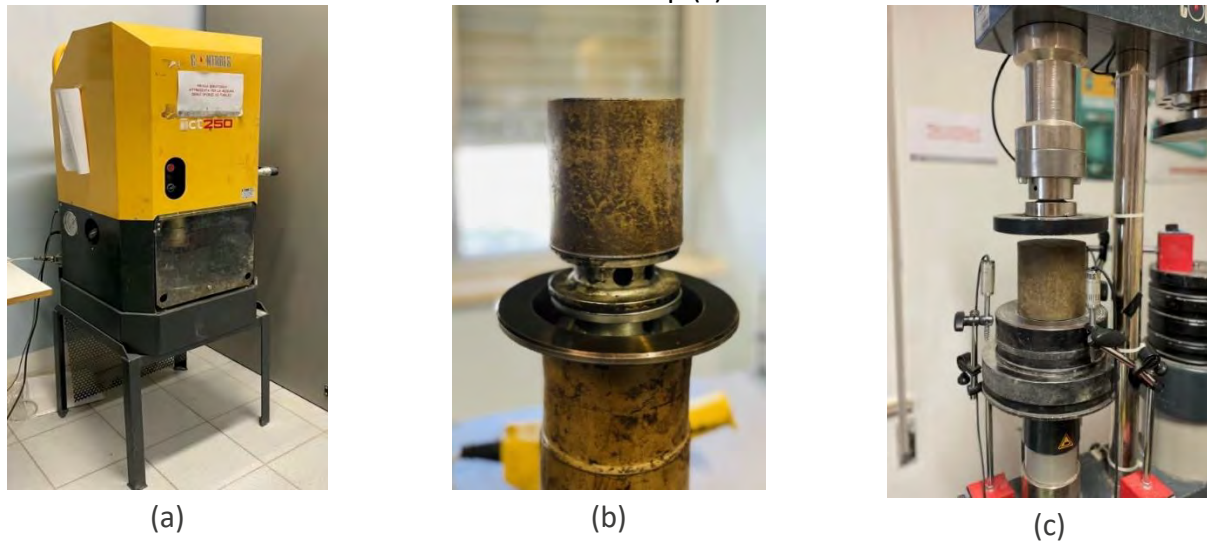
2.2.7 Specimen preparation and UCS test

The UCS of both untreated and treated studied mixtures, as introduced in Sec. 2.2.6, was investigated on cylindrical specimens compacted through gyratory shear compactor (Figure 1a). Their densification was carried out by applying a vertical pressure of 600 kPa, a tilting angle of the mould of 1.25°, and a rotation speed of 30 rpm. The gyratory compaction method is a reproducible and reduced effort procedure to compact samples for testing [32, 33]. Moreover, this device facilitates the preparation of specimens which are subjected to a compacting process in which normal and shear stresses are analogous to those produced using cylindrical rollers in the field. Such features comply with the aim of the present work of performing a comparative analysis among the mechanical responses of different stabilized mixtures which might be used as subgrade materials in the construction of road pavements.

The specimen production procedure began mixing the A clay with a specific OMC based on mixture type. Such sample was then stored in a plastic bag for about 24 hours to guarantee an adequate water absorption. When treated specimens were to be produced, the wet soil was poured into a steel tray and mixed with lime or ash prior to densification. Finally, each specimen was compacted at the Standard Proctor MDD. To this aim, for each blend a specific weight of mixture was poured into the mould so as to produce cylindrical samples of 100 mm diameter and 100 mm height (Figure 1(b)). Four replicates were compacted for each studied mixture. A height-to-diameter ratio of 1 was set to reduce the density heterogeneity along the specimen height. After its release from the mould, each cylindrical specimen was wrapped by a plastic film and stored in a sealed plastic bag to prevent moisture loss. Thus, compacted specimens were cured in a climatic chamber at 20 °C for 7 days before testing.

Cured samples were hence tested to evaluate their UCS by means of a 15-kN compressive machine using strain-controlled application of the axial load. In particular, the load was applied so as to produce an axial strain at a rate of 1%/min. As shown in Figure 1(c), three displacement transducers (LVDTs) were set at 120° to monitor the axial deformation of the specimen along testing.

Figure 1. Gyrotary shear compactor (a); cylindrical specimen compacted through gyrotary device (b); UCS test set up (c).



2.3 Results

2.3.1 XRPD

Table 2 shows the mineralogical composition of the clay and of the two ashes, determined by XRPD analyses.

Table 2. Mineralogical composition of Clay (C) and ashes (A1 and A2).

Sample	Phase	Chemical formula	Wt%	Error
C	Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5.65	0.09
	Calcite	CaCO_3	10.67	0.11
	Orthoclase	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	5.99	0.11
	Chamosite	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2}, \text{Fe}^{3+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	1.19	0.04
	Enstatite	MgSiO_3	20.41	0.12
	Quartz	SiO_2	2.76	0.16
	Illite	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$	25.65	0.23
	Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	6.97	0.09
	Amorphous		20.70	0.4 [EPB1]0
A1	Vivianite	$\text{Fe}^{+2}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$	1.06	0.06
	Calcite	CaCO_3	14.91	0.15
	Lime	CaO	17.13	0.11
	Periclase	MgO	5.49	0.10
	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	21.27	0.16
	Kyanite	Al_2SiO_5	1.17	0.11
	Gismondine	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16} \cdot 9(\text{H}_2\text{O})$	8.29	0.13
	Hydroxylapatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	2.53	0.10
	Fairchildite	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$	6.47	0.12
	Amorphous		21.6	0.4
A2	Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	1.73	0.09
	Calcite	CaCO_3	37.6	0.17
	Lime	CaO	6.10	0.04
	Periclase	MgO	1.68	0.05
	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	7.66	0.10
	Quartz	SiO_2	3.86	0.03
	Sylvite	KCl	0.74	0.04
	Hydroxylapatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	2.01	0.06
	Collinsite	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{PO}_4)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	4.74	0.16
	Amorphous		33.8	0.3

It is shown that both ashes, and particularly A1, contain significant amount of lime and portlandite while the content in silicates is relatively low. The mineralogical composition confirms that both ashes could be conveniently used as a substitute of lime in clayey soils treatment.

2.3.2 ICL Test

Results of ICL test performed on A/L, C/A1 and C/A2 mixtures are reported in Table 3.

Table 3. Results of the ICL test. According to the reference standard, the weight percentage is calculated on the dry weight of clay. Bold characters indicated the minimum required percentage of each additive necessary to enter the stabilization field.

Campione	Weight %	pH	T (°C)
C + (CaOH) ₂	2	12.36	20.7
C + (CaOH)₂	3	12.41	21.0
C + (CaOH) ₂	4	12.48	20.7
C + (CaOH) ₂	6	12.52	20.4
C + A1	2	11.61	20.6
C + A1	4	12.08	20.8
C + A1	6	12.33	20.5
C + A1	7	12.39	20.6
C + A1	8	12.44	20.6
C + A2	2	10.71	20.2
C + A2	4	11.54	20.0
C + A2	6	11.92	20.1
C + A2	8	12.09	21.0
C + A2	9	12.14	21.0
C + A2	11	12.3	20.6
C + A2	12	12.34	20.6
C + A2	14	12.38	21.5
C + A2	15	12.40	22.1

It is worth to note that, as expected, the ash weight percentage to be added to the clay to induce stabilization is lower for A1, which contains higher amounts of lime and portlandite, and higher for A2, containing lower percentages of such minerals.

The results of this test have been used as a reference for creating the mixtures to be tested. Namely, three mixtures were prepared, respectively made of: clay + 3% of Ca(OH)₂, clay + 8% of A1 and Clay + 15% of A2. Hereafter these three mixtures will be respectively named: MIX 0, MIX 1 and MIX 2.

2.3.3 Specific gravity

Density measurements taken on the clay C and on the two ashes A1 and A2 are shown in table 4.

Table 4. Values of densities determined by using the automatic gas pycnometer Ultrapyc 5000.

Run	Volume (cm ³)	Density (g/cm ³)	Temp. (°C)	Volume (cm ³)	Density (g/cm ³)	Temp. (°C)	Volume (cm ³)	Density (g/cm ³)	Temp. (°C)
	C			A1			A2		
1	2.627	2.619	20.00	1.2048	2.7591	20.001	1.0933	2.7187	19.997
2	2.626	2.620	20.00	1.2054	2.7578	20.003	1.0841	2.7417	19.999
3	2.624	2.621	20.00	1.2054	2.7577	20.003	1.0788	2.7553	20.001
4	2.621	2.625	20.00	1.2049	2.7587	20.003	1.0808	2.7501	20.000
5	2.624	2.622	20.00	1.2074	2.7532	20.003	1.0853	2.7387	20.001
6	2.629	2.620	20.00	1.2036	2.7617	20.002	1.0851	2.7391	20.002
7	2.627	2.619	20.00	1.2091	2.7492	20.002	1.0828	2.7450	20.000
8	2.623	2.623	20.00	1.2020	2.7655	20.000	1.0844	2.7409	20.003
9	2.626	2.620	20.00	1.2070	2.7540	20.002	1.0781	2.7569	20.003
10	2.623	2.623	20.00	1.2024	2.7646	20.001	1.0878	2.7324	20.002
True density	2.6210			2.7590			2.7429		

The computation of true density considers the temperature variations.

Table 5 reports the values of G_s of clay and ashes.

Material	G _s
C	2.62
A1	2.76
A2	2.74

2.3.4 Plasticity limits

Plastic limit (W_P) and liquid limit (W_L) were determined on the untreated clay and on the mixtures prepared as described above. Table 6 shows W_L , W_P and PI values determined on untreated clay and on MIX 0, MIX 1 and MIX 2.

Table 6. Liquid limit (W_L), plastic limit (W_P) and Plasticity Index (PI) of untreated clay and mixtures.

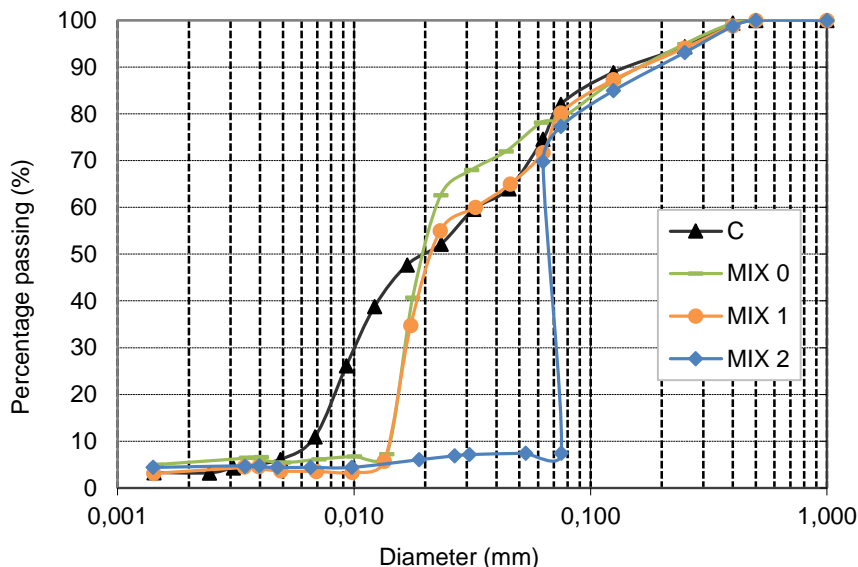
Material	WL (%)	WP (%)	PI (%)
C	38.8	24.7	14.1
MIX 0	37.2	30.9	6.3
MIX 1	38.8	30.2	8.5
MIX 2	39.0	31.5	7.5

It can be observed that the plasticity is reduced, with respect to untreated materials, both when the clay is treated with lime and when it is treated with the selected amount of A1 and A2.

2.3.5 Grain size distribution

Figure 1 Shows the grain size distribution of both untreated clay and mixtures.

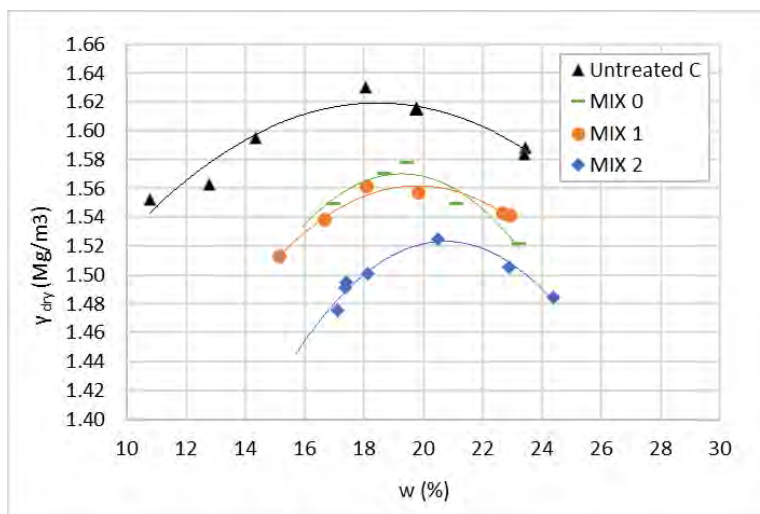
Figure 1. Grain size distribution of untreated clay and mixtures



2.3.6 Proctor test

The Proctor compaction analysis was performed to obtain the relationship among the moisture content (w) and the dry density (γ_{dry}) for studied mixtures. The moisture content was measured after compaction drying the specimens until constant mass. In Figure 3, Proctor compaction curves are shown for untreated clay, MIX 0, MIX 1 and MIX 2, respectively.

Figure 3. Proctor curves for untreated clay and stabilized mixtures.



From the figure, it can be noted that the compaction curves of treated mixtures move both downward and from left to right in comparison with that determined for the untreated sample. Accordingly, MDD and OMC values decrease and increase, respectively. Furthermore, experimental

data reveal similar compaction trends for MIX 0 and MIX 1, while variations in MDD and OMC values for MIX 2 resulted the greatest. Such occurrence was expected for the MIX 0 because of flocculation process of soil particles which generally determines higher air voids into the mixture and in turn lower dry densities. Therefore, it can be observed how biomass ash stabilized mixtures behave similarly to the lime-stabilized one. The highest OWC and the lowest MDD observed for the MIX 2 are likely due to the high percentage of ashes (15%) into the sample. In Table 7, the OMC and MDD values for studied mixtures are summarized.

Table 7. OMC and MDD values for untreated clay and stabilized mixtures.

Material	OMC (%)	MDD (Mg/m ³)
C	18.5	1.620
MIX 0	19.2	1.570
MIX 1	19.8	1.562
MIX 2	20.5	1.523

2.3.7 UCS test

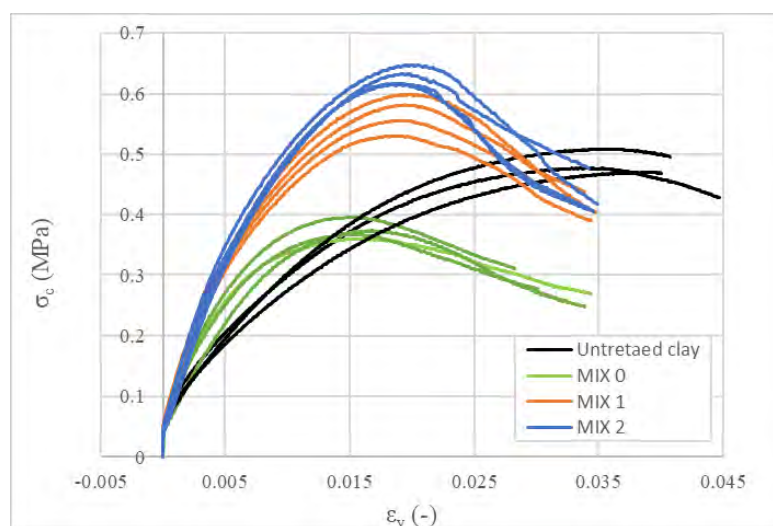
The UCS test was performed in order to evaluate the effects of different stabilizers on the mechanical properties of clayey mixtures after 7-day curing. The data acquisition system provided applied load and vertical displacement values at sufficient intervals to define the shape of the stress-strain curve. To this aim, the vertical stress σ_c and the vertical strain ε_y were derived as follows:

$$\sigma_c = F/A \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \Delta L/L_0 \quad (2)$$

where F is the applied load (N), A is the cross-sectional area of the specimen (mm), ΔL is the vertical displacement as average value of the reads from the three LVDTs, L_0 is the initial height of the specimen. Thus, the results of the UCS tests for studied mixtures are shown in Figure 3.

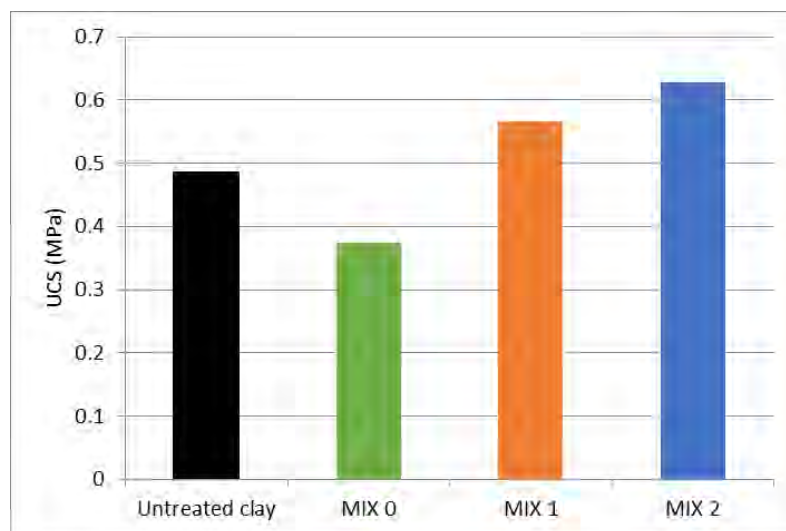
Figure 4. Vertical stress–strain plot for untreated clay and stabilized mixtures.



From the figure, it can be clearly noted that replicates of each mixture show comparable vertical stress-strain plots, testifying good repeatability of results. In comparison with the untreated clay, which represents the reference sample, MIX1 and MIX2 achieve higher vertical stresses with lower vertical strains, while MIX 0 reached the lowest vertical stresses at the peak of the curves. The effects induced by the presence of stabilizing agents into the mixtures can be clearly observed in terms of slope of the rising branches of the curves, which reflects the stiffness properties of the material. Accordingly, treated mixtures revealed a positive increase in stiffness in comparison with the untreated soil. In this context, MIX 1 and MIX 2 outperform MIX 0.

In order to compare materials using a synthetic parameter, the UCS was evaluated through Eq. 1 introducing the peak value of the load. As shown in Figure 5, experimental UCS values were then averaged for each studied mixture.

Figure 5. UCS values for untreated clay and stabilized mixtures.



MIX 1 and MIX 2 show an increase in UCS values in comparison with that provided by the untreated clay of 16.7% and 29.4%, respectively. MIX 0 instead shows a decrease of 22.9%. Such occurrence might be due to mineral composition of the untreated clay, in which illite (25%) and crystalline quartz (20%) phases are 25% and 20% in weight, respectively. These are supposed to not react significantly with lime in the short term. Otherwise, both ashes, being added to C clay in higher percentages than hydrated lime in MIX 0, ensure greater contents of minerals in the amorphous state which might speed up the stabilization processes through pozzolanic reactions.

3. Conclusions and further experimentation plan

Results of preliminary analyses aimed at verifying whether the selected biomass ashes are suitable as stabilizing agents of a clayey soil, show that the effects of the selected ashes on the physical characteristic of the analyzed clay are virtually the same as those obtained when treating the clay with lime. The observed effects, that is a reduction in plasticity and a change of the grain size distribution after treatment, can be mainly ascribed to the short-term modification process, which is related to the

cation exchange in the clay particles. Moreover, results of mechanical testing reveal the positive impact of biomass ash stabilization process on both unconfined compressive strength and stiffness. Ash treated blends experience lower strains with increasing stresses, which is promising for using as subgrade materials in the construction of road pavements. These results seem to be encouraging and suggest investigating the possible long-term effects of the stabilization process, due to the occurrence of pozzolanic reactions, which are still to be analyzed.

In the nearest future for the selected blends (MIX 0, MIX 1 and MIX 2) the effect of curing time on the mechanical characteristics will be followed, and chemical-textural and mineralogical analyses performed on the same sample in the same times will be allowed to describe the occurring processes at atomistic scale and explain the properties observed at large scale.

Reference

1. Cambi, C.; Carrisi, S.; Comodi, P. Use of the Methylene Blue Stain Test to Evaluate the Efficiency of Lime Treatment on Selected Clayey Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **2012**, *138*, 1147–1150, doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000687.
2. Bell, F.G. Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. *Engineering geology* **1996**, *42*, 223–237.
3. Boardman, D.I.; Glendinning, S.; Rogers, C.D.F. Development of Stabilisation and Solidification in Lime–Clay Mixes. *Géotechnique* **2001**, *51*, 533–543, doi:10.1680/geot.2001.51.6.533.
4. Al-Mukhtar, M.; Lasledj, A.; Alcover, J.-F. Behaviour and Mineralogy Changes in Lime-Treated Expansive Soil at 20 C. *Applied clay science* **2010**, *50*, 191–198.
5. Lemaire, K.; Deneele, D.; Bonnet, S.; Legret, M. Effects of Lime and Cement Treatment on the Physicochemical, Microstructural and Mechanical Characteristics of a Plastic Silt. *Engineering Geology* **2013**, *166*, 255–261, doi:10.1016/j.enggeo.2013.09.012.
6. Chemedda, Y.C.; Deneele, D.; Christidis, G.E.; Ouvrard, G. Influence of Hydrated Lime on the Surface Properties and Interaction of Kaolinite Particles. *Applied Clay Science* **2015**, *107*, 1–13, doi:10.1016/j.clay.2015.01.019.
7. Vitale, E.; Deneele, D.; Russo, G.; Ouvrard, G. Short-Term Effects on Physical Properties of Lime Treated Kaolin. *Applied Clay Science* **2016**, *132*, 223–231.
8. Vitale, E.; Deneele, D.; Russo, G. Microstructural Investigations on Plasticity of Lime-Treated Soils. *Minerals* **2020**, *10*, 386.
9. Cristelo, N.; Glendinning, S.; Teixeira Pinto, A. Deep Soft Soil Improvement by Alkaline Activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement* **2011**, *164*, 73–82, doi:10.1680/grim.900032.
10. Rios, S.; Cristelo, N.; Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. Structural Performance of Alkali-Activated Soil Ash versus Soil Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering* **2016**, *28*, 04015125.
11. Vitale, E.; Deneele, D.; Paris, M.; Russo, G. Multi-Scale Analysis and Time Evolution of Pozzolanic Activity of Lime Treated Clays. *Applied Clay Science* **2017**, *141*, 36–45.
12. Turan, C.; Javadi, A.A.; Vinai, R.; Russo, G. Effects of Fly Ash Inclusion and Alkali Activation on Physical, Mechanical, and Chemical Properties of Clay. *Materials* **2022**, *15*, 4628.

13. Fastelli, M.; Cambi, C.; Zucchini, A.; Sassi, P.; Pandolfi Balbi, E.; Pioppi, L.; Cotana, F.; Cavalaglio, G.; Comodi, P. Use of Biomass Ash in Reinforced Clayey Soil: A Multiscale Analysis of Solid-State Reactions. *Recycling* **2023**, *8*, 5.
14. Agrela, F.; Cabrera, M.; Morales, M.M.; Zamorano, M.; Alshaaer, M. Biomass Fly Ash and Biomass Bottom Ash. In *New trends in eco-efficient and recycled concrete*; Elsevier, 2019; pp. 23–58.
15. Cabrera, M.; Rosales, J.; Ayuso, J.; Estaire, J.; Agrela, F. Feasibility of Using Olive Biomass Bottom Ash in the Sub-Bases of Roads and Rural Paths. *Construction and Building Materials* **2018**, *181*, 266–275.
16. Cherian, C.; Siddiqua, S. Engineering and Environmental Evaluation for Utilization of Recycled Pulp Mill Fly Ash as Binder in Sustainable Road Construction. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *298*, 126758, doi:10.1016/j.jclepro.2021.126758.
17. Rietveld, H.M. A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures. *Journal of applied Crystallography* **1969**, *2*, 65–71.
18. Altomare, A.; Burla, M.C.; Giacovazzo, C.; Guagliardi, A.; Moliterni, A.G.; Polidori, G.; Rizzi, R. Quanto: A Rietveld Program for Quantitative Phase Analysis of Polycrystalline Mixtures. *Journal of Applied Crystallography* **2001**, *34*, 392–397.
19. Balić-Žunić, T. Quantitative Powder Diffraction Phase Analysis with a Combination of the Rietveld Method and the Addition Method. *Powder Diffraction* **2002**, *17*, 287–289.
20. Merkys, A.; Vaitkus, A.; Butkus, J.; Okulič-Kazarinas, M.; Kairys, V.; Gražulis, S. COD:: CIF:: Parser: An Error-Correcting CIF Parser for the Perl Language. *Journal of applied crystallography* **2016**, *49*, 292–301.
21. Vaitkus, A.; Merkys, A.; Gražulis, S. Validation of the Crystallography Open Database Using the Crystallographic Information Framework. *Journal of applied crystallography* **2021**, *54*.
22. Quirós, M.; Gražulis, S.; Girdzijauskaitė, S.; Merkys, A.; Vaitkus, A. Using SMILES Strings for the Description of Chemical Connectivity in the Crystallography Open Database. *Journal of cheminformatics* **2018**, *10*, 1–17.
23. Gražulis, S.; Merkys, A.; Vaitkus, A.; Okulič-Kazarinas, M. Computing Stoichiometric Molecular Composition from Crystal Structures. *Journal of applied crystallography* **2015**, *48*, 85–91.
24. Gražulis, S.; Daškevič, A.; Merkys, A.; Chateigner, D.; Lutterotti, L.; Quiros, M.; Serebryanaya, N.R.; Moeck, P.; Downs, R.T.; Le Bail, A. Crystallography Open Database (COD): An Open-Access Collection of Crystal Structures and Platform for World-Wide Collaboration. *Nucleic acids research* **2012**, *40*, D420–D427.
25. Gražulis, S.; Chateigner, D.; Downs, R.T.; Yokochi, A.F.T.; Quirós, M.; Lutterotti, L.; Manakova, E.; Butkus, J.; Moeck, P.; Le Bail, A. Crystallography Open Database – an Open-Access Collection of Crystal Structures. *J Appl Cryst* **2009**, *42*, 726–729, doi:10.1107/S0021889809016690.
26. Merkys, A.; Vaitkus, A.; Grybauskas, A.; Konovalovas, A.; Quirós, M.; Gražulis, S. Graph Isomorphism-Based Algorithm for Cross-Checking Chemical and Crystallographic Descriptions. *Journal of cheminformatics* **2023**, *15*, 25.

27. Eades, J.L.; Grim, R.E. A Quick Test to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization. *Highway research record* **1966**.
 28. ASTM D6276-99a - Standard test method for using pH to Estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization.
 39. ASTM D4318-00 - Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils1.
 30. ASTM D422 - Standard Test Method for Particle-Size Analysis
 31. EN 13286-2, Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for the determination of the laboratory reference density and water content - Proctor compaction, European Committee for Standardization, **2010**.
 32. Santoni, R. L.; Tingle, J. S.; Nieves, M. Accelerated strength improvement of silty sand with nontraditional additives. *Transportation research record*, **2005**, *1936(1)*, 34-42.
 33. Xing, C.; Liu, X.; Anupam, K. Response of sandy soil stabilized by polymer additives. *Open Access Journal of Environmental and Soil Sciences* **2018**, *3*, 64-71.
-

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Multi-domain approach to evaluate human comfort outdoors: a case study in central Italy

Roberta Jacoby Cureau ¹, Ilaria Pigliautile ^{1,2}, Ioannis Kousis ^{1,2} and Anna Laura Pisello ^{1,2,3,*}

¹ CIRIAF – Interuniversity Research Center on Pollution and Environment – University of Perugia, Via G. Duranti 67, 06125, Perugia, Italy

² Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 93, 06125, Perugia, Italy

³ Department of Civil and Environmental Engineering, Princeton University, NJ, USA

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: anna.pisello@unipg.it

Abstract: Although human comfort depends on several environmental stimuli, comfort assessments usually take into account one domain at a time (i.e., thermal, visual, acoustic, and air quality), without considering possible interactions and crossed effects between them. This study presents an approach for investigating multi-domain comfort outdoors, aiming at analyzing the impact of the thermal domain on visual, acoustic, and overall comfort. The method was based on environmental comfort walks conducted in an urban area in central Italy, and the analyses focused on two distinct places, an urban park and a commercial hub. Environmental parameters were monitored using a wearable device and fixed thermohygrometers. Simultaneously, participants in the experiment and people who were attending the places under investigation answered a specific questionnaire about environmental comfort. Regression models were developed to evaluate the impact of air temperature and relative humidity on visual, acoustic, and overall comfort, but the predictors were statistically significant only for visual comfort in the park and acoustic and overall comfort in the commercial hub. In contrast, the multi-domain analysis including only the questionnaire responses showed that thermal comfort votes were associated with visual and overall comfort in both places and with acoustic comfort only at the park. Therefore, it was concluded that the perceived interactions between domains were more related to subjective factors than to environmental triggers in these two spots. These results contribute to improving the comprehension of multi-domain comfort outdoors, which is important to enhance human well-being and useful for planning more comfortable urban areas.

Keywords: outdoor comfort; multi-domain comfort; urban environmental quality; mobile monitoring.

1. Introduction

Over half of the world's population lives in cities, and this number is projected to rise in the coming decades [1]. However, rapid urbanization and the consequent alterations in land use and cover and growth in anthropogenic activities cause significant environmental challenges that negatively impact the quality of living in urban areas [2]. Urban overheating and air and noise pollution, for instance, have been linked to increased morbidity and mortality rates [3–5]. Consequently, these issues have been highlighting the need for more sustainable and resilient urban environments to ensure human health and well-being [6], which fosters the study of environmental quality and comfort outdoors.

Human comfort outdoors is a complex concept influenced by a wide range of environmental factors including air temperature, wind speed, pollutants concentration, noise level, etc. [7–9]. Previously, comfort investigations were primarily focused on the effects of single physical domains (thermal, visual, acoustic, and air quality) on human comfort. However, human environmental perception depends on the combination and interaction of several stimuli that are experienced simultaneously [10] that must be addressed to deeply understand human responses. Multi-domain approach for human comfort assessment started to be investigated in indoor environments, but recently this approach is also being applied to outdoors [11]. However, outdoor multi-domain comfort studies are still a few and further investigations are required to reach a full understanding of human comfort in urban environments.

The complexity and high heterogeneity of urban areas can lead to large variations in the environmental parameters [12], which hinders environmental quality evaluation and efforts to improve cities' livability. Monitoring human environments at a hyperlocal scale, which can be achieved by using mobile transects, helps to assess these differences [13]. In addition, factors other than the environmental variables, like psychological aspects and space layout, also influence human comfort and perception [7], so combining environmental monitoring with subjective comfort assessments can ease the understanding of discomfort triggers and help attending people's wants and expectations in terms of environmental comfort and well-being.

In this context, this paper aimed to investigate the crossed effects between the thermal domain and the visual and acoustic ones, as well as with overall comfort level. The thermal domain was chosen as the main effect to be investigated because urban overheating is one of the main challenges of modern cities as it is responsible for numerous environmental problems, like intensifying thermal discomfort outdoors [4]. This situation is worsened in the context of global warming [14], so considering the multi-domain approach, it is important to understand how thermal triggers affect also other comfort domains.

This study focused on the investigation of an urban park and a commercial hub located in a city in central Italy. Environmental monitoring was combined with subjective environmental assessments to provide a complete interpretation of the environmental quality of these places. A wearable system was used to monitor key environmental parameters, while questionnaires were distributed to gather the environmental perception. Statistical methods were applied to verify whether the subjective assessments of the thermal domain were related to the ones from other domains. Moreover, regression models were used to verify the relationship between air temperature and relative humidity with visual, acoustic, and overall comfort status.

2. Materials and methods

This paper presents a human comfort assessment from a multi-domain perspective in two different places located in an urban environment in central Italy. Eight monitoring sessions were performed on which environmental parameters were registered with a portable monitoring system and fixed thermohygrometers, while comfort perception was evaluated through dedicated questionnaires. Statistical methods were applied to investigate the dependence between the thermal domain and visual and acoustic ones, as well as overall comfort.

2.1. Monitoring campaign

This experiment was based on an environmental walk: a pre-defined path (starting at one of the spots of interest and finishing in the other) was completed twice a day (at 2 pm and 6 pm, to be symmetric to the diurnal peak of air temperature that is usually around 4 pm) for four consecutive days (from June 12th to 15th, 2021).

Throughout the walks, a wearable monitoring system was used to register the environmental parameters related to thermal, visual, and air quality domains. During every walk, three participants were involved in the monitoring, for a total of 24 volunteers. The restricted number of participants was a consequence of the COVID-19 pandemic contingencies for the period when this monitoring campaign was carried out. All the participants were previously contacted and agreed to participate in the experiment. They were aware that they could leave the experiment at any moment and that all their information would be handled anonymously following the General Data Protection Regulation (GDPR). These participants were asked to answer a questionnaire regarding their environmental comfort. Before responding to this survey, participants spent at least 10 minutes in the area acclimatizing to the surroundings, within a few meters of the wearable monitoring system.

To increase the sample of answers, during the entire duration of the walks, some individuals who were already in the monitored spots (here referred to as locals) were also requested to answer the questionnaire. Moreover, fixed sensors monitoring air temperature and relative humidity were positioned in the two spots to continuously monitor these parameters during the entire duration of this campaign.

2.2. Data collection

During the environmental walks, a wearable monitoring system, detailed described in [13], was used to measure key multi-domain environmental parameters (i.e., air temperature, relative humidity, wind speed and direction, global solar radiation, illuminance, and CO₂ and particulate matter concentrations). This innovative device was designed to assess outdoor environments on a hyperlocal scale from the pedestrian perspective with high temporal granularity (data recorded every five seconds). Besides all the monitoring sensors, it counts with a GPS to track the precise geographical position of each record. In addition to this wearable device, a thermohygrometer was settled in the two spots to continuously monitor temperature and relative humidity (temperature accuracy: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$; humidity accuracy: $\pm 3.0\%$ at 25°C) during the entire four days when the environmental walks occurred, recording these data every one minute. These sensors were positioned in a place protected from direct exposition to solar radiation and rain. Figure 1 shows the wearable device and the thermohygrometers used in this campaign.

Figure 1. Monitoring devices: a and b) wearable system; c) thermohygrometer at the urban park; d) thermohygrometer at the commercial hub.



Despite quantitative environmental data, qualitative information was collected through dedicated questionnaires. This survey included questions related to personal information (gender and age) and to multi-domain comfort (based on the recommendations of ISO 10551:2019 [15] and the Method A of ISO/TS 12913–2:2018 [16]). Subjects were asked about their level of thermal comfort, visual comfort, noise perception, acoustic quality perception, and overall comfort on a 5-point Likert-like scale [17]. Table 1 presents the correlation between the Likert scale and the qualitative comfort judgment (noise perception and acoustic quality perception were used as acoustic comfort assessments).

The questionnaire was applied to the environmental walk participants (24 people who answered the survey in both spots) and to locals, that is, subjects that were already at the investigated spots (150 locals in the urban park and 160 in the commercial hub).

Table 1. Qualitative comfort assessment and correspondent Likert scale.

Likert scale	Thermal comfort	Visual comfort	Noise perception	Acoustic quality perception	Overall comfort
-2	Very uncomfortable	Very uncomfortable	Very noisy	Very bad	Very uncomfortable
-1	Uncomfortable	Uncomfortable	Noisy	Bad	Uncomfortable
0	Neither uncomfortable nor comfortable	Neither uncomfortable nor comfortable	Neutral	Neither bad nor good	Neither uncomfortable nor comfortable
+1	Comfortable	Comfortable	Silent	Good	Comfortable
+2	Very comfortable	Very comfortable	Very silent	Very good	Very comfortable

2.3. Data analysis

Statistical methods were used to analyze the quantitative and qualitative gathered data. Descriptive statistics were used to describe the two spots in terms of the environmental boundary conditions and people environmental perception. Then, data registered with the wearable device were compared with the Mann-Whitney test [18] to verify whether the monitored environments differed in terms of environmental parameters. The choice for a non-parametric test was done because most samples of environmental data did not follow the normal distribution. The same hypothesis test was used to evaluate whether the environmental perception differed in both places. For this analysis, only the answers from local people were considered because this test requires non-paired samples. The significance level considered in these analyses was 5%.

As a first multi-domain analysis, the association between thermal comfort vote and other domains' votes (visual, acoustic, and overall comfort) was analyzed through Fisher's test [19] to determine whether this relationship was a statistically significant. Here, votes from both participants and local people were included, but the analysis was performed separately for the urban park and the commercial hub to check if the association between the domains was different in these spots. Again, the adopted significance level was 5%.

Then, probit regression was used to determine whether environmental parameters from the thermal domain are related to visual, acoustic, and overall comfort. Probit regression verifies the relationship between a dichotomous (binary) response variable and one or more predictors by estimating the probability of an observation falling in one of the two categories of the response variable. It has been already used for analyzing subjective assessments of thermal sensation [20–23]. In this study, as a multi-domain approach is being proposed, temperature and relative humidity were considered the predictors, and visual comfort, noise perception, acoustic quality perception, and overall comfort were the response variables. As the outcomes were evaluated on a 5-point scale and for the probit model they must be binary, it was considered the votes corresponding to +2 and +1 on the Likert scale (Table 1) as "comfortable" (1), and the votes 0, -1, and -2 as "uncomfortable" (0). Votes from participants and locals were used in the probit models. Participants were associated with the temperature and humidity registered by the wearable device as this system registered the specific conditions to which they were being exposed, while votes from locals were correlated to the data retrieved by the thermohygrometers as their assessments were not necessarily provided at the time

the wearable device was in that spot (locals votes were collected during the entire walk period, which lasted about 56 minutes). Model fit was evaluated by means of the Akaike Information Criterion (AIC): the lower the AIC, the better the probit model fits the data. The effect of the predictors in the response variable was assessed by determining the average marginal effects (AME). In the case of the probit models, AME represents how much the probability of the outcome being 1 (in this case, “comfortable”) increases or decreases when the predictor rises by one unit. The probit models were developed separately for the urban park and the commercial hub, and this analysis was performed in the R software environment [24] using the packages DescTools [25] and margins [26].

3. Case study

This study took place in Perugia, central Italy, which is an area defined by a humid subtropical climate (climate zone Cfa according to the Köppen-Geiger classification [27]). Two places were investigated: an urban park and a commercial hub. They are close to each other, then the walk between these spots was approximately 1 km long. The entire length of each environmental walk (including the 10 minutes of acclimatization in each place) was about 56 minutes. The walks always started at the urban park and finished in the commercial hub. Figure 2 presents a map indicating where the monitored places are located, as well as pictures of the two spots (taken at the position where the participants have stayed during the monitoring campaign). The red line indicated the path crossed during the monitoring.

Figure 2. a) Monitored areas and path crossed for the environmental walk; b) urban park; c) commercial hub.



The urban park is relatively new and integrates greenery with seats and sidewalks, an artificial lake, a playground, an open arena, and a restaurant, with background music all the time. The commercial hub has two floors, the first one has stores and restaurants, and the second has offices. In front of the building, there is a parking lot to serve the customers.

4. Results and discussions

4.1. Environmental conditions

Figure 3 presents the parameters measured with the wearable monitoring system during the eight environmental walks performed. A technical issue occurred with the device during the walk on June 14th at 6 pm, then data from this monitoring session is not available.

During all environmental walks, the air temperature was higher and relative humidity was lower at the commercial hub than in the park. These differences were statistically significant ($p < .05$) by comparing the two spots through the Mann-Whitney test (except for air temperature on June 13th at 6 pm, $p = .141$). However, since these measurements were not done simultaneously, this variation could also be attributed to elapsed time. For this reason, the differences between air temperature retrieved by the wearable at the beginning (park) and the end (commercial hub) of the walks were compared to the differences registered by the thermohygrometers during the same periods. As these sensors were placed in fixed spots, the air temperature variation registered by them is only due to elapsed time. Table 2 presents these values. The negative signs mean that air temperature decreased in time during the referred period.

Table 2. Differences in air temperature (°C) identified with the wearable device and the fixed thermohygrometers during each walk.

Walk	Wearable device	Fixed sensors	
		Urban park	Commercial hub
June 12 th , 2 pm	3.19	1.01	0.73
June 12 th , 6 pm	0.52	6.07	-0.18
June 13 th , 2 pm	2.88	0.13	0.74
June 13 th , 6 pm	-0.93	3.48	-0.21
June 14 th , 2 pm	2.36	0.16	-0.48
June 14 th , 6 pm	-	4.50	-1.07
June 15 th , 2 pm	2.88	0.32	-0.30
June 15 th , 6 pm	0.29	5.01	0.07

Air temperature increased during the walk duration at the urban park in all sessions. The same was observed with the wearable device, with exception of the monitoring on June 13th at 6 pm. At the commercial hub, on the other side, this pattern varied along the days and periods when the walk was performed. It is important to note that extremely high differences were identified at the urban park during the later period (6 pm). Even though the fixed sensors were protected from the sun exposition, the probe positioned at the urban park was under the sun from 6.30 pm to 7.00 pm because of the sun's position at this time of the day, causing this rapid rise in recorded air temperatures. The increasing/decreasing air temperature trends differed between the wearable device and the fixed sensors in magnitude. The variation registered by the wearable device was always broader than the one observed in the commercial hub, and broader than in the park at 2 pm (when the fixed sensor was

shadowed). Therefore, it can be inferred that, despite the time effect, the distinct spatial features of these places (morphology and surface materials) also have a meaningful influence on air temperature.

Wind speed was always greater in the park (difference statistically significant in all the walks), which contributes to improving thermal comfort during summer [28]. Solar radiation and illuminance were also significantly higher at the park, but this is due to the fact that participants stayed in the shadowed area at the commercial hub. These parameters presented high amplitude at the park due to the trees' shadows: the person carrying the wearable device sought to stay close to the participants, moving accordingly to their position that could quickly change from a point under the sun to a shadowed one because of the presence of trees.

Regarding air quality, CO₂ concentrations were slightly higher in the commercial area, with differences that were not statistically significant only on June 12th at 6 pm ($p = .996$) and June 13th at 2 pm ($p = .075$). The disparity between the places is more evident when evaluating the PM concentrations, which were significantly higher at the commercial zone (except for PM₁₀ concentrations on June 14th at 2 pm, $p = .368$). Markedly, urban greenery is recognized as a mitigation strategy for PM concentrations and air quality improvement in cities [29,30].

4.2. Subjective environmental assessments

A total of 174 people answered the questionnaire at the urban park. They were between 11 and 75 years old (mean = 33.0, sd = 14.4), 53% females and 47% males. At the commercial hub, 184 people responded to the environmental assessment, with ages ranging from 11 to 74 years (mean = 29.4, sd = 13.1), 51% females and 49% males.

Figure 4 presents the environmental assessment of the two places under investigation provided by participants and locals through the questionnaire, and Table 3 presents the p values obtained from the comparison of these votes through the Mann-Whitey test. Thermal comfort assessments were usually better at the park than in the commercial area (more votes for "comfortable" (+1) and "very comfortable" (+2)), while the visual comfort evaluations were more similar. Concerning the acoustic domain, the commercial hub was generally perceived as noisier, and acoustic quality was better evaluated at the park. In fact, urban greenery contributes to noise attenuation [31], which can lead to better acoustic perception. The better acoustic comfort assessments at the park are more evident at 6 pm than at 2 pm. Both places were well evaluated in terms of overall comfort, with mean comfort votes equal to 0.79 (2 pm) and 1.09 (6 pm) at the park and 0.40 (2 pm) and 0.45 (6 pm) at the commercial hub.

Different from the environmental parameters, people's perceptions were often similar as statistically significant differences were not found for all environmental walks. This implies that factors other than the environment itself influence comfort levels. Indeed, some studies reported that emotional regulation and some personal factors like age, gender, health, and smoke status [8,32,33] can influence the environmental perception outdoors, which emphasizes the importance of including the human dimension in comfort studies conducted in outdoor environments.

Figure 3. Environmental data registered with the wearable device: a) air temperature; b) relative humidity; c) wind speed; d) CO₂ concentration; e) PM_{2.5} concentration; f) PM₁₀ concentration; g) solar radiation; h) illuminance. (Note: UP means urban park, CH means commercial hub)

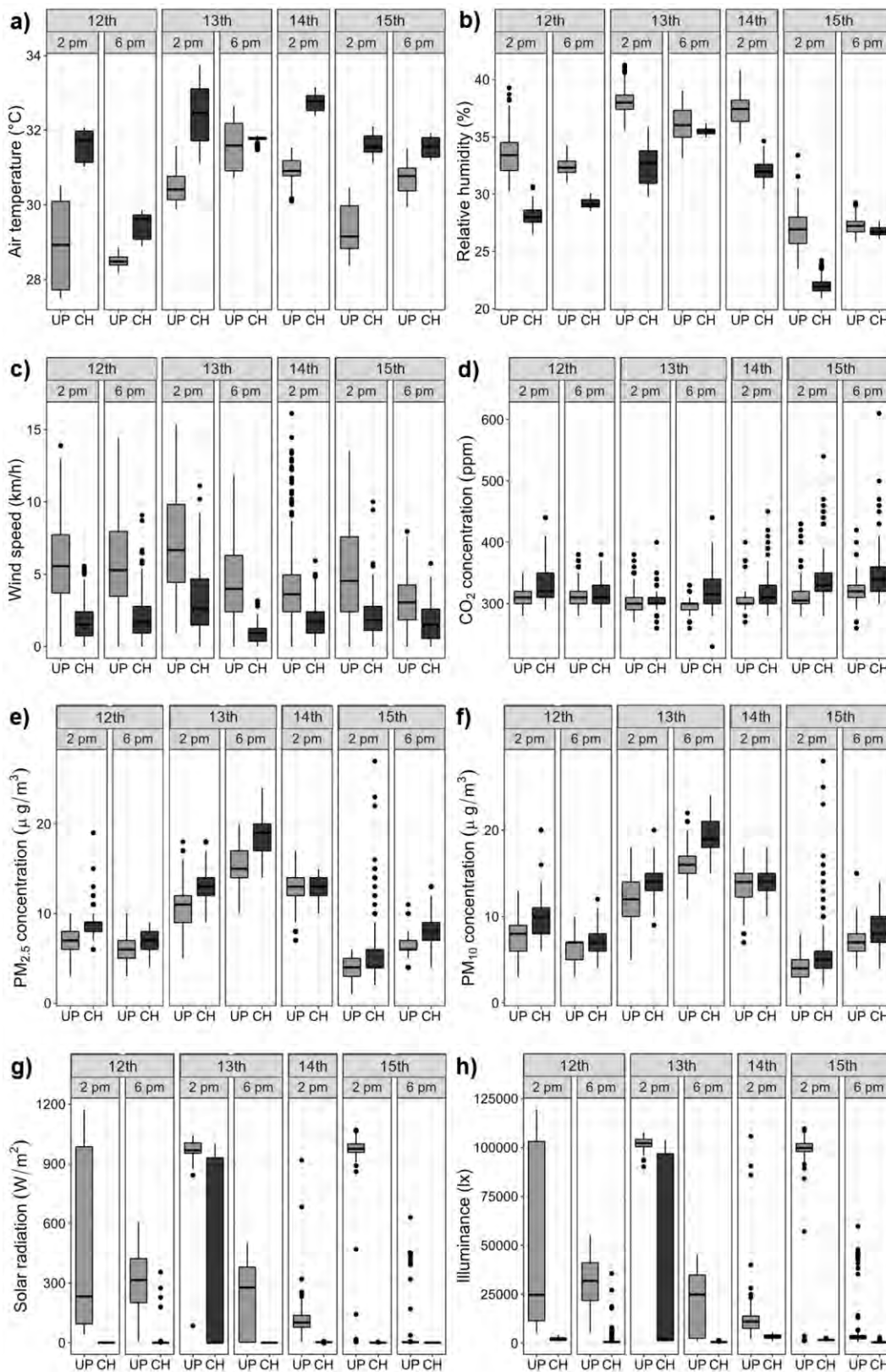


Figure 4. Questionnaire answers regarding a) thermal comfort; b) visual comfort; c) noise perception; d) acoustic quality perception; e) overall comfort.

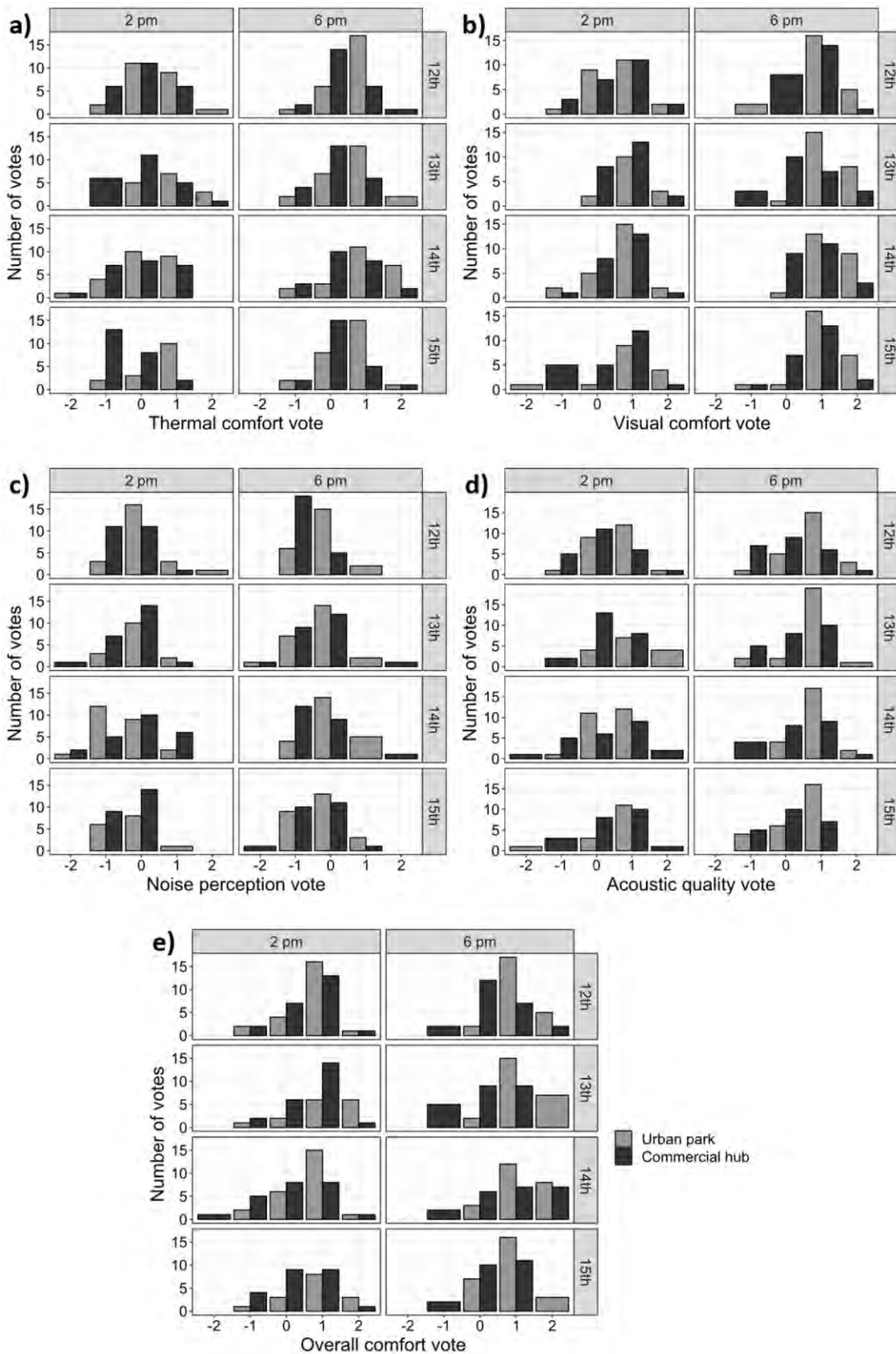


Table 3. *p* values for Mann-Whitney test.

Walk	Thermal comfort	Visual comfort	Noise perception	Acoustic quality perception	Overall comfort
June 12 th , 2 pm	0.582	0.635	0.005*	0.463	0.752
June 12 th , 6 pm	0.062	0.098	0.002*	0.023*	0.007*
June 13 th , 2 pm	0.003*	0.572	0.247	0.016*	0.064
June 13 th , 6 pm	0.042*	0.003*	0.599	0.016*	0.001*
June 14 th , 2 pm	0.919	0.957	0.002*	0.429	0.638
June 14 th , 6 pm	0.031*	0.017*	0.023*	0.024*	0.231
June 15 th , 2 pm	< .001*	0.038*	0.456	0.383	0.053
June 15 th , 6 pm	0.045*	0.069	0.216	0.497	0.287

Note: * $p < .05$.

4.3. Multi-domain comfort investigation

The first multi-domain investigation was the analysis of the relationship between the thermal comfort votes with the other domains' responses. In both places, the improvement in thermal comfort was associated with better visual and overall comfort assessments. At the park, higher thermal comfort levels were related to more votes for "silent" and "good acoustic quality". The votes for "very comfortable" related to the thermal domain that both places received (one vote for each place) are associated with "very noisy" votes. The significance of these relationships was tested with Fisher's test (*p* values presents in Table 4).

Table 4. *p* values for Fisher's test.

Compared domains	Urban park	Commercial hub
Thermal comfort and visual comfort	< .001*	< .001*
Thermal comfort and noise perception	.031*	.154
Thermal comfort and acoustic quality perception	.010*	.281
Thermal comfort and overall perception	< .001*	< .001*

Note: * $p < .05$.

The thermal domain was related to visual and comfort ones at the park, and to overall comfort level as well. At the commercial hub, the relationship between thermal and acoustic domains was not statistically significant, implying that interactions between comfort domains are more relevant at the park than in the commercial area.

Then, to investigate the relationship between thermal environmental triggers (air temperature and relative humidity) and subjective assessments, four probit regression models were developed for each place. Table 5 presents the AIC of each model, used to evaluate the model fit, and the *p* values for the predictors, which indicates whether they were significant to predict the response variable.

Since the probit models consider different response variables, AIC cannot be used to compare them. However, it is notable that, for both places, the noise perception model presented the lower AIC. For the models developed with urban park data, the air temperature was statistically significant only for

visual comfort. In this case, by increasing temperature by one unit, the probability of being comfortable in the visual domain increases by 7%. For the commercial area models, temperature and relative humidity were significant for noise perception (AME equal to 4% and 1%, respectively). The air temperature was also significant to the overall comfort model, but in this case, its rise by one unit reduces in 7% the probability of feeling comfortable overall.

Table 5. Outcomes of probit models.

Response variable	Predictor	Urban park		Commercial hub	
		<i>p</i> value	Model AIC	<i>p</i> value	Model AIC
Visual comfort	Air temperature	.002*	139.5	.250	252.9
	Relative humidity	.294		.263	
Noise perception	Air temperature	.493	133.3	.027*	80.5
	Relative humidity	.669		.023*	
Acoustic quality perception	Air temperature	.463	221.0	.901	253.9
	Relative humidity	.766		.821	
Overall comfort	Air temperature	.378	179.8	.039*	254.6
	Relative humidity	.884		.581	

Note: * $p < .05$.

Although the relationship between the thermal domain and the other ones was significant when analyzing the subjective assessments (i.e., questionnaire responses), thermal environmental parameters as triggers for the other domains were not significant for the most part of regression models. Even in the cases when the environmental parameters were significant to the probit models, their average effect on increasing or decreasing the comfort level is very low. Therefore, it can be inferred that the multi-domain interactions in this case study are more related to the subjective aspects of comfort, like personal and psychological ones, than to the environmental triggers. Indeed, as previously stated, subjective factors play an important role in environmental perception [8,32,33], and, for this reason, can also affect the perceived crossed effects between comfort domains.

5. Conclusions

This paper presents an investigation of the crossed effects between the thermal domain and visual, acoustic, and overall comfort in outdoor environments. This study was based on environmental walks and involved environmental data gathered by a wearable device and fixed thermohygrometers, and subjective environmental assessments provided through a comfort questionnaire. Two different spaces were investigated (an urban park and a commercial hub) located in the same urban area in central Italy.

In general, the differences between the environmental parameters registered in these two environments were statistically significant. However, people's environmental perceptions were often similar, with a slightly better perception of the park than the commercial hub. Therefore, subjective factors have affected peoples' perceptions as places with different environmental characteristics were similarly evaluated. When performing the multi-domain assessment using only qualitative data

(questionnaire answers), visual and overall comfort were significantly related to the thermal domain in both places, while acoustics and thermal only at the urban park. Conversely, in the multi-domain analysis considering air temperature and relative humidity as triggers for perception related to other domains, the predictors were significant only for visual comfort at the park, and noise perception and overall comfort in the commercial area. Hence, it can be concluded that the perceived crossed effects between comfort domains in these two places are more related to subjective factors than to environmental triggers, emphasizing the importance of including the human dimension (i.e., subjective assessments) in comfort studies carried out outdoors. Furthermore, the found interactions between domains reinforce that multi-domain human comfort outdoors should be explored to a greater extent. Outdoor environments are more complex than indoor ones, which hinders multi-domain analyses. However, only through these investigations, it will be possible to fully understand environmental perception and comfort, which will enable proposing more effective actions for improving human well-being and cities' livability.

Further assessments using other regression techniques (e.g., logistic regression) should be performed to evaluate and improve the model fit. Moreover, additional analyses may be carried out to verify the relationship of environmental triggers from other domains (e.g., pollutants concentration, visual aspects, sound pressure, etc.) on thermal comfort. It is important to emphasize that this study was based on monitoring campaigns conducted in a specific period of the year, and the sample of subjects who answered the questionnaire was limited, so the results found through the performed analyses are restricted to the investigated areas under those environmental characteristics. Supplementary monitoring campaigns in different places and under different conditions should be carried out to enhance the proposed multi-domain approach.

References

1. United Nations Human Settlements Programme *World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization*; 2020; ISBN 978-92-1-0054386.
2. Martins, T.A.L.; Adolphe, L.; Bonhomme, M.; Bonneaud, F.; Faraut, S.; Ginestet, S.; Michel, C.; Guyard, W. Impact of Urban Cool Island Measures on Outdoor Climate and Pedestrian Comfort: Simulations for a New District of Toulouse, France. *Sustain. Cities Soc.* **2016**, *26*, 9–26, doi:10.1016/J.SCS.2016.05.003.
3. Peckens, C.; Porter, C.; Rink, T. Wireless Sensor Networks for Long-Term Monitoring of Urban Noise. *Sensors* 2018, *18*.
4. Santamouris, M. Recent Progress on Urban Overheating and Heat Island Research. Integrated Assessment of the Energy, Environmental, Vulnerability and Health Impact. Synergies with the Global Climate Change. *Energy Build.* **2020**, *207*, 109482, doi:10.1016/J.ENBUILD.2019.109482.
5. Pérez, S.; German-Labaume, C.; Mathiot, S.; Goix, S.; Chamaret, P. Using Bayesian Networks for Environmental Health Risk Assessment. *Environ. Res.* **2022**, *204*, 112059, doi:10.1016/J.ENVRES.2021.112059.
6. Palusci, O.; Monti, P.; Cecere, C.; Montazeri, H.; Blocken, B. Impact of Morphological Parameters

- on Urban Ventilation in Compact Cities: The Case of the Tuscolano-Don Bosco District in Rome. *Sci. Total Environ.* **2022**, *807*, 150490, doi:10.1016/J.SCITOTENV.2021.150490.
7. Peng, Y.; Feng, T.; Timmermans, H. A Path Analysis of Outdoor Comfort in Urban Public Spaces. *Build. Environ.* **2019**, *148*, 459–467, doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.023.
 8. Pantavou, K.; Psiloglou, B.; Lykoudis, S.; Mavrakakis, A.; Nikolopoulos, G.K. Perceived Air Quality and Particulate Matter Pollution Based on Field Survey Data during a Winter Period. *Int. J. Biometeorol.* **2018**, *62*, 2139–2150, doi:10.1007/s00484-018-1614-3.
 9. Mascolo, A.; Mancini, S.; Graziuso, G.; Quartieri, J.; Guarnaccia, C. Comparison between Sound Pressure Levels and Perception: A Soundscape Application in a University Campus. *J. Phys. Conf. Ser.* **2020**, *1603*, 12026, doi:10.1088/1742-6596/1603/1/012026.
 10. Chinazzo, G.; Andersen, R.K.; Azar, E.; Barthelmes, V.M.; Becchio, C.; Belussi, L.; Berger, C.; Carlucci, S.; Corgnati, S.P.; Crosby, S.; et al. Quality Criteria for Multi-Domain Studies in the Indoor Environment: Critical Review towards Research Guidelines and Recommendations. *Build. Environ.* **2022**, *226*, 109719, doi:10.1016/J.BUILDENV.2022.109719.
 11. Cureau, R.J.; Pigliautile, I.; Kousis, I.; Pisello, A.L. Multi-Domain Human-Oriented Approach to Evaluate Human Comfort in Outdoor Environments. *Int. J. Biometeorol.* **2022**, *66*, 2033–2045, doi:10.1007/s00484-022-02338-7.
 12. Pigliautile, I.; Pisello, A.L. A New Wearable Monitoring System for Investigating Pedestrians' Environmental Conditions: Development of the Experimental Tool and Start-up Findings. *Sci. Total Environ.* **2018**, *630*, 690–706, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.02.208.
 13. Cureau, R.J.; Pigliautile, I.; Pisello, A.L. A New Wearable System for Sensing Outdoor Environmental Conditions for Monitoring Hyper-Microclimate. *Sensors* **2022**, *22*, 502.
 14. Kleerekoper, L.; Van Esch, M.; Salcedo, T.B. How to Make a City Climate-Proof, Addressing the Urban Heat Island Effect. *Resour. Conserv. Recycl.* **2012**, *64*, 30–38, doi:10.1016/J.RESCONREC.2011.06.004.
 15. International Organization for Standardization ISO 10551:2019 Ergonomics of the Physical Environment. Subjective Judgement Scales for Assessing Physical Environments 2019.
 16. International Organization for Standardization ISO/TS 12913-2:2018 Acoustics — Soundscape — Part 2: Data Collection and Reporting Requirements 2018.
 17. Bavaresco, M. V.; D'Oca, S.; Ghisi, E.; Lamberts, R. Methods Used in Social Sciences That Suit Energy Research: A Literature Review on Qualitative Methods to Assess the Human Dimension of Energy Use in Buildings. *Energy Build.* **2020**, *209*, doi:10.1016/J.ENBUILD.2019.109702.
 18. Corder, G.W.; Foreman, D.I. *Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach*; 2011; ISBN 9781118165881.
 19. Hoffman, J.I.E. Hypergeometric Distribution. *Biostat. Med. Biomed. Pract.* **2015**, 179–182, doi:10.1016/B978-0-12-802387-7.00013-5.
 20. Ballantyne, E.R.; Hill, R.K.; Spencer, J.W. Probit Analysis of Thermal Sensation Assessments. *Int. J. Biometeorol.* **1977**, *21*, 29–43, doi:10.1007/BF01552964.
 21. Salata, F.; Golasi, I.; de Lieto Vollaro, R.; de Lieto Vollaro, A. Outdoor Thermal Comfort in the

- Mediterranean Area. A Transversal Study in Rome, Italy. *Build. Environ.* **2016**, *96*, 46–61, doi:10.1016/J.BUILDENV.2015.11.023.
22. Canan, F.; Golasi, I.; Ciancio, V.; Coppi, M.; Salata, F. Outdoor Thermal Comfort Conditions during Summer in a Cold Semi-Arid Climate. A Transversal Field Survey in Central Anatolia (Turkey). *Build. Environ.* **2019**, *148*, 212–224, doi:10.1016/J.BUILDENV.2018.11.008.
23. Liu, S.; Nazarian, N.; Hart, M.A.; Niu, J.; Xie, Y.; de Dear, R. Dynamic Thermal Pleasure in Outdoor Environments - Temporal Alliesthesia. *Sci. Total Environ.* **2021**, *771*, doi:10.1016/J.SCITOTENV.2020.144910.
24. R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing Available online: <https://www.r-project.org/>.
25. Signorell, A.; Aho, K.; Alfons, A.; Anderegg, N.; Aragon, T.; Arachchige, C.; Arppe, A.; Baddeley, A.; Barton, K.; Bolker, B.; et al. DescTools: Tools for Descriptive Statistics. R Package Version 0.99.46 Available online: <https://cran.r-project.org/package=DescTools>.
26. Leeper, T.J. Margins: Marginal Effects for Model Objects. R Package Version 0.3.26 2021.
27. Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F. World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorol. Zeitschrift* **2006**, *15*, 259–263, doi:10.1127/0941-2948/2006/0130.
28. Wei, D.; Yang, L.; Bao, Z.; Lu, Y.; Yang, H. Variations in Outdoor Thermal Comfort in an Urban Park in the Hot-Summer and Cold-Winter Region of China. *Sustain. Cities Soc.* **2022**, *77*, 103535, doi:10.1016/J.SCS.2021.103535.
29. Fares, S.; Conte, A.; Alivernini, A.; Chianucci, F.; Grotti, M.; Zappitelli, I.; Petrella, F.; Corona, P. Testing Removal of Carbon Dioxide, Ozone, and Atmospheric Particles by Urban Parks in Italy. *Environ. Sci. Technol.* **2020**, *54*, 14910–14922, doi:10.1021/acs.est.0c04740.
30. Su, T.H.; Lin, C.S.; Lu, S.Y.; Lin, J.C.; Wang, H.H.; Liu, C.P. Effect of Air Quality Improvement by Urban Parks on Mitigating PM2.5 and Its Associated Heavy Metals: A Mobile-Monitoring Field Study. *J. Environ. Manage.* **2022**, *323*, 116283, doi:10.1016/J.JENVMAN.2022.116283.
31. Cohen, P.; Potchter, O.; Schnell, I. The Impact of an Urban Park on Air Pollution and Noise Levels in the Mediterranean City of Tel-Aviv, Israel. *Environ. Pollut.* **2014**, *195*, 73–83, doi:10.1016/J.ENVPOL.2014.08.015.
32. Zhang, T.; Su, M.; Hong, B.; Wang, C.; Li, K. Interaction of Emotional Regulation and Outdoor Thermal Perception: A Pilot Study in a Cold Region of China. *Build. Environ.* **2021**, *198*, doi:10.1016/J.BUILDENV.2021.107870.
33. Pantavou, K.; Lykoudis, S.; Psiloglou, B. Air Quality Perception of Pedestrians in an Urban Outdoor Mediterranean Environment: A Field Survey Approach. *Sci. Total Environ.* **2017**, *574*, 663–670, doi:10.1016/J.SCITOTENV.2016.09.090.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Benessere 4D. Programmazione di attuatori in legno stampati in 4D per il miglioramento passivo del benessere igrometrico e percettivo

Fabio Bianconi¹, Marco Filippucci¹, Giulia Pelliccia^{1,*}

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia

* Autore di riferimento. E-Mail: giulia.pelliccia@outlook.it

Abstract: Abitare significa sia avere un rapporto con il territorio e l'ambiente, sia collegarsi alla propria identità e alla propria memoria. In questo contesto, il rapporto tra architettura e natura assume un importante significato e si pone al centro del tema dell'architettura in legno. L'architettura in legno ha un fascino estetico e benefici pratici che hanno un impatto positivo sulla salute e sul benessere dei cittadini. Le caratteristiche del legno sono in linea con i principi della progettazione biofilica, che migliorano il comfort e il benessere riducendo lo stress e gestendo il "tecnostress". Il legno può essere considerato un materiale intelligente naturale in virtù delle sue proprietà igroscopiche e può essere ingegnerizzato sfruttando gli scarti dell'industria del legno per produrre nuovi compositi. Tra essi, i WPCs (Wood Polymer Composites) possono essere utilizzati per realizzare filamenti per stampanti 3D di tipo FDM (Fused Deposition Modeling), consentendo di impiegare le tecniche di fabbricazione additiva al legno. Le stesse proprietà igroscopiche che nel legno producono variazioni dimensionali dovute all'assorbimento o desorbimento di umidità dall'ambiente circostante si verificano anche nei compositi a base di legno stampati in 3D. La risposta igroscopica e la velocità di reazione possono essere programmate in funzione di determinate proprietà di stampa, alternanza degli strati, materiali utilizzati e pattern impiegati per produrre attuatori responsivi. L'obiettivo è quello di collegare la trasformazione della forma in funzionalità di controllo ambientale applicata al comfort degli edifici. Tali attuatori biomimetici possono essere sfruttati come regolatori passivi dei flussi d'aria umida che aggiungono ai concetti di funzionalità e sostenibilità anche l'attenzione verso la qualità estetica.

Keywords: compositi in legno; stampa 4D; regolazione igrometrica; controllo passivo; attuatori responsivi; facciate responsive; stampa 3D in legno.

1. Introduzione

1.1 *Biophilic design e benessere*

Il concetto di abitare è etimologicamente legato al verbo latino *habere*, che significa avere, possedere. Tuttavia, non si tratta solo di possedere, quanto di inescare una relazione, in primo luogo con il territorio e l'ambiente, in secondo luogo con la città. Lo spazio diventa abitazione quando viene vissuto e percepito, secondo il senso della parola latina *percipere*, che significa afferrare o, appunto, percepire. L'aspetto percettivo diventa predominante, poiché l'uomo è un animale prevalentemente visivo e "più del 50% dei neuroni del suo cervello risponde a questo input sensoriale" [1]. La scelta di un'abitazione non ricade soltanto su aspetti funzionali e prestazionali, ma comprende anche altri fattori come la sostenibilità e il senso di accoglienza. L'ambiente ha un impatto sulla vita di chi vive lo spazio [2] e può avere un effetto positivo o negativo, ma mai neutro. Ripensare lo spazio architettonico in relazione alla salute dei cittadini [3] e al benessere [4] diventa quindi centrale.

Tra i materiali più diffusi e utilizzati in architettura, il legno è uno di quelli che maggiormente influisce sull'uomo e sul suo comfort. La salubrità di un luogo è la premessa fondamentale per garantire condizioni adeguate di comfort e fruizione degli spazi, dal punto di vista termo-igrometrico, acustico, illuminotecnico e visivo. Secondo Fell, i molteplici benefici fisiologici e psicologici per la salute individuati nell'architettura in legno includono la riduzione della pressione sanguigna, della frequenza cardiaca e dei livelli di stress, l'aumento della vigilanza e della concentrazione, il miglioramento dello stato emotivo e del livello di espressione di sé, l'aumento della creatività, una maggiore rapidità di recupero e una minore percezione del disagio [5]. Le qualità del legno e delle architetture in legno rientrano nella logica della progettazione biofilica [6–8], in particolare per la relazione che genera all'interno dell'abitazione con chi la abita [8–10]. Questo vale anche per ambienti e condizioni diverse [11,12], anche se differiscono solo nell'aspetto [13]. A parità di spazio, il legno influisce sul benessere [14] e allo stesso tempo permette di gestire e ridurre il "tecnostress" [15]. Il legno stimola i sensi influenzando il benessere in modo implicito attraverso l'olfatto, il suono (prodotto, ad esempio, camminando sui pavimenti), il tatto che stimola le sensazioni e la vista che è legata alla valutazione del comfort [16].

Si può parlare allora di benessere in quattro dimensioni: quella fisica, legata al comfort termo-igrometrico, quella mentale, basata sul comfort percettivo, quella ambientale, attraverso la sostenibilità dei materiali, e infine quella temporale, per effetto delle azioni che determinano il concetto di abitare.

1.2 *Stampa 4D di compositi a base di legno*

Il legno è un materiale anisotropo con simmetria ortotropa che presenta tre diversi coefficienti di rigonfiamento corrispondenti alle tre direzioni anatomiche principali (tangenziale, longitudinale e radiale) [17]. In particolare, trasferendo i principi biomimetici che regolano l'apertura delle squame delle pigne a strutture artificiali ingegnerizzate, è possibile realizzare strutture a doppio strato con una risposta pre-programmata alle variazioni di umidità [18–20]. Le differenze nel coefficiente di

espansione tra i due strati determinano la flessione del composito indotta dalle sollecitazioni [21].

Negli ultimi 10 anni, l'uso della stampa 3D ha dimostrato un potenziale nello sviluppo di materiali con architetture complesse attraverso la produzione di materiali intelligenti [22]. La versatilità della manifattura additiva basata sulla tecnologia FDM (Fused Deposition Modelling) l'ha resa adatta anche alla realizzazione di sensori di vario tipo e all'impiego in svariati campi [23]. La stampa 3D si basa su una serie di precise istruzioni per il posizionamento geometrico del percorso di stampa e sul codice per gestire le impostazioni di stampa. Queste istruzioni sono progettate e manipolate all'interno di una piattaforma di modellazione computazionale. Per percorsi di stampa molto semplici, le istruzioni possono essere scritte inserendo direttamente le istruzioni del G-code riga per riga. Un approccio più recente è la progettazione diretta tramite visual scripting all'interno di una piattaforma di modellazione 3D.

Il tempo di risposta di un sensore rispetto allo stimolo e la velocità di risposta successiva sono fondamentali per valutare le sue caratteristiche di prestazione. Oltre alle tre dimensioni di larghezza, altezza e lunghezza, diventa fondamentale la quarta dimensione, il tempo, come funzione del tempo di risposta in relazione allo stimolo. Si parla quindi di stampa 4D [24], che riguarda l'utilizzo della stampa 3D per produrre sensori la cui reazione è innescata da specifici stimoli esterni come luce, calore, solventi, elettricità o acqua [25,26]. Tra questi Stimulus Responsive Materials (SRMs) [25] ci sono quelli che reagiscono alle variazioni di umidità utilizzando filamenti a base di farina di legno [27–30] o, più in generale, Wood Polymer Composites (WPCs). Quando sono esposti a variazioni di umidità, i compositi a doppio strato a base di legno subiscono una flessione indotta da sollecitazioni, a causa delle differenze nei coefficienti di rigonfiamento tra lo strato attivo e quello passivo [31]. Questo comportamento bio-ispirato può essere utile per sviluppare attuatori passivi igromorfi per gli ambienti costruiti, al fine di attivare un sistema di ventilazione naturale. Questo può costituire una soluzione più economica e sostenibile rispetto ai tradizionali sistemi di ventilazione elettromeccanici [32].

2. Programmazione e design delle deformazioni igroscopiche

La ricerca è finalizzata allo sviluppo di un attuttore igroscopico responsivo da utilizzare come regolatore passivo del flusso d'aria in ambienti interni umidi. L'uso di una stampante 3D è più conveniente rispetto alla produzione di compositi laminati in legno, dove i tranciati in legno che compongono lo strato attivo e quello passivo sono incollati con la fibratura incrociata, oppure lo strato passivo è formato da un materiale non igroscopico.

Diverse proprietà di stampa influenzano il comportamento di tali compositi igroscopici. Il *layer height* è una delle più importanti, poiché regola lo spessore dei singoli strati e lo spessore complessivo del campione. Partendo dalla teoria di Timoshenko [33], sostituendo la temperatura con l'umidità relativa e i coefficienti di espansione termica con quelli igroscopici, la variazione di curvatura del composito a doppio strato Δk può essere calcolata seguendo Reysat et al. [19]:

$$\Delta k = \frac{\alpha \Delta \varphi f(m, n)}{h} \quad (1)$$

dove

$$f(m, n) = \frac{[6(1+m)^2]}{[3(1+m)^2 + (1+mn)(m^2 + \frac{1}{mn})]} \quad (2)$$

e $m = h_p/h_a, m = h_p/h_a$

α è la differenza tra i coefficienti di espansione igroscopica dello strato attivo e passivo e $\Delta\phi$ è la variazione dell'umidità relativa.

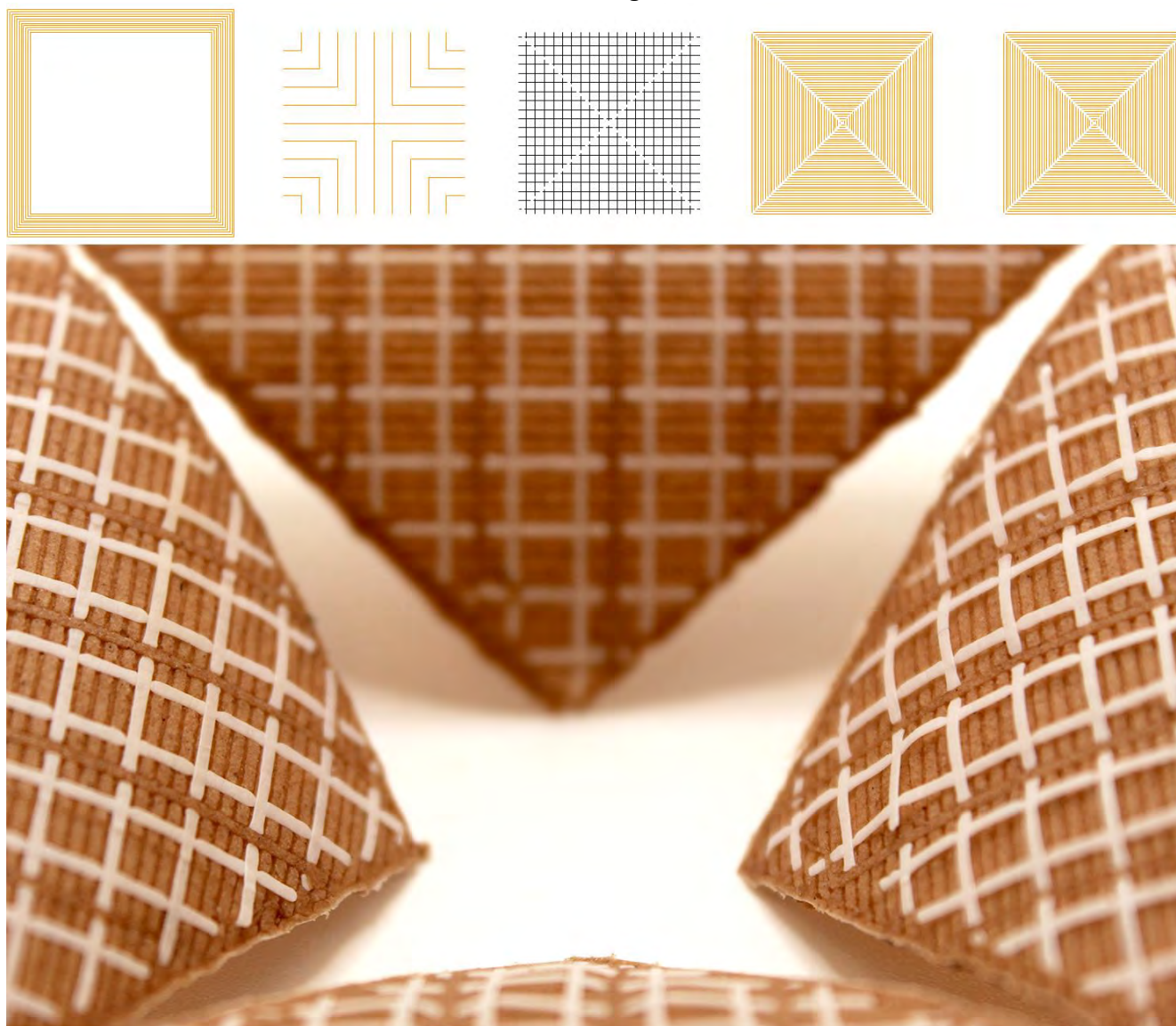
L'*infill* è un secondo parametro di stampa importante. Esso comprende tutto ciò che è interno al perimetro esterno o alle pareti dell'oggetto stampato. Il pattern può assumere varie geometrie e, insieme alla densità dell'*infill*, può influenzare la resistenza complessiva e il tempo di stampa. Nei compositi a base di legno stampati in 3D questi parametri contribuiscono a regolare l'entità e la direzione dell'espansione.

Diversi attuatori con forme e configurazioni differenti sono stati stampati in 3D in studi precedenti [34]. A partire da questi primi risultati, in questo articolo viene presentato un metodo di fabbricazione differente che prevede un ulteriore intervento sull'oggetto stampato, secondo la tecnica giapponese del kirigami.

2.1 Realizzazione di un attuttore igroscopico stampato in 3D con la tecnica del kirigami

L'attuttore oggetto del presente articolo è stato stampato con una Prusa i3 MK3S+ con un ugello di 0,4 mm di diametro. Per lo strato attivo è stato scelto il filamento Laywoo-D3, composto al 40% da farina di legno in una matrice polimerica in PLA (Acido Polilattico). Per lo strato passivo è quindi stato scelto il PLA, poiché il suo alto grado di compatibilità con il Laywood consente di ridurre la possibile delaminazione tra i due strati. Il comportamento igro-responsivo del composito è stato progettato considerando la flessione indotta dalle sollecitazioni ottenuta grazie alla particolare architettura a doppio strato. Lo strato attivo è stato stampato con il filamento a base di legno con un pattern a zig-zag e un *layer height* di 0.4 mm, mentre per lo strato passivo in PLA è stato scelto un pattern a griglia e un *layer height* di 0.2 mm. Un terzo tipo di strato, chiamato strato di adesione, è stato necessario in questo caso per migliorare ulteriormente l'adesione tra il filamento di legno e il PLA (Fig. 1).

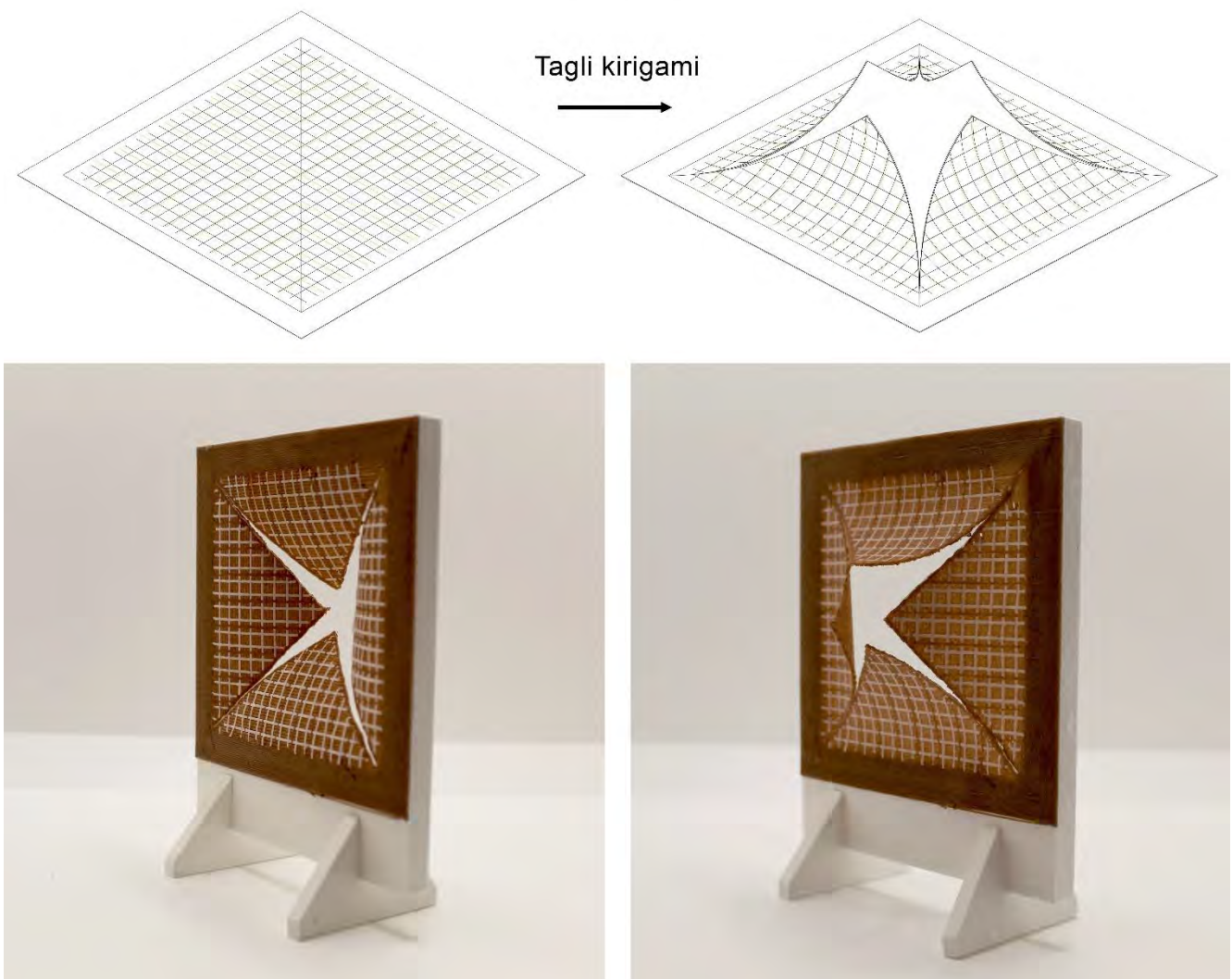
Figura 1. Sovrapposizione dei pattern e dei materiali per ogni specifico strato nell'attuatore realizzato tramite kirigami.



L'attuatore è un quadrato di 10 cm per lato che può essere considerato un esempio di applicazione di kirigami, una tecnica tradizionale giapponese che, contrariamente all'origami, prevede anche il taglio. Questo concetto è stato recentemente sviluppato e applicato ai materiali compositi per trasformare elementi 2D in geometrie 3D più complesse [35]. Invece di assemblare le parti costitutive dell'oggetto finale, questo approccio consente trasformazioni continue e dirette da 2D a 3D [36]. Pertanto, il composito responsivo può essere realizzato con un unico processo di stampa. Per il prototipo stampato presentato in questo articolo è stata utilizzata una cornice sottile come base di appoggio per quattro alette triangolari. Le alette sono state originariamente stampate in un pezzo unico che è stato poi tagliato con una taglierina termica. Le parti igro-responsive si piegano verso l'interno quando l'umidità aumenta e verso l'esterno quando diminuisce, mentre mostrano una configurazione piatta quando l'umidità è intorno al 40÷50% (Fig. 2), intervallo che risulta essere ottimale per il benessere degli occupanti. Infatti, da un lato, al di sotto del 30% possono verificarsi

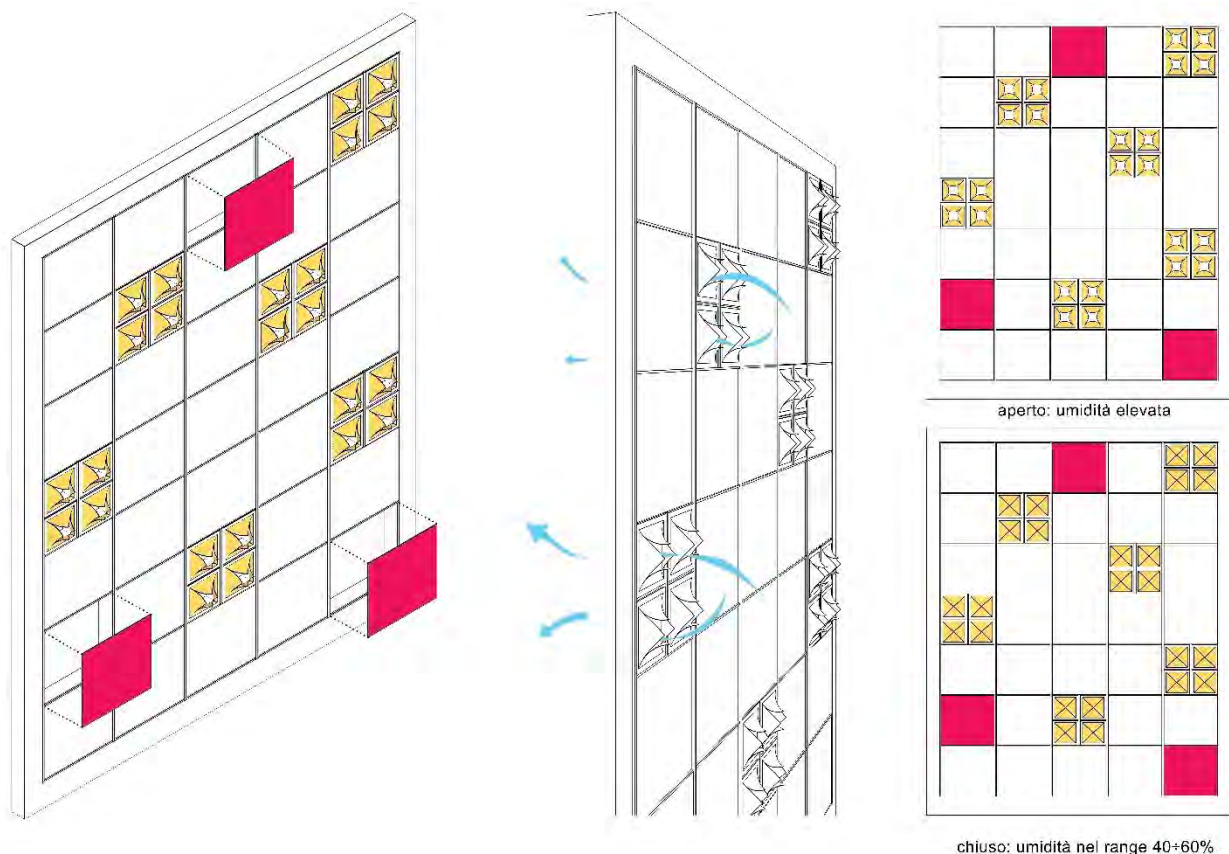
problemi di disseccamento delle mucose, dall'altro valori superiori al 60% possono aumentare lo sviluppo di acari della polvere [37]. Inoltre, valori di umidità superiori al 70% aumentano la sensazione di caldo con temperature elevate [38]. La tecnica del kirigami si è rivelata particolarmente utile per garantire una chiusura completa delle parti responsive una volta che i livelli di umidità tornano ai valori ambientali ottimali, in quanto l'attuatore torna alla configurazione originale che aveva prima del taglio.

Figura 2. Le deformazioni igroscopiche inducono una flessione delle alette verso l'interno (umidità > 40÷50%) o verso l'esterno (umidità < 40÷50%).



3. Applicazioni architettoniche per il miglioramento del benessere

La capacità dei compositi a base di legno stampati in 4D di utilizzare le proprietà intrinseche del materiale per cambiare forma in risposta all'umidità ambientale ha un grande potenziale per lo sviluppo di meccanismi di controllo ambientale passivo nell'ambito del comfort degli ambienti indoor. Il caso studio descritto è stato sviluppato come modulo per facciate interne personalizzabili, in cui gli elementi responsivi possono essere aggiunti o rimossi consentendo una maggiore o minore ventilazione (Fig. 3).

Figura 3. Possibile applicazione del modulo igroscopico per facciate indoor responsive.

Conclusioni

L'esigenza di metodi più sostenibili per migliorare le prestazioni degli edifici nasce dalle attuali sfide ambientali: riscaldamento, raffreddamento, illuminazione e ventilazione hanno un impatto a lungo termine sull'impronta ecologica di un edificio. Gli attuatori passivi realizzati con materiali pre-programmati offrono potenziali soluzioni per ridurre i costi operativi e utilizzare materiali rinnovabili a basso costo per migliorare gli ambienti interni. L'architettura degli SRMs può essere programmata attraverso algoritmi di visual scripting e stampa 4D, a seconda del comportamento e dello stimolo desiderato. Questo articolo tratta la produzione di compositi igro-reattivi utilizzando un'architettura funzionale di compositi a base di legno che impiega la teoria di Timoshenko per generare attuazioni cinematiche in risposta agli stimoli ambientali. La deformazione degli attuatori dipende in gran parte dalla geometria iniziale e dalle proprietà di stampa, ma combinando varie tecniche e moduli si possono ottenere attuatori che producono una deformazione significativa in risposta all'umidità. Le prime deformazioni avvengono entro pochi minuti dall'esposizione agli stimoli e raggiungono il valore massimo in poche ore, il che può essere utilizzato per progettare facciate responsive che deumidificano passivamente gli ambienti interni. Le proprietà intrinseche del materiale, la geometria e la mesostruttura degli attuatori stampati hanno quindi tutte le potenzialità per consentire di sviluppare meccanismi di apertura/chiusura per la ventilazione naturale.

References

1. Maffei, L., I diversi sentieri della memoria e l'arte visiva. In A. Pinotti, & G. Lucignani, eds., *Immagin. della mente Neurosci. arte, Filos.* (Milano: Cortina Raffaello, 2007), pp. 69–81.
2. Goldhagen, S. W., *Welcome to Your World. How the Built Environment Shapes Our Lives* (New York: HarperCollins, 2017).
3. Millennium Ecosystem Assessment, *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis* (Washington : Island Press, 2005).
4. Bechtel, R. B. & Churchman, A., *Handbook of environmental psychology* (New York: J. Wiley & Sons, 2002).
5. Fell, D. R., Wood in the human environment : restorative properties of wood in the built indoor environment, University of British Columbia, **2010**. <https://doi.org/10.14288/1.0071305>.
6. Wilson, E. O., *Biophilia* (Harvard University Press, 1984).
7. Kellert, S. R., Heerwagen, J. H., & Mador, M. L., eds., *Biophilic Design: The Theory, Science, and Practice of Bringing Buildings to Life* (John Wiley & Sons Inc, 2008).
8. Strobel, K., Nyrud, A. Q., & Bysheim, K., Interior wood use: linking user perceptions to physical properties. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 32 (**2017**) 798–806. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1287299>.
9. Nyrud, A. Q. & Bringslimark, T., Is interior wood use psychologically beneficial? A review of psychological responses toward wood. *Wood and fiber science: journal of the Society of Wood Science and Technology*, 42 (**2010**) 202–218.
10. Tsunetsugu, Y., Miyazaki, Y., & Sato, H., Visual effects of interior design in actual-size living rooms on physiological responses. *Building and Environment*, 40 (**2005**) 1341–1346. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.11.026>.
11. Kelz, C., Grote, V., & Moser, M., Interior wood use in classrooms reduces pupils' stress levels. *Conf. 9th Bienn. Conf. Environ. Psychol.* (2011).
12. T., A., T. MA, W., K. MA, T., E. MA, T., H. MA, M., E. MA, T., B. MA, W., R., S., Y., S., C., T., T., M., & S., A., Behavior Changes in Older Persons Caused by Using Wood Products in Assisted Living. *Public Health Research*, 2 (**2012**) 106–109. <https://doi.org/10.5923/j.phr.20120204.07>.
13. Rice, J., Kozak, R. A., Meitner, M. J., & Cohen, D. H., Appearance wood products and psychological well-being. *Wood and Fiber Science: journal of the Society of Wood Science and Technology*, 38 (**2006**) 644–659.
14. Burnard, M. & Kutnar, A., Wood as a material for sustainable, healthy environments. *Proc. 57th Int. Conv. Soc. Wood Sci. Technol.* (2014).
15. Song, C., Ikei, H., & Miyazaki, Y., Physiological effects of nature therapy: A review of the research in Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13 (**2016**) 781. <https://doi.org/10.3390/ijerph13080781>.
16. Ikei, H., Song, C., & Miyazaki, Y., Physiological effects of wood on humans: a review. *Journal of Wood Science*, 63 (**2017**) 1–23. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1597-9>.
17. Giordano, G., *Tecnologia del legno. 1, La materia prima* (UTET, 1981).

18. Dawson, C., Vincent, J. F. V., & Rocca, A.-M., How pine cones open. *Nature*, 390 (1997) 668. <https://doi.org/10.1038/37745>.
19. Reyssat, E. & Mahadevan, L., Hygromorphs: from pine cones to biomimetic bilayers. *Journal of the Royal Society, Interface*, 6 (2009) 951–957. <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0184>.
20. Reichert, S., Menges, A., & Correa, D., Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness. *Computer-Aided Design*, 60 (2015) 50–69. <https://doi.org/10.1016/J.CAD.2014.02.010>.
21. Le Duigou, A. & Correa, D., 4D printing of natural fiber composite. In M. Bodaghi, & A. Zolfagharian, eds., *Smart Mater. Addit. Manuf. Vol. 1 4D Print. Princ. Fabr. Addit. Manuf. Mater. Technol.* (Elsevier, 2022), pp. 297–333.
22. Mustapha, K. B. & Metwalli, K. M., A review of fused deposition modelling for 3D printing of smart polymeric materials and composites. *European Polymer Journal*, 156 (2021) 110591. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2021.110591>.
23. Khosravani, M. R. & Reinicke, T., 3D-printed sensors: Current progress and future challenges. *Sensors and Actuators A: Physical*, 305 (2020) 111916. <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2020.111916>.
24. Pei, E., 4D printing: Dawn of an emerging technology cycle. *Assembly Automation*, 34 (2014) 310–314. <https://doi.org/10.1108/AA-07-2014-062/FULL/PDF>.
25. Tibbits, S., The emergence of 4D printing. *TED Conf.* (2013).
26. Zolfagharian, A., Kouzani, A. Z., Khoo, S. Y., Moghadam, A. A. A., Gibson, I., & Kaynak, A., Evolution of 3D printed soft actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 250 (2016) 258–272. <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2016.09.028>.
27. Le Duigou, A., Castro, M., Bevan, R., & Martin, N., 3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality. *Materials and Design*, 96 (2016) 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018>.
28. Correa, D. & Menges, A., 3D printed hygroscopic programmable material systems. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1800 (2015) 24–31. <https://doi.org/10.1557/OPL.2015.644>.
29. El-Dabaa, R. B., Salem, I., & Abdelmohsen, S., DIGITALLY ENCODED WOOD: 4D Printing of Hygroscopic Actuators for Architectural Responsive Skins. *ASCAAD 2021 - Archit. Age Disruptive Technol.* (Cairo, 2021), pp. 240–252.
30. Tahouni, Y., Cheng, T., Wood, D., Sachse, R., Thierer, R., Bischoff, M., & Menges, A., Self-shaping Curved Folding:: A 4D-printing method for fabrication of self-folding curved crease structures. *Proceedings - SCF 2020: ACM Symposium on Computational Fabrication*, (2020). <https://doi.org/10.1145/3424630.3425416>.
31. Tomec, D. K., Straže, A., Haider, A., & Kariž, M., Hygromorphic Response Dynamics of 3D-Printed Wood-PLA Composite Bilayer Actuators. *Polymers*, 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/POLYM13193209>.
32. Correa, D., Papadopoulou, A., Guberan, C., Jhaveri, N., Reichert, S., Menges, A., & Tibbits, S., 3D-

- Printed Wood: Programming Hygroscopic Material Transformations. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2 (2015) 106–116. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0022>.
33. Timoshenko, S., Analysis of Bi-Metal Thermostats. *JOSA*, Vol. 11, Issue 3, pp. 233-255, 11 (1925) 233–255. <https://doi.org/10.1364/JOSA.11.000233>.
34. Bianconi, F., Filippucci, M., & Pelliccia, G., Legno e stampa 3D per la regolazione passiva del comfort igrometrico. Valutazione delle deformazioni igroscopiche attraverso l'analisi per immagini. *XXII Congr. Naz. CIRIAF Svilupp. Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salut. Um. - Atti* (Perugia: Morlacchi Editore University Press, 2022), pp. 154–162.
35. Xu, L., Shyu, T. C., & Kotov, N. A., Origami and Kirigami Nanocomposites. *ACS Nano*, 11 (2017) 7587–7599. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b03287>.
36. Chen, S., Chen, J., Zhang, X., Li, Z.-Y., & Li, J., Kirigami/origami: unfolding the new regime of advanced 3D microfabrication/nanofabrication with “folding.” *Light: Science & Applications*, 9 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0309-9>.
37. Wolkoff, P., Azuma, K., & Carrer, P., Health, work performance, and risk of infection in office-like environments: The role of indoor temperature, air humidity, and ventilation. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 233 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113709>.
38. Buonocore, C., De Vecchi, R., Scalco, V., & Lamberts, R., Influence of relative air humidity and movement on human thermal perception in classrooms in a hot and humid climate. *Building and Environment*, 146 (2018) 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.036>.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Architettura per la condivisione energetica. Sperimentazione sulle Comunità Energetiche Rinnovabili verso la cultura del risparmio.

Francesco Asdrubali ¹, Paolo Civiero ², Stefano Converso ², Federico Fiume ², Dante Maria Gandola ¹, Antonino Laudani ¹, Paola Marrone ², Iliaria Montella ^{1,*}, Martina Palermo ¹, Alberto Raimondi ², Marco Ranzato ² and Francesco Riganti Fulginei ¹

¹ Department of Industrial, Electronic and Mechanical Engineering, Roma Tre University, 00146 Rome, Italy

² Department of Architecture, Roma Tre University, 00153 Rome, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: ilaria.montella@uniroma3.it

Abstract: La recente XIX edizione di *M'illumino di Meno*, Giornata Nazionale del Risparmio Energetico e degli Stili di Vita Sostenibili, lanciata da Rai Radio 2 e promossa dalla Rete delle Università per lo Sviluppo sostenibile (RUS), è stata dedicata alle CER come volano per incentivare la cultura della sostenibilità ambientale e del risparmio delle risorse. L'Università Roma Tre ha partecipato all'iniziativa coinvolgendo gli studenti in un workshop dedicato a mappatura di consumi energetici e produzione da fonte rinnovabile di una sua sede per indagare la possibilità di costruire una CER. Questo lavoro illustra la metodologia utilizzata per mappare i consumi energetici e la produzione di energia simulando l'installazione di pannelli fotovoltaici, nonché per indagare il concetto di flessibilità attraverso l'interrelazione tra consumi e fasce orarie. Per la mappatura dei consumi è stato monitorato il consumo istantaneo della sede ed è stato predisposto un modello di calcolo per mappare in loco i consumi dei singoli edifici, monitorati a cadenza bioraria, così consentendo agli studenti di delineare un profilo di consumi giornalieri. Per la produzione, a partire dal modello 3D degli edifici usato per simulare la radiazione solare incidente, sono state individuate le aree più idonee alla produzione, definendo una matrice di efficacia-impatto e una valutazione a sostegno della loro scelta. La progettazione tecnica dell'impianto è stata elaborata con PVGIS. Il carattere dimostrativo dell'iniziativa, e l'interrelazione consumi-produzione, sono state un'occasione per sensibilizzare gli studenti verso la cultura del risparmio nonché per comprendere le potenzialità energetiche degli spazi universitari nell'ipotesi di una gestione ottimizzata,

secondo il modello della condivisione energetica che li veda coinvolti da ‘consumer’ a ‘prosumer’.

Keywords: Sistemi energetici decentrati; Comunità Energetiche Rinnovabili; energia rinnovabile; bilancio energetico; consapevolezza energetica; condivisione energetica; cultura del risparmio; prosumer di energia.

1. Contesto generale di riferimento

La sperimentazione descritta in questo contributo si inserisce all’interno della 19ª edizione di “M’illumino di meno”, la Giornata Nazionale del Risparmio Energetico e degli Stili di Vita Sostenibili che, a partire dal 2005 Rai Radio2, con il programma radiofonico Caterpillar, promuove annualmente per diffondere la cultura della sostenibilità ambientale e del risparmio delle risorse.

A partire dal 2022, con la legge 27 aprile 2022, n. 34, il Parlamento italiano ha riconosciuto il 16 febbraio come Giornata nazionale del risparmio energetico e degli stili di vita sostenibili *“al fine di promuovere la cultura del risparmio energetico e del risparmio di risorse mediante la riduzione degli sprechi, la messa in atto di azioni di condivisione e la diffusione di stili di vita sostenibili”* (art. 19-bis) [1].

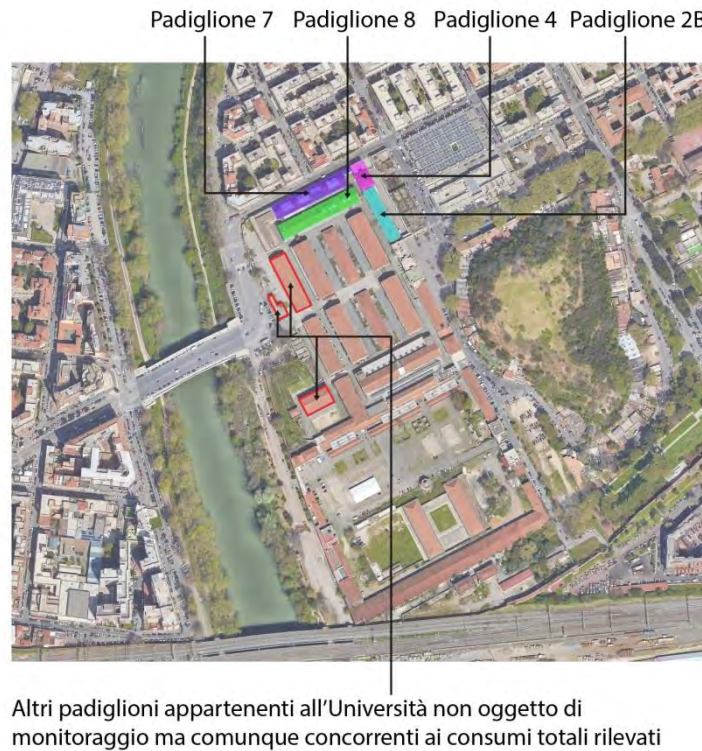
La campagna di sensibilizzazione vede coinvolte di consueto anche molte Istituzioni, università, scuole, aziende, amministrazioni e associazioni come testimonial coinvolti in attività di sperimentazione e disseminazione, per il comune scopo di sensibilizzare la cittadinanza e sottolineare l’importanza di adottare comportamenti virtuosi volti alla riduzione dei consumi e degli sprechi di energia.

L’edizione del 2023 [2] è stata dedicata alle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), intese come sinergie territoriali tra enti pubblici e cittadini coinvolti nel produrre e distribuire energia da fonti energetiche rinnovabili.

L’Università Roma Tre, attraverso la collaborazione dei Dipartimenti di Architettura e di Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica, ha partecipato all’iniziativa organizzando un seminario sulle CER e un’attività di progettazione: *“Architettura per la condivisione energetica. Workshop sulle Comunità energetiche rinnovabili”*.

Grazie alla sinergia tra alcuni docenti, studenti e dottorandi, durante la giornata di workshop sono stati monitorati i consumi energetici di alcuni spazi per la didattica e degli uffici del Dipartimento di Architettura (Figura 1), situato nell’area dell’Ex-Mattatoio nel quartiere Testaccio a Roma e, sebbene sugli edifici dell’ex-Mattatoio ricada il vincolo di tutela da parte della Soprintendenza, sono state simulate le potenzialità di produzione energetica da fonti rinnovabili per sensibilizzare la Comunità Accademica sui principi delle CER.

Figura 1. pianta generale del Mattatoio e padiglioni presi in esame per il workshop.



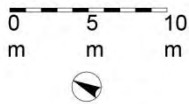
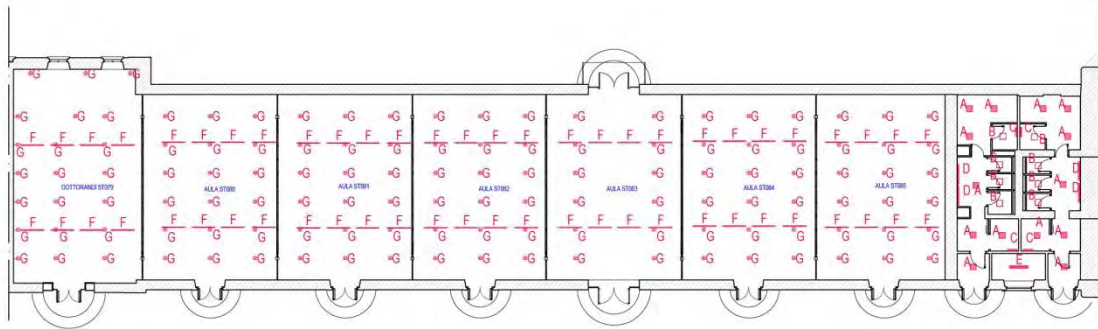
2. Metodologia utilizzata per la preparazione dell'attività, la scelta delle superfici e la mappatura di consumi e produzione

Per affrontare il tema della progettazione delle CER e valutare la loro effettiva efficacia nel contesto individuato, il workshop è stato organizzato in fasi durante le quali sono state svolte le seguenti attività:

- mappatura dei profili di presenza e di consumo giornalieri e orari nelle aule e negli uffici;
- modellazione di coperture ed aree attrezzabili con pannelli fotovoltaici; analisi della radiazione solare incidente sulle superfici previste e calcolo della produzione energetica attraverso pannelli fotovoltaici;
- analisi quantitativa e restituzione dei dati di consumo e produzione di energia elettrica con l'obiettivo di determinare scenari di bilancio energetico e ottimizzazione dei consumi energetici.

Per svolgere il workshop nei tempi prefissati di una giornata, sono state predisposte schede di raccolta dati con la mappatura codificata di tutte le apparecchiature elettriche in dotazione nelle aule, e delle possibili attrezzature temporanee degli utenti, assegnando ad ognuno di essi un valore di Potenza (W) e un consumo orario medio (kWh) (Figure 2, 3, 4).

Figura 2. pianta padiglione 2B.



PIANTA PIANO TERRA

Figura 3. pianta padiglione 4.



PIANTA PIANO TERRA

Via Volpicelli

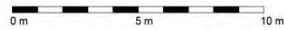
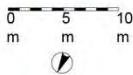
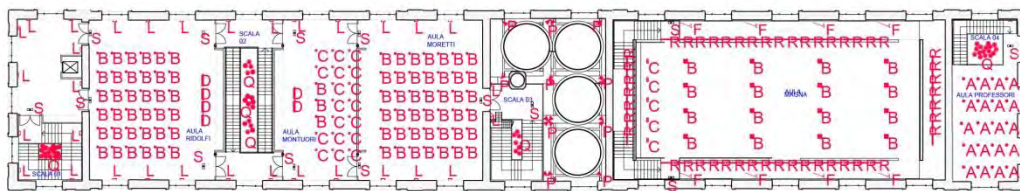
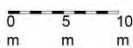
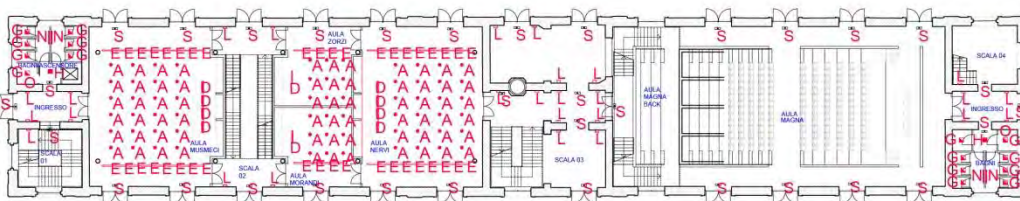


Figura 4. pianta padiglione 8.



PIANTA PIANO PRIMO



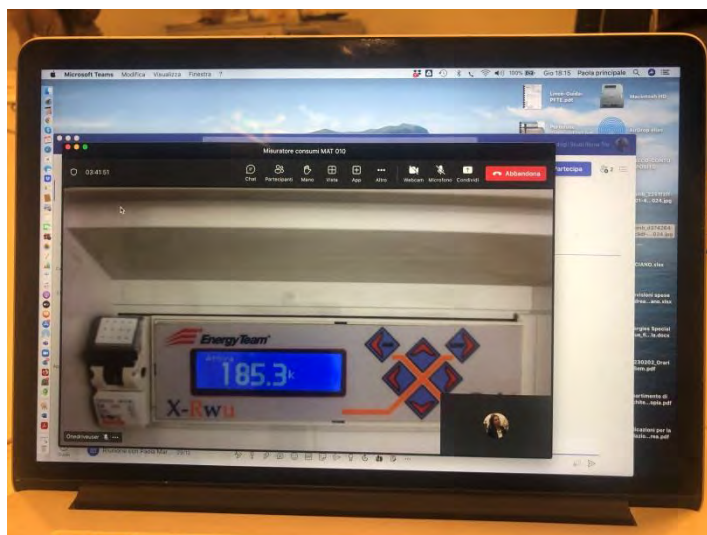
PIANTA PIANO TERRA

Gli studenti hanno effettuato il monitoraggio nei padiglioni 2B, 4, 7, 8, con quattro rilevamenti ad intervalli regolari, alle ore 9, 11, 14, 16, compilando un foglio excel con la mappatura degli occupanti, dei corpi illuminanti in funzione, delle apparecchiature elettriche fisse e temporanee attive.

Al contempo è stato predisposto un modello 3D semplificato del complesso del Mattatoio con il software FormIt Pro di Autodesk, ed è stata effettuata l'analisi della radiazione solare incidente sulle superfici previste e, a seguire, una volta individuate le possibili localizzazioni di superfici captanti, il calcolo della produzione energetica attraverso pannelli fotovoltaici con l'uso di PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) [3].

Appare necessario specificare che, essendo l'iniziativa inserita all'interno dell'edizione di "M'illumino di meno", era prioritario che fosse svolta nella data ad essa destinata. Sebbene, da calendario accademico, a febbraio le lezioni s'interrompono, e dunque la presenza degli studenti è scarsa, nella giornata del workshop erano in corso le Olimpiadi della Matematica con circa seicento partecipanti. Dunque, sebbene il profilo d'uso rilevato non corrisponda propriamente a quello consueto del periodo di lezioni, è stato considerato ugualmente significativo per gli scopi del workshop. Pertanto, con l'intenzione di incentivare la consapevolezza energetica dei partecipanti, grazie al supporto dell'Energy Manager di Ateneo, è stato previsto il monitoraggio in tempo reale dei consumi nell'arco della giornata (Figura 5), e una successiva restituzione dei dati reali di consumo con una granularità di 15 minuti.

Figura 5. monitoraggio in tempo reale del contatore generale.



2.1. Matrici di impatto visivo e criteri di scelta delle superfici

Il complesso dell'ex-Mattatoio risale al periodo tra la fine dell'800 e l'inizio del '900, originariamente destinato alla macellazione degli animali, e successivamente riconvertito a scopi culturali e sociali ospitando la sede universitaria, il museo MACRO, la Città dell'Altra Economia, spazi espositivi ed altri spazi destinati alla creatività e all'incontro. L'architettura rappresenta un esempio di archeologia industriale del XIX secolo, attualmente vincolato, con elementi architettonici in ferro, muratura portante, tetti a doppia falda e aperture ad arco sui fronti.

Dal punto di vista urbanistico, nel PRG l'area dell'ex-Mattatoio ricade nell'ambito "Città Storica", nella voce di legenda "Capisaldi architettonici e urbani". Nel Piano Territoriale Paesaggistico Regionale, nell'ambito del "Sistema del Paesaggio Insediativo" è inserita come "Paesaggio dei Centri e Nuclei Storici con relativa fascia di rispetto". Dal punto di vista vincolistico, l'area ricade nell'area vincolata – Area Sito Unesco (Figura 6).

Figura 6. immagine della caratterizzazione tipologica dell'ex-Mattatoio.



In un contesto attuale, caratterizzato dall'emergenza climatica, economica e sociale, e dagli imminenti orizzonti temporali di riduzione del 55% delle emissioni climalteranti entro il 2030, e di neutralità climatica entro il 2050, e di superamento della disuguaglianza sociale ed economica [4], la riflessione sulla possibilità d'integrare sistemi di produzione da fonte energetica rinnovabile (FER) [5], diventa auspicabile pur nel rispetto delle caratteristiche del patrimonio vincolato, soprattutto pensando alle strategie promosse a livello nazionale ed europeo per incentivare la transizione e il decentramento della produzione energetica in contesti già urbanizzati [6,7,8,9,10].

A partire da queste premesse, l'esperienza del workshop con studenti di architettura ed ingegneria ha provato a procedere sul confine sottile tra tutela del bene vincolato e necessità di incentivare la massima produzione da fonte rinnovabile a sostegno degli ingenti consumi di un complesso universitario.

Per questa ragione, a partire dal modello 3D usato per simulare la radiazione solare incidente, gli studenti sono stati invitati a riflettere sulle possibili localizzazioni delle superfici captanti e sono state individuate alcune soluzioni tipo, riferibili all'installazione di pannelli fotovoltaici, ordinate secondo una gerarchia di impatto.

La gerarchia di impatto è stata definita assegnando un punteggio crescente, che identificasse il minore o maggiore impatto visivo della soluzione fotovoltaica proposta. In particolare, come esemplificato in seguito nelle tabelle, è stato assegnato un minimo valore di impatto visivo ai fotovoltaici apposti sui lucernari in vetro (impatto 1), seguiti in modo crescente dai fotovoltaici sulle pensiline (impatto 2), da quelli freestanding sui tetti piani (impatto 3), da quelli sui tetti a falda (impatto 4), da quelli sui muri esterni verticali (impatto 5), da quelli su possibili costruzioni in vetro costruite ex-novo come connessione tra i padiglioni (impatto 6).

Al modello tridimensionale è stato assegnato un sistema di codificazione alfanumerico (Figura 7 e 8), che ha consentito loro di poter valutare dapprima l'effettiva radiazione solare incidente (Figura 9), e successivamente, per ognuno degli elementi architettonici selezionati, simulare la producibilità del sistema fotovoltaico.

Figura 7. assegnazione delle superfici e sistema di codificazione alfanumerica dei padiglioni 7 e 8.

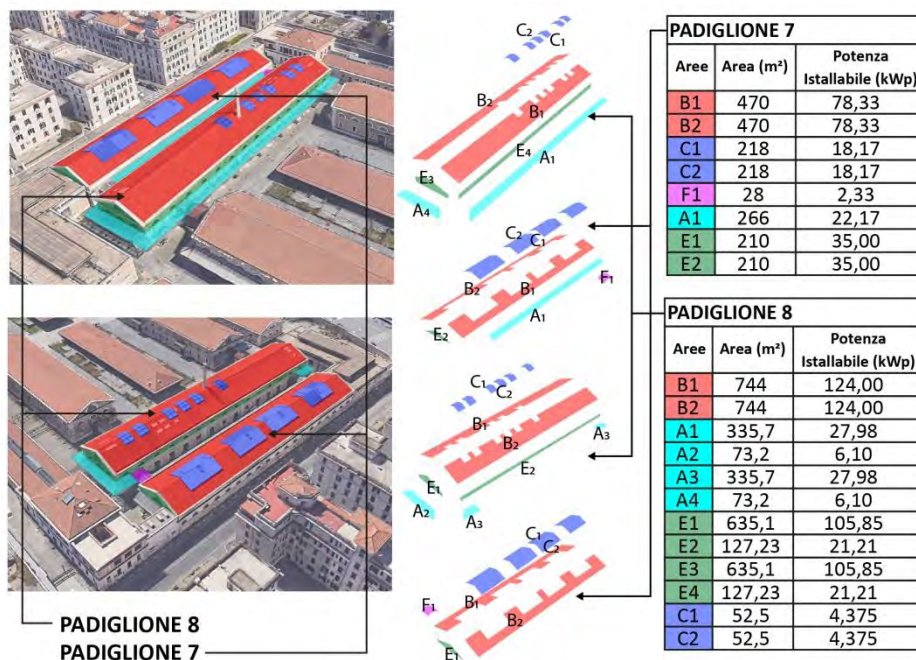


Figura 8. assegnazione delle superfici e sistema di codificazione alfanumerica dei padiglioni 4 e 2B.

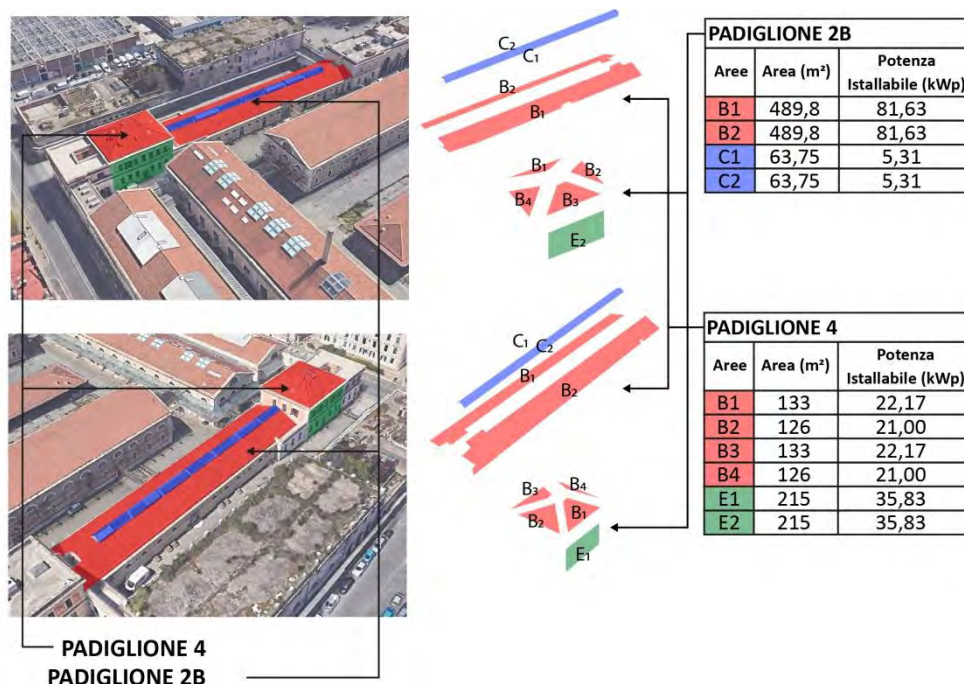
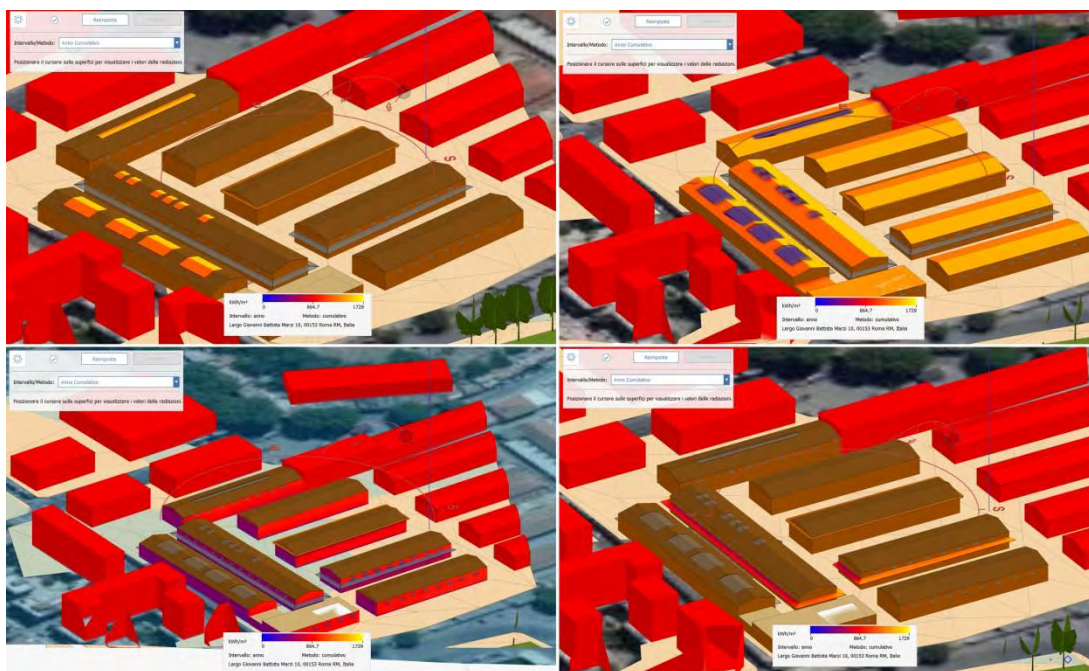


Figura 9. analisi solare con il software FormIt Pro per pensiline, coperture, pareti, lucernari.



Per l’installazione dell’impianto fotovoltaico sui padiglioni sono state prese in considerazione le seguenti possibili superfici: pensiline, coperture, pareti, lucernario. Ciascuna tipologia di superficie è stata caratterizzata con una nomenclatura alfanumerica sequenziale riferita alla tipologia di substrato (vetro/opaco) e alla tipologia di impianto (free-standing /roof integrated):

- Codice A per le pensiline in vetro;
- Codice B per i tetti opachi a falda;
- Codice C per i lucernai in vetro;
- Codice D per i tetti opachi piani;
- Codice E per le mura opache esterne verticali;
- Codice F per possibili costruzioni in vetro per collegare padiglioni adiacenti.

È stato successivamente assegnato un codice alfabetico ad ogni area analizzata (Tabella 1) assegnando, in base alla destinazione d’uso e al livello di visibilità dell’impianto fotovoltaico, un punteggio crescente da 1 (impatto minimo) a 6 (impatto massimo).

Tabella 1. Legenda codici aree e impatto visivo aree utilizzate.

Aree	Tipologia di Substrato (Vetro o Opaco)	Tipologia impianto (FS o RI)	Impatto
A	VETRO	ROOF-INTEGRATED	2
B	OPACO	ROOF-INTEGRATED	4
C	VETRO	ROOF-INTEGRATED	1
D	OPACO	FREE-STANDING	3
E	OPACO	VERTICAL-WALL	5
F	VETRO	ROOF-INTEGRATED	6

2.2. Valutazione e calcolo potenza installabile

La potenza nominale dell'impianto, espressa in kWatt-picco (kWp), rappresenta la massima potenza che l'impianto stesso può generare in condizioni Standard di Test e viene calcolata, a seconda della tipologia di installazione, mediante le equazioni (1) e (2) [11].

$$\text{Potenza Installabile (kWp)}: \begin{cases} \frac{\text{Area disponibile}}{12} & \text{se impianti free - standing (1)} \\ \frac{\text{Area disponibile}}{6} & \text{se impianti integrati (2)} \end{cases}$$

Sulla base dell'equazione (1) e (2), per ogni padiglione è stata calcolata la potenza installabile riferita alle aree utilizzabili e codificate con il codice alfanumerico (Tabelle 2, 3, 4, 5).

Tabella 2. Aree utilizzate padiglione 2B.

Aree	Area (mq)	Slope (°)	Azimuth (°)	Potenza Installabile (kWp)
B1	489,8	14	62,6	81,63
B2	489,8	14	-11,8	81,63
C1	63,75	14	62,6	5,31
C2	63,75	14	-11,8	5,31

Tabella 3. Aree utilizzate padiglione 4.

Aree	Area (mq)	Slope (°)	Azimuth (°)	Potenza Installabile (kWp)
B1	133	14	152	22,17
B2	126	14	-25	21,00
B3	133	14	28	22,17
B4	126	14	-116	21,00
E1	215	90	152	35,83
E2	215	90	28	35,83

Tabella 4. Aree utilizzate padiglione 7.

Aree	Area (mq)	Slope (°)	Azimuth (°)	Potenza Installabile (kWp)
B1	470	14	-62	78,33
B2	470	14	118	78,33
C1	218	14	-62	18,17
C2	218	14	118	18,17
F1	28	90	-62	2,33
A1	266	14	-62	22,17
E1	210	90	-62	35,00
E2	210	90	118	35,00

Tabella 5. Aree utilizzate padiglione 8.

Aree	Area (mq)	Slope (°)	Azimuth (°)	Potenza Installabile (kWp)
B1	744	14,11	-27,8	124,00
B2	744	14,11	118	124,00
A1	335,7	20	-27,8	27,98
A2	73,2	20	63	6,10
A3	335,7	20	118	27,98
A4	73,2	20	-63	6,10
E1	635,1	90	-27,8	105,85
E2	127,23	90	63	21,21
E3	635,1	90	118	105,85
E4	127,23	90	-63	21,21
C1	52,5	14,11	-27,8	4,375
C2	52,5	14,11	118	4,375

2.3. Mappatura dei consumi

Per valutare i consumi energetici negli spazi universitari derivanti dal funzionamento di utilizzatori alimentati con energia elettrica (quali, ad esempio, lampade, pc, stampanti, ecc.) è stata delineata una metodologia basata su un'analisi orientativa, volta prevalentemente alla sensibilizzazione ai fini di un utilizzo sempre più responsabile delle risorse energetiche. Non sono stati presi in considerazione i consumi derivanti dal condizionamento degli ambienti, oggetto di una regolazione centralizzata da parte dell'Ufficio tecnico dell'Ateneo. I consumi elettrici sono stati valutati nell'arco di una tipica giornata lavorativa, dalle ore 9.00 alle 18.00, effettuando rilevamenti con frequenza di acquisizione pari a una volta ogni due ore, in modo tale da ottenere quattro slot orari ($s_1= 9.00 -11.00$ / $s_2= 11.00 -13.00$ / $s_3= 14.00 -16.00$ / $s_4= 16.00 -18.00$). In ogni rilevamento sono stati conteggiati il numero di dispositivi considerati d'interesse per ciascun padiglione. Tali dispositivi sono stati catalogati con la relativa potenza nominale riportata nella tabella 6.

Tabella 6. Tipologie apparecchiature.

Tipologia	Potenza nominale (W)	Codice	Tipologia	Potenza nominale (W)	Codice
compatta diffusa soffitto fluorescente	52	A	apparecchio sicurezza (Exit) fluorescente	54	Q
compatta diffusa soffitto fluorescente	36	B	faro	200	R
lineare diffusa A fluorescente a parete l 588 mm	24	C	apparecchio sicurezza (Exit) fluorescente	11	S
lineare diffusa B fluorescente a parete l 1188 mm	54	D	compatta diretta semiincasso C fluorescente	57	T
lineare policarbonato a vista fluorescenti	72	E	lineare diretta sospensione D fluorescente	54	U
lineare Indiretta fluoresc. Su profilato H	54	F	lineare diretta incasso E fluorescente	28	V

apparecchio in sospensione da binario A lampada (HIT)	70	G	apparecchio orientabile F alogena	50	Z
apparecchio sicurezza (segnaletica via esodo)	24	H	compatta diffusa soffitto G1 fluorescente (2*13)	26	J
lineare C1 fluorescente l 1471 mm	26	I	circolare diffusa soffitto G2 fluorescente (40+22)	62	K
lineare C4 fluorescente l 571 mm	35	L	compatta doppia emissione parete L ioduri metallici	70	W
lineare diffusa parete F fluorescente	14	M	lineare diffusa parete N2 fluorescente	24	X
compatta diffusa soffitto M1 fluorescente	36	N	orientabile su struttura sospensione O ioduri metallici	70	Y
compatta diffusa soffitto M2 fluorescente	36	O	compatta diffusa su cavi sospensione P fluorescente	23	α
lineare diffusa parete N1 fluorescente	26	P	lineare diretta sospensione R fluorescente	58	β
notebook portatile	60	PC	postazione aula tipo*	650	POSTAZ.
monitor LED de 55" LED	57	TV	stampante multifunzione ufficio	300	STAMP.
computer da tavolo uffici	250	PC F.	/	/	/

*La postazione aula tipo è stata considerata nella seguente impostazione (microfono ambientale, audio amplificatore, tablet & smart tab, cablaggio/switch, router, computer, videocamera).

Avendo stabilito pari a due ore la granularità oraria di acquisizione dei dati, tutte le apparecchiature conteggiate in funzionamento nel momento del rilevamento sono state assunte funzionanti nella totalità dello slot orario considerato. Pertanto, il consumo derivante dalle N apparecchiature presenti in ciascun padiglione nelle due ore sotto analisi è stato così calcolato (3):

$$\text{Consumo orario apparecchiature}_{\text{padiglione}} = \sum_{n=1}^N \text{Potenza nominale}_n \times 2h \quad (3)$$

Il consumo complessivo giornaliero, dato dall'insieme di dispositivi in funzionamento per ciascun padiglione, è stato ottenuto sommando i consumi nei quattro slot orari individuati (4):

$$\text{Consumo giornaliero}_{\text{padiglione}} = \sum_{s=1}^4 \text{Consumo orario apparecchiature}_{\text{padiglione},s} \quad (4)$$

dove $s = \{1,2,3,4\}$

Nelle tabelle 7, 8, 9, 10, 11 è riportato il numero di apparecchi in funzione per ogni codice di riferimento a seconda del padiglione di riferimento, mentre nell'ultima colonna il valore complessivo di consumi elettrici per ogni fascia oraria.

Tabella 7. Padiglione 2B.

Rilievo	A	B	C	D	E	F	G	H	PC	PC F.	Totale (kWh)
9-11	13	5	3	3	1	8	92	7	13	/	17,96
11-13	10	7	3	3	/	/	69	7	33	1	16,57
14-16	10	7	3	3	/	/	85	7	28	1	18,21
16-18	10	7	3	3	/	/	62	7	62	1	19,07
											71,81

Tabella 8. Padiglione 4.

Rilievo	I	L	M	N	O	P	Q	PC F.	STAMP.	TV	Totale (kWh)
9-11	62	2	4	13	2	4	14	6	5	2	12,88
11-13	58	/	2	13	2	4	14	7	5	2	12,99
14-16	58	/	2	13	2	4	12	2	6	2	10,44
16-18	62	/	4	13	2	4	14	9	6	/	11,89
											48,20

Tabella 9. Padiglione 7.

Rilievo	R	S	O	PC.	POSTAZ.	Totale (kWh)
9-11	32	14	6	1	1	14,84
11-13	32	14	7	1	1	14,89
14-16	28	15	7	3	1	13,55
16-18	32	14	6	/	1	14,72
						58,01

Tabella 10. Padiglione 8 primo piano.

Rilievo	A	D	T	U	V	Z	J	K	W	P	X
9-11	86	146	23	10	8	8	14	2	54	2	1
11-13	84	146	23	9	/	8	5	2	55	2	1
14-16	84	82	15	3	/	/	8	2	59	2	1
16-18	36	82	15	5	4	/	12	2	53	2	1

Tabella 11. Padiglione 8 secondo piano.

Rilievo	Y	α	β	S	PC	PC F.	STAMP.	TV	POSTAZ.	Totale (kWh)
9-11	2	1	5	24	44	44	5	7	2	66,04
11-13	2	1	5	24	44	44	19	2	2	63,62
14-16	2	1	9	26	/	47	6	7	2	51,74
16-18	6	2	7	25	/	44	26	7	2	49,04
										230,44

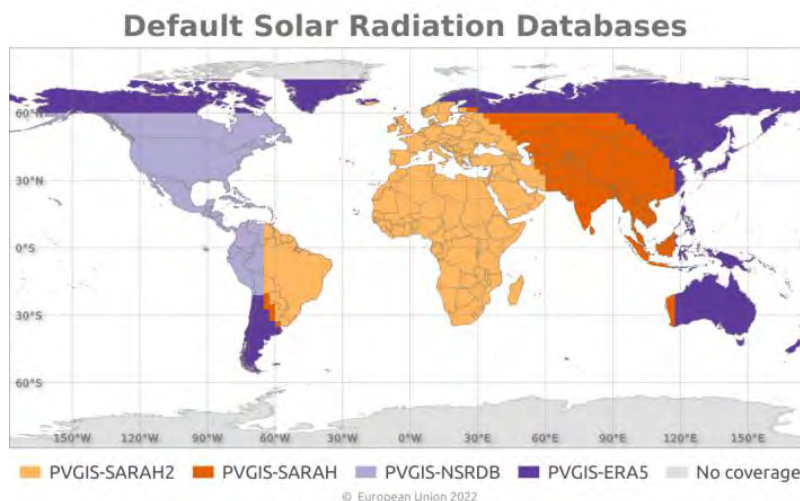
3.4. Mappatura della produzione

Negli ultimi anni il settore energetico è in rapida evoluzione con l'obiettivo di inglobare nel panorama di generazione le fonti energetiche rinnovabili in maniera continuamente crescente. Tra le diverse fonti rinnovabili l'energia solare è la fonte energetica primaria sulla Terra [12]. Nel contesto

delle comunità energetiche rinnovabili in ambito urbano gli impianti che sfruttano le fonti rinnovabili si prestano bene a contribuire ad una crescente decentralizzazione della produzione; in particolare gli impianti fotovoltaici rendono concreta l'idea di integrare produzione e consumo all'interno di quartieri cittadini densamente abitati, dove sarebbe impossibile pensare di installare sistemi di produzione differenti. Tuttavia, la produzione di energia elettrica da fotovoltaico è influenzata da diversi fattori, da cui deriva una certa aleatorietà nella produzione: la quantità di radiazione solare disponibile, variabile nell'arco della giornata e dei mesi, è dipendente dalle condizioni atmosferiche, dall'orientamento e dall'inclinazione con cui vengono esposti al Sole i pannelli fotovoltaici; l'efficienza, inoltre, è dipendente dalla temperatura in cui operano. Tutto ciò può portare a variazioni nella produzione di energia elettrica nel tempo e nello spazio.

Per stimare la produzione di energia elettrica da fotovoltaico si utilizzano diversi strumenti, tra i quali si distingue l'applicazione web PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), in quanto è uno strumento utilizzabile senza alcuna licenza, non ci sono restrizioni per l'utilizzo dei risultati ottenuti e non è necessaria alcuna registrazione. PVGIS è un servizio online gratuito, messo a disposizione dalla Commissione Europea, che fornisce informazioni sulle possibili prestazioni di un impianto fotovoltaico, sfruttando le informazioni sull'irraggiamento solare orario misurato per un certo numero di anni in base alla posizione geografica in cui si ipotizza di installare un impianto [3]. Il database utilizzato per le latitudini europee è PVGIS-SARAH2, i cui dati sono stati acquisiti per via satellite dal 2005 al 2020 (Figura 10).

Figura 10. Database predefiniti della radiazione solare in PVGIS 5.2, Unione Europea, 2022.



In PVGIS è possibile effettuare diversi tipi di simulazioni. Per avere informazioni circa la produzione di energia con granularità oraria, in uno specifico mese dell'anno, è stata implementata la simulazione Daily Data. Mediante le simulazioni Daily Data è possibile per l'utente ottenere il profilo orario di radiazione nella località desiderata. Per simulare la radiazione incidente su una certa superficie, PVGIS necessita dei seguenti parametri di input: Solar radiation database, month, slope (°), Azimuth (°) e Time.

Il risultato del calcolo del profilo giornaliero è costituito da 24 valori orari dell'irraggiamento solare (W/m^2) (Figura 11) (Tabella 12). Questi possono essere visualizzati come funzione del tempo.

Figura 11. Esempio irraggiamento solare globale, diffuso ed indiretto.

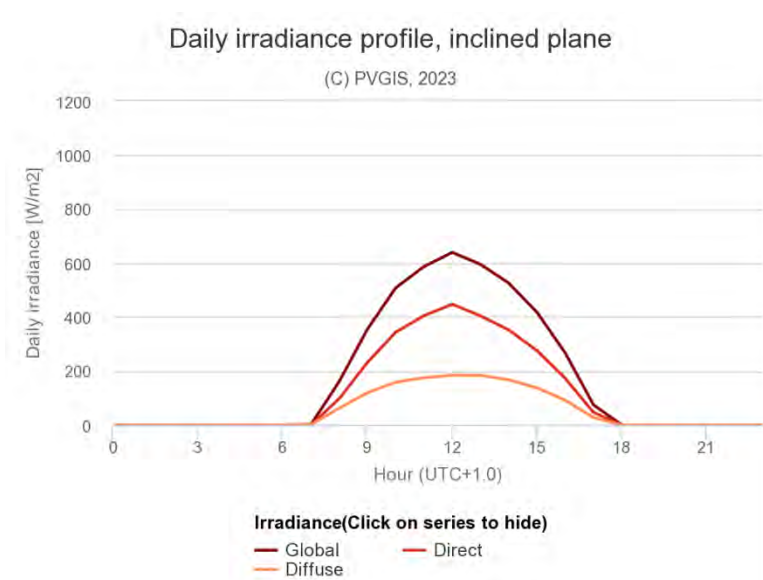


Tabella 12. Tabella irraggiamento globale con i numeri per fasce orarie (nelle sole ore di presenza del sole alba-tramonto).

Time	8:45	9:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45
Irraggiamento globale	185	336	444	505	502	434	358	246	118	24

Si definisce irraggiamento solare la potenza che incide dal Sole su una superficie di un metro quadro [W/m²]. La radiazione solare, invece, è l’energia che riceve una superficie di un metro quadro dal Sole [Wh/m²] [13]. Per ottenere informazioni circa la produzione di energia da un ipotetico impianto fotovoltaico nell’ intervallo di tempo che si sceglie di prendere in esame, in questo caso pari a due ore, avendo stabilito pari ad una volta ogni due ore la frequenza di acquisizione dei dati di consumo energetico, è possibile utilizzare l’equazione 5.

$$E_h [Wh] = potenza\ impianto * rendimento * radiazione\ solare \quad (5)$$

In cui la radiazione solare per un intervallo di due ore, può essere calcolata con l’equazione 6 a partire dai valori di irraggiamento orario simulati in ambiente PVGIS:

$$Radiazione\ solare_{t,t+2h} = \frac{Irraggiamento [t] + Irraggiamento[t + 2h]}{2} \times 2h \quad (6)$$

Il rendimento dell’impianto, con le attuali tecnologie, tenendo conto delle perdite dei cavi, negli inverter e delle perdite dovute alla scarsa pulizia dei moduli, può essere stimato intorno all’85%, in modo tale da tener conto delle perdite complessive del sistema [14]. La potenza nominale dell’impianto, espressa in kWatt-picco (kWp), rappresenta la massima potenza che l’impianto stesso può generare in condizioni Standard di Test.

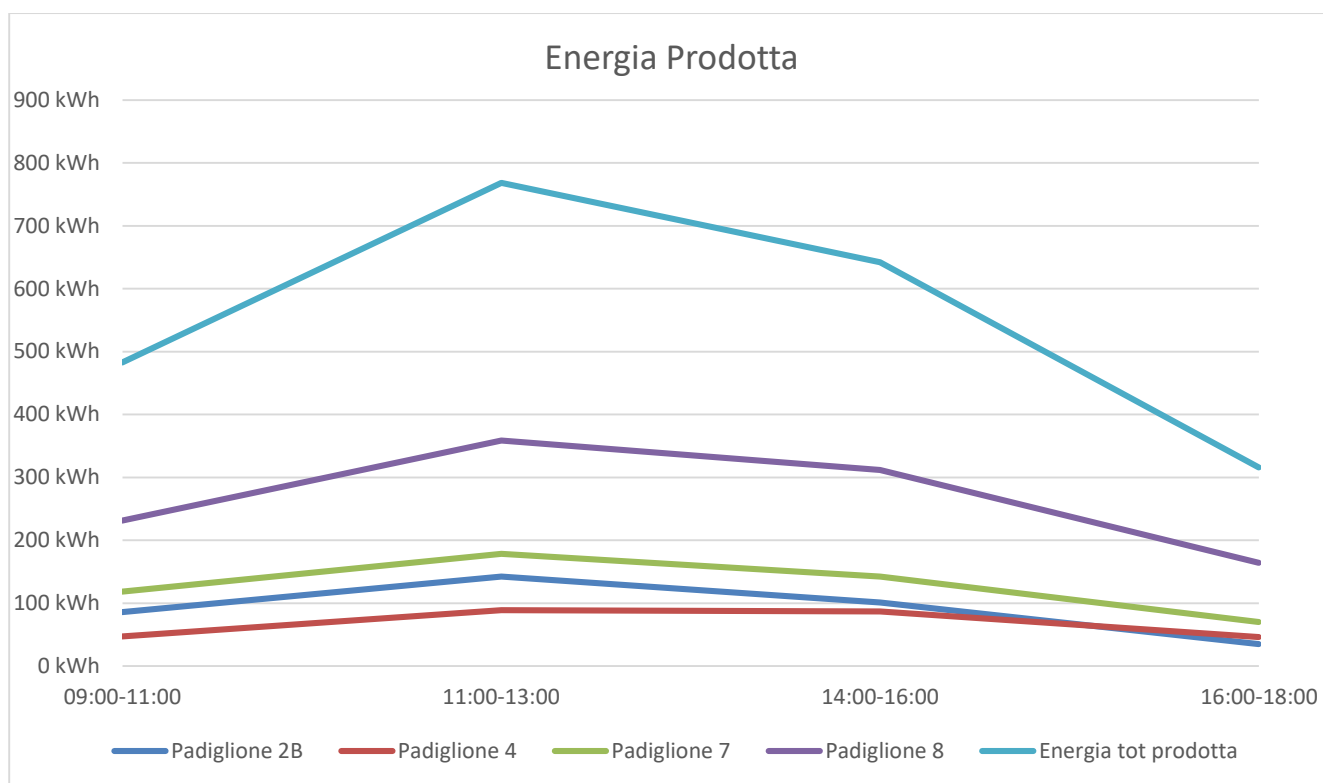
Nella tabella 13 sono riportati i valori ottenuti, per tutti i padiglioni, per la simulazione di energia

prodotta nella giornata lavorativa (9.00-18.00), suddivisi per padiglione, e nella figura 12 ne è riportato il grafico, sia per singoli padiglioni che per totale complessivo.

Tabella 13. Simulazione energia prodotta per fasce orarie nei singoli padiglioni.

Padiglioni	Energia prodotta per fascia oraria				Energia prodotta nella giornata per Padiglione
	9 - 11	11 - 13	14 - 16	16 - 18	
Padiglione 2B	85,80	142,44	101,07	34,97	364,28
Padiglione 4	47,39	88,76	86,81	46,36	269,32
Padiglione 7	118,32	178,57	142,49	70,21	509,58
Padiglione 8	231,43	358,68	311,80	164,36	1066,28
Energia prodotta	482,94	768,45	642,17	315,90	2209,46

Figura 12. Grafico dell'energia prodotta simulata per singoli padiglioni e per totale complessivo.



4. Confronto produzione-consumi e analisi dei risultati

Allo scopo di confrontare i dati di produzione da fotovoltaico e quelli di consumo è necessario fare una precisazione. Come accennato nei paragrafi precedenti, il monitoraggio in loco ha coinvolto solo alcuni padiglioni, rilevando in essi solo i consumi elettrici delle apparecchiature visibili nei vari ambienti.

I consumi effettivi, rilevati in tempo reale e rendicontati giornalmente con una cadenza di 15 minuti, rappresentano il consumo energetico istantaneo del Dipartimento di Architettura e sono

comprensivi anche della quota parte di consumi del sistema di climatizzazione e di ACS, e della quota parte di consumi dovuti ad altre fonti (internet, intranet, sistemi elettrici ausiliari e di emergenza, eventuali dispersioni etc.).

Dal momento che lo scopo dell'iniziativa era quello di sensibilizzare gli studenti verso la gestione consapevole dell'energia e la cultura del risparmio, il rilevamento in loco dei dati e il confronto consumo-produzione sono diventati un'occasione per i partecipanti di ragionare criticamente sulla condivisione di energia in una CER, sull'integrabilità dei sistemi di produzione in edifici esistenti di natura storica, sulla spinta tecnologica nel proporre integrazioni architettoniche e sulle disattenzioni sulla gestione energetica nell'uso quotidiano dei loro spazi.

Si riportano sotto (Tabelle 14, 15) i dati di consumi rilevati in loco dagli studenti ed energia prodotta simulata, e il relativo bilancio energetico:

Tabella 14. Bilancio Energetico giornaliero tra consumi rilevati dagli studenti ed energia prodotta simulata [kWh].

Padiglioni	9 - 11		11 - 13		14 - 16		16 - 18		Bilancio energetico giornaliero per ciascun padiglione
	Energia prodotta	Energia consumata	Energia prodotta	Energia consumata	Energia prodotta	Energia consumata	Energia prodotta	Energia consumata	
2B	85,80	17,964	142,44	16,568	101,07	18,208	34,97	19,068	292,47
4	47,39	12,876	88,76	12,996	86,81	10,44	46,36	11,892	221,12
7	118,32	14,84	178,57	14,892	142,49	13,554	70,21	14,72	451,58
8	231,43	66,036	358,68	63,624	311,80	51,738	164,36	49,042	835,83
Bilancio energetico	371,22		660,37		548,23		221,18		1.801,00

Tabella 15. Bilancio energetico giornaliero, tra consumi rilevati dagli studenti ed energia prodotta simulata, in base ai quattro slot orari considerando l'insieme di tutti i padiglioni del workshop.

Slot orario	9 - 11	11 - 13	14 - 16	16 - 18	Totale (kWh)
Energia prodotta (dato simulato)	482,94	768,45	642,17	315,90	2.209
Energia consumata (dato rilevato da studenti)	111,72	108,08	93,94	94,72	408

Dal confronto tra dati di produzione simulata sui padiglioni e di consumo rilevato nei padiglioni, l'energia prodotta supera di circa 5,4 volte l'energia consumata.

Tuttavia, per fare delle valutazioni più efficaci utili nell'ottica di un progetto di condivisione dell'energia, è parso più significativo confrontare i dati di consumo effettivi rilevati dal contatore, rappresentativi di tutta la sede universitaria e non esclusivamente di padiglioni analizzati, e quelli di produzione simulati.

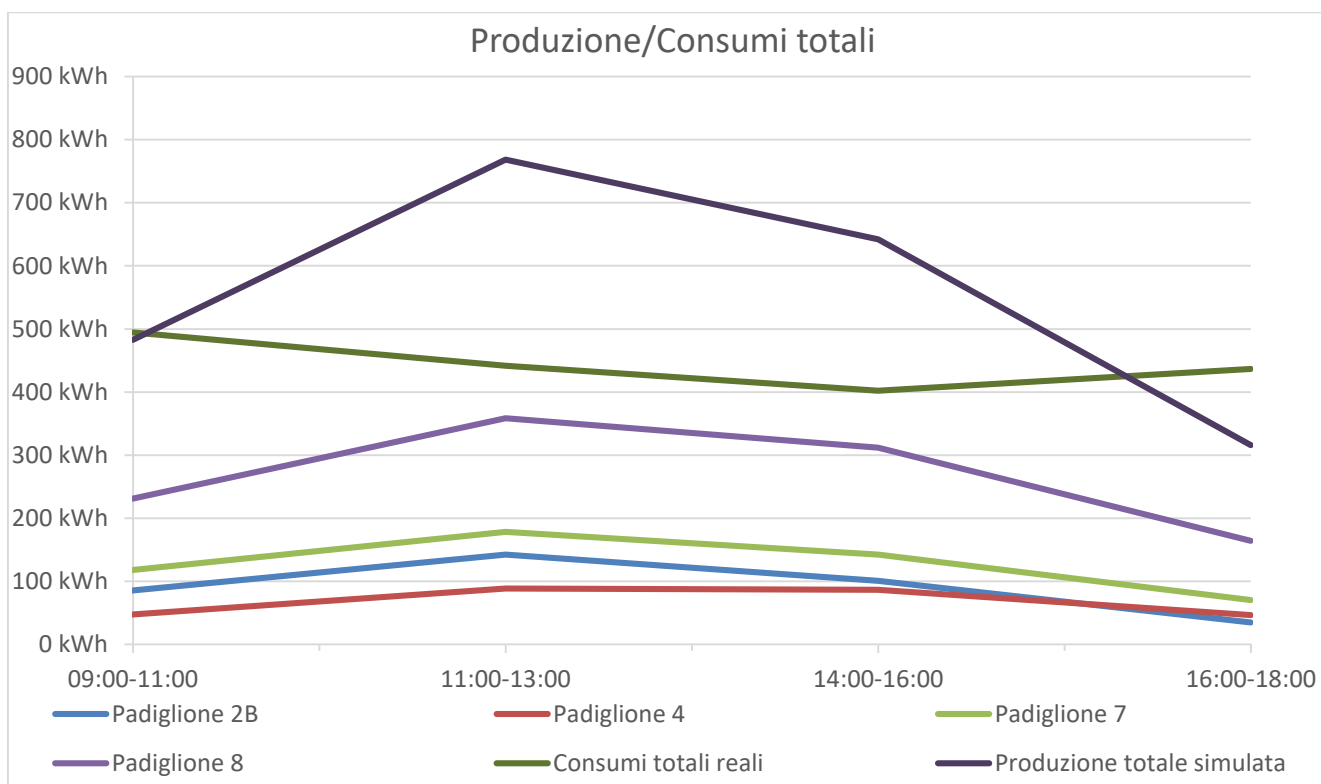
I consumi giornalieri, rilevati dal contatore generale, nelle stesse fasce orarie scelte per i rilevamenti in loco, sono riportati nella tabella seguente (Tabella 16), e sono stati calcolati facendo una media dei dati in kWh rilevati ogni 15 minuti, moltiplicando il dato per le due ore dello slot:

Tabella 16. Energia consumata negli stessi slot orari scelti per i rilevamenti in loco.

Slot orario	9 - 11	11 - 13	14 - 16	16 - 18
Energia consumata (dato reale)	494,4 kWh	441,6 kWh	402,4 kWh	436,8 kWh

Sebbene ci sia una discrepanza tra i dati di consumo calcolati da rilevamenti in loco, e dati di consumo rilevati dal contatore dovuta, come dichiarato, alla parzialità del dato rilevato, partendo da quanto raccolto, è possibile creare una relazione tra consumi reali di tutta la sede universitaria e produzione energetica simulata (Figura 13):

Figura 13. Grafico del confronto tra dato reale di energia consumata per tutto il Dipartimento di Architettura negli slot orari indicati, dato simulato di energia prodotta da fotovoltaico solo sui padiglioni analizzati, e bilancio energetico finale.



Come è possibile vedere dai dati in tabella, già considerando la produzione stimata solo per alcuni padiglioni la copertura da FER dei consumi dell'intero Dipartimento di Architettura appare superiore ai consumi, sebbene non sia stato preso in conto in questo studio l'analisi sullo storage, e la distribuzione oraria della richiesta di energia e sebbene il profilo utenza non corrisponda a quello dell'uso abituale.

Si sottolinea infatti che, come accennato nel paragrafo precedente, il profilo d'uso della giornata presa in esame, non è completamente rappresentativo del consueto utilizzo dei padiglioni e, dunque, presenta valori di consumo relativi certamente ad una presenza consistente di studenti, ma parzialmente sottostimati.

Allo stesso tempo si sottolinea che la produzione da fotovoltaico del mese di febbraio non è particolarmente vantaggiosa, a fronte dei consumi termici che, al contrario, sono impostati su una temperatura di set point invernale.

Dal monitoraggio è emerso che per molte ore, in particolare in quelle pomeridiane in cui le Olimpiadi di Matematica erano terminate, pur essendo le aule quasi o del tutto vuote, una buona parte delle apparecchiature elettriche, prevalentemente luci, sono rimaste accese; così come il sistema di climatizzazione.

Dai rilievi fatti nei padiglioni infatti si evince che, nonostante la differenza importante tra la mattina e il pomeriggio, sia in termini di occupazione che di utilizzo degli spazi, i consumi sono rimasti pressochè invariati. Dato confermato anche dai rilievi dei consumi reali ottenuti dal monitoraggio del contatore generale.

A fronte dell'intuizione di uno spreco di energia, queste valutazioni sostengono appieno l'importanza della flessibilità energetica e di piani di efficientamento dei consumi, sia in termini di gestione sia in termini di qualità dei sistemi edificio-impianto.

I consumi generali rilevati appaiono piuttosto alti, e questa constatazione sostiene appieno la necessità di intervenire anche in termini di efficientamento degli edifici, anche quando storici e vincolati.

5. Conclusioni

Nella giornata oggetto di questo paper sono emerse due importanti tematiche nel difficile percorso verso la transizione energetica: la consapevolezza riguardo i consumi e la potenzialità dell'ambiente costruito di accogliere spot di produzione da FER. Per quanto riguarda la consapevolezza, è emerso chiaramente, attraverso lo strumento del monitoraggio, che molto spesso gli spazi avevano molte (se non tutte) le apparecchiature elettriche monitorabili accese, anche se completamente vuoti. Parallelamente, per quanto riguarda l'aspetto della produzione sono emersi valori piuttosto ingenti dalle simulazioni: infatti, anche includendo i consumi termici (che non sono stati rilevati nel monitoraggio) e tutti quelli degli altri padiglioni, sembrerebbe possibile coprire l'intero fabbisogno energetico del Dipartimento di Architettura. Questo dato diviene ancora più interessante se si considerano i molti margini di intervento riguardo la riduzione dei consumi. Infatti, come visto anche in parte in questo paper, ci sarebbe un ampio margine di miglioramento riguardo l'efficientamento dei padiglioni e della loro gestione. In tal caso, quindi, non solo si riuscirebbe a coprire l'intero fabbisogno energetico del Dipartimento di Architettura di Roma Tre, ma addirittura si avrebbe una buona quota di energia disponibile per essere distribuita al quartiere.

Questo esperimento suggerisce quindi che la strada per le città più sostenibili non solo è possibile, ma è anche alla portata delle disponibilità tecnologiche in nostro possesso, entrate già da tempo nel mercato abituale e sostenute da incentivi che ne rendono i costi economici più sostenibili.

Tuttavia, affinché questo sia possibile è necessario interrogarsi su soluzioni progettuali e tecnologiche tali da garantire queste prestazioni e, allo stesso tempo, preservare quanto più possibile il patrimonio, storico, culturale, architettonico e paesaggistico. È quindi più che mai opportuno un attento e rinnovato dibattito riguardo le normative di tutela del paesaggio perché esse prendano seriamente in considerazione la possibilità di consentire l'integrazione di queste tecnologie, seppur in deroga alle attuali stringenti normative, non sottovalutando, in caso contrario, le ricadute nel rallentamento del processo di decarbonizzazione che ci vede coinvolti in orizzonti temporali molto prossimi.

References

1. Gazzetta Ufficiale, Legge 27 aprile 2022, n. 34 Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 1° marzo 2022, n. 17, recante misure urgenti per il contenimento dei costi dell'energia elettrica e del gas naturale, per lo sviluppo delle energie rinnovabili e per il rilancio delle politiche industriali. (22G00048) (*GU Serie Generale n.98 del 28-04-2022*), 2022. Available online: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2022/04/28/98/sg/pdf> (accessed on 03 April 2023).
2. Rai Radio 2 – Caterpillar, *XIX Edizione M'illumino di meno*, 2023. Available online: <https://www.raiplaysound.it/articoli/2021/11/Millumino-di-Meno-a40952e7-b8ec-44f3-967e-6d3c776df5e2.html> (accessed on 03 April 2023).
3. European Commission. *PVGIS User Manual*. Available online: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en (accessed on 03 April 2023).
4. European Union. *Urban Agenda for the EU*, 2021, <https://urbanagenda.urban-initiative.eu/urban-agenda-eu> (accessed on 03 April 2023).
5. European Commission. *Energy Efficiency First (EEF) 2021*. Available online: https://commission.europa.eu/news/commission-publishes-recommendation-and-guidelines-energy-efficiency-first-principle-2021-09-28_it (accessed on 03 April 2023).
6. European Commission. *Communication from the commission to the european parliament, the european council, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. The European Green Deal*. COM/2019/640 final 2019. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (accessed on 03 April 2023).
7. European Commission. *NextGenerationEU 2020*. Available online: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/eu-borrower-investor-relations/nextgenerationeu_en (accessed on 03 April 2023).
8. European Commission. *National Recovery and Resilience Plan (NRRP) 2021*. Available online: https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility/italys-recovery-and-resilience-plan_en (accessed on 03 April 2023).
9. European Union. *New European Bauhaus (NEB) 2022*. Available online: https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en (accessed on 03 April 2023).

10. United Nations, Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development, 2015. doi: 10.1201/b20466-7.
11. Castello S.; De Lia F.; Graditi G.; Scogliamiglio A.; Zingarelli L.; Schioppo R.; Progettare e installare un impianto fotovoltaico, 3rd ed.; ENEA: Italia, 2008.
12. Duffie, J.A.; Beckman, W.A. Frontmatter. In Solar Engineering of Thermal Processes, eds J.A. Duffie and W.A. Beckman, 2013.
13. Talluri G.; Grasso F.; Iturrino Garcia C.; Luchetta A. Optimal battery energy storage system scheduling within renewable energy communities. *Energies*, 2021, 14(24), 8480.
14. Faba A.; Gaiotto S.; Lozito G. M. A novel technique for online monitoring of photovoltaic devices degradation. *Solar Energy*, 2017, 158, 520-527.

Riconoscimenti

Gruppo docenti: Francesco Asdrubali, Paolo Civiero, Stefano Converso, Antonino Laudani, Paola Marrone, Ilaria Montella, Alberto Raimondi, Marco Ranzato, Francesco Riganti Fulginei.

Tutor: Federico Fiume, Dante Maria Gandola, Martina Palermo, Laura Rosini.

Studenti: Valerio Conicella, Martina Foschi, Francesco Massacci, Federica Massimi, Eleonora Molino, Laura Palleschi, Giordana Panella, Giancarlo Scarascia.

Dottorandi: Dario Ballarano, Leone Maria Barbaro, Luca Tesei.

Il lavoro di rilievo dati nei padiglioni, di restituzione nelle tabelle predisposte, analisi di produzione, analisi solare è stato svolto durante la giornata dagli studenti e dai dottorandi.

Il lavoro di preparazione, organizzazione e sistematizzazione dei dati, confronto tra dati rilevati, consumi reali e dati di produzione simulati, è stato svolto dal gruppo docenti e dai tutor.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Need for the implementation of biosecurity in animal farming

Chiara Poeta¹, Silva Costarelli², Alessandro Monacelli³, Emiliano Lasagna⁴, Raffaella Franceschini⁵,
Maria Luisa Marenzoni^{1,*}

¹ Department of Veterinary Medicine, University of Perugia, via S. Costanzo 4, 06124, Perugia, Italy

² Istituto Zooprofilattico Umbria e Marche "Togo Rosati", via Salvemini 1, 06126, Perugia, Italy

³ Ente Produttori Selvaggina (EPS) Umbria, via Savonarola 28, 06121 Perugia, Italy

⁴ Department of Agricultural, Food and Environmental Sciences, University of Perugia, Borgo XX giugno 74, 06121 Perugia, Italy

⁵ Department of Engineering of Sciences, Guglielmo Marconi University, via Plinio, 44, 00193 Rome, Italy.

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: marialuisa.marenzoni@unipg.it

Abstract: As the COVID outbreak has learned, pandemics can originate from zoonoses, particularly where the domestic and wild interface meet. Effective prevention is offered by the implementation of biosecurity measures, which, both in the planning and application phases, require multidisciplinary skills and the active participation of the people, even in an animal breeding setting. In this work, through the analysis of a case study, the level of biosecurity of a farm, the critical points and strengths, the need to calibrate the measures on the real characteristics of the farm analyzed and the impact of these measures on animal health and, in a One Health perspective, on human and environmental health are evaluated. However, many needs emerge which in the past were not considered and which are now required by law and hence the necessity to increase competences to find new solutions.

Keywords: One Health; biosecurity; infectious emerging diseases; animal farming; wild animals.

1. Main information

The experience of the COVID epidemic and the hypothesized genesis of the SARS-CoV-2 virus, which predicts its passage from wild animal species to humans through intermediate species, have made it

clear to everyone the effect that the emergence of an epidemic caused by an emerging infectious agent can have globally [1,2]. It is estimated that 5 new emerging human infectious diseases appear every year, 3 of which are zoonotic, meaning transmitted from animals. In addition, regardless of the nature of the pathogen, it is estimated that an inter-pandemic period of 11-40 years exists between epidemics [3,4]. Countries therefore depend on their ability to prevent and predict these situations. The European Union is moving in this direction, seeking to contain anthropization, which is considered one of the factors favoring the development of emerging infectious diseases [2].

Livestock farming, a sector of particular economic interest also in our country, represents an environment in which the conditions of human-animal and domestic-wild animal contact can facilitate the onset and spread of emerging infectious diseases. The different types of farming, for example intensive or extensive, present different risk profiles. If the weakness of intensive farming is represented by the number of animals per unit of surface area, in extensive farming, now particularly appreciated for its positive effects on animal welfare and environmental sustainability, the risk of contact between domestic and wild animals, and therefore of transmission of contagious diseases, is greater [2,5].

Prevention is based on the application of biosecurity measures, intended as all the tools (building works, facilities, devices, operational procedures, etc.) aimed at preventing or reducing the onset of infectious diseases. The breeder has a fundamental role in managing this risk, considering, however, that his role requires tools, both technological and training-related, that can only be defined through a broader and multidisciplinary perspective than that of the main professionals operating in the sector (Agronomists, Zootechnicians, and Veterinarians) [2,6].

The purpose of this work is to emphasize the possibilities of implementing biosecurity measures tailored to the specific type of farming, through the description of a case study related to the qualitative evaluation of infectious risk and the possible actions to be applied for biosecurity purposes in a faunal-hunting farm.

2. Material and methods

2.2. Description of the wildlife hunting reserve

The faunal hunting farm examined covers approximately 700 hectares and is located in a hilly area in Central Italy, from 334 to 670 meters above sea level. The entrance to the farm is through a gate which is the only form of access to the farm. The destination is both for agricultural land use and as a hunting reserve, therefore different activities are practiced there. The farm borders two beef cattle farms, one on each side. The farm has approximately 350-380 roe deer, over 200 wild boars, 25-35 red deer, 25-30 fallow deer, 300 pheasant, around 200 hares, some wolves and red foxes, all estimated by census.

From a vegetation point of view, the area is mainly characterized by Mediterranean bush. The reserve encloses within its perimeters several natural water sources: a reservoir, a large river, and many smaller streams and canals (flowing mostly in winter) around the perimeters, serving as natural boundaries.

In this area many old farmhouses are present. An area of the farm has been destined to the processing of hunted animals, according to the regional guidelines relating to food safety [7]. There is a disposal system for animal by-products (part of carcasses, digestive tract content, and so on) that are taken away by a company that deals with the disposal of this type of waste [8].

2.3. Data collection

To collect the data, the manager of the farm was interviewed, using a simplified model of the questions present in the ClassyFarm check list, paying particular attention to the aspects of biosecurity, i.e. the set of actions, tools and procedures useful for containing the risk of introduction and transmission of infectious diseases, as currently there is no specific system referring to extensive farming [9]. The objective of the interview was to identify the critical points present in the farm for the introduction and spread of infectious diseases.

Additional material on the subject has been collected from other international sources [10,11].

The questions were divided into macro-areas: general section; management; hunting activity; external inputs; staff training/development; biosecurity.

The questions asked during the interview are extensively reported in a degree thesis on this topic [12].

3. Analysis of the collected data

From the point of view of location and natural structure, the farm has many positive aspects that contribute to biosecurity:

- the numerous water sources make it possible to dilute the animals in the area for watering purposes, reducing the possibility of direct contact. In fact, water sources are recognized as a risk for infectious diseases due to the potential proximity of several animals while drinking and the possibility that water may protect some etiological agents from inactivation.

- The farm is located in an area with very low livestock density, generating a low level of risk of transmission of infectious diseases between domestic and wild animals. The animals present in the hunting farm represent populations that live in a controlled environment but belong to species that occur naturally in the wildlife and that have the same susceptibility spectrum as wild animals, representing a possible bridge for infectious diseases.

- The animal diet administered in the farm does not require supplementation; this is an important aspect for biosecurity as it reduces the entry of vehicles and external people. Food introduced on farms or means of transport have often been the cause of the spread of highly diffusive diseases, such as highly pathogenic avian influenza, swine fever, swine coronavirus and so on.

From a functional and structural point of view, the farm is frequented for various activities and some aspects were considered deficient and to be implemented for biosecurity:

- lack of no-entry signs for unauthorized personnel at the entrance and along the fences; these signs could be easily placed and act as a deterrent, at least for occasional visitors.

- absence of a specific disinfection area, which could be designed at the entrance to disinfect incoming vehicles.

-The creation of a special parking area would be useful for gathering visitors, limiting the potential introduction and spread of infectious diseases, in the event that people entering the perimeters go to visit other agricultural land, maybe with livestock and potentially carriers of infected fomites. Ideally, a specific car park where hunters can park and be equipped with vehicles on site, to hunt within the perimeters.

- The fence is a critical point for external hunters to tear it down to allow farm animals to escape and be hunted; this represents a problem in terms of biosecurity, especially if the escaping animals then return within the perimeters of the hunting reserve, bringing with them microorganisms that they have taken from outside. The fence is therefore important to limit the movement of animals. In this regard, it could be useful to educate local farmers on the biosecurity and risks involved and favors cooperation. It may also be helpful to install security cameras along perimeters to control them.

- Given the relevance of infectious diseases and their spread among different animal populations, even if it was noted during the interview that employees are aware of the basic principles of hygiene and infectious diseases, it is important to maintain an appropriate level of training. In this sense, it would be important to define and follow some basic biosecurity rules for internal and external personnel, such as changing shoes, wearing clean and sanitized clothes and dedicating a special area to this sanitization.

-It should not be allowed to leave food or waste on the holding by personnel to avoid the risk of introducing African swine fever. Waste containers could easily be installed within the area but should be made inaccessible to animals.

-Information posters could be used to summarize all the good practices useful for avoiding the spread of infectious diseases.

-Another advantage of the farm was the sensitivity of the management to the health situation of the animals and the prompt attention to surveillance, participating in voluntary surveillance plans of the national health system. In fact, when requested by the national veterinary service, the farm has promptly and voluntarily made the animals available, in particular the wild boars, dead or killed, for the surveillance of the African swine fever, participating to a national plan. At the same time, the analysis of dead animals is useful to detect the presence of any other etiological agent.

In the interview, the animal welfare parameter was not mentioned, even if it is a fundamental element to be analyzed in accordance with national and European laws; however, in this farm, animal welfare was clearly expressed as the ethology of the animals respected the natural rhythms and the density of the animals was not excessive.

4. Discussion

This study represents an attempt to analyze the risk of infectious diseases in the management of a faunal-hunting farm, hosting wild animal species in a controlled context. It demonstrates that the proposed model can be applied to perform an infection risk analysis and to improve the biosecurity

level of farm. In fact, this model can be applied and shared with other comparable agricultural contexts with the one studied, which allows to highlight the importance of the application of biosecurity processes and methods and all the economic, environmental and social benefits deriving from them. A higher level of biosecurity increases animal welfare by reducing disease status from infectious agents, that is another relevant objective to breed animal in European Union [6].

An immediate impact of the interview and analysis was to increase awareness of manager and staff on the risks of infectious diseases and the potential factors that can cause them and that could be better managed to reduce this risk. This translates into greater attention to actions and procedures that were not previously placed in attention. This underlines how much training is a tool to make farms autonomous in the planning of biosecurity plans, as required by European regulation [6]. However, personalized and multidisciplinary advice would be appropriate for each farm, considering the typical characteristics of the area, the attitude of the farm and the type of production, focusing on protection of the environment and the territory.

Fences represent the barrier between the farm and the wildlife and European and national laws even impose some criteria on this, as happens for the prevention of African swine fever [13].

However, many other aspects could be enhanced in different farms, but new tools are needed to design and improve existing structures and new technologies to facilitate the prevention and control of infectious diseases, with an integrated approach that considers as many parts as possible, in accordance with the One Health perspective, respecting human, animal and environmental health. The integration of multiple skills and the active collaboration between breeders and technicians fully responds to the approach suggested by the One Health system, towards the integration of all the actors in the supply chain, from producers, to animals, to the consumer, confirming itself as a driving force of human and animal health.

References

1. Gortàzar, C.; Ferroglio, E.; Höfle, U.; Frölich, K.; Vicente J., Diseases shared between wildlife and livestock: a European perspective. *European Journal of Wildlife Research*, **2007**, *53*, 241-256.
2. Van Langevelde, F.; Rivera Mendoza, H. R.; Matson K. D.; Esser H. J.; De Boer W.F.; Schindler S. The link between biodiversity loss and the increasing spread of zoonotic diseases, document for the committee on Environment, Public Health and Food Safety, Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, European Parliament, Luxembourg, 2020. Available online: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2020/658217/IPOL_IDA\(2020\)658217_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2020/658217/IPOL_IDA(2020)658217_EN.pdf) (accessed on 31 March 2023).
3. Marques, A.D.; Sherrill-Mix, S.; Everett, J.K.; Adhikari, H.; Reddy, S.; Ellis, J.C.; Zelif, H.; Greening, S.S.; Cannuscio, C.C.; Strelau, K.M.; Collman, R.G.; Kelly, B.J.; Rodino, K.G.; Bushman, F.D.; Gagne, R.B.; Anis, E. Multiple Introductions of SARS-CoV-2 Alpha and Delta Variants into White-Tailed Deer in Pennsylvania. *mBio*, **2022**, *13*, e0210122.
4. Capua, I. *La meraviglia e la trasformazione verso una salute circolare*, Mondadori, Milano Italia, 2021.

5. Gubbiotti, M. *Costruire un futuro di sostenibilità ambientale e sociale per un nuovo rapporto tra persone, natura e animali*. In *Zootecnia & parchi*, 1st ed.; Point Veterinaire Italie, Milano, Italia, 2022.
6. REGOLAMENTO (UE) 2016/429 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0429> (accessed on 31 March 2023).
7. Linee guida vincolanti in materia di igiene delle carni di selvaggina selvatica – Food safety - Umbria Region. 2022. Available online: https://www.atcperugia1.it/pdf/2022/lineeguida/PEC-REGIONE-UMBRIA-PROT28910-22_DEL_14-02-2022-LINEE-GUIDA.pdf (accessed on 31 March 2023).
8. Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1069&from=EN> (accessed on 31 March 2023).
9. Classyfarm. Available online: <https://www.classyfarm.it/> (accessed on 31 March 2023).
10. Canadian Food Inspection Agency. *Biosecurity for Canadian cervid farms producer, planning guide*. 2018. Available online: https://inspection.canada.ca/DAM/DAM-animals-animaux/STAGING/text-texte/terr_biosec_standards_cervid_planning_guide_1529952193639_eng.pdf (accessed on 31 March 2023).
11. Animal Health Australia and Plant Health Australia Limited. *Farm Biosecurity Action Planner*. 2019. Available online: <file:///home/cp970019/Scaricati/Farm-Biosecurity-Action-Planner-2019.pdf> (accessed on 31 March 2023).
12. Poeta, C. The interface between wild and domestic animals as a risk of transmission of infectious diseases: an analysis of a wildlife hunting reserve in Central Italy. Bachelor Degree, Corso di Laurea interdipartimentale in Produzione Animali, University of Perugia, 21 February 2023.
13. Decreto 28 giugno 2022, Requisiti di biosicurezza degli stabilimenti che detengono suini, GU Serie Generale n.173 del 26-07-2022. Available online: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/07/26/22A04210/sg> (accessed on 31 March 2023).

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Modulating the transition temperature of VO₂ for sustainable radiative cooling in buildings

Francesco Marchini^{1,2,*}, Roberto Bondi¹, Roberto D'Amato¹, Claudia Fabiani^{2,3}, Loredana Latterini¹ and Anna Laura Pisello^{2,3}

¹ Department of Chemistry, Biology and Biotechnology, University of Perugia, Via Elce di sotto 8, Perugia, 06123, Italy

² CIRIAF - Interuniversity Research Center, University of Perugia, Via G. Duranti 67, Perugia, 06125, Italy

³ Department of Engineering, University of Perugia, University of Perugia, Via G. Duranti 93, Perugia, 06125

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: francesco.marchini@studenti.unipg.it

Abstract: Despite the promising potential for building applications, the fixed properties of radiative coolers limit their practical use in the intrinsically dynamic built environment, resulting in missed opportunities to improve building physics and urban well-being. The key to unlocking the full potential of radiative cooling lies in scalability and adaptability to specific environmental conditions that would, for example, prevent overcooling during the winter season. In this view, Vanadium Oxide (VO₂) could produce innovative modulating layers due to its reversible insulator-to-metal transition, accompanied by a dramatic change in the optical properties in the visible and near-infrared region. This property makes VO₂ suitable for coupling with radiative coolers, allowing them to tune/untune their emittance reversibly within the atmospheric window and assuring an adaptive behaviour to the external stimuli. However, at present, the VO₂ transition temperature (68°C) is too high for the application in the built environment. Therefore, this research aims to lower and modulate the transition temperature of VO₂ by utilizing W-doping and defects engineering as optimization techniques. The chemical and optical properties of the obtained VO₂ compounds are examined in the experimental investigation, focusing on thermochromic performances. The ultimate goal is to develop a cost-effective and manageable approach for producing VO₂ with lower transition temperatures towards the sustainable exploitation of radiative cooling processes in the urban built environment.

Keywords: Thermochromic materials; Vanadium Oxide; UHI mitigation; Hydrothermal synthesis; Radiative cooling

1. Introduction

The Urban Heat Island (UHI) effect is a well-known phenomenon that refers to the tendency of urban areas to experience higher outdoor air temperatures than their surrounding rural areas [1-2]. This is due to the fact that densely packed buildings and paved surfaces in cities trap and amplify heat more effectively than natural ecosystems and rural areas, which are often shaded and cooled by trees and vegetation [3]. The impact of urban heating is particularly concerning because it can have negative effects on human health and increase energy requirements [4]. Scientific research on the mitigation of the UHI phenomenon has been growing, focusing on passive mitigation technologies that employ ambient energy sources instead of purchased energy like electricity or natural gas [5-6].

In this topic, radiative cooling is the process of cooling a surface or an object by radiating heat into a colder environment, based on the fundamental principle that all objects at a temperature above absolute zero emit thermal radiation [7-8]. This natural process can lead to extraordinary cooling performance when heat is dissipated toward outer space, the coldest heat sink of our known universe [9-10]. Indeed, Earth's atmosphere acts as a curtain, an opaque barrier to much of the electromagnetic spectrum, but specific ranges of wavelengths can freely pass through: such holes are defined as atmospheric windows [11].

The combination of the atmosphere's transparency in the 8-to-13- μm wavelength band and outer space's potential as a heat sink has opened up a new frontier in renewable-energy research [12-13]. In building applications, radiative cooling has the potential to provide cooling without the need for electricity, achieving sub-ambient temperatures and thus mitigating UHI effects [14]. Although radiative cooling is more easily achievable at night due to the spectral alignment between the transparency window and the peak in a 300 K blackbody's radiation spectrum, it is crucial during hot daytime periods when direct sunlight reaches building roofs and pavements, leading to overheating and exacerbating urban heat islands [15]. Daytime radiative cooling requires materials with near-zero absorptivity across the solar spectrum while generating strong thermal radiation in the atmospheric transparency wavelength window, which imposes stricter requirements [16]. Despite the promising potential for building applications, the fixed properties of radiative coolers limit their practical use in the intrinsically dynamic built environment, resulting in missed opportunities to improve building physics and urban well-being [17]. The key to unlocking the full potential of radiative cooling lies in scalability and adaptability to specific environmental conditions that would, for example, prevent overcooling during the winter season [18-19].

In this view, Vanadium dioxide (VO_2) represents the principal promise of a room-temperature dynamic thermal switch. It exhibits many fascinating properties due to reversible first-order insulator-to-metal transition (MIT) that spontaneously occurs at around 68 °C (T_{MIT}) [20], the closest MIT to room

temperature [21], accompanied by a crystallographic transition between a low-temperature monoclinic phase (M) and a high-temperature tetragonal phase (R) [22]. VO₂ could produce innovative modulating layers due to its reversible insulator-to-metal transition, accompanied by a dramatic change in the optical properties in the visible and near-infrared region [23]. This property makes VO₂ suitable for coupling with radiative coolers, allowing them to tune/untune their emittance reversibly within the atmospheric window and assuring an adaptive behaviour to the external stimuli [24].

For example, Taylor et al. [25] proposed a self-regulating passive radiative cooling system utilizing a Fabry-Perot approach. Their design consisted of a lossless dielectric spacer layer placed between a VO₂ thin film and an opaque reflective substrate.

At low temperatures, the thin VO₂ insulating layer allowed IR light to pass through and into the spacer layer, resulting in minimal thermal radiation losses. As the VO₂ thin film underwent a phase transition into the metallic state, it acted as the top mirror of the Fabry-Perot cavity with a resonant response covering a broad range of wavelengths due to the confinement and enhancement of the electric field. This allowed for dynamic switching of the system through the combination of different functional layers. However, at present, the VO₂ transition temperature (68°C) is too high for the introduction in the built environment [26].

The transition temperature of VO₂ should be reduced, while the switching ability of its transmittance in infrared should be kept or enhanced during the MIT [27]. In spite of the extensive efforts contributed these problems are still unsolved, which are crucial for the application of VO₂ [28]. Transition metal elements with large atomic radius and rich valences introduced into VO₂ could trigger the distortion of its lattice and modify its properties related to MIT. Reducing the transition temperature of the MIT could be achieved efficiently by the incorporation of some metal ions, such as W⁶⁺, Mo⁶⁺, and Nb⁵⁺, into the crystal lattices of VO₂ [29-30]. Oxygen vacancies and hydrogenation may be also used to decrease the MIT transition temperature, significantly affecting its electronic and optical properties [31-32]. Indeed, the presence of oxygen vacancies can reduce the bandgap of VO₂ and shift its critical temperature to lower values, making it more suitable for practical applications and enhancing infrared transmittance and thermochromic switching performances [33]. However, the creation of too many oxygen vacancies can lead to the formation of metallic VO₂, which does not exhibit the thermochromic effect.

Therefore, precise control of the concentration and distribution of oxygen vacancies is crucial for tailoring the properties of VO₂ for specific applications [34]. These methods often require complicated and costly equipment, can be applied on limited substrates and are impractical for large-area applications [35].

Therefore, this research aims to lower and modulate the transition temperature of VO₂ by utilizing W-doping and defects engineering as optimization techniques. The chemical properties of the obtained VO₂ compounds are examined in the experimental investigation, focusing on thermochromic performances. The ultimate goal is to develop a cost-effective and manageable approach for producing VO₂ with lower transition temperatures towards the sustainable exploitation of radiative cooling processes in the urban built environment.

2. Materials and methods

1.1. Synthesis

In our experiments, all of the chemical reagents were analytical grade and used as obtained commercially without further purification. The synthesis of nano-sized $\text{VO}_2(\text{R})$ was performed in two stages, which include the preparation of $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ gel and the reduction of this gel via hydrothermal treatment. The preparation of $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ gels was carried out according to an earlier publication [36]. The dissolution reaction of V_2O_5 in H_2O_2 is highly exothermic and can even be very violent when concentrated hydrogen peroxide solutions are used (such as 30wt%). Therefore, more diluted H_2O_2 solutions had then been used to be able to control the formation of the gel.

In a typical experiment, 0.450g V_2O_5 powder (Sigma-Aldrich, USA) was dissolved in a 15ml solution of hydrogen peroxide (5wt% or 10wt%) (H_2O_2). The exothermic reaction leads to the partial decomposition of hydrogen peroxide, which in turn leads to the release of oxygen with rigorous bubbling and the formation of V(V) per-oxo-complexes. A clear orange solution was formed after about 10 min (with a final pH of about 1.5), and it progressively turned into a red-brown gelatinous flocculate form after ageing for 24 hours, as shown in Figure 1.

Figure 1. Red-brown gel formed after ageing for 24 hours.



An appropriate $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Sigma-Aldrich, USA) solution was added drop-wise under continuous stirring when (i) the solution reached a brownish-red colour and stopped flocculating (about an hour), and (ii) after waiting for 24 hours. It can be observed that with the addition of hydrazine, the gel turns black quickly, which means that some V_2O_5 was reduced.

After that, the solution was poured into a 50 ml Teflon vessel and sealed in a stainless steel autoclave, then followed by hydrothermal treatment at 240°C for 24 hours. After hydrothermal treatment, the suspension was centrifuged and rinsed several times with distilled water and ethanol. The final product was dried at 60°C for 10 hours in a desiccator.

Doping technology was used to tune down the phase transition temperature of VO₂. In our experiments, tungsten from (NH₄)₆W₁₂O₃₉ · 5H₂O (Thermo Fischer Scientific, USA) was used for cation substitution. For this purpose, the doped sample was prepared by adding an appropriate amount of W-dopant just before sealing the Teflon vessel and then followed by hydrothermal treatment.

1.2. Experimental methodology

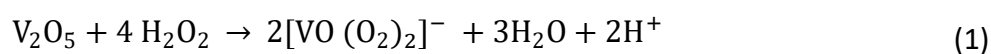
Thermogravimetric analysis (TGA) was used to determine the change in mass as a function of temperature, providing information on the composition and thermal stability of the samples. Analyses were performed under nitrogen flux using a Netzsch STA 2500 Regulus instrument. The experiments were done by applying a ramp from 20°C until 600°C, with a heating rate of 20°C/min and a nitrogen flux of 50 ml/min. Differential scanning calorimetry (DSC) analysis was conducted to study the reversible structural phase transition of the thermochromic VO₂. A Netzsch DSC 214 Polyma was used with acquisition cycles from 0 to 100°C using a heating step of 10°C/min and a 50 mL/min nitrogen flux.

The experiments were performed using aluminium pans with open lids for all the samples, with an empty pan as the reference. The composite morphologies were investigated by field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM) through an LEO 1525 ZEISS instrument equipped with InLens and angle-selective back-scattered (AsB) detectors. The elemental composition and chemical mapping were performed through energy dispersive x-ray spectrometry (EDX), using a Bruker 5030 EDX detector attached to the SEM microscope.

3. Results and discussions

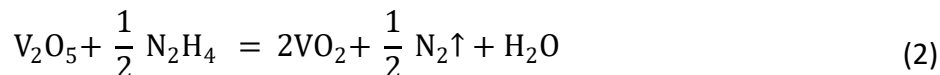
Large-scale and low-cost synthesis of VO₂(M) is a challenge for materials scientists. For industrial purposes, V₂O₅ · nH₂O gel has been used as a vanadium precursor for the synthesis of VO₂ nano-powders, which are currently prepared by pouring the molten V₂O₅ heated around 800°C, into water or via the acidification of metavanadate NaVO₃ aqueous solutions through a proton-exchanger resin [37]. However, the concentration of vanadium is difficult to adjust in these processes, and the cation could not be exchanged thoroughly. Sol-gel method could be used to prepare large-area VO₂ films, offering the advantages of high purity, homogeneity, stoichiometry control and ease of doping [38].

In this paper, the synthesis of VO₂ nano-structured powders was carried out by combining sol-gel and hydrothermal treatment processes. Firstly, vanadium pentoxide gel obtained from the reaction of V₂O₅ and H₂O₂ was adopted as a vanadium source in the hydrothermal process. Hydrogen peroxide, for instance, reacts vigorously with crystalline V₂O₅ giving rise to a red gelatinous product. Moreover, the use of H₂O₂ increases the solubility of V₂O₅ with the reaction of [39]:



The use of Vanadium(V) required a reducing agent to be reduced to Vanadium(IV) in VO₂. In this report, the one-step hydrothermal synthesis used hydrazine monohydrate as the reducing agent since N₂H₄ is a kind of strong reductant in alkaline conditions. When it was added to the dark red V₂O₅ · nH₂O gel under continuous stirring, the colour turns black immediately indicating the formation of some

lower valence vanadium. The chemical reaction for the reduction of V(V) to V(IV) might be formulated as follows:



Literature work explores the introduction of oxygen vacancies as an optimization strategy towards the modulation of the transition temperature of VO₂. For this purpose, different syntheses were realized through the variation of the flocculating time of the precursor solution and the concentration of H₂O₂. In the case of sample S4, the possible correlation between the presence of oxygen vacancies and the introduction of W doping was investigated.

Table 1. Samples investigated in the experimental characterization.

Sample #	H ₂ O ₂ [%wt]	Flocculating time [hours]	Reducing agent	Doping [%]
1	5	1	N ₂ H ₄	x
2	5	24	N ₂ H ₄	x
3	10	24	N ₂ H ₄	x
4	5	24	N ₂ H ₄	W (1%)

When the phase transition of VO₂(M) occurs, it respectively exhibits noticeable endothermic and exothermic profiles in the heating and cooling DSC curves, which corresponds to the phase transition of VO₂(M). The phase transition properties are shown in Figure 2. Sample S1, in which hydrazine has been added after just 1 hour, shows a definite peak at 64.8°C in the heating process, similar to the classic critical temperature reported in the literature of 68°C. By increasing the flocculation time to 24 hours, as in the case of sample S2, the transition temperature in the heating phase drops to 53°C with a smoother curve, far lower than the value for typical VO₂ and coherent with the 55.5°C temperature reported in [40].

The reason for the decrease of transition temperature is the presence of the oxygen vacancies, and thus the increase of electron concentration, caused by oxygen deficiency in the VO₂ crystal lattice since the samples were fabricated in reductive circumstances [41]. A similar shift also happens in the cooling phase, where sample S2 shows a transition temperature of 26°C, almost 30°C degrees less than sample S1. Thermogravimetric analysis (Figure 3) shows a smooth linear trend without particular peaks and good thermal stability for S1 and S2. The morphology and the element composition of the obtained powders were compared through SEM and EDX investigation (Figure 4).

Figure 2. Comparison of the results of DSC analysis: a) S1-S2, b) S2-S3, c) S3-S4.

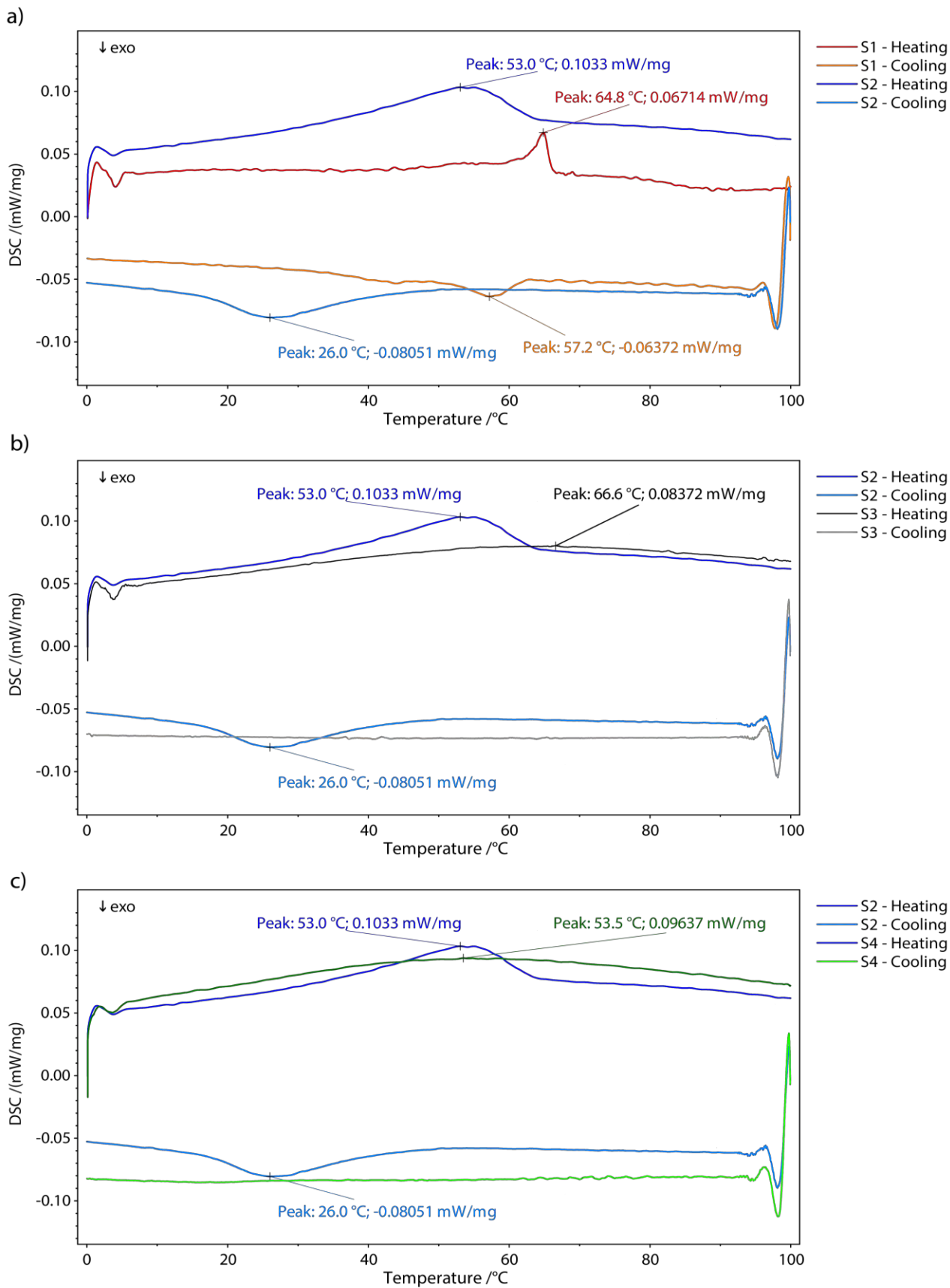
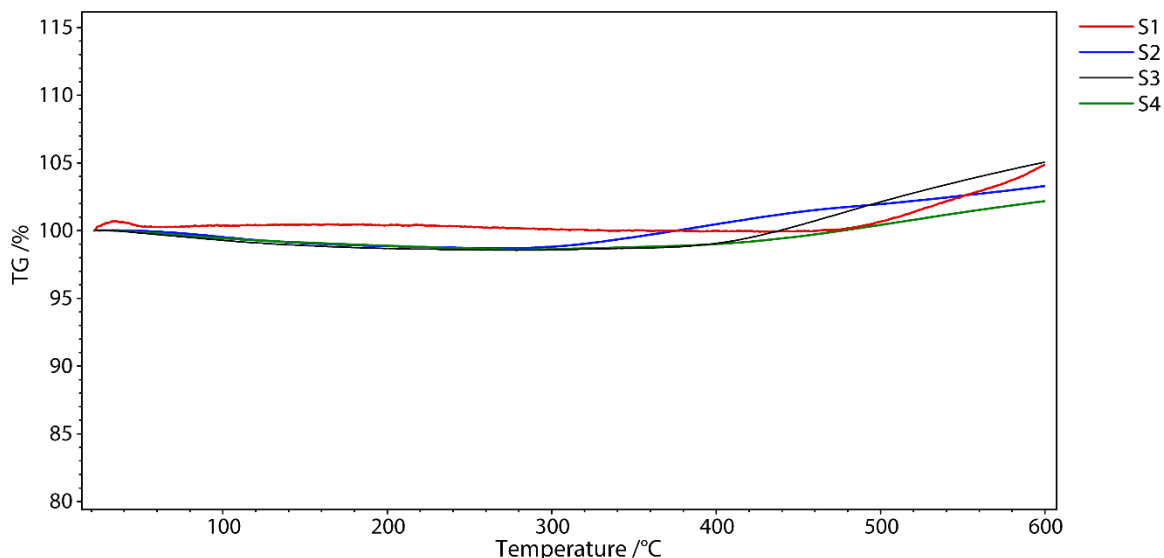


Figure 3. Results of TG Analysis.

The morphology and size distribution of the prepared samples is investigated through SEM imaging. The samples show a rod-like morphology, with a typical width that decreases for S2 (Figure 3b). One-dimensional (1D) nanostructures, such as nanorods, have raised great interest because they present novel characteristics, owing to their small radial dimensions, while retaining their longitudinal connectivity [42].

Based on these results, the synthesis of S3 explored the influence of H_2O_2 on the development of VO_2 powder; increasing the concentration of H_2O_2 from 5%wt to 10%wt in the precursor solution while following the S2 synthesis method. Compared with S2, S3 sample shows a flatter curve in the DSC analysis without defined peaks. This behaviour is confirmed by SEM images, where S2 nanorods give way to irregular shapes aggregates (Figure 3c). Therefore, the increase of H_2O_2 concentration did not bring the desired outcomes, probably due to the deformation of the VO_2 structure.

As the most effective dopant on an atomic percent basis, W-doping was introduced in the S4 synthesis procedure. Indeed, the presence of oxygen vacancies could facilitate the substitution of tungsten for vanadium, causing a further reduction of the VO_2 transition temperature. SEM and EDX investigation confirm the partial success of the doping process, even if the W-loading has to be investigated in more details, while, from a morphologic point of view, S4 compound presents an irregular shape. The introduction of W causes a lowering and flattening in the DSC heating curve of S4, with a smooth hump centered at 53.0°C (Figure 2c).

Figure 4. SEM images and element mapping of the VO₂ powders: a) S1, b) S2, c) S3 and d) S4.

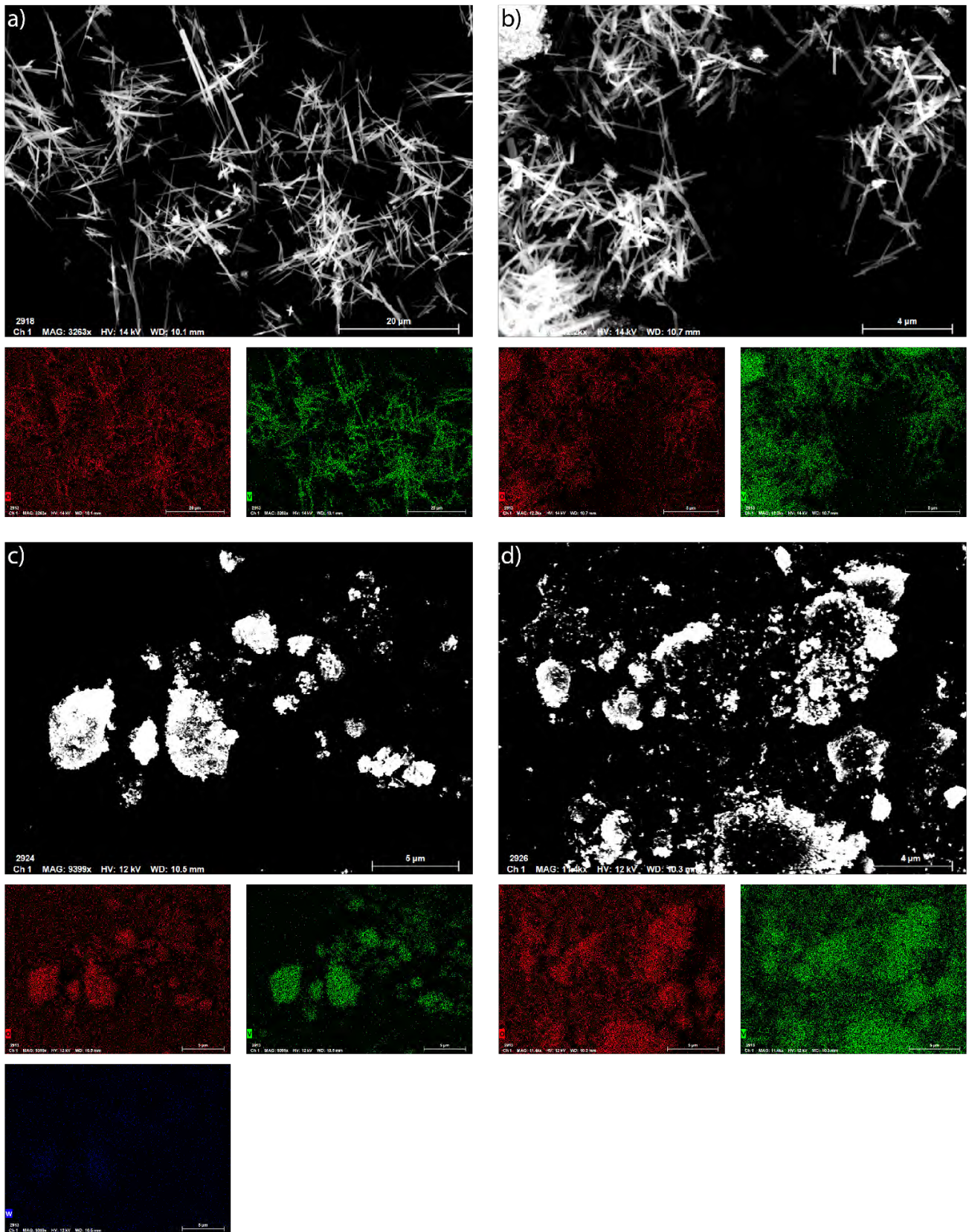


Table 2. Atomic percent of key elements in VO₂ nanoparticles determined by EDX.

Sample	Elements	Atomic Number	Mass Normalized [%]	Atom [%]	Absolut Error [%]
S1	O	8	47.17	73.97	1.13
	V	23	52.83	26.03	0.62
S2	O	8	35.17	63.34	1.20
	V	23	64.83	36.66	1.02
S3	O	8	31.17	59.05	1.15
	V	23	68.83	40.95	1.29
S4	O	8	31.93	60.28	1.17
	V	23	66.56	39.47	1.18
	W	74	1.31	0.25	0.05

4. Conclusions

Radiative cooling is a promising strategy for reducing energy consumption in buildings and mitigating the urban heat island effect. However its widespread application has been hindered by the need to adapt to the dynamic built environment. Thanks to its reversible insulator-to-metal transition, Vanadium Dioxide represents the principal promise of a room-temperature dynamic thermal switch. For this purpose, this work explores the introduction of oxygen vacancies as an optimization strategy towards the modulation of the transition temperature of VO₂. By combining sol-gel and hydrothermal treatment processes, a facile VO₂ nanopowder synthesis had been developed by the dissolution reaction of V₂O₅ in H₂O₂. Increasing the flocculating up to 24 hours before the introduction of hydrazine, a VO₂ powder with (i) a transition temperature of 53.0°C (far lower than the typical 68.0°C), (ii) high thermal stability and (iii) nano-rod morphology has been developed. Similar synthesis procedures, increasing the H₂O₂ concentration and inserting W-doping, resulted in a deformation of the VO₂ structure. This study highlights the potential of oxygen deficiencies in the VO₂ crystal lattice towards the modulation of the transition temperature, a strategy that could represent a more cheap and sustainable alternative to doping techniques. Further investigations will focus on the considerable change in the optical properties in the visible and near-infrared region caused by the MIT transition of VO₂-synthesized compounds.

References

1. L. Yang, F. Qian, D.-X. Song, K.-J. Zheng, Research on urban heat-island effect, *Procedia Engineering*, 2016, 169 (11–18), Fourth International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island, 30-31 May and 1 June 2016. doi:10.1016/j.proeng.2016.10.002.
2. M. Santamouris, Heat Island Research in Europe: The State of the Art, *Advances in Building Energy Research* 2007, 1 (123–150), doi:10.1080/17512549.2007.9687272.
3. G. Evola, A. Gagliano, A. Fichera, L. Marletta, F. Martinico, F. Nocera, A. Pagano, UHI effects and strategies to improve outdoor thermal comfort in dense and old neighbourhoods, *Energy Procedia* 134 (2017) 692–701, Sustainability in Energy and Buildings 2017: Proceedings of the Ninth KES

- International Conference, Chania, Greece, 5-7 July 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.589
4. L. Kleerekoper, M. van Esch, T. B. Salcedo, How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect, *Resources, Conservation and Recycling* 64 (2012) 30–38. doi:10.1016/j.resconrec.2011.06.004.
 5. M. Santamouris, On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings, *Energy and Buildings* 82 (2014) 100–113.
 6. K. Degirmenci, K. C. Desouza, W. Fieuw, R. T. Watson, T. Yigitcanlar, Understanding policy and technology responses in mitigating urban heat islands: A literature review and directions for future research, *Sustainable Cities and Society* 70 (2021) 102873. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.022.
 7. B. Zhao, M. Hu, X. Ao, N. Chen, G. Pei, Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects, *Applied Energy* 236 (2019) 489–513. doi:10.1016/j.apenergy.2018.12.018.
 8. D. Zhao, A. Aili, Y. Zhai, J. Lu, D. Kidd, G. Tan, X. Yin, R. Yang, Subambient cooling of water: Toward real-world applications of daytime radiative cooling, *Joule* 3 (1) (2019) 111–123. doi:10.1016/j.joule.2018.10.006
 9. X. Lim, The super-cool materials that send heat to space, *Nature* 577 (7788) (2020) 18–20. doi:10.1038/d41586-019-03911-.
 10. W. Li, S. Fan, Radiative Cooling: Harvesting the Coldness of the Universe, *Optics and Photonics News* 30 (11) (2019) 32–39. doi:10.1364/OPN.30.11.000032.
 11. J. W. Salisbury, D. M. D’Aria, Emissivity of terrestrial materials in the 8–14 μm atmospheric window, *Remote Sensing of Environment* 42 (2) (1992) 83–106. doi:10.1016/0034-4257(92)90092-X.
 12. U. Khan, R. Zevenhoven, Passive cooling through the atmospheric window for vehicle temperature control, *Archives of Thermodynamics* 42 (3) (2021) 291–300, International Conference on Contemporary Problems in Thermal Engineering, CPOTE 21-24-09-2020.
 13. X. Yu, J. Chan, C. Chen, Review of radiative cooling materials: Performance evaluation and design approaches, *Nano Energy* 88 (2021) 106259. doi:10.1016/j.nanoen.2021.106259.
 14. A. P. Raman, M. A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli, S. Fan, Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight, *Nature* 515 (2014) 540–544. doi:10.1038/nature13883.
 15. M. Hu, G. Pei, L. Li, R. Zheng, J. Li, J. Ji, Theoretical and Experimental Study of Spectral Selectivity Surface for Both Solar Heating and Radiative Cooling, *International Journal of Photoenergy* 2015 (2015) 1–9. doi:10.1155/2015/807875.
 16. B. Ko, D. Lee, T. Badloe, J. Rho, Metamaterial-based radiative cooling: Towards energy-free all-day cooling, *Energies* 12 (1) (2019). doi:10.3390/en12010089.
 17. J. Yang, Z.-H. Wang, K. E. Kaloush, Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47 (2015) 830–843. doi:10.1016/j.rser.2015.03.092.
 18. G. Ulpiani, G. Ranzi, K. W. Shah, J. Feng, M. Santamouris, On the energy modulation of daytime radiative coolers: A review on infrared emissivity dynamic switch against overcooling, *Solar Energy*

- 209 (2020) 278–301. doi:10.1016/j.solener.2020.08.077.
19. K. Tang, K. Dong, J. Li, M. P. Gordon, F. G. Reichertz, H. Kim, Y. Rho, Q. Wang, C.-Y. Lin, C. P. Grigoropoulos, A. Javey, J. J. Urban, J. Yao, R. Levinson, J. Wu, Temperature-adaptive radiative coating for all-season household thermal regulation, *Science* 374 (6574) (2021) 1504–1509. doi:10.1126/science.abf7136.
 20. M. A. Kats, R. Blanchard, S. Zhang, P. Genevet, C. Ko, S. Ramanathan, F. Capasso, Vanadium Dioxide as a Natural Disordered Meta-material: Perfect Thermal Emission and Large Broadband Negative Differential Thermal Emittance, *Physical Review X* 3 (2013) 041004. doi:10.1103/PhysRevX.3.041004.
 21. V. S. K. Channam, F. Maury, N. Bahlawane, Vanadium Oxide as a Key Constituent in Reconfigurable Metamaterials, *IntechOpen*, 2018, Ch. 1, pp. 1–20. doi:10.5772/intechopen.80476.
 22. L. Yuchao, F. Kong, B. Wang, Y. Zhao, Z. Wang, Preparation of shape-controlling VO₂(M/R) nanoparticles via one-step hydrothermal synthesis, *Frontiers of Optoelectronics* 14 (2020) 311–320. doi:10.1007/s12200-020-1006-2.
 23. S. Wang, T. Jiang, Y. Meng, R. Yang, G. Tan, Scalable thermochromic smart windows with passive radiative cooling regulation, *Science* 374 (2021) 1501–1504. doi:10.1126/science.abg0291.
 24. Wang, G. Tan, R. Yang, D. Zhao, Materials, structures, and devices for dynamic radiative cooling, *Cell Reports Physical Science* 3 (12) (2022) 101198. doi:10.1016/j.xcrp.2022.101198
 25. S. Taylor, Y. Yang, L. Wang, Vanadium dioxide based Fabry-Perot emitter for dynamic radiative cooling applications, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 197 (2017) 76–83. doi:10.1016/j.jqsrt.2017.01.014.
 26. Z. Peng, W. Jiang, H. Liu, Synthesis and electrical properties of tungsten-doped vanadium dioxide nanopowders by thermolysis, *Journal of Physical Chemistry* 111 (2006) 1119–1122. doi:10.1021/jp066342u.
 27. G. Pan, J. Yin, K. Ji, X. Li, X. Cheng, H. Jin, J. Liu, Synthesis and thermochromic property studies on w doped vo₂ films fabricated by sol-gel method, *Scientific Reports* 7 (2017) 1–10. doi:10.1038/s41598-017-05229-9.
 28. L. Kang, Y. Gao, H. Luo, A novel solution process for the synthesis of VO₂ thin films with excellent thermochromic properties, *ACS Applied Materials & Interfaces* 1 (10) (2009) 2211–2218. doi:10.1021/am900375k.
 29. D. Li, M. Li, J. Pan, Y. Luo, H. Wu, Y. Zhang, G. Li, Hydrothermal synthesis of Mo-doped VO₂/TiO₂ composite nanocrystals with enhanced thermochromic performance, *ACS Applied Materials & Interfaces* 6 (9) (2014) 6555–6561.
 30. Z. Peng, Y. Wang, Y. Du, D. Lu, D. Sun, Phase transition and IR properties of tungsten-doped vanadium dioxide nanopowders, *Journal of Alloys and Compounds* 480 (2) (2009) 537–540. doi:10.1016/j.jallcom.2009.01.092.5
 31. V. Andreev, V. Kapralova, V. Klimov, Effect of hydrogenation on the metal-semiconductor phase transition in vanadium dioxide thin films, *Physics of the Solid State* 49 (2007) 2318–2322. doi:10.1134/S1063783407120177.

32. S. Zhang, I. S. Kim, L. J. Lauhon, Stoichiometry Engineering of Monoclinic to Rutile Phase Transition in Suspended Single Crystalline Vanadium Dioxide Nanobeams, *Nano Letters* 11 (4) (2011) 1443–1447. doi:10.1021/nl103925m.
33. M. A. Basyooni, M. Al-Dossari, S. E. Zaki, Y. R. Eker, M. Yilmaz, M. Shaban, Tuning the metal–insulator transition properties of VO₂ thin films with the synergetic combination of oxygen vacancies, strain engineering, and tungsten doping, *Nanomaterials* 12 (9) (2022) 1470. doi:10.3390/nano12091470.
34. L. Fan, X. Wang, F. Wang, Q. Zhang, L. Zhu, Q. Meng, B. Wang, Z. Zhang, C. Zou, Revealing the role of oxygen vacancies on the phase transition of VO₂ film from the optical-constant measurements, *RSC Advances* 8 (2018) 19151–19156. doi:10.1039/C8RA03292K.
35. B. Alonso, J. Livage, Synthesis of Vanadium Oxide Gels from Peroxovanadic Acid Solutions: A ⁵¹V NMR Study, *Journal of Solid State Chemistry* 148 (1) (1999) 16–19. doi:10.1006/jssc.1999.8283.
36. E. Muller, Herstellung kolloider vanadinsäuren nach einer neuen dispersions methode, *Zeitschrift für Chemie und Industrie der kolloide* 8 (1911) 302–303.
37. J. Livage, Sol-gel chemistry and electrochemical properties of vanadium oxide gels, *Solid State Ionics* 86-88 (1996) 935–942, Proceedings of the 10th International Conference on Solid State Ionics. doi:10.1016/0167-2738(96)00336-0.
38. A. Riapanitra, Y. Asakura, S. Yin, One-step hydrothermal synthesis and thermochromic properties of chlorine-doped VO₂(M) for smart window application, *Functional Materials Letters* 13 (01) (2020) 1951008. doi:10.1142/S1793604719510081.
39. H. Ji, D. Liu, H. Cheng, Y. Tao, Large area infrared thermochromic VO₂ nanoparticle films prepared by inkjet printing technology, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 194 (2019) 235–243. doi:10.1016/j.solmat.2019.02.028.
40. S. Ji, F. Zhang, P. Jin, Preparation of high performance pure single phase VO₂ nanopowder by hydrothermally reducing the V₂O₅ gel, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (12) (2011) 3520–3526. doi:10.1016/j.solmat.2011.08.015.
41. C. Griffith, H. Eastwood, Influence Of Stoichiometry on metal - semiconductor transition in Vanadium Dioxide, *Journal of Applied Physics* 45 (1974) 2201–220.
42. A. P. Alivisatos, Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots, *Science* 271 (5251) (1996) 933–937. doi:10.1126/science.271.5251.933.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Monitoring the thermal potential of low-cost radiative cooling materials under static and dynamic conditions of exposure

Chiara Chiatti ¹, Ioannis Kousis ², Claudia Fabiani ², Laura Carlosena ³ and Anna Laura Pisello ^{1,2*}

¹ CIRIAF Research Centre – University of Perugia, Via G. Duranti 67, 06125 Perugia (Italy)

² Engineering Department – University of Perugia, Via G. Duranti 93, 06125 Perugia (Italy)

³ Department of Engineering – Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona, Navarra (Spain)

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: anna.pisello@unipg.it

Abstract: Reflecting the radiation of the sun while emitting thermal radiation to cold outer space has proven to be an effective solution against urban overheating. The latter severely impact the energy consumption of buildings, outdoor pollution levels, and heat-related morbidity and mortality, which is why recent research has focused on new advanced mitigation technologies to be implemented in cities. Passive radiative cooling (PRC) has the potential to provide a temperature lower than ambient without any energy consumption. While conventional cooling prototypes reject heat to the air, PRCs reject heat to the outer atmosphere emitting radiation mainly in the 8-13 μm range, i.e., the so-called atmospheric window. This work investigates the thermal behavior of different radiative cooling materials under various exposure conditions to examine their effective cooling potential. The basic structure of the samples comprehends a highly reflective substrate (aluminum or Vikuiti) and a silica-derived emissive layer. After a preliminary characterization under controlled environmental settings, the samples were exposed outdoors, and their superficial temperature was monitored during the central hours of the day. Comparisons among samples and a benchmark aluminum reference layer were made, also considering the weather data collected during the days of exposure. Although the samples did not reach sub-ambient temperatures during the monitoring, the emissive layer significantly reduced the surface temperature. Furthermore, the effect of a tunable intermediate layer placed between the substrate and the emissive element was demonstrated to positively impact

the thermal performance of the sample, thanks to its capability of changing the emissivity spectrum with temperature.

Keywords: radiative cooling; urban heat island; spectrally selective materials; cool materials; in-field monitoring.

1. Introduction

Human activity over the last century has contributed significantly to the ongoing climate crisis, leading to an increase in average global temperatures and elevated ambient temperatures in cities worldwide [1]. Materials used in urban areas that absorb and store solar radiation, combined with a lack of greenery and water bodies, contribute to the higher incidence of urban overheating, particularly during hot periods [2],[3]. This leads to a significant increase in energy demand for cooling, resulting in high energy consumption and greenhouse gas emissions. Buildings are particularly responsible for this issue: they account for over 30% of global final energy consumption and nearly 30% of greenhouse gas emissions, and most electricity and heat generating systems rely on fossil fuels [4],[5]. Studies have shown that in urbanized areas, high temperatures can cause discomfort both indoors and outdoors. Unfortunately, extreme heat events are becoming more frequent and can even lead to increased morbidity and mortality rates [6], particularly among vulnerable social groups who may lack access to adequate energy services [7]. As a result, several heat dissipation strategies have been proposed and tested to improve the thermal urban environment for both indoors and outdoors.

Passive cooling techniques have gained significant attention in recent years, and Radiative Cooling (RC) is among the most promising ones. Its main goal is to decrease building surface temperatures and regulate indoor conditions, while also contributing to decreasing urban ambient temperatures. PRC occurs naturally during nighttime when direct sunlight is absent. It works by utilizing a surface that highly emits thermal radiation within the Infrared (IR) wavelength range, particularly within the Atmospheric Window (AW) where the atmosphere is nearly transparent. At these wavelengths, thermal radiation goes directly to outer space without being trapped by Earth's atmosphere. The higher the emission within the AW range, the lower the heat exchange with the atmosphere, resulting in lower surface temperatures [8]. However, during daytime, simply emitting within the AW range is insufficient for reducing surface temperature because heat gains from incident sunlight outweigh the surface's thermal emission. To achieve Daytime Radiative Cooling (DRC), it is therefore essential to simultaneously reflect shortwave radiation through high reflectance. Until recently, the production of materials that can both highly reflect shortwave radiation and highly emit thermal radiation almost exclusively within the AW range was limited due to the absence of sophisticated fabrication technologies. Although nighttime RC has been investigated since the 1970s, it was not until 2014 when Raman et al. [9] successfully developed and experimentally tested a RC structure that achieved sub-ambient temperature during direct exposure to the sun, making it the first-ever material to achieve

sub-ambient temperature of up to almost 5 °C in the daytime. This breakthrough triggered relevant research for built environment applications, and DRC is currently considered the next generation of materials for super-cool building skins [8],[10].

The literature describes two main types of DRC, i.e., selective and broadband RC, both with a high capacity of reflecting the incident solar radiation (>90%). Selective radiative cooling (SDRC) materials emit thermal radiation specifically within the AW (8-13 μm) and can achieve significant surface temperature reductions (up to 40 °C under ideal conditions) [9],[11]. SDRCs are ideal for decreasing indoor temperatures and improving building energy efficiency. Broadband DRCs, on the other hand, emit within the overall Infrared spectrum (IR) and inherently exchange power with the atmosphere [12]. BDRCs are effective for sub-ambient surface temperature and urban overheating mitigation by transferring their cooling effect to the ambient.

Studies on DRCs have shown that they can significantly reduce surface temperatures and have strong cooling capabilities, making them a promising option for the next generation of building materials to counteract urban overheating. However, their practical use is limited by high costs and complex manufacturing processes. Moreover, there are no established standards or protocols for monitoring DRCs in the laboratory or in real-world settings, which can lead to biased comparisons of results. Therefore, while DRCs show great potential, there are still significant challenges that need to be overcome for their widespread adoption. In this framework, the present work aims to study low-cost scalable prototypes for daytime radiative cooling as possible materials to be implemented in the built environment. Their thermal behavior is evaluated under different meteorological and boundary conditions, by means of a dedicated experimental methodology involving both in-lab and in-field tests.

2. Materials and Samples

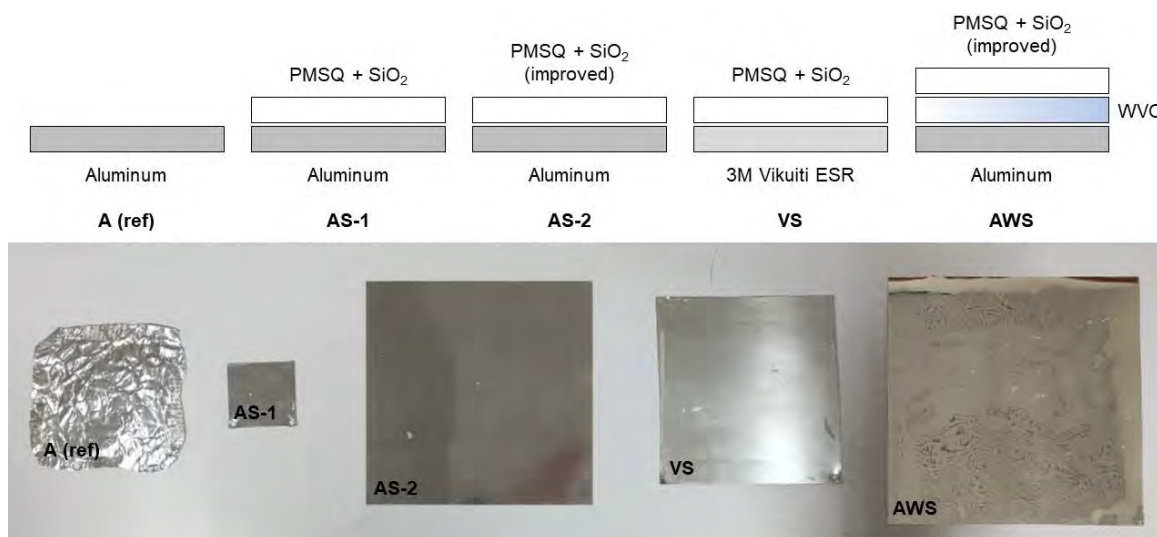
This research focuses on testing different radiative cooling prototypes developed and optimized from a prior study [13]. The basic structure was made of a reflective aluminum substrate and an emissive silica coating, following the same approach proposed by C.G. Granqvist and A. Hjortsberg [14]. In particular, the emissive layer was a spray coating made of PMSQ (polymethylsilsesquioxane) with SiO₂ nanoparticles embedded at a 5% weight. The approximate cost for the proposed emissive layer of 2 μm of PMSQ and SiO₂ nanoparticles is about 0.3 €/m², being competitive for built-environment applications [13]. Table 1 and Figure 1 summarize all the considered prototypes.

Samples AS-1 and AS-2 belong to the basic class of materials; the only difference is that AS-2 was fabricated with an enhanced formulation to improve both the solar transparency of the emissive layer and the reflectivity of the substrate. In VS sample, instead, the aluminum layer was substituted with a 3M Vikuiti Enhanced Solar Reflector (ESR) film [15] to optimize the reflectivity of the substrate. Finally, AWS sample was made of the aluminum substrate, the improved emissive layer based on PMSQ and SiO₂ and a tunable layer with developed vanadium dioxide doped with tungsten, placed between the two. A traditional aluminum sheet (sample A) was also investigated and taken as reference to evaluate the performance of the multi-layered structure of the radiative cooling prototypes.

Table 1. Summary of the considered samples.

Sample code	Substrate	Tunable layer	Emissive layer	Thickness [mm]	Dimensions [mm×mm]
A	aluminum	-	-	0.05	110×110
AS-1	aluminum	-	PMSQ + SiO ₂ nanoparticles	1.00	50×50
AS-2	aluminum	-	PMSQ + SiO ₂ nanoparticles	1.00	195×195
VS	vikuiti ESR	-	PMSQ + SiO ₂ nanoparticles	0.03	115×115
AWS	aluminum	Tungsten-doped VO ₂	PMSQ + SiO ₂ nanoparticles	1.00	195×195

Figure 1. Schematic structure (above) and photos (below) of the considered samples.



3. Methodology

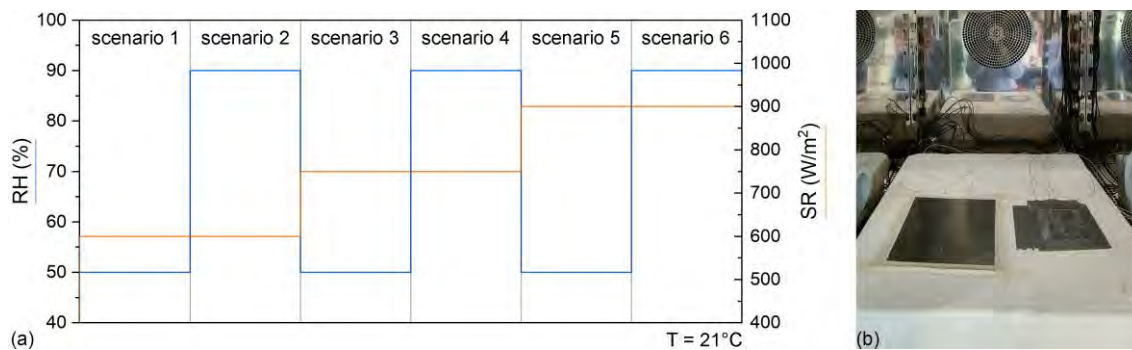
The aim of this research was to explore the impact of spectral emissivity profile on the potential to achieve sub-ambient temperatures, which can help mitigate urban overheating. To accomplish this objective, the thermal behavior of the selected materials was monitored when exposed to several controlled and realistic outdoor boundary conditions. The performance of PRC materials was compared to the aluminum foil without the emissive layer (sample A). The surface temperature of the samples was continuously measured by three sensors (thermocouples, type T) applied on the downward face of each prototype. Data were collected with a time-step of 10 s and the average value of the three sensors was considered.

3.1. In-lab thermal monitoring

To preliminary evaluate the impact of different relative humidity (RH) and solar irradiation (SR) values, a climatic chamber (ATT DM340SR) equipped with a solar simulator (BF SUN 1200W) was used. Each sample and the reference one (A) were placed together inside the internal compartment of the

chamber and exposed to a hygrothermally controlled cycle. The cycle covered three levels of solar irradiation (600, 750, 900 W/m²) and two levels of relative humidity (50% and 90%), while keeping a constant ambient temperature of 21°C. An extruded polystyrene base was used to locate the samples to avoid heat conduction. Figure 2 shows the settings of the 30-min scenarios the samples were exposed to.

Figure 2. (a) Temperature (T), relative humidity (RH) and solar irradiation (SR) settings of the six consecutive scenarios the samples were exposed to. (b) DRC and reference sample inside the climatic chamber.



3.2. In-field thermal monitoring

At a later stage, DRC prototypes were directly exposed to the sun on the parking area of the CIRIAF Research Centre (Perugia, Italy). The experiment was repeated for four sunny days, between January 30 and March 17 of 2023, from 12:00 to 16:00. Four experimental setups were investigated, as summarized in Figure 3:

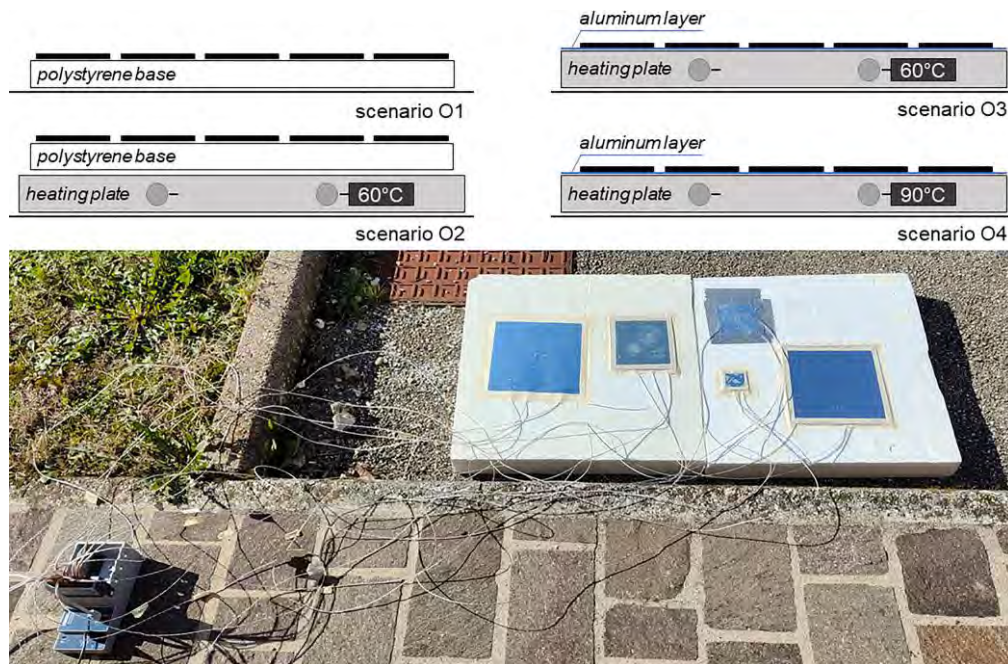
- Samples on a 10-cm thick polystyrene base (scenario O1);
- Samples on a 10-cm thick polystyrene base, placed over a heating plate at 60°C (scenario O2);
- Samples on an aluminum layer, placed over a heating plate at 60°C (scenario O3);
- Samples on an aluminum layer, placed over a heating plate at 90°C (scenario O4).

At the same time, an outdoor monitoring system placed on the rooftop of CIRIAF's building was used to capture the overall microclimatic background boundary conditions.

The system includes a weather station measuring air temperature, wind speed and direction, relative humidity, and incoming solar radiation.

All the sensors perform a continuous monitoring campaign, collecting data every 10 s and producing average values every 10 min. Data are gathered via a connected Data Logger station which is coupled with a web-based platform wherein the sensors' data become available for download.

Figure 3. Schematic representation of the four experimental setups for outdoor thermal monitoring (above) and picture of their outdoor thermal monitoring under direct sun (below).



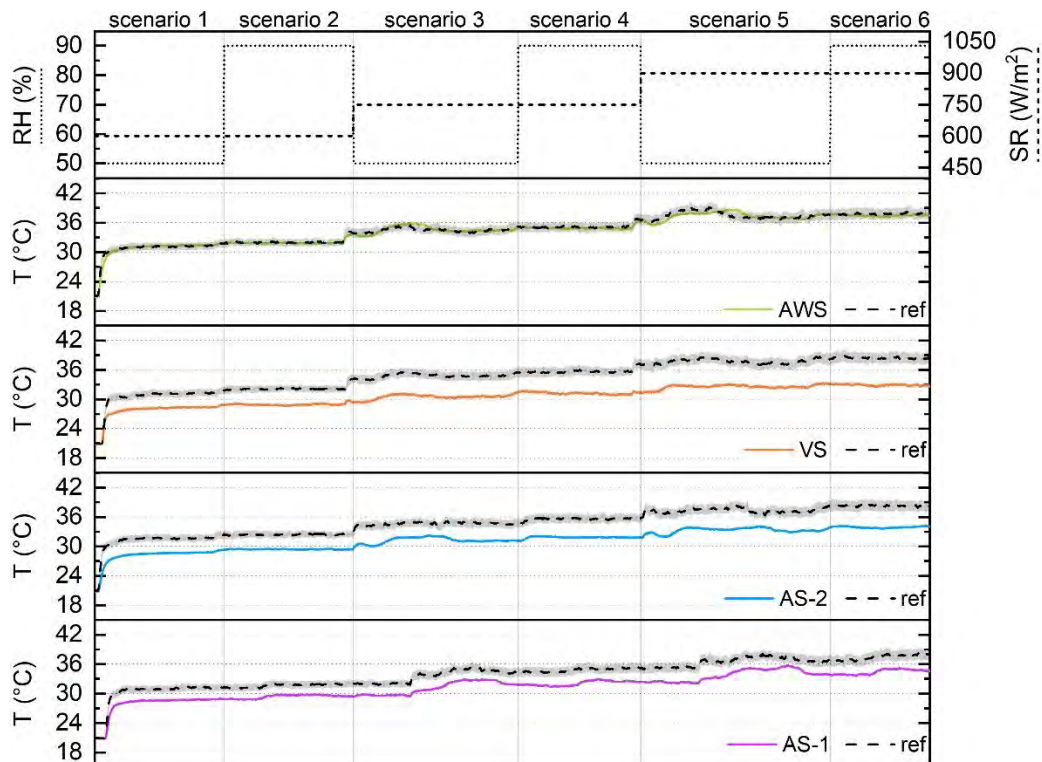
4. Results and discussions

4.1. Results from the in-lab thermal monitoring

Figure 4 shows the superficial temperature profiles of all the DRC samples with respect to the reference aluminum foil during the in-lab monitoring campaign. It is important to note that the samples were not exposed to the real atmosphere, but only to the irradiation provided by the solar simulator of the climatic chamber. As a result, radiative exchange with the sky did not occur, allowing for the evaluation of the impact of different relative humidity (RH) and solar irradiation (SR) intensities on the thermal performance of the samples.

It is evident how the exposure to a higher level of irradiation caused an increase in the samples' superficial temperature, which stayed always above the constant ambient 21°C set inside the climatic chamber. While sample AWS had a close temperature to the aluminum reference, which ranged from $\approx 30^\circ\text{C}$ (beginning of scenario 1) to $\approx 38^\circ\text{C}$ (end of scenario 6), all the others PRCs stayed cooler. Starting at 26.7°C , AS1 and AS2 had a superficial temperature increase of 7.8°C and 7.4°C respectively, while VS sample heated by only 6.1°C , resulting in the best performing prototype. Slight changes in temperature, in the range $0.2\text{--}0.7^\circ\text{C}$, can be seen also between those scenarios that differed only for RH values (1-2, 3-4, and 5-6). Despite there are evidence of the worsening of the PRCs performance with high relative humidity [16],[17], we can only hypothesize that something similar happened, because the same increase belonged also to the reference sample A that does not have the emissive layer.

Figure 4. Superficial temperature's profiles of each DRC sample (continuous line), compared to the reference aluminum foil (dashed line). Thermal monitoring performed inside the internal compartment of the climatic chamber at different RH and SR values (T_{amb} at 21°C).



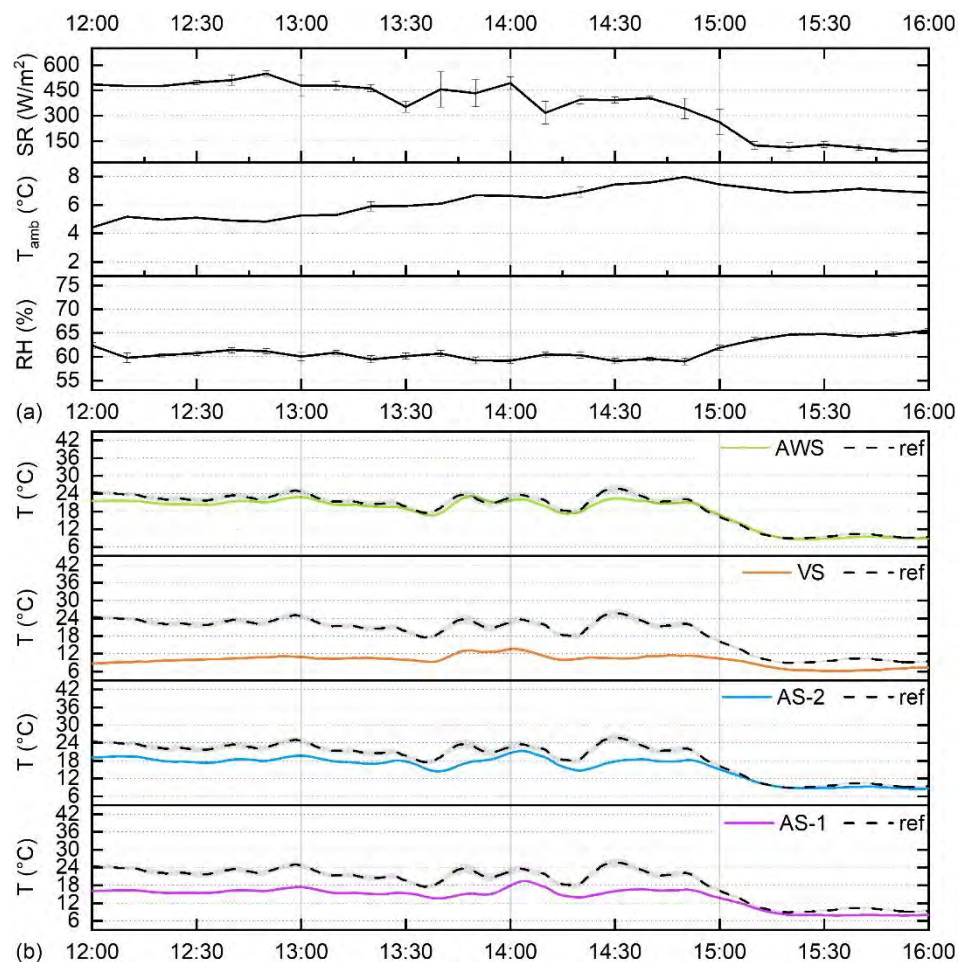
4.2. Results from the in-field thermal monitoring

Figures 5-8 report the results from the monitoring of the thermal behavior of the DRC samples under realistic conditions of exposure. The upper part of the graphs shows the averaged outdoor environmental parameters collected by the microclimatic weather station located on the roof of CIRIAF's building, i.e., solar radiation (SR), air temperature (T_{amb}) and relative humidity (RH). The lowest part of the figures, instead, compares the superficial temperature of each prototype with the reference one (sample A). As introduced in Section 3.2, the same procedure was repeated for different sunny days and according to four different experimental setups (scenarios O1-O4) to evaluate the impact of different boundary conditions on the thermal performance of the PRC prototypes. Table 2 summarizes for each scenario the maximum and minimum values of both (i) surface temperatures and (ii) difference between the reference aluminum and RC material surface temperatures.

By simply exposing all the samples to the sun, placing them on a 10-cm thick polystyrene base to avoid heat conduction (scenario O1, Figure 5), similar relations to what observed during the in-lab campaign occurred. AWS sample reached a superficial temperature very close to, but slightly below (from -0.8°C to -3.3°C), the reference. More significant differences were detected between the other PRCs prototypes and the reference (sample A). As during the in-lab monitoring, the Vikuiti sample (VS) proved to guarantee the highest cooling potential, maintaining the lowest surface temperatures during the whole monitoring with a maximum reduction of 15.8°C with respect to aluminum. Small differences

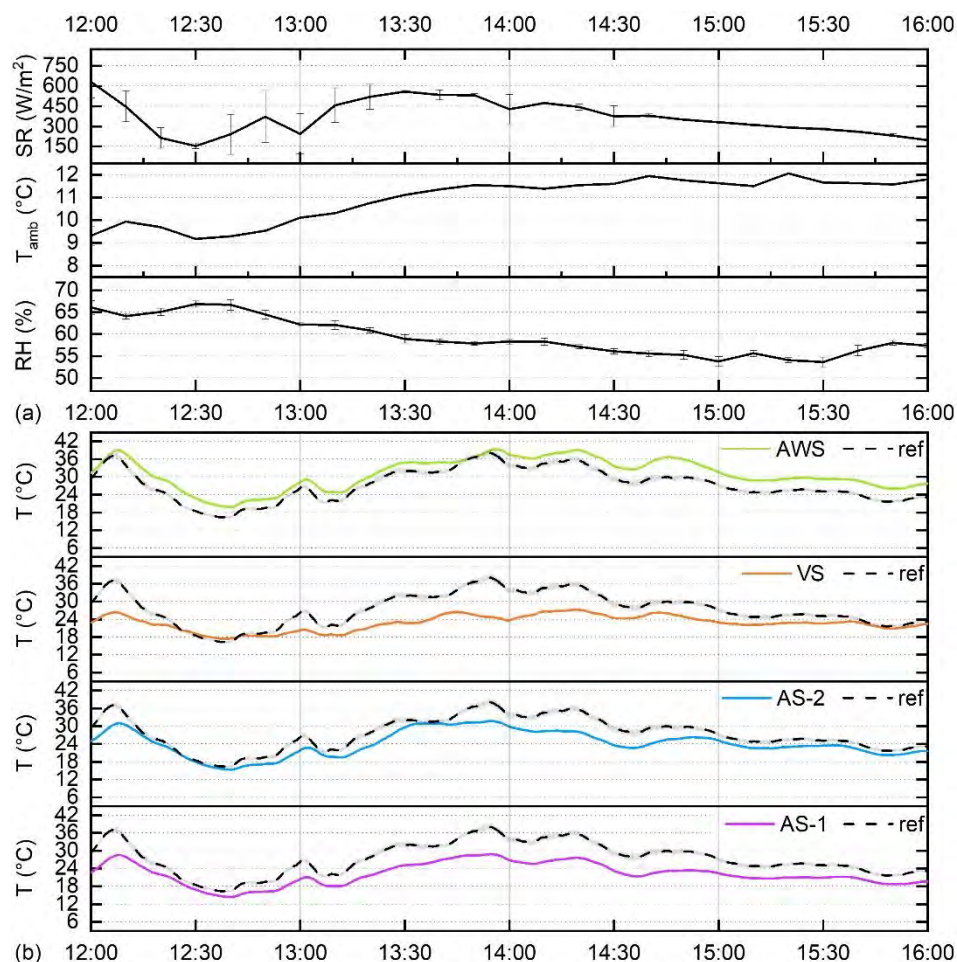
can be found, instead, between the behavior of samples AS1 and AS2: the second stayed slightly warmer, with a difference from the former in terms of T_{max} and T_{min} of 1.8°C and 0.7°C, respectively. Given the low air temperatures the materials were exposed to, it was not possible to reach sub-ambient T values: superficial temperatures basically increased and decreased according to the solar irradiation profile, getting close to T_{amb} once SR values went down (from 15:00 to 16:00).

Figure 5. Scenario O1: superficial temperature's profiles of each DRC sample (continuous line), compared to the reference aluminum foil (dashed line). Thermal monitoring performed on 30 January 2023.



Observation of the thermal behavior of the samples according to scenario O2 (Figure 6) confirmed the best cooling performance of the sample VS with respect to the reference aluminum foil and compared to the other RCs. Of course, placing the polystyrene support on a heating plate at 60°C, made the samples reach higher temperatures than in scenario O1. In particular, the sample RC with the tunable layer between the substrate and the emissive part (sample AWS) exceeded the reference temperature (sample A) throughout the whole monitoring period, up to a maximum difference of 7.1°C in the time-range 14:30-15:00. All the other RCs remained cooler than the aluminum foil, with AS1 behaving slightly better than AS2, and VS performing best ($\Delta T_{max} = 13.2^{\circ}C$).

Figure 6. Scenario O2: superficial temperature’s profiles of each DRC sample (continuous line), compared to the reference aluminum foil (dashed line). Thermal monitoring performed on 2 February 2023.



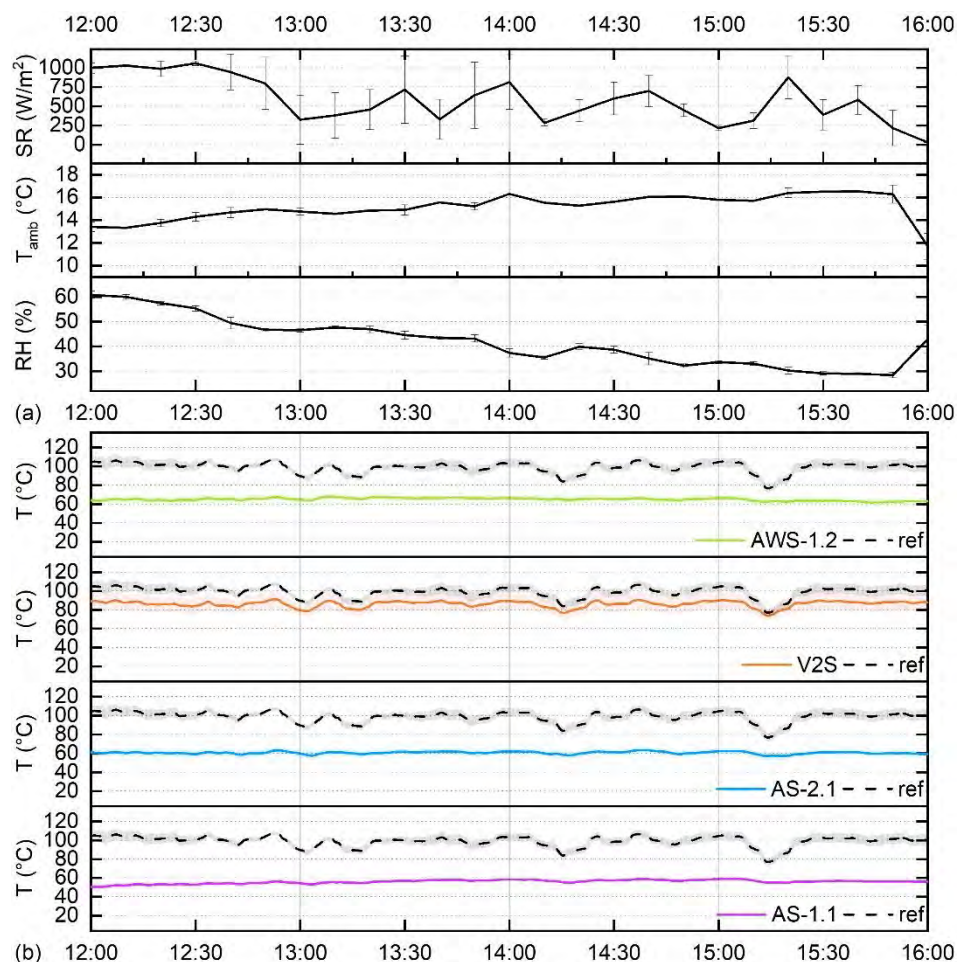
Given the low thermal conductivity of the polystyrene support used in scenario O2, samples did not reach the set temperature of the heating plate (60°C) during the monitoring, making it difficult to assess any radiative cooling phenomenon that may have occurred. For this reason, in scenarios O3 and O4, the samples were placed in direct contact with the heating plate with only a layer of aluminum between them. To be consistent with the last scenario described, the temperature of the heating plate was also set to 60°C in O3; results are shown in Figure 7.

Always comparing the RC materials with the reference A, it is evident how something in the behavior of the former changed at higher temperatures. While the aluminum foil reached an average temperature of 100°C, with oscillations that followed the solar irradiation profile, all the RCs samples stayed cooler. In this case, VS performed worse than the others, reaching an 18.1°C maximum difference from A temperature. AS1, AS2 and AWS, not only maintained their superficial temperature in the range 59.1-68.0°C, i.e., very close to the heating plate temperature, but their profile was almost constant throughout the monitoring, ranging between less than 10°C. Probably, the heating rate of the plate overcame the effect of solar irradiation on the superficial temperature of the samples. Again, AS1

stayed a bit cooler than the optimized counterpart (AS2), with differences between their T in the range 4.5-6.0°C.

Focusing on the performance of sample AWS, a big change in scenario O3 with respect to O1 and O2, can be noticed. While the RC prototype used to behave very similarly to the aluminum reference, in Figure 7 it showed a superficial temperature reduction with respect to sample A going from 14.2°C up to 43.9°C. This could be related to the activation of the tunable layer, i.e., to changes in the emittance property and radiative power of the overall system, above a certain T value. Indeed, the tunable layer’s composition involved vanadium dioxide doped with tungsten: VO₂ has an acknowledged phase transition temperature of 68°C which can be effectively decreased by W-doping [18],[19].

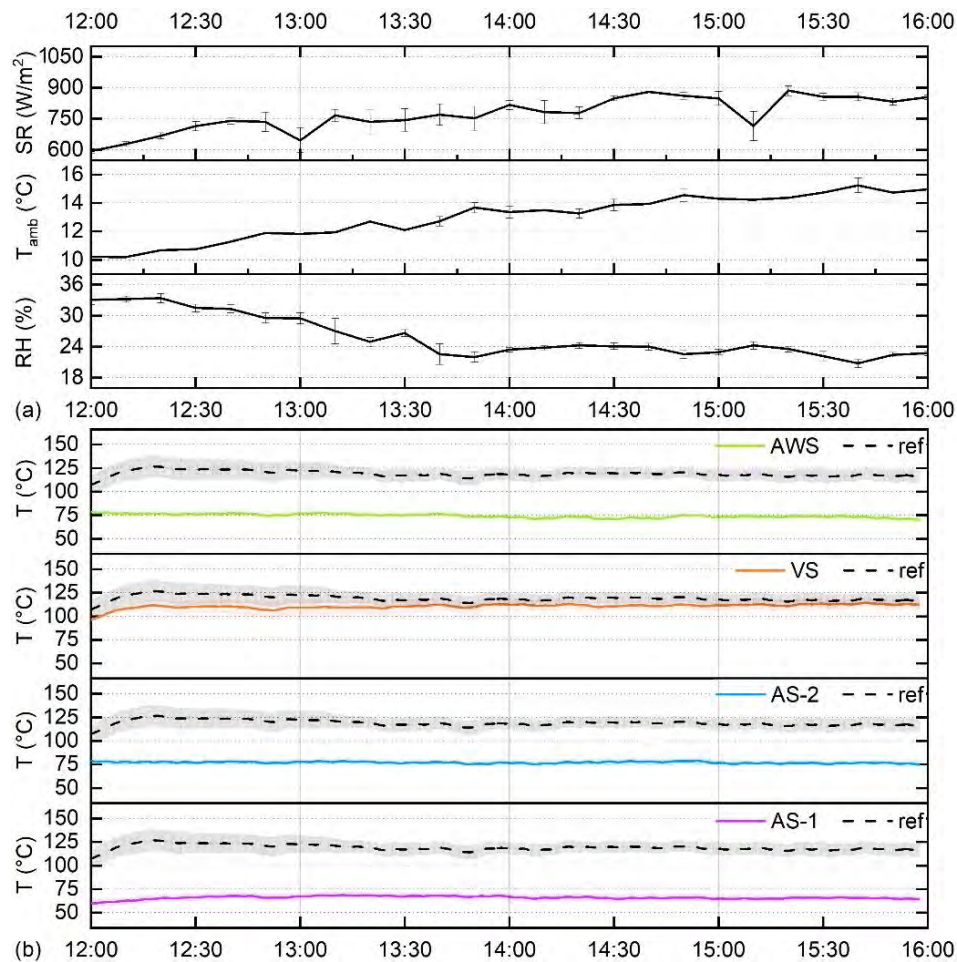
Figure 7. Scenario O3: superficial temperature’s profiles of each DRC sample (continuous line), compared to the reference aluminum foil (dashed line). Thermal monitoring performed on 7 February 2023.



To further investigate the radiative cooling potential of the samples in more extreme boundary conditions, an O3-similar experimental setup was reproduced for scenario O4, setting the temperature of the heating plate at 90°C (Figure 8). While Vikuity sample managed to stay 3.4°C to 15.2°C below the aluminum reference, all the other RC options not only differed more from sample A, but also

maintained a superficial temperature lower than 90°C, i.e., the temperature of the heating plate. In more details, samples AS1, AS2 and AWS reached a maximum T of 68.7°C, 78.9°C and 78.6°C, respectively. Also in this case, the temperature profile of the RC samples was almost centered to a constant value during the whole monitoring period.

Figure 8. Scenario O4: superficial temperature's profiles of each DRC sample (continuous line), compared to the reference aluminum foil (dashed line). Thermal monitoring performed on 17 March 2023.



When analyzing the obtained temperature data of each scenario, observations on the geometry of the samples should be considered. As summarized in Table 1, the investigated prototypes differed for dimensions and thickness, and this certainly had an impact on their thermal behavior. For instance, the lower thickness of A and VS with respect to the others helped them reach more easily higher temperatures when placed over a heating source. Despite this, the result of having lower surface temperatures than the one of the heating plate at direct contact with the samples themselves could be of interest thinking of the possible application of such materials as radiative coolers for the built environment. Their capability of maintaining sub-ambient temperatures, even though under extreme boundary conditions, paves the way to further investigation to better detect their radiative cooling potential.

Table 2. Summary of the measured surface temperatures during the in-field monitoring campaigns.

		A	AS1	AS2	VS	AWS		A	AS1	AS2	VS	AWS
T_{\max} (°C)	Scenario O1	25.7	19.5	21.3	13.7	23.1	Scenario O2	38.0	28.8	31.7	27.2	39.3
T_{\min} (°C)		8.9	7.8	8.5	6.2	8.6		16.3	14.4	15.4	17.4	19.8
$\Delta T_{\max} = \max(T_{\text{ref}} - T_{\text{RC}})$		-	9.7	8.1	15.8	3.3		-	9.2	7.6	13.2	0.1
$\Delta T_{\min} = \min(T_{\text{ref}} - T_{\text{RC}})$		-	0.7	0.03	1.9	0.8		-	1.4	0.1	-1.2	-7.1
T_{\max} (°C)	Scenario O3	107.2	59.1	63.6	91.1	68.0	Scenario O4	126.7	68.7	78.9	114.4	78.6
T_{\min} (°C)		76.9	49.9	55.9	74.0	57.2		107.2	60.2	74.9	96.1	70.3
$\Delta T_{\max} = \max(T_{\text{ref}} - T_{\text{RC}})$		-	54.4	45.5	18.1	43.9		-	62.1	49.3	15.2	50.2
$\Delta T_{\min} = \min(T_{\text{ref}} - T_{\text{RC}})$		-	21.6	19.5	2.8	14.2		-	46.9	28.2	3.4	28.5

5. Conclusions

This study delves into the thermal performance of scalable daytime radiative cooling (DRC) materials. The research examines the evolution of superficial temperature evolution, under different controlled and realistic boundary conditions and in comparison to a simple aluminum foil taken as reference material. The effect of single weather variables, i.e., solar radiation and relative humidity, was first evaluated by exposing the samples to a hygrothermally controlled cycle by means of a climatic chamber equipped with a solar simulator. Excluding the radiative exchange with the sky, it was evident how superficial temperatures increased with the solar irradiation level the samples were exposed to. The prototype with the Vikuiti reflective layer (VS) proved to maintain the lowest temperature in comparison to the reference, followed by AS1 and AS2. The sample with the tunable layer (AWS), instead, behave similarly to aluminum throughout the whole in-lab test.

At a later stage, samples were exposed outdoor to realistic boundary conditions and under direct sun. Four experimental setups (O1-O4) were created during different days (from 12:00 to 16:00), using a heating plate to achieve higher superficial temperatures. Results showed how under most boundary conditions, the RC materials had the ability to stay cooler than the reference aluminum. While VS and AWS were respectively the best- and the worst-performing prototypes at mid-low temperatures (scenarios O1 and O2), their behavior completely reversed for high T values (scenarios O3 and O4). The significant increase in superficial temperature of the Vikuiti sample can be blamed on its small thickness, while the achievement of the transition temperature of the tungsten doped VO_2 activated the tunable layer of the AWS sample, changing its emissive properties.

Future work should investigate the radiative cooling potential of these prototypes more deeply, purifying the results of the possible effects of the different samples' geometry. Their in-lab characterization through optical and thermal techniques of measurement should be performed to assess the absolute properties of each RC prototype. Moreover, the same methodology for outdoor monitoring should be carried out during summer months to detect the possible achievement of sub-ambient temperatures more easily. Finally, the degradation and aging of such materials should be evaluated according to prolonged exposure to realistic and extreme weather conditions.

References

- [1] Peters GP, Andrew RM, Boden T, Canadell JG, Ciais P, Le Quéré C, et al. "The challenge to keep global warming below 2 °C". *Nat Clim Chang* [Internet]. 3(1)(2013): 4–6. Available from: <http://www.nature.com/articles/nclimate1783>
- [2] Santamouris M, Cartalis C, Synnefa A, Kolokotsa D. "On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review". *Energy Build.* 98(2015): 119–24.
- [3] Ward K, Lauf S, Kleinschmit B, Endlicher W. "Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers". *Sci Total Environ* [Internet]. 569–570(2016): 527–39. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969716312931>
- [4] Yu X, Chan J, Chen C. "Review of radiative cooling materials: Performance evaluation and design approaches". *Nano Energy* [Internet]. 88(2021): 106259. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211285521005152>
- [5] Kalair A, Abas N, Saleem MS, Kalair AR, Khan N. "Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables". *Energy Storage* [Internet]. 3(1)(2021). Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/est2.135>
- [6] Khan HS, Santamouris M, Paolini R, Caccetta P, Kassomenos P. "Analyzing the local and climatic conditions affecting the urban overheating magnitude during the Heatwaves (HWs) in a coastal city: A case study of the greater Sydney region". *Sci Total Environ* [Internet]. 755(2021): 142515. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720360447>
- [7] Kousis I, Laskari M, Ntouroso V, Assimakopoulos M-N, Romanowicz J. "An analysis of the determining factors of fuel poverty among students living in the private-rented sector in Europe and its impact on their well-being". *Energy Sources, Part B Econ Planning, Policy* [Internet]. 15(2)(2020): 113–35. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567249.2020.1773579>
- [8] Zhao B, Hu M, Ao X, Chen N, Pei G. "Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects". *Appl Energy* [Internet]. 236(2019): 489–513. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261918318373>
- [9] Raman AP, Anoma MA, Zhu L, Rephaeli E, Fan S. "Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight". *Nature* [Internet]. 515(7528)(2014): 540–4. Available from: <http://www.nature.com/articles/nature13883>
- [10] Santamouris M, Feng J. "Recent Progress in Daytime Radiative Cooling: Is It the Air Conditioner of the Future?". *Buildings* [Internet]. 8(12)(2018): 168. Available from: <http://www.mdpi.com/2075-5309/8/12/168>
- [11] Zhou L, Song H, Liang J, Singer M, Zhou M, Stegenburgs E, et al. "A polydimethylsiloxane-coated metal structure for all-day radiative cooling". *Nat Sustain* [Internet]. 2(8)(2019): 718–24. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0348-5>
- [12] Kou J, Jurado Z, Chen Z, Fan S, Minnich AJ. "Daytime Radiative Cooling Using Near-Black Infrared Emitters". *ACS Photonics* [Internet]. 4(3)(2017): 626–30. Available from:

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsp Photonics.6b00991>

- [13] Carlosena L, Andueza Á, Torres L, Irulegi O, Hernández-Minguillón RJ, Sevilla J, et al. "Experimental development and testing of low-cost scalable radiative cooling materials for building applications". *Sol Energy Mater Sol Cells* [Internet]. 230(2021): 111209. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024821002518>
- [14] Granqvist CG, Hjortsberg A. "Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films". *J Appl Phys* [Internet]. 52(6)(1981): 4205–20. Available from: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.329270>
- [15] "3M™ Vikuiti™ Enhanced Specular Reflector (ESR)" [Internet]. Available from: https://www.3mcanada.ca/3M/en_CA/p/d/v000100093/
- [16] Huang J, Lin C, Li Y, Huang B. "Effects of humidity, aerosol, and cloud on subambient radiative cooling". *Int J Heat Mass Transf* [Internet]. 186(2022): 122438. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931021015362>
- [17] Han D, Ng BF, Wan MP. "Preliminary study of passive radiative cooling under Singapore's tropical climate". *Sol Energy Mater Sol Cells* [Internet]. 206(2020): 110270. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024819305999>
- [18] Shin E, Pan K, Wang W, Subramanyam G, Vasilyev V, Leedy K, et al. "Tungsten-doped vanadium dioxide thin film based tunable antenna". *Mater Res Bull* [Internet]. 101(2018): 287–90. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002554081730154X>
- [19] Taylor S, Yang Y, Wang L. "Vanadium dioxide based Fabry-Perot emitter for dynamic radiative cooling applications". *J Quant Spectrosc Radiat Transf* [Internet]. 197(2017): 76–83. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002240731630574X>

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Doping-induced Control of the Metal-Insulator Transition (MIT) Temperature in Thermo-chromic VO₂ for Radiative Cooling Applications: a Combined Density Functional Theory and Ab-initio Molecular Dynamics investigation

Costanza Borghesi^{1,2}, Claudia Fabiani^{2,3}, Roberto Bondi⁴, Loredana Latterini⁴, Anna Laura Pisello^{2,3}, Giacomo Giorgi^{1,2,5,*}

¹ Department of Civil & Environmental Engineering (DICA), University of Perugia, Via Duranti 93, 06125 Perugia, Italy

² CIRIAF – Interuniversity Research Centre, University of Perugia, Perugia, Italy

³ Department of Engineering, University of Perugia, Via Duranti 93, 06125 Perugia, Italy

⁴ Nano4Light Lab, Department of Chemistry, Biology and Biotechnology, University of Perugia, Via Elce di sotto 8, Perugia, 06123, Italy

⁵ CNR-SCITEC, 06123 Perugia, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: giacomo.giorgi@unipg.it

Abstract: In view of its usage in next generation construction materials, we present here introductory research where VO₂ structural and electronic features are discussed and compared with those available in literature to study eventual doping induced metal-to-insulator (MIT) transition phase temperature variation. The intrinsic difficulties in treating a highly correlated material, like VO₂, motivates us to include the so-called Hubbard correction on top of standard calculations exploiting standard Density Functional Theory. Importantly, to catch and include thermal effects in our analysis (vital is in view of the working principle of the material as thermo-chromic a transition state at ~68°C (~340 K) between the insulating and the metallic phase) the usage of ab-initio Molecular Dynamics is mandatory.

Keywords: Metal-Insulator Transition (MIT), Density Functional Theory, *Ab-initio* Molecular Dynamics, Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC), Vanadium Dioxide (VO₂)

1. Introduction

Recent analysis predicts that in the next few years a relevant portion of the total electricity consumption and 10% of greenhouse gas emissions will be associated to the massive usage of the so-called heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) devices (1). Finding a remedy to this huge indoor energy consumption can partly help in relieving the global warming issue which is approaching its tipping-point. Nowadays, passive radiative cooling (PRC) systems are getting increasing attention, mostly because their usage may bring down the temperature simply exploiting the intrinsic properties of the materials and the architectures they undergo in such devices without consuming energy from other sources (the term “passive” refers to such operating principle) (2). Differently from the traditional air-conditioning systems, PRC devices are energy-free and refrigerant-free cooling technologies embodying the ability of reflecting incoming solar irradiance, while emitting thermal radiation to the cold universe thereby achieving sub-ambient cooling. Most of the high-performance devices currently being developed exploit reflective metal/polymer stacked bilayer structures, which minimize the absorption of the solar spectrum and maximize the mid-IR emission. However, the structural conditions for manufacturing efficient radiative cooling devices limit their optical diversity and significantly reduce their utilization.

Together with photochromic (3,4) and humidity-chromic ones (5), thermochromic glasses/materials are nowadays receiving increasing interest by the community for the peculiar properties they have in containing energy waste and enhancing indoor comfort. Light, moisture, and heat remain indeed the most effective triggers that induce the switch of the materials in passive dynamic systems, i.e., those systems activated by a natural external impulse (6). Thermochromic smart windows/devices are constituted by thermochromic materials which change their visible optical properties in response to temperature variation. Materials like VO_2 have been investigated (see among the others ref. (7)) as well as hybrid organic-inorganic and full-inorganic halide perovskites (8), and also some particular hydrogels (9). In this context, VO_2 represents probably the most complex system with applicability in thermochromic windows and a thorough knowledge of its electronic features at the atomistic level may help to have a better understanding about the material features in radiative cooling-oriented applications. Indeed, thermochromic materials, for the reasons previously discussed, may be able to be integrated in a multilayered device, where optoelectronic properties can be switched ‘on’ and ‘off’ to activate other layers’ properties (e.g., activation/deactivation of the thermal emitting layer).

Accordingly, we aim to exploit the capability of VO_2 toward phase transition to regulate the release of sensible heat to be dissipated. VO_2 exhibits a temperature-driven transition at 68°C between low-T semiconducting non-magnetic monoclinic phase (M1) and high-T metallic paramagnetic tetragonal rutile phase (R) (10) (See Figure 2). The structural, electronic, and optical features of VO_2 are thus topic of investigation in the present research, with particular attention paid to the Metal-Insulator Transition (MIT) which characterizes VO_2 and the temperature at which it takes place. Indeed, the idea behind the overall work is to shift such temperature by means of doping procedure towards lower values to make the MIT temperature (TMIT) closer to room T values, thus exploitable in the processes involved in PRC devices. Thus, to achieve such goal, here we show preliminary results about the impact

(nature/ratio of dopants) of pristine VO_2 doping, trying to figure out the most effective dopant able to bring the T down to room temperature.

Figure 1. Scheme of HTC production.

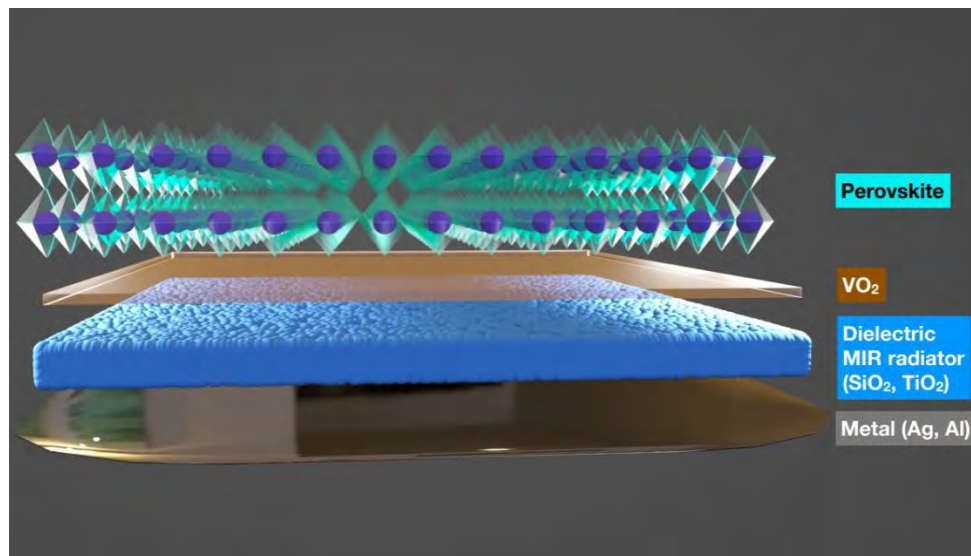
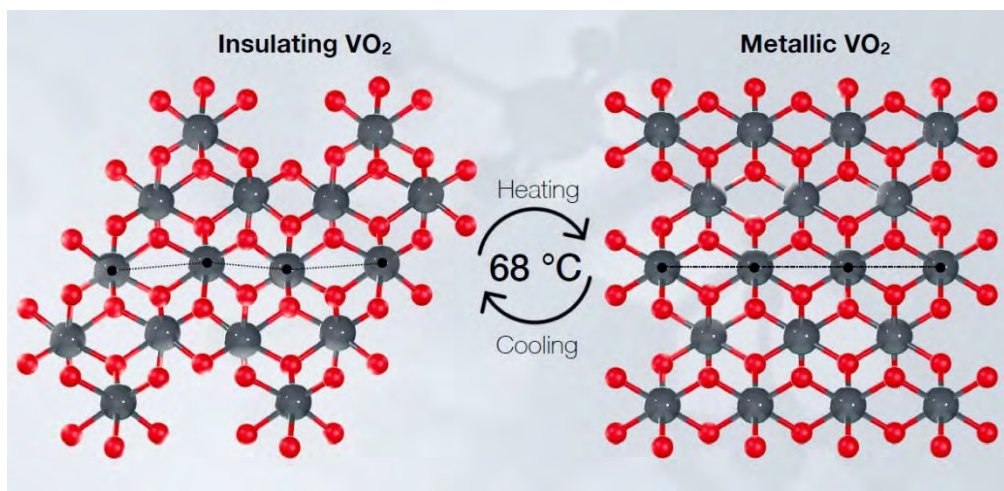


Figure 2. Pictorial representation of the Metal-to-Insulator (MIT) phase transition occurring at $T=68^\circ\text{C}$. (grey: V atoms; red: O atoms).



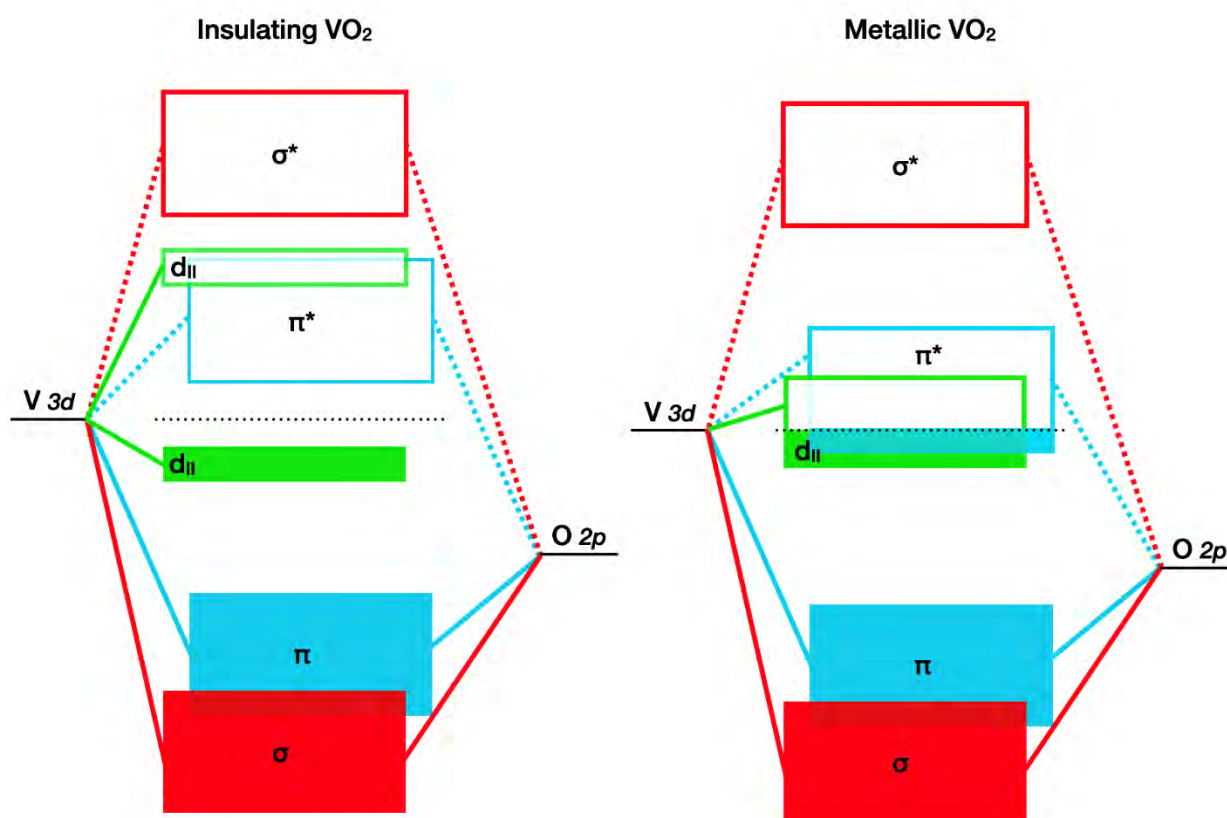
2. Computational Scheme and Theory Background

Following the initial work of Morin (11), in a seminal work, John Goodenough (10) discussed the theory beyond the crystallographic transition in VO_2 and the electronic features of both rutile and monoclinic phases. Since then, many efforts have been spent in order to achieve a better understanding of the electronic behavior of the polymorphs of VO_2 and their phase transition (12). A significant debate concerns the nature of the MIT and specifically about the nature of the bandgap opening in the insulating phase, i.e., whether it is a Mott or a Peierls transition. While indeed a structurally driven phase transition (Peierls) has been initially suggested as driving force in the

mechanism, on the other hand, recent experimental findings have confirmed the relationship between the MIT and electron-correlation effects (Mott); the most recent interpretations conclude that the mechanism can be dually treated as a “Mott–Peierls transition” (13–15) keeping anyway in mind that the Mott transition is the initiating mechanism of the transition (16,17).

In this framework, theoretically reproducing experimental electronic and optical features becomes a non-trivial task. Standard Density Functional Theory (DFT) based approaches (both LDA and GGA) fail in reproducing the experimentally reported bandgap ($\sim 0.6\text{--}0.7$ eV) between $d_{||}$ and π^* orbitals (10). Several alternative approaches have been suggested to overcome this issue: combining dynamical mean-field theory (DMFT) (18) and standard LDA is a way to open the gap of monoclinic phase of VO_2 (19). Later, Sun et al. (20) exploited a DFT/PBE analysis by including the Hubbard correction ($U=3.5$ eV), i.e., the empirical parameter added in the calculations (nominally DFT+U), using it to improve the prediction of both insulating and metallic phases of VO_2 . More recently the same Hubbard scheme has been extended by Zayed et al. (21) to other more evolved levels of theory obtaining good match between the reported experimental bandgap (and the $d_{||}$ band splitting) of monoclinic VO_2 and the calculated one.

Figure 3. Schematic band representation for (left) monoclinic and (right) tetragonal, rutile, VO_2 phase.



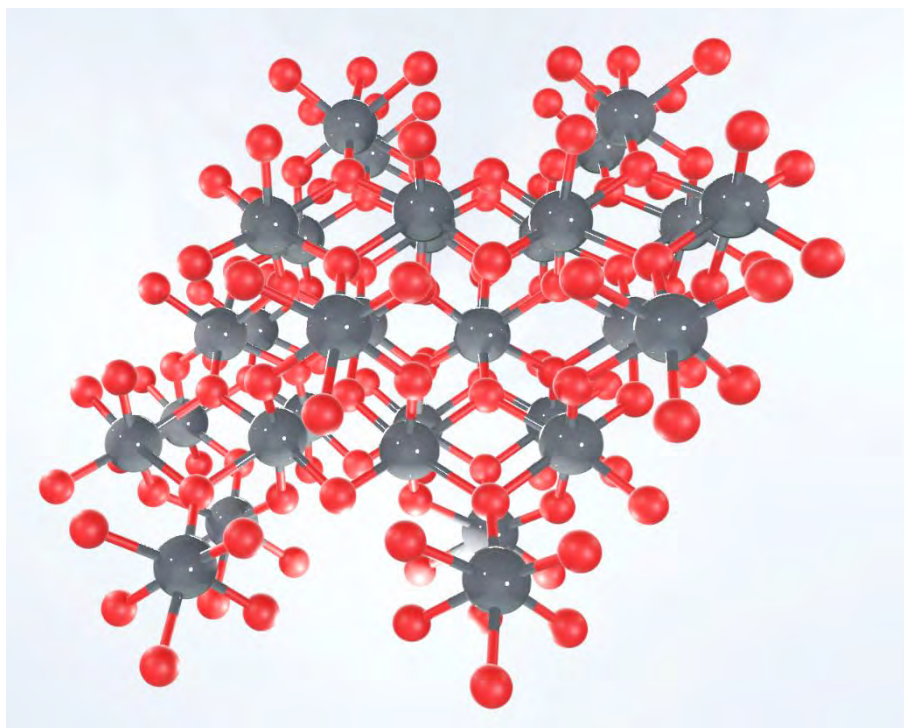
3. Results and discussions

Given the intricate nature of the theoretical treatment of VO₂, our objective is to identify a suitable approach that can accurately replicate the 0 K structural and electronic characteristics of both phases while also reproducing the experimentally reported TMIT (approximately 340 K).

To prepare the systems, we utilized the coordinates of the initial VO₂-M1 phase unit cell obtained from experimental data reported by G. Andersson at 293 K (22). The crystal structure belongs to the P2₁/c symmetry space group, with lattice constants $a=5.743$, $b=4.517$ and $c=5.375$ Å. The simulation samples consisted of 96 atoms, and the supercells were generated as a 2x2x2 replica of the M1 unit cell. A snapshot of the larger system is shown in Figure 4.

At first, we performed DFT+U calculations as implemented in the VASP package (23–26) with projector augmented-wave pseudopotentials using plane-wave energy cutoff was set to 540 eV, finding good agreement with experimentally reported structural and electronic features (mainly the gap of monoclinic VO₂).

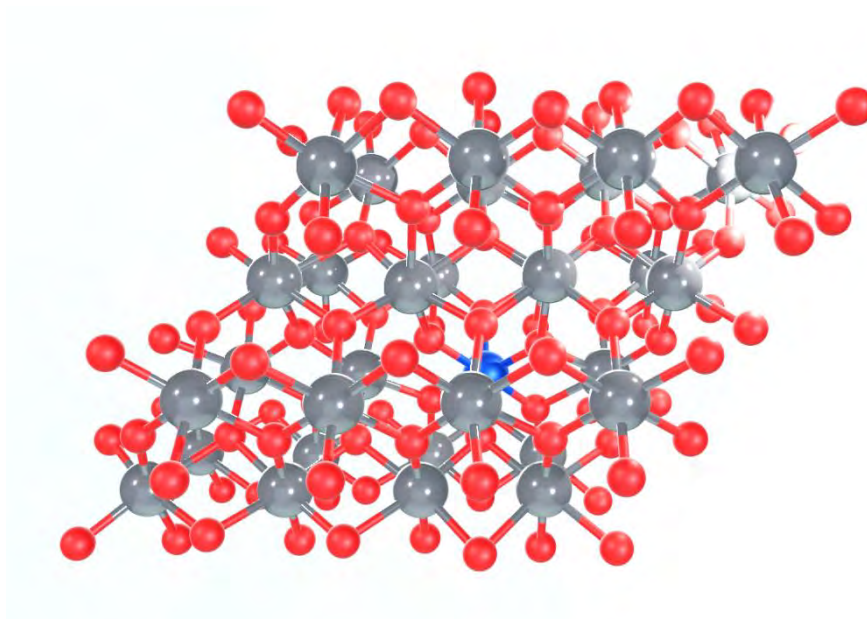
Figure 4. 96-atoms 2x2x2 supercell of VO₂-M1 used in the simulations before the MIT transition. V and O atoms are represented by grey and red spheres, respectively.



Since a single DFT approach is not capable of describing both electronic and magnetic properties of both M1 and R phases, nonmagnetic calculations were performed under the PBE+U framework, beware the fact that the PBE+U scheme incorrectly predicts anti-ferromagnetic ground state of M1 instead of the experimental nonmagnetic one (27). Concerning the setting of U and J parameters, we noticed that the commonly adopted values $U \approx 4$ eV and $J \approx 0.8$ eV shift the MIT temperature to much higher values and to get closer to the experimental conditions it is necessary to modify these two

parameters. After having tested different sets of values, we have fixed $U=2.8$ eV and $J=0.5$ eV as these parameters are the ones that reproduce more accurately the TMIT (prioritizing this metric for our purposes), while still capturing some of the correlation effects, fundamental feature of vanadium-based compounds. Then, to include thermal effects, we performed *ab-initio* Molecular Dynamics simulations adding the Hubbard correction term (AIMD+U). AIMD+U calculations were conducted under the NPT Parrinello-Rahman dynamics using the Langevin stochastic thermostat with a time-step of 1 fs. The system was equilibrated for 10 ps (10000 steps) and then progressively heated over another 10 ps. As for M-/X-doped ($M = \text{Si, W, Mo}$; $X = \text{F}$) VO_2 , we also selected a $2 \times 2 \times 2$ super cell with 96 atoms for monoclinic phase (M1). In these supercells, one dopant atom is introduced as substitutional defect, replacing one V atom ($M = \text{Si, W, Mo}$) or one O atom ($X = \text{F}$) at the selected crystallographic site (M_V or X_O), illustrated in Fig. 5 (for the former case).

Figure 5. The calculated model for Si-doped VO_2 . The V and O atoms are represented by grey and red spheres, respectively. The S_{i_V} is denoted as Si-doped VO_2 substitutional site, which is indicated by blue color.



4. Conclusions

In conclusion, we have successfully characterized the phase transition of VO_2 through the utilization of first-principles calculations, which involved the combination of DFT, Ab-initio Molecular Dynamics, and Hubbard model. Our findings demonstrate that, with a carefully calibrated selection of the Hubbard parameters, it is possible to accurately reproduce the temperature of the metal-insulator transition from monoclinic to rutile phase, while still taking into account correlation effects. Furthermore, our preliminary calculations have revealed a decrease in the TMIT of VO_2 for the doped sample, which has motivated us to continue our search for additional species and balanced concentrations of dopants. This will enable us to achieve a greater degree of control over the TMIT of VO_2 , which is a highly desirable outcome.

Overall, our research has provided valuable insights into the phase transition of VO₂, and we believe that our findings will contribute significantly to an improved knowledge of the material features.

Acknowledgements

The authors thank the ERC StG Project HELIOS (GA 101041255, PI dr. A.L. Pisello) funded by the European Commission under the framework of Horizon Europe program. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Research Council. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

References

1. The Future of Cooling. Paris, France; 2018.
2. Santamouris M, Asimakopoulos D. Passive cooling of buildings. Earthscan; 1996.
3. Durr H, Bouas-Laurent H. Photochromism: molecules and systems. Elsevier; 2003.
4. Irie M. Photochromism: memories and switches introduction. Chem Rev. 2000;100(5):1683–4.
5. Nandakumar DK, Ravi SK, Zhang Y, Guo N, Zhang C, Tan SC. A super hygroscopic hydrogel for harnessing ambient humidity for energy conservation and harvesting. Energy & Environ Sci. 2018;11(8):2179–87.
6. Wang X, Narayan S. Thermochromic materials for smart windows: a state-of-art review. Front Energy Res. 2021;837.
7. Shen N, Chen S, Huang R, Huang J, Li J, Shi R, et al. Vanadium dioxide for thermochromic smart windows in ambient conditions. Mater Today Energy. 2021;21:100827.
8. Saidaminov MI, Abdelhady AL, Murali B, Alarousu E, Burlakov VM, Peng W, et al. High-quality bulk hybrid perovskite single crystals within minutes by inverse temperature crystallization. Nat Commun. 2015;6(1):7586.
9. Granqvist CG. Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review. Sol energy Mater Sol cells. 2007;91(17):1529–98.
10. Goodenough JB. The two components of the crystallographic transition in VO₂. J Solid State Chem. 1971;3(4):490–500.
11. Morin FJ. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature. Phys Rev Lett. 1959;3(1):34.
12. Wentzcovitch RM, Schulz WW, Allen PB. VO₂: Peierls or Mott-Hubbard? A view from band theory. Phys Rev Lett. 1994;72(21):3389.
13. Weber C, O'Regan DD, Hine NDM, Payne MC, Kotliar G, Littlewood PB. Vanadium dioxide: A Peierls-Mott insulator stable against disorder. Phys Rev Lett. 2012;108(25):256402.
14. Laverock J, Preston ARH, Newby Jr D, Smith KE, Sallis S, Piper LFJ, et al. Photoemission evidence for crossover from Peierls-like to Mott-like transition in highly strained VO₂. Phys Rev B. 2012;86(19):195124.
15. Pergament AL, Stefanovich GB, Velichko A. Oxide electronics and vanadium dioxide perspective: A

- review. *J Sel Top Nano Electron Comput.* 2013;1(1):24–43.
16. Pergament AL, Boriskov PP, Velichko AA, Kuldin NA. Switching effect and the metal–insulator transition in electric field. *J Phys Chem Solids.* 2010;71(6):874–9.
 17. Stefanovich G, Pergament A, Stefanovich D. Electrical switching and Mott transition in VO₂. *J Phys Condens Matter.* 2000;12(41):8837.
 18. Biroli G, Parcollet O, Kotliar G. Cluster dynamical mean-field theories: Causality and classical limit. *Phys Rev B.* 2004;69(20):205108.
 19. Biermann S, Poteryaev A, Lichtenstein AI, Georges A. Dynamical Singlets and Correlation-Assisted Peierls Transition in VO₂. *Phys Rev Lett.* 2005;94(2):26404.
 20. Sun C, Yan L, Yue B, Liu H, Gao Y. The modulation of metal–insulator transition temperature of vanadium dioxide: a density functional theory study. *J Mater Chem C.* 2014;2(43):9283–93.
 21. Zayed MK, Elabbar AA, Yassin OA. Electronic and optical properties of the VO₂ monoclinic phase using SCAN meta-GGA and TB-mBJ methods. *Phys B Condens Matter.* 2020;582:411887.
 22. Andersson G. Studies on vanadium oxides. *II e Cryst Struct.* 1956;
 23. Kresse G, Hafner J. Ab initio molecular dynamics for open–shell transition metals. *Phys Rev B [Internet].* 1993 Nov;48(17):13115–8. Available from: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.48.13115>
 24. Kresse G, Hafner J. Ab initio molecular–dynamics simulation of the liquid–metal–amorphous–semiconductor transition in germanium. *Phys Rev B [Internet].* 1994;49(20):14251–69. Available from: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.49.14251>
 25. Kresse G, Furthmüller J. Efficiency of ab–initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane–wave basis set. *Comput Mater Sci [Internet].* 1996;6(1):15–50. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0927025696000080>
 26. Kresse G, Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total–energy calculations using a plane–wave basis set. *Phys Rev B [Internet].* 1996;54(16):11169–86. Available from: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.54.11169>
 27. Plašienka Dcv, Martoňák R, Newton MC. Ab initio molecular dynamics study of the structural and electronic transition in VO₂. *Phys Rev B [Internet].* 2017;96(5):54111. Available from: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.96.054111>

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

I possibili impieghi dell'idrogeno verde nell'industria pesante e il ruolo chiave delle hydrogen valleys

Giorgio Grossi ^{1,*}, Fausto Arpino ¹, Christian Canale ¹, Gino Cortellessa ¹, Marco Dell'Isola ¹, Luigi Del Plato ², Carmelo Fallone ², Giorgio Ficco ¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale, Via G. Di Biasio 43, Cassino, Italia

² Società Gasdotti Italia S.p.A., Via dei Salci 25, Frosinone, Italia

* Autore di riferimento. E-Mail: giorgio.grossi@unicas.it

Abstract: L'idrogeno è destinato a rivestire un ruolo cruciale per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione al 2050, in virtù della sua integrabilità con altre tecnologie pulite per la produzione e il consumo di energia e dei suoi molteplici utilizzi nell'industria pesante. Ad oggi, infatti, l'idrogeno è utilizzato diffusamente nel settore industriale, tuttavia le sue caratteristiche chimico-fisiche introducono problematiche per quanto riguarda lo stoccaggio all'interno dei siti produttivi. Infatti, sia l'elevata quantità di energia potenzialmente accumulabile grazie alle dimensioni estremamente ridotte della molecola di idrogeno, sia la proprietà di essere un gas inodore ed incolore, possono da un lato amplificare i rischi connessi e, dall'altro lato rendere inavvertibile la presenza di fughe, creando potenziali situazioni di pericolo. In questo contesto, la realizzazione di *hydrogen valleys* finalizzate alla produzione e distribuzione di idrogeno verde in scala locale nelle aree industriali più o meno estese può contribuire alla diffusione di questo vettore energetico, valorizzando al contempo le attività della cosiddetta industria pesante e contribuendo a decarbonizzare il settore. Nel presente lavoro, dopo la presentazione di alcuni dei possibili usi dell'idrogeno nei settori industriali cosiddetti *hard-to-abate*, viene presentato il progetto per il recupero di un'area industriale abbandonata in provincia di Frosinone per la produzione di idrogeno verde. I risultati preliminari evidenziano la necessità di ingenti investimenti iniziali, di conseguenza, il progetto risulta sostenibile nel breve periodo solo in presenza di importanti fondi pubblici. Nel lungo periodo invece, il progetto è sostenibile e i benefici superano di gran lunga i costi.

Parole chiave: idrogeno verde; gas naturale; settori hard-to-abate; decarbonizzazione.

1. Introduzione

La COP26, tenutasi a Glasgow nel 2021, ha riconosciuto l'urgenza di limitare il riscaldamento globale sotto 1.5°C rispetto ai livelli preindustriali, invitando i Paesi a rafforzare la risposta globale alla minaccia del cambiamento climatico. Il raggiungimento di questo obiettivo ambizioso richiederà una rapida, profonda e sostenuta riduzione delle emissioni globali di CO₂ derivanti dall'impiego delle fonti fossili, in tutti i settori dell'economia.

Le Fonti di Energia Rinnovabile (FER) sono la chiave di volta della politica energetica dell'UE per sostituire i combustibili fossili e di conseguenza ridurre le emissioni complessive di gas serra senza la necessità di catturare l'anidride carbonica prodotta. In questo senso, l'Europa sta fronteggiando un cambiamento sostanziale del proprio sistema energetico, promuovendo e incentivando la transizione da sistemi di conversione basati sulle fonti fossili a sistemi basati sul largo uso delle FER.

Il raggiungimento della neutralità carbonica entro il 2050 è però un obiettivo sfidante, specialmente per i settori cosiddetti *hard-to-abate* (i settori ad alta intensità energetica, come ad esempio quello dei trasporti pesanti), che sono responsabili ogni anno dell'emissione in atmosfera di circa 10 Gton di CO₂, pari al 30% del totale. Sono diverse le problematiche che rendono difficile la riduzione delle emissioni di gas serra in tali settori, tra cui: (i) il limitato recupero dei materiali dopo l'uso; (ii) l'incremento dell'efficienza di processi termodinamici cruciali senza un contemporaneo incremento della riduzione delle emissioni di gas serra; (iii) la bassa disponibilità di alternative elettriche pronte all'uso [1]. La decarbonizzazione di tali settori può essere ottenuta esclusivamente tramite un approccio diversificato; economia circolare, efficienza energetica, utilizzo di combustibili verdi (i.e., idrogeno e biometano), cattura della CO₂ ed elettrificazione costituiscono un insieme di soluzioni che possono ridurre in modo significativo le emissioni nei settori industriali fortemente energivori, se implementate insieme.

In tale scenario, l'idrogeno verde riveste un ruolo cruciale in virtù della sua adattabilità e integrabilità con le FER e altre tecnologie pulite per la produzione e il consumo di energia. In particolare, l'idrogeno offre la possibilità di decarbonizzare gli usi finali dell'energia su larga scala, in quanto non vi sono emissioni di CO₂ e sostanze inquinanti derivanti dalla sua combustione o dal suo impiego come vettore energetico. Ci si aspetta che l'idrogeno verde e le tecnologie di cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica (CCS, Carbon Capture and Storage) possano ridurre significativamente l'impronta carbonica delle industrie energivore, specialmente il settore siderurgico e chimico. Inoltre, il costo delle FER è destinato a diminuire nel lungo periodo, rendendo l'idrogeno verde una materia prima conveniente per produrre ammoniaca, metanolo e altri prodotti chimici (l'idrogeno è già un componente essenziale di tali prodotti, e quindi l'integrazione dell'idrogeno verde può essere ottenuta mediante piccole modifiche [2]). In questo modo l'idrogeno può accelerare il processo di decarbonizzazione nei settori per cui l'elettrificazione non è una soluzione efficiente (quali l'industria pesante, il trasporto di merci pesanti e su lunga distanza, il trasporto ferroviario non elettrificato e il settore residenziale), sfruttando la flessibilità e la competitività del trasporto e dello stoccaggio dell'idrogeno per rispondere alle sfide dell'elettrificazione. L'idrogeno può anche garantire le capacità di stoccaggio necessarie per incrementare la stabilità e la flessibilità delle reti elettriche, attraverso l'applicazione delle tecnologie

Power-to-Gas (PtG). Infatti, l'iniezione nel sistema di trasporto e distribuzione del gas naturale (GN) dell'idrogeno prodotto dal surplus di energia rinnovabile rappresenta una vera e propria opportunità, fornendo allo stesso tempo servizi di bilanciamento della rete elettrica e promuovendo l'accoppiamento tra i settori dell'energia elettrica e del gas. Sfruttando l'infrastruttura del GN, l'idrogeno permette di collegare i siti di produzione e di domanda su lunghe distanze, riducendo così i costi di approvvigionamento e garantendo la necessaria sicurezza e continuità del servizio attraverso lo sviluppo di un mercato internazionale. Infine, si prevede che nei prossimi anni i costi di produzione dell'idrogeno diminuiranno, raggiungendo la competitività, grazie allo sviluppo di tecnologie più efficienti per la produzione di idrogeno verde e alla crescente disponibilità di energia elettrica da fonti rinnovabili.

Come è noto, il blending dell'idrogeno con il GN porta a significative variazioni delle proprietà termofisiche della miscela GN-H₂ risultante, che si traducono a loro volta in una variazione delle proprietà di combustione ed energetiche. In particolare, l'arricchimento di idrogeno induce effetti altamente non lineari sulla velocità di combustione e sulla propagazione della fiamma, causando un potenziale comportamento esplosivo [3,4]. Pertanto, l'iniezione di idrogeno nel GN potrebbe comportare problemi di sicurezza a seconda del contenuto volumico di idrogeno (ad esempio, maggiori emissioni fuggitive e maggiore infiammabilità). In realtà, con un contenuto di H₂ compreso tra il 5 e il 15% si verificano solo criticità minori, a seconda delle condizioni specifiche, mentre per un contenuto più elevato sono necessarie indagini mirate. Per quanto riguarda la valutazione delle proprietà fisiche e termodinamiche di miscele di GN-H₂, è disponibile un'ampia letteratura scientifica sull'argomento [5–8], così come numerosi documenti tecnici normativi, come la norma ISO 6976:2017 per il calcolo della densità e del potere calorifico e le norme ISO 12213 per il calcolo del fattore di compressibilità (la cui applicabilità è limitata al 10%vol. di H₂).

La strategia italiana, in linea con quella dell'UE, mira ad aumentare gli investimenti per la produzione e l'utilizzo dell'idrogeno, secondo due orizzonti temporali. Nel breve termine (2030), l'obiettivo è rendere l'idrogeno verde progressivamente competitivo in specifici settori industriali, gettando le basi per un ecosistema nazionale basato su questo vettore energetico. Nel lungo termine (2050), invece, l'obiettivo è contribuire alla decarbonizzazione dei settori *hard-to-abate* attraverso l'uso dell'idrogeno verde. La domanda di idrogeno verde dovrebbe essere di circa 0.7 Mton/anno entro il 2030, richiedendo l'installazione di 5 GW di elettrolizzatori entro la fine del decennio.

Nel presente lavoro vengono delineati alcuni dei possibili usi dell'idrogeno nei settori industriali *hard-to-abate*, al fine di illustrare le potenzialità di tale vettore energetico; viene inoltre presentato il progetto per il recupero di un'area industriale abbandonata in provincia di Frosinone per la produzione di idrogeno verde, il cui obiettivo è: (i) promuovere e sviluppare l'uso dell'idrogeno verde nei settori dell'industria e del trasporto pubblico; (ii) ridurre le emissioni di gas serra e di inquinanti derivanti dall'utilizzo di combustibili; (iii) favorire l'occupazione nel territorio; e (iv) sostenere la ricerca, lo sviluppo tecnologico e l'innovazione relativi alla filiera dell'idrogeno.

Dopo l'analisi del contesto territoriale e industriale, vengono descritte le fasi del progetto e i criteri di dimensionamento dell'impianto di produzione di idrogeno. Viene inoltre presentata e discussa

un'analisi preliminare costi-benefici. A questo proposito, il presente lavoro fa leva sul valore sociale del carbonio (Social Carbon Value, *SCV*) per quantificare i benefici ambientali derivanti dalle emissioni di CO₂ evitate, rappresentando così un benchmark per studi futuri sull'argomento.

2. Usi dell'idrogeno nell'industria pesante

Oltre all'impiego per la produzione di energia termica senza emissioni di CO₂, esistono diversi processi produttivi che utilizzano l'idrogeno grazie alle sue proprietà chimico-fisiche. L'idrogeno ha infatti un elevato potere riducente ed è utilizzato in vari ambiti industriali come, ad esempio, nelle raffinerie per la produzione di carburanti, oli e lubrificanti, nell'industria farmaceutica, nell'industria siderurgica, nell'industria per la produzione di cemento o la produzione di ammoniaca e metanolo, ecc. L'idrogeno trova impiego anche per il trattamento termico di minerali e metalli e, grazie alla sua capacità di prevenire l'ossidazione, è ampiamente utilizzato nella fabbricazione di semiconduttori. Non da ultima, la possibilità di utilizzare l'idrogeno per la produzione di energia elettrica senza emissioni di gas serra mediante l'uso di celle a combustibile rende tale molecola particolarmente interessante per applicazioni stazionarie temporanee (ad esempio, nei grandi cantieri o eventi) o di backup (gruppi elettrogeni di grandi dimensioni) o per alimentare i veicoli pesanti tipicamente utilizzati all'interno di un'area industriale. Sono proprio le caratteristiche uniche dell'idrogeno a rendere l'utilizzo di tale sostanza particolarmente promettente e sfidante allo stesso tempo. L'idrogeno è infatti una molecola molto piccola, inodore, incolore, con un elevatissimo contenuto energetico per unità di massa, un campo di infiammabilità molto ampio, una elevata velocità di fiamma ed una densità molto più bassa di quella dell'aria (si disperde velocemente se rilasciato in atmosfera). Ad oggi, nel settore industriale l'idrogeno è utilizzato diffusamente ed in sicurezza. Ciò nonostante, date le sue caratteristiche chimico-fisiche, il principale ostacolo al suo utilizzo è rappresentato dalle problematiche relative allo stoccaggio all'interno di un sito industriale attivo. Oltre alla elevatissima quantità di energia potenzialmente accumulata, infatti, le dimensioni ridottissime della molecola di idrogeno, unitamente al fatto che essa è inodore ed incolore, possono rendere inavvertibile l'eventuale presenza di perdite, creando potenziali situazioni di pericolo. Per tali motivi, le attuali linee guida per lo stoccaggio dell'idrogeno prevedono soluzioni costruttive, misure di sicurezza e procedure gestionali molto severe e particolarmente costose.

La realizzazione di una *hydrogen valley* finalizzata a rendere disponibile idrogeno verde in un'area industriale può contribuire enormemente a valorizzare l'attività della cosiddetta "industria pesante", decarbonizzandone al contempo gli usi. Sebbene il costo dell'idrogeno blu (i.e., idrogeno prodotto dallo steam reforming del metano o dalla gassificazione del carbone, con la cattura e lo stoccaggio della CO₂) sia ad oggi compreso tra circa 2 e 3 EUR/kg, l'acquisto di tale gas da parte di un'azienda richiede la realizzazione di un adeguato sistema di accumulo per consentire lo scarico da parte del carro bombolaio, oltre alle relative infrastrutture (l'accumulo deve trovarsi all'esterno e ad una certa distanza dalle strutture), con costi che naturalmente dipendono dalla quantità di idrogeno acquistato, ma che possono comunque essere pari a svariate decine di migliaia di euro. La disponibilità di idrogeno verde in un'area industriale mediante condotta dedicata rappresenta quindi un beneficio non

trascurabile, con ripercussioni economiche che vanno debitamente considerate nella valutazione del costo effettivo sostenuto dalle aziende per l'approvvigionamento di idrogeno.

Non da ultimo, l'ossigeno ottenuto dal processo di elettrolisi, oltre che poter essere valorizzato commercialmente, può contribuire sia a migliorare i processi produttivi dell'area industriale, che ad ottimizzare i processi di trattamento delle acque reflue o di gassificazione di biomasse per la produzione di ulteriori gas rinnovabili.

Nel seguito si illustrano i principali vantaggi derivanti dall'uso dell'idrogeno verde nell'industria pesante con particolare riferimento all'industria siderurgica e all'industria del cemento, settori tra i più impattanti in termini di emissioni globali di CO₂ [9].

2.1. *Industria siderurgica*

Nell'ambito dell'industria cosiddetta "pesante", il settore siderurgico è uno dei maggiori responsabili delle emissioni mondiali di anidride carbonica. Con 845 Mtep di energia consumata nel 2019, rappresenta il 20% degli usi energetici industriali e l'8% dei consumi finali. Questo rende la siderurgia il secondo più grande consumatore di energia dopo l'industria chimica e responsabile del 7÷9% delle emissioni globali di CO₂ legate all'energia [10,11]. La produzione di acciaio è ad oggi dominata dal processo Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace (BF-BOF), che soddisfa il 71% della domanda mondiale. È seguita dalla metallurgia secondaria (i.e., riutilizzo dei rottami di acciaio), che soddisfa il 24% del mercato e impiega forni ad arco elettrico (Electric Arc Furnace, EAF). Vi è infine il processo innovativo Direct Reduced Iron – Electric Arc Furnace (DRI-EAF), che copre circa il 5% della domanda globale. Secondo l'Associazione mondiale dei produttori di acciaio (World Steel Association), la produzione di una tonnellata di acciaio è responsabile dell'emissione, in media, di 1.85 tonnellate di CO₂ in atmosfera. Il settore dell'acciaio è parte dell'EU ETS (European Union Emission Trading System) ed è pertanto soggetta a penali per la CO₂ emessa (nel 2022 si è osservato un forte aumento del prezzo della CO₂ sul mercato ETS, con picchi vicini a 100 EUR/ton di CO₂). Come risultato, il settore siderurgico ha iniziato a valutare l'introduzione dell'idrogeno (e in particolare dell'idrogeno verde) all'interno dei processi produttivi, con l'obiettivo di ridurre il consumo di combustibili fossili e le associate emissioni di anidride carbonica. Nella produzione di acciaio, l'idrogeno può essere impiegato come agente riducente primario nel processo DRI-EAF, come agente riducente secondario nel processo BF-BOF e in entrambe le metodologie come combustibile per la produzione di calore ad alta temperatura [2].

2.1.1. Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace (BF-BOF)

Il processo BF-BOF è attualmente il metodo prevalente per la fornitura di materie prime siderurgiche in tutto il mondo; tuttavia, è basato sull'utilizzo massivo di carbone (come combustibile e agente riducente), suscitando gravi preoccupazioni in termini di inquinamento ambientale [12]. Si compone di due sottoprocessi distinti: nell'altoforno (Blast Furnace, BF) il minerale di ferro viene ridotto in ferro metallico utilizzando coke; in seguito, il metallo prodotto viene convertito in acciaio nella fornace basica ad ossigeno (Basic Oxygen Furnace, BOF). L'idrogeno verde può essere utilizzato all'interno dell'altoforno come agente riducente, sostituendo in parte il monossido di carbonio derivante dalla

combustione del carbon coke, e come combustibile ausiliario. Gli altoforni esistenti hanno requisiti operativi e configurazioni che limitano il contenuto complessivo di H₂ al 5÷10% [11]; in questo modo è possibile ridurre le emissioni di CO₂ del 21% circa (0.46 ton CO₂ per tonnellata di acciaio prodotto) [13], utilizzando 27.5 kg H₂ per ogni tonnellata di metallo fuso.

2.1.2. Direct Reduced Iron – Electric Arc Furnace (DRI-EAF)

DRI-EAF è un processo di produzione dell'acciaio in due step che prevede la produzione di ferro direttamente ridotto (Direct Reduced Iron, DRI) seguita dalla raffinazione del DRI all'interno di un forno ad arco elettrico.

Nella riduzione diretta il minerale metallico viene convertito in ferro allo stato solido reagendo con gas riducenti (i.e., una miscela al 55% di idrogeno e 36% di monossido di carbonio [11]) prodotti dal reforming del gas naturale (gas-based DRI) o dalla gassificazione del carbone (coal-based DRI) [14,15]. Il DRI che ne deriva è una forma di ferro ad elevata purezza che è comunemente usata come materia prima per l'EAF, in aggiunta ai rottami di acciaio; all'interno del forno ad arco elettrico l'energia è fornita attraverso uno o tre elettrodi, bruciatori e reazioni chimiche favorite dall'iniezione di carbone e ossigeno nel metallo fuso e nelle scorie [16,17].

A differenza dell'altoforno in cui è solo un agente riducente ausiliario, nella produzione del DRI l'idrogeno può fungere da agente riducente primario (Hydrogen Direct Reduction, H-DR) [18,19]. Una fonte di carbonio (1.5÷3%) è però ancora necessaria per produrre acciaio all'interno del forno ad arco elettrico; per questo motivo le emissioni di anidride carbonica non possono essere eliminate del tutto, ma utilizzando fonti biogeniche di carbonio al posto di combustibili fossili possono essere ridotte in modo significativo (fino a 0.025 ton CO₂/ton acciaio) [2]. La riduzione diretta è una tecnologia collaudata per l'utilizzo di gas ricchi in idrogeno, in grado di accettare miscele con diverse concentrazioni di CO e H₂: nel caso del DRI gas-based è possibile sostituire con idrogeno fino al 30% del gas naturale senza modificare il processo e utilizzare al 100% idrogeno con modifiche minori [11]. Il processo H-DR ha quindi un enorme potenziale per ridurre fino all'80-90% delle emissioni di anidride carbonica, ma gli esiti effettivi dipendono notevolmente dalla disponibilità di idrogeno verde [19].

2.1.3. Idrogeno come combustibile nell'industria siderurgica

Come accennato nelle sezioni precedenti, oltre ad essere utilizzato come agente riducente l'idrogeno (o miscele di gas ricche di idrogeno) mostra anche un grande potenziale come combustibile nel processo di produzione dell'acciaio. Al momento i combustibili che vengono di solito impiegati sono gas d'altoforno, gas naturale e gas di cokeria. L'aumento della percentuale di idrogeno nell'attuale sistema di alimentazione dei combustibili migliorerebbe l'efficienza energetica e il rendimento produttivo in virtù del suo maggiore potere calorifico, riducendo contemporaneamente le emissioni di anidride carbonica. Le potenziali applicazioni dell'idrogeno come combustibile nel settore siderurgico riguardano principalmente la produzione di pellet (utilizzo nel forno a griglia e nella torrefazione a nastro), la sinterizzazione del minerale di ferro (come combustibile ausiliario per intensificare il processo e come carburante di accensione), la siviera e il forno di riscaldamento [20].

2.2. Industria del cemento

Il settore della produzione del cemento, componente chiave del calcestruzzo, è responsabile di circa l'8% delle emissioni globali di gas serra [21].

Si prevede che entro il 2060 il numero di edifici sulla Terra sarà circa il doppio di quelli attualmente esistenti [22]; dal momento che per 1 kg di cemento prodotto si emettono circa 0.5-0.9 kg di CO₂ [23], sono necessari importanti cambiamenti nel processo di produzione del cemento al fine di ridurre l'impronta carbonica ed evitare che ingenti quantitativi di CO₂ vengano rilasciati in atmosfera.

La produzione di cemento rilascia CO₂ attraverso due tipi di attività: l'utilizzo di energia e le reazioni di calcinazione. Il processo di produzione del cemento può essere suddiviso in 10 fasi, dall'estrazione delle materie prime alla macinazione e allo stoccaggio del prodotto finito (Figura 1).

Figura 1. Fasi del processo di produzione del cemento [24].



Alcune fasi, come la macinazione dei materiali in ingresso e del prodotto finale, sono tipicamente alimentate da energia elettrica e non comportano emissioni in loco, o dirette. I combustibili (tipicamente carbone) sono utilizzati per riscaldare un precalcinatore e un forno rotativo, in cui i materiali in ingresso raggiungono temperature superiori ai 1400 °C. I combustibili fossili bruciati per produrre questo calore sono responsabili di circa il 30-40% delle emissioni dirette di CO₂ associate alla produzione di cemento. Il restante 60-70% deriva dalla reazione chimica che avviene nel precalcinatore, dove il calcare (in gran parte calcite e aragonite, con formula chimica CaCO₃) viene scomposto in calce (CaO) e anidride carbonica (CO₂). La CO₂ viene poi rilasciata in atmosfera, mentre la calce viene utilizzata per produrre il clinker, il componente principale del cemento. Queste ultime sono chiamate *emissioni di processo*, per distinguerle dalle *emissioni legate all'energia* [25].

L'idrogeno verde entra all'interno della filiera produttiva del cemento come possibile combustibile sostitutivo ai tradizionali combustibili fossili. La fiamma derivante dalla combustione dell'idrogeno ha

però proprietà diverse da quella dei combustibili attualmente utilizzati e potrebbe non essere adatta ai bruciatori utilizzati nella produzione di clinker.

Per ovviare a queste limitazioni, la ricerca si sta attualmente concentrando sull'abbinamento dell'idrogeno ad altri combustibili a basse emissioni di CO₂, come le biomasse [26]. Anche se questi sforzi potrebbero portare a progetti di successo e a riduzioni significative delle emissioni [27], sono necessari ulteriori ricerche e test [28] (secondo quanto riportato dall'Associazione Europea del Cemento, gli aspetti fisici del forno, i flussi di massa del combustibile, i profili di temperatura, il trasferimento di calore e le considerazioni sulla sicurezza degli impianti devono ancora essere analizzati [26]). Una volta sviluppati e ottimizzati per il riscaldamento dei forni, i bruciatori a idrogeno possono essere abbinati ad altre tecnologie di produzione del cemento, che possono a loro volta essere combinate con la cattura e lo stoccaggio della CO₂.

3. Progettazione di una *hydrogen valley* nella zona industriale di Frosinone

Il progetto si inserisce nel contesto del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), e mira a sviluppare una sorta di laboratorio tecnologico dimostrativo delle varie forme di sfruttamento dell'idrogeno (ad esempio elettrolizzatori, metanatori, iniezione nella rete del gas, trasporti pubblici) sia per i ricercatori che per le aziende. Il dimensionamento del progetto non si basa solo sulle prestazioni delle tecnologie applicabili, ma anche sulle caratteristiche dell'area in cui è previsto l'intervento e sui dati puntuali di consumo di GN delle industrie che vi operano, insieme alle previsioni della domanda di energia in uno scenario di breve-medio e lungo termine.

In Tabella 1 sono riportati il Potere Calorifico Superiore (PCS) e la densità (d) del GN (quello tipico distribuito nell'area interessata), dell'idrogeno puro e delle miscele GN-H₂ con il 10% e il 20% di H₂, calcolati secondo la metodologia descritta da Dell'Isola et al. [8]. È possibile notare come, a parità di energia, sono necessari volumi maggiori all'aumentare della frazione di idrogeno nel blend GN-H₂.

Tabella 1. Potere calorifico superiore e densità di GN, idrogeno puro e miscele GN-H₂ con 10% e 20%vol. H₂.

Miscela	PCS (MJ/Sm ³)	PCS (MWh/Sm ³)	PCS (MWh/kg)	d (kg/Sm ³)
100% GN	39.5391	0.0110	0.0146	0.7527
90% GN + 10% H ₂	36.7799	0.0102	0.0149	0.6856
80% GN + 20% H ₂	34.0254	0.0095	0.0153	0.6186
100% H ₂	12.1023	0.0034	0.0396	0.0850

Per il dimensionamento appropriato dell'intervento sono stati calcolati i coefficienti specifici di conversione a diversi contenuti di H₂ nella miscela GN-H₂, con l'obiettivo di ottenere la stessa quantità di energia di 10⁶ Sm³ di GN. Il volume totale della miscela è stato quindi ottenuto moltiplicando il volume di GN per il rapporto tra il PCS del GN (cioè della miscela senza H₂) e il PCS della miscela con il contenuto di H₂ considerato. Di conseguenza, il volume e la massa di H₂ sono stati ottenuti

moltiplicando il volume di GN-H₂ per il contenuto di H₂ e per la densità di H₂, rispettivamente.

In Tabella 2, sono riportati i coefficienti di conversione utilizzati, il contenuto di idrogeno necessario (sia in massa che in volume) e le emissioni di CO₂ evitate.

Tabella 2. Volumi delle miscele GN-H₂ e dell'idrogeno necessario, unitamente alla CO₂ prodotta ed evitata, per diversi contenuti di H₂.

Miscela	Volume della miscela (Sm ³ 10 ⁶)	Volume di H ₂ (Sm ³ 10 ⁶)	Massa di H ₂ (ton)	CO ₂ prodotta (ton 10 ³)	CO ₂ evitata (ton 10 ³)
100% GN	1	-	-	2.03	-
90% GN + 10% H ₂	1.075	0.108	9.1	1.83	0.20
80% GN + 20% H ₂	1.162	0.232	19.8	1.62	0.41
100% H ₂	3.267	3.267	277.6	-	2.03

Le quantità di CO₂ prodotte ed evitate riportate in Tabella 2 sono state calcolate tramite il tool SW disponibile all'indirizzo <https://ghgprotocol.org/>, sulla base dell'effettiva composizione del gas naturale. La CO₂ evitata in Tabella 2 tiene conto solo delle emissioni di gas serra derivanti dal consumo di gas naturale. Considerando anche l'energia rinnovabile totale prodotta dagli impianti fotovoltaici e non consumata dagli elettrolizzatori, si avrebbe un ulteriore risparmio potenziale di circa 4.59 tonnellate di CO₂ per ogni milione di Sm³ di GN.

L'area industriale interessata dal progetto si trova nel territorio dei comuni di Frosinone e Ferentino, nel centro Italia. La rete di trasmissione del GN in uso è costituita dalle seguenti sezioni (vedi Figura 2): (i) ex rete ASI, condotte con diametro di 6-8 pollici; (ii) lato destro del fiume Sacco, condotte con diametro di 4-6 pollici; (iii) lato sinistro del fiume Sacco, condotte con diametro di 4-6 pollici.

Figura 2. Vista della zona industriale Frosinone-Ferentino.



Per il dimensionamento dell'intervento sono stati analizzati i consumi di GN degli ultimi 6 anni (i.e., dal 2016 al 2021) delle industrie rifornite nell'area, calcolando la media ponderata dei consumi di ciascuna e assegnando un peso maggiore a quelli degli ultimi anni. L'analisi effettuata ha rivelato un incremento dei consumi di GN nell'area negli ultimi 3 anni, e che più del 90% di essi sono concentrati in sole 8 aziende.

Al fine di ricavare la previsione della domanda di gas naturale nell'area interessata dall'intervento, è stato stimato il moltiplicatore della domanda come rapporto tra la stima dei consumi dell'anno preso in considerazione e i consumi dell'anno 2020, come stimati da Snam e Terna (i TSO del settore gas ed energia elettrica in Italia) in relazione a due scenari [30]: (i) National Trend Italia, sviluppato da Snam e Terna [31] e (ii) Global Ambition, elaborato da ENTSOs [32].

Nella Tabella 3, si riporta la sintesi della previsione della domanda di gas naturale in Italia nel periodo 2020 – 2040.

Tabella 3. Previsione della domanda di GN in Italia [30].

Scenario	2020	2025	2030	2035	2040
Consumi nazionali di GN (10^9 Sm^3)					
Global Ambition	71.3	72.2	74.9	72.6	70.3
National Trend Italia	71.3	72.2	62.4	63.5	64.5
Consumi medi	71.3	72.2	68.7	68.0	67.4
Fattore moltiplicativo della domanda di GN					
Global Ambition	1.000	1.013	1.050	1.018	0.986
National Trend Italia	1.000	1.013	0.875	0.890	0.905
Fattore moltiplicativo medio	1.000	1.013	0.963	0.954	0.945

Per quanto riguarda la realizzazione del progetto, sono state previste due fasi principali:

- *Fase 1:* fino a 9 aziende coinvolte, fino al 10%vol. di H_2 nella miscela GN- H_2 , circa 500 tonnellate di produzione di H_2 attraverso un elettrolizzatore da 10 MW di potenza nominale, capacità di stoccaggio di H_2 fino a 10-14 tonnellate e capacità del reattore di metanazione di circa 500 kW; si ipotizza che l' H_2 per il settore dei trasporti sia in fase iniziale;
- *Fase 2:* fino a 20 aziende coinvolte, fino al 20%vol. di H_2 nella miscela GN- H_2 , più di 1000 tonnellate di produzione di H_2 attraverso un elettrolizzatore da 20 MW di potenza nominale, capacità di stoccaggio di H_2 fino a 30-35 tonnellate e capacità del reattore di metanazione di circa 500 kW; si ipotizza che l' H_2 per il settore dei trasporti sia in fase di sviluppo.

Si ritiene che il contenuto di idrogeno iniettato nella miscela GN- H_2 aumenti gradualmente a partire dal 2030 fino alla completa sostituzione del GN con l'idrogeno nell'area entro il 2040, e che vengano coinvolte le aree industriali limitrofe (ad esempio, Cassino, Piedimonte, Ceprano e Anagni) insieme ad altre aziende situate nell'area Frosinone-Ferentino.

Per il dimensionamento degli impianti sono state assunte le seguenti ipotesi:

1. La potenza nominale dell'elettrolizzatore P_{el} (kW) necessaria per la produzione dei quantitativi di H_2 stimati per garantire il fabbisogno energetico delle aziende coinvolte nel progetto, è stata valutata utilizzando la seguente relazione:

$$P_{el} = \frac{E_{H_2}}{h_{el}} = \frac{Q_{H_2} \cdot E_{un,H_2}}{h_{el}} \quad (1)$$

dove Q_{H_2} è la quantità di H_2 che è necessario produrre in un anno, (kg); E_{un,H_2} è il consumo energetico dell'elettrolizzatore per unità di H_2 prodotto, assunto pari a 60 kWh/kg; h_{el} è il numero di ore di funzionamento dell'elettrolizzatore in un anno, assunto pari a 3000 h/anno, considerando l'instabilità e l'intermittenza della generazione fotovoltaica.

La potenza di picco del fotovoltaico necessaria a garantire il fabbisogno di energia elettrica dell'elettrolizzatore, P_{PV} (kW), è stata valutata considerando un fattore moltiplicativo pari a 5:

$$P_{PV} = 5 \cdot P_{el} \quad (2)$$

2. La produzione annua di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico E_{PV} (kWh) è stata valutata attraverso la seguente equazione:

$$E_{PV} = P_{PV} \cdot E_{PV,local} \quad (3)$$

dove $E_{PV,local}$ è la produzione annuale da fotovoltaico relativa al sito individuato dal progetto per ogni kW di potenza da fotovoltaico installata, assunta pari a 1368 kWh/kW e stimata attraverso il tool PVGIS (PhotoVoltaic Geographical Information System) disponibile all'indirizzo https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.

3. La superficie necessaria per l'installazione dell'impianto fotovoltaico è stata stimata come segue:

$$S_{PV} = P_{PV} \cdot \gamma_{S,P_{PV}} \quad (4)$$

dove S_{PV} è la superficie totale occupata dall'impianto fotovoltaico (ha) e $\gamma_{S,P_{PV}}$ è la superficie necessaria per unità di potenza P_{PV} installata, assunta pari a 1.5 ha/MW.

4. Risultati

4.1. Dimensionamento dell'intervento

Ciascuna fase è stata progettata seguendo uno sviluppo progressivo delle tubazioni di collegamento dal sito di produzione e stoccaggio dell'idrogeno (entrambi situati nei siti industriali dismessi) al punto

di riconsegna presso le industrie. Sulla base della stima previsionale dei consumi di GN, è stata dimensionata l'unità di elettrolisi dell'impianto. Attualmente vi sono tre principali tecnologie di elettrolisi che possono essere considerate per un impianto PtG, le cui principali caratteristiche sono riportate in Tabella 4: (i) alcalina (Alkaline Electrolysis, AEL), (ii) con membrana a scambio protonico (Proton Exchange Membrane Electrolysis, PEMEL) e (iii) ad ossidi solidi (Solid Oxide Electrolysis, SOEL).

Tabella 4. Principali caratteristiche delle tecnologie di elettrolisi attualmente disponibili [33–37].

	AEL	PEMEL	SOEL
Temperatura operativa (°C)	20 ÷ 80	20 ÷ 200	500 ÷ 1000
Efficienza (PCS, %)	59 ÷ 70	65 ÷ 82	40 ÷ 60
Produzione nominale (Nm ³ /h)	100 ÷ 103	100 ÷ 102	-
Potenza nominale (kW)	100 ÷ 103	100 ÷ 102	-
Consumo di acqua (L/kg H ₂)	9 ÷ 11 [22]	9 ÷ 11 [22]	9 ÷ 11 [22]
	-	18.04 [23]	9.1 [23]
Consumi energetici specifici (kWh/kg H ₂)	50 ÷ 83	65 ÷ 81	33
Tempi di avviamento a freddo	10 min—ore	s—min	-
Tempi di riavvio	30 ÷ 60 min	riavvio non necessario	-
Rangeability (% della potenza nominale)	25 ÷ 100%	5 ÷ 100%	-
Costi (EUR/kW)	1000	>2000	-

La scelta degli autori è ricaduta sulla tecnologia alcalina, in quanto commercialmente più matura. I principali vantaggi di tale soluzione risiedono nei minori costi di investimento (grazie all'impiego di metalli non nobili per gli elettrodi) e nella stabilità a lungo termine [33].

Come descritto in precedenza, è stato considerato un contenuto crescente di H₂ nella miscela (cioè dal 10%vol. nel 2026 al 100%vol. nel 2035) ed è stato calcolato un coefficiente moltiplicativo della domanda di energia come da Tabella 3 (per il periodo 2026-2029 è stato considerato un andamento lineare) al fine di ottenere le tonnellate di H₂ necessarie.

L'energia richiesta in ingresso dall'elettrolizzatore è stata quindi ottenuta moltiplicando la quantità di H₂ da produrre per i consumi energetici specifici, che possono ragionevolmente diminuire, dal 2030 in poi, da 60 a 50 kWh/kg (grazie all'avanzamento tecnologico, con un incremento dell'efficienza dal 66% al 79%).

La capacità nominale dell'elettrolizzatore P_{el} , la produzione annua di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico E_{PV} e la superficie necessaria per l'installazione dell'impianto fotovoltaico S_{PV} sono state determinate attraverso le equazioni (1)-(4).

Nella Tabella 5 sono riportati i risultati delle analisi condotte a medio termine (cioè fino al 2040).

Tabella 5. Risultati della fase di progettazione.

	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
Miscela GN/H ₂ (%)	10	10	10	20	20	100	100
Moltiplicatore della domanda stimato	1.003	0.993	0.983	0.973	0.963	0.954	0.945
H ₂ richiesto (ton)	80	282	425	480	518	827	1303
Consumi specifici elettrolizzatore (kWh/kg)	60	60	60	60	60	50	50
Efficienza elettrolizzatore (%)	66	66	66	66	66	79	79
Energia necessaria (MWh)	4818	16,914	25,519	28,803	31,109	41,328	65,163
Ore funzionamento elettrolizzatore (h/a)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Potenza elettrolizzatore, P_{el} (MW)	1.6	5.6	8.5	9.6	10.4	13.8	21.7
Potenza PV installata, P_{PV} (MW)	8.0	28.2	42.5	48.0	51.8	68.9	108.6
Energia prodotta, E_{PV} (MWh/a)	10,984	38,564	58,184	65,670	70,929	94,227	148,572
Superficie richiesta, S_{PV} (ha)	12	42	64	72	78	103	163

4.2. Analisi costi-benefici

L'analisi costi-benefici consente di eseguire valutazioni di progetti basate sulla quantificazione del valore monetario attualizzato dei relativi costi $C_{tot,att}$ e benefici $B_{tot,att}$. Se il rapporto $\frac{B_{tot,att}}{C_{tot,att}} > 1$, il progetto può essere considerato economicamente sostenibile.

I costi possono essere raggruppati in tre categorie principali: (i) spese in conto capitale (Capital Expenditure, CAPEX); (ii) spese operative (Operating Expenditure, OPEX), calcolate fino al 2040 come percentuale dei costi CAPEX; (iii) costi misti (MIXED), che presentano sia le caratteristiche dei costi variabili che di quelli fissi (ad esempio, lo stoccaggio e la compressione dell'H₂ dal 2035 in poi).

Nella Tabella 6 sono riassunti i costi stimati relativi al progetto nelle diverse fasi di sviluppo.

Tabella 6. Risultati dell'analisi dei costi.

Descrizione	CAPEX, M EUR			OPEX, M EUR			MIXED, M EUR		
	2023	2031	2036	2023	2031	2036	2023	2031	2036
	2030	2035	2040	2030	2035	2040	2030	2035	2040
Rete GN	5.1	1.4	1	0.6	2.5	3.8			
PV	100	0	0	6.9	7.5	7.5			
Elettrolizzatore	12	288	150	2.2	15.5	37.9			
Compressore	11.4	0	0	3.3	2.7	0	0.9	5.3	
Stoccaggio	15	0	0	2	1.8	0	63.2	352.3	
Miscelazione	1.6	0	0						
Fattore di sicurezza	10	0	0						
Totale	155.1	307.4	151	15	30	49.2	64.1	357.6	

Per l'analisi dei benefici sono stati considerati i seguenti contributi: (i) benefici ambientali derivanti dalla CO₂ evitata (*SCV*); benefici socioeconomici per i nuovi posti di lavoro (*BSL*); benefici derivanti dallo stoccaggio di idrogeno (*BSI*).

Per definire il valore monetario dei benefici ambientali derivanti dalla CO₂ evitata è stato utilizzato il Social Carbon Value (*SCV*), che fornisce una soglia massima dei costi che un'azienda dovrebbe essere disposta a sostenere per arginare il cambiamento climatico ed è calcolata attraverso la relazione seguente [40]:

$$SCV = CO_{2,av} \cdot C_{CO_2} \quad (5)$$

dove $CO_{2,av}$ è la CO₂ evitata e C_{CO_2} è il costo del carbonio, il cui valore può essere ottenuto considerando uno scenario peggiore (SP) e uno scenario migliore (SM) con valori di C_{CO_2} rispettivamente stimati pari a 57 EUR/ton e 114 EUR/ton fino al 2030 e pari a 66 EUR/ton e 180 EUR/ton dal 2030 al 2040 [41]. Per quantificare il BSL è stato utilizzato il valore aggiunto per occupato pari a 58683 EUR nella provincia di Frosinone (fonte Istat), considerando che per ogni milione di euro di CAPEX e/o costi misti investito in progetti sostenibili dal punto di vista ambientale si generano un minimo di 10 (scenario peggiore) ed un massimo di 15 (scenario migliore) posti di lavoro [42].

Un ulteriore beneficio consiste nella differenza di costo tra lo stoccaggio dell'idrogeno (previsto nel progetto a partire dal 2035) e quello dell'energia elettrica. La quantificazione monetaria del beneficio BSI è calcolata come segue:

$$BSI = (C_{storage,el} - C_{storage,H_2}) H_2 \quad (6)$$

dove $C_{storage,el}$ e $C_{storage,H_2}$ sono i costi di stoccaggio dell'energia elettrica e dell'idrogeno (EUR/MWh), rispettivamente. In questo lavoro, $C_{storage,el}$ è stato assunto pari a 114.8 EUR/MWh, mentre $C_{storage,H_2}$ è stato assunto variabile tra 51 EUR/MWh [43] (scenario migliore) e 76 EUR/MWh (scenario peggiore) [44] per lo stoccaggio di idrogeno in giacimenti esauriti di gas naturale. In Tabella 7 si riporta un riepilogo dei benefici stimati.

Tabella 7. Risultati dell'analisi dei benefici.

Benefici, M EUR	2023–2030	2031–2035	2036–2040
<i>SCV</i> (SP–SM)	4.7–9.3	18.9–37.8	67.9–150.9
<i>BSL</i> (SP–SM)	91–136.5	218–327	298.5–444.7
<i>BSI</i> (SP–SM)	0	38.6–63.5	215.2–353.9
Benefici totali (SP–SM)	95.7–145.8	275.5–428.3	581.6–949.5

Per la valutazione del rapporto costi-benefici, data l'ampia variabilità degli scenari migliore e peggiore, sono stati considerati due valori minimo e massimo calcolati come segue:

$$\frac{B_{tot,att}}{C_{tot,att}} = \frac{\sum_t (SCV_t + BSL_t + BSI_t) FA_t}{\sum_t (CAPEX_t + OPEX_t + MIXED_t) FA_t} \quad (7)$$

$$FA_t = \frac{1}{(1+r)^t} \quad (8)$$

dove FA_t è il fattore di attualizzazione, r è il tasso di sconto sociale (assunto pari al 4%) e t è il numero di anni considerati nell'analisi.

In continuità con la prima parte, nella presentazione dei costi e dei benefici l'orizzonte temporale è stato limitato al 2040. Tuttavia, l'analisi è stata estesa fino al 2070, in quanto si prevede che il progetto presenti rilevanti benefici nel periodo successivo al 2040 (in termini di CO₂ evitata, nuovi occupati, benefici derivanti dallo stoccaggio). Infatti, l'analisi mostra come il progetto richieda un significativo contributo pubblico nel breve termine, mentre si autosostiene nel lungo periodo (cioè dopo il 2051, anno in cui la stima quantitativa dei benefici supera i costi), dove i benefici superano in maniera rilevante i costi. Pertanto, come precedentemente indicato, il rapporto costi-benefici si riferisce al periodo 2023-2070. Nei due scenari si ricava un valore del rapporto benefici/costi attualizzato pari a 1.1 e 1.9, rispettivamente nello scenario peggiore e migliore. Entrambi gli scenari risultano quindi ammissibili per l'investimento nel progetto. In termini di emissioni di CO₂ evitate, il progetto presenta un risparmio annuale limitato fino al 2035 (ad esempio, 31298 tonnellate nel 2034), mentre il risparmio annuale aumenta significativamente dopo il 2035 (206596 tonnellate all'anno dal 2035 al 2039 e 315210 tonnellate all'anno dal 2040 al 2070).

5. Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati discussi alcuni dei possibili usi dell'idrogeno nei settori industriali *hard-to-abate*, evidenziando le potenzialità di questo vettore energetico e il suo ruolo cruciale per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione al 2050.

È stato inoltre presentato e discusso il progetto per il recupero di un sito industriale dismesso nel centro Italia per la produzione, la distribuzione e il consumo di idrogeno verde su scala locale. Il progetto è finalizzato a promuovere l'utilizzo dell'idrogeno nei settori dell'industria e del trasporto pubblico, nonché a sostenere la ricerca, lo sviluppo tecnologico e l'innovazione relativi alla filiera dell'idrogeno. L'analisi effettuata ha evidenziato che:

- diverse aziende dell'area industriale sono pronte ad essere rifornite con una miscela di GN-H₂ con un contenuto di idrogeno pari al 10% entro il 2028, perché i loro sistemi di produzione necessitano di modifiche limitate;
- secondo le previsioni della domanda di energia dell'area, fino al 2030 sarà sufficiente un elettrolizzatore da 5 MW, mentre, secondo le fasi di sviluppo del progetto, la potenza dell'elettrolizzatore dovrà necessariamente aumentare fino a 20 MW con la possibilità di produrre circa 1000 tonnellate/anno di idrogeno verde;
- nello scenario a lungo termine, è prevista una riduzione della CO₂ prodotta fino a 31298 tonnellate/anno entro il 2030.

I risultati dell'analisi costi-benefici mostrano infine che sono necessari investimenti iniziali importanti che, nel breve termine, sono sostenibili solo con incentivi pubblici. D'altra parte, nel lungo periodo (cioè fino al 2070), il progetto diventa sostenibile poiché i benefici superano significativamente i costi.

Riferimenti

1. Bataille, C.G.F. Physical and Policy Pathways to Net-zero Emissions Industry. *WIREs Clim. Change* **2020**, *11*, doi:10.1002/wcc.633.
2. IRENA *Green Hydrogen for Industry: A Guide to Policy Making*; International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, 2022;
3. Messaoudani, Z. Iabidine; Rigas, F.; Binti Hamid, M.D.; Che Hassan, C.R. Hazards, Safety and Knowledge Gaps on Hydrogen Transmission via Natural Gas Grid: A Critical Review. *Int. J. Hydrog. Energy* **2016**, *41*, 17511–17525, doi:10.1016/j.ijhydene.2016.07.171.
4. Tsai, Y.-T.; Fu, T.; Zhou, Q. Explosion Characteristics and Suppression of Hybrid Mg/H₂ Mixtures. *Int. J. Hydrog. Energy* **2021**, *46*, 38934–38943, doi:10.1016/j.ijhydene.2021.09.145.
5. Stetsenko, A.A.; Nedzelsky, S.D.; Naumenko, V.A. The Effect of Hydrogen on the Physical Properties of Natural Gas and the Metrological Characteristics of Its Metering Systems. *Metrol. Instrum.* **2020**, *45–50*, doi:10.33955/2307-2180(6)2019.45-50.
6. Jaworski, J.; Kułaga, P.; Blacharski, T. Study of the Effect of Addition of Hydrogen to Natural Gas on Diaphragm Gas Meters. *Energies* **2020**, *13*, 3006, doi:10.3390/en13113006.
7. Jaworski, J.; Dudek, A. Study of the Effects of Changes in Gas Composition as Well as Ambient and Gas Temperature on Errors of Indications of Thermal Gas Meters. *Energies* **2020**, *13*, 5428, doi:10.3390/en13205428.
8. Dell'Isola, M.; Ficco, G.; Moretti, L.; Jaworski, J.; Kułaga, P.; Kukulska-Zajac, E. Impact of Hydrogen Injection on Natural Gas Measurement. *Energies* **2021**, *14*, 8461, doi:10.3390/en14248461.
9. Fennell, P.; Driver, J.; Bataille, C.; Davis, S.J. Cement and Steel — Nine Steps to Net Zero. *Nature* **2022**, *603*, 574–577, doi:10.1038/d41586-022-00758-4.
10. Marocco, P.; Gandiglio, M.; Audisio, D.; Santarelli, M. Assessment of the Role of Hydrogen to Produce High-Temperature Heat in the Steel Industry. *J. Clean. Prod.* **2023**, *388*, 135969, doi:10.1016/j.jclepro.2023.135969.
11. Fan, Z.; Friedmann, S.J. Low-Carbon Production of Iron and Steel: Technology Options, Economic Assessment, and Policy. *Joule* **2021**, *5*, 829–862, doi:10.1016/j.joule.2021.02.018.
12. Lu, L.; Pan, J.; Zhu, D. Quality Requirements of Iron Ore for Iron Production. In *Iron Ore*; Elsevier, 2015; pp. 475–504 ISBN 978-1-78242-156-6.
13. Yilmaz, C.; Wendelstorf, J.; Turek, T. Modeling and Simulation of Hydrogen Injection into a Blast Furnace to Reduce Carbon Dioxide Emissions. *J. Clean. Prod.* **2017**, *154*, 488–501, doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.162.

14. Bhaskar, A.; Assadi, M.; Nikpey Somehsaraei, H. Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen. *Energies* **2020**, *13*, 758, doi:10.3390/en13030758.
15. Battle, T.; Srivastava, U.; Kopfle, J.; Hunter, R.; McClelland, J. The Direct Reduction of Iron. In *Treatise on Process Metallurgy*; Elsevier, 2014; pp. 89–176 ISBN 978-0-08-096988-6.
16. Hay, T.; Visuri, V.-V.; Aula, M.; Echterhof, T. A Review of Mathematical Process Models for the Electric Arc Furnace Process. *Steel Res. Int.* **2021**, *92*, 2000395, doi:10.1002/srin.202000395.
17. Singh, R. Production of Steel. In *Applied Welding Engineering*; Elsevier, 2020; pp. 35–52 ISBN 978-0-12-821348-3.
18. Vogl, V.; Åhman, M.; Nilsson, L.J. Assessment of Hydrogen Direct Reduction for Fossil-Free Steelmaking. *J. Clean. Prod.* **2018**, *203*, 736–745, doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.279.
19. Wang, R.R.; Zhao, Y.Q.; Babich, A.; Senk, D.; Fan, X.Y. Hydrogen Direct Reduction (H-DR) in Steel Industry—An Overview of Challenges and Opportunities. *J. Clean. Prod.* **2021**, *329*, 129797, doi:10.1016/j.jclepro.2021.129797.
20. Liu, W.; Zuo, H.; Wang, J.; Xue, Q.; Ren, B.; Yang, F. The Production and Application of Hydrogen in Steel Industry. *Int. J. Hydrog. Energy* **2021**, *46*, 10548–10569, doi:10.1016/j.ijhydene.2020.12.123.
21. Cormos, C.-C. Decarbonization Options for Cement Production Process: A Techno-Economic and Environmental Evaluation. *Fuel* **2022**, *320*, 123907, doi:10.1016/j.fuel.2022.123907.
22. United Nations Environment Programme *2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*; 2021;
23. Fayomi, G.U.; Mini, S.E.; Fayomi, O.S.I.; Ayoola, A.A. Perspectives on Environmental CO₂ Emission and Energy Factor in Cement Industry. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2019**, *331*, 012035, doi:10.1088/1755-1315/331/1/012035.
24. International Energy Agency and Cement Sustainability Initiative *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*; 2018;
25. Jeffrey Rissman *Cement's Role in a Carbon-Neutral Future*; 2018;
26. Global Cement *Green Hydrogen for Grey Cement*; 2020;
27. Sintef *Report: Hydrogen for Europe*; 2019;
28. Energy Efficiency *Deep Decarbonisation of Industry: The Cement Sector*; 2020;
29. Jay Bartlett; Alan Krupnick *Decarbonized Hydrogen in the US Power and Industrial Sectors: Identifying and Incentivizing Opportunities to Lower Emissions*; 2020;
30. Snam; Terna *Scenari Di Riferimento per Il Piano Di Sviluppo Delle Reti Di Trasporto Del Gas 2022-2031*;
31. Snam; Terna *Scenario National Trend Italia*;
32. ENTSOs *TYNDP 2020 - Scenario Report*;
33. Sapountzi, F.M.; Gracia, J.M.; Weststrate, C.J. (Kees-J.; Fredriksson, H.O.A.; Niemantsverdriet, J.W. (Hans) Electrocatalysts for the Generation of Hydrogen, Oxygen and Synthesis Gas. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2017**, *58*, 1–35, doi:10.1016/j.pecs.2016.09.001.

34. Mazza, A.; Bompard, E.; Chicco, G. Applications of Power to Gas Technologies in Emerging Electrical Systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *92*, 794–806, doi:10.1016/j.rser.2018.04.072.
35. *PEM Electrolysis for Hydrogen Production: Principles and Applications*; Bessarabov, D.G., Wang, H., Li, H., Zhao, N., Eds.; CRC Press: Boca Raton, Florida, 2016; ISBN 978-1-4822-5232-3.
36. Yates, J.; Daiyan, R.; Patterson, R.; Egan, R.; Amal, R.; Ho-Baille, A.; Chang, N.L. Techno-Economic Analysis of Hydrogen Electrolysis from Off-Grid Stand-Alone Photovoltaics Incorporating Uncertainty Analysis. *Cell Rep. Phys. Sci.* **2020**, *1*, 100209, doi:10.1016/j.xcrp.2020.100209.
37. Mehmeti, A.; Angelis-Dimakis, A.; Arampatzis, G.; McPhail, S.; Ulgiati, S. Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies. *Environments* **2018**, *5*, 24, doi:10.3390/environments5020024.
38. Yates, J.; Daiyan, R.; Patterson, R.; Egan, R.; Amal, R.; Ho-Baille, A.; Chang, N.L. Techno-Economic Analysis of Hydrogen Electrolysis from Off-Grid Stand-Alone Photovoltaics Incorporating Uncertainty Analysis. *Cell Rep. Phys. Sci.* **2020**, *1*, 100209, doi:10.1016/j.xcrp.2020.100209.
39. Mehmeti, A.; Angelis-Dimakis, A.; Arampatzis, G.; McPhail, S.; Ulgiati, S. Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies. *Environments* **2018**, *5*, 24, doi:10.3390/environments5020024.
40. Rahil, A.; Gammon, R.; Brown, N.; Udie, J.; Mazhar, M.U. Potential Economic Benefits of Carbon Dioxide (CO₂) Reduction Due to Renewable Energy and Electrolytic Hydrogen Fuel Deployment under Current and Long Term Forecasting of the Social Carbon Cost (SCC). *Energy Rep.* **2019**, *5*, 602–618, doi:10.1016/j.egy.2019.05.003.
41. International Energy Agency *World Energy Model Documentation*; 2021;
42. EPA *Quantifying the Multiple Benefits of Energy Efficiency and Renewable Energy*;
43. European Hydrogen Backbone; Gas For Climate *Analysing Future Demand, Supply, and Transport of Hydrogen*; 2021;
44. European Commission. Directorate General for Energy.; Guidehouse.; Tractebel Impact. *Hydrogen Generation in Europe: Overview of Costs and Key Benefits.*; Publications Office: LU, 2020;

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Valorisation of olive mill wastes for biostimulant, biogas and soil organic fertilizer production

Daniela Pezzolla¹, Daniele Del Buono², Ciro Tolisano², Dario Priolo², Marco Rallini¹, Claudia Zadra³, Luigi Torre¹, Debora Puglia¹, Giovanni Gigliotti¹

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, University of Perugia, UdR INSTM, Strada di Pentima 4, 05100, Terni, Italy

² Department of Agricultural, Food and Environmental Sciences, University of Perugia, Borgo XX Giugno, 06121 Perugia, Italy

³ Department of Pharmaceutical Sciences, University of Perugia, via del Liceo,1, 06123 Perugia, Italy

*Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: daniela.pezzolla@unipg.it

Abstract: The extraction of bioactive substances and nutrients from olive mill wastes to produce biostimulants and biofertilizers and bioenergy recovery from the residual biomasses are identified as new agroecological farming solutions to enhance the agroecosystem resilience under a circular economy perspective. In this framework, solid and liquid olive mill wastes were collected to determine the main chemical properties. Preliminary analyses showed that pomace derived from three-phase processing was suitable for lignin isolation. To this end, the biopolymer recovery was achieved by applying a treatment based on an ionic liquid (IL - triethylamine-sulfuric acid - [Et₃NH][HSO₄]). This procedure was effective and allowed obtaining of lignin nanoparticles (LNPs). In addition, increasing the stoichiometric ratio favoring sulfuric acid over triethylamine made it possible to raise the yield of LNPs. Subsequently, the nanoparticles were characterized by using FE-SEM, TGA and FTIR spectroscopy analyses. Finally, LNPs were tested on maize plants, and some benefits were found. With the main aim of closing the cycle, the residual biomass from previous extraction processes has been characterized for further use in anaerobic digestion to optimize biogas production. In parallel, olive mill wastewaters were characterized for the extraction of bioactive compounds.

Keywords: lignin; biostimulant; nanolignin; pomace; ionic liquid; cellulose, anaerobic digestion.

1. Introduction

In the last fifty years, agriculture has significantly increased its productivity, leading to intensive pressure on the environment that needs to be seriously considered. The high inputs of synthetic products, the increase in greenhouse gas (GHG) emissions, the high water consumption for irrigation, and the release of polluting compounds into soil and water are expected to have impacts on the sustainability of agroecosystems [1-3]. Hence, the main consequences of intensive agriculture are the unsustainable use of natural resources, which has an adverse effect on soil fertility and biodiversity, and the degradation of the environment as a result of pollutants release. Therefore, more sustainable approaches are required to enhance agroecosystem resilience, promoting innovative farming systems and avoiding disturbances in the long term.

The olive chain in the Mediterranean area has significant social and economic implications, as well as impacts on the agroecosystem, generating a high amount of olive mill waste in a relatively short period of time. Indeed, 9.6 million tons of olive mill waste are estimated to produce annually in European producer countries [4], representing several environmental risks due to the high concentration of polluting substances.

Olive milling wastes can derive from two types of olive processing (two- and three-phase systems), which differ in the amount and chemical composition of their respective residues. Olive mill wastewater (OMWW), olive mill solid wastes (OMSW), and pomaces (POM), which are the main residues of olive-oil chain production, are characterized by a low pH, high salinity, organic matter, and phenolic and lipidic compounds and nutrients. Hence, the uncontrolled reuse of olive mill wastes as fertilizer can be a cause of negative effects on soil and groundwater [5]. It is also true, from the perspective of the circular economy, recycling agricultural waste is crucial in the transition toward sustainable agriculture. The by-products obtained from olive extraction can be valorized for producing bio-based products (biostimulants and biofertilizers), employable for increasing resistance to stress, crop yield, and soil fertility, while lowering the environmental impact of chemical inputs [3]. The recovery of nutrients from olive milling wastes can be translated into the possibility of protecting natural resources and minimizing or eliminating the environmental impact of waste, providing *biofertilizers* and *plant biostimulants* for improving crop performance and stress tolerance. Additionally, it is important to explore the effectiveness of these wastes to produce value-added products as natural-lignin-derived biopolymers, that can gradually release nutrients or other active substances into the soil without accumulating harmful waste. Indeed, *biopolymeric nanomaterials* can represent a valuable solution to minimize the use of fertilizers or stimulants and to have a controlled release of nutrients and bioactive compounds. Finally, the remaining biomass from the recovery of high-value bioproducts can be used to recover *bioenergy* as biogas, lowering the carbon footprint of all the valorization processes of olive milling waste.

Within the project 4BIOLIVE “Production of Biostimulants, Biofertilizers, Biopolymers and Bioenergy from OLIVE-oil chain residues and by-products” (<https://www.4biolive.eu/our-project/>), sustainable farming solutions are studied to enhance the agroecosystem resilience, by using an integrated approach thanks to the involvement of a multidisciplinary consortium (University of Perugia, Universitat Politècnica de Catalunya, National Institute of Agronomic Research of Algeria,

Institution of Agricultural Research and Higher Education Chott-Mariem, Institut Supérieur des Etudes Appliquées en Humanités de Mahdia/University of Monastir).

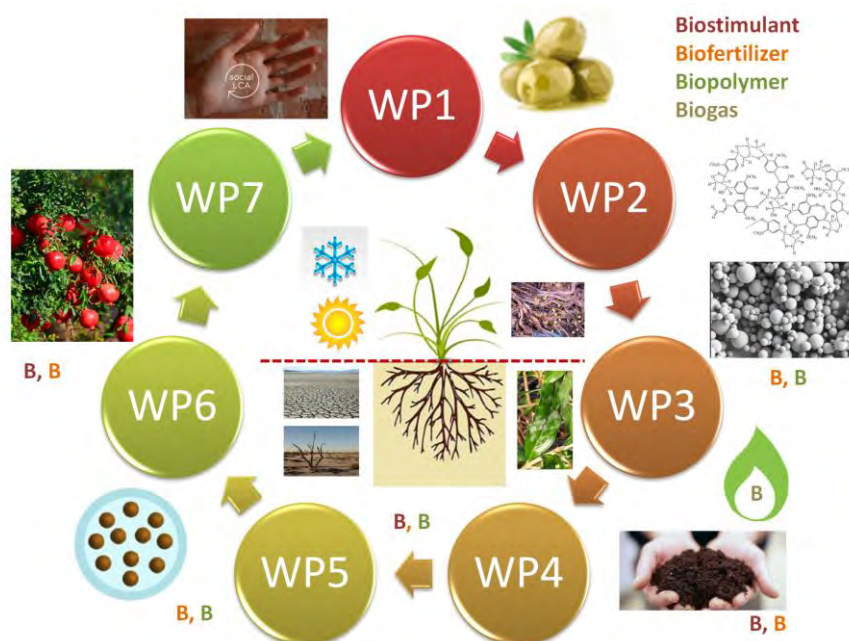
According to a circular economy perspective, new proposed farming solutions to improve agroecosystem resilience are the recovery of bioactive substances and nutrients from olive mill wastes to produce biostimulants and biofertilizers, the valorization of the lignocellulosic fraction to obtain biopolymers, and the recovery of bioenergy from residual biomass. The evaluation of potential socio-economic and environmental impacts of the innovative bioproducts in the Mediterranean area is also considered.

The project development includes 4 phases (**Figure 1**):

- Phase 1: Selection and characterization of olive mill wastes, with the identification of high-value ingredients and extraction of biostimulants and biofertilizers (WP1).
- Phase 2: Processing of raw materials and lignocellulosic fractions to obtain biostimulants, biofertilizers and carriers for the controlled release of bioactive compounds, valorisation of the residual biomass after extraction of high-value bioproducts for biogas production, evaluation of the effects on plant and soil (WP2-WP3-WP4-WP5).
- Phase 3: Trials to test the effectiveness of biostimulants, biofertilizers and biopolymers on fruit orchards (WP6).
- Phase 4: Adoption of environmentally, socially and economically sustainable agroecosystems (WP7).

Two additional transversal WPs regarding dissemination/exploitation of the project results (WP8) and management (WP9) are also included.

Figure 1. Methodology proposed in 4BIOLIVE project (<https://www.4biolive.eu/methodology/>)



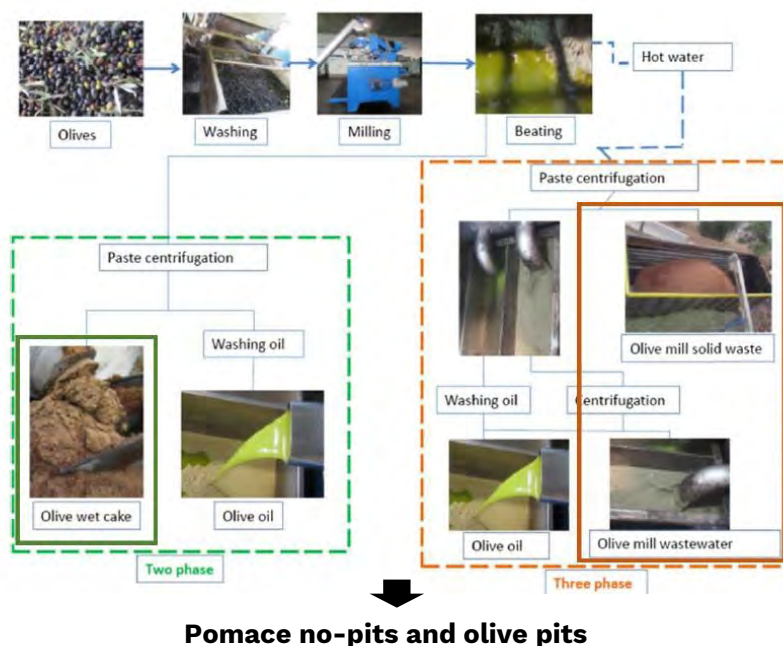
This work shows the results of activities for WP1 and WP2, in particular the use of lignin nanoparticles as biostimulants and the partial characterization of the residual biomass after applying extraction processes. Moreover, olive mill wastewater was used for the extraction of bioactive compounds.

2. Materials and Methods

2.1 Biomasses collection and characterization

Olive mill wastes were collected at “Frantoio Centumbrie” near Perugia (Italy) (**Figure 2**). In particular, olive wet cake (two-phase pomace), olive mill solid waste (three-phase pomace) and pomaces without pits, obtained from the processing of olives from different cultivars, were considered for lignin isolation.

Figure 2. Olive mill waste collection



These biomasses were then characterized for their main physico-chemical properties and fiber fractionation (Neutral Detergent Fiber, Acid Detergent Fiber and Acid Detergent Lignin) to select the best materials for lignin isolation. The olive mill wastewaters (OMWW) were analyzed for the extraction of bioactive compounds.

2.2 OMWW treatment to recover bioactive compounds

Different methodologies for the recovery of polyphenols and flavonoids from OMWW have been considered, identifying and quantifying the main compounds in different extracts. OMWW was treated with a non-polar solvent for removing the fat portion (defatting) before extracting polyphenolic and flavonoid compounds.

The extraction of phenolic compounds and flavonoids was performed with two different methods by using different mixtures of organic solvents in different ratios, giving extract L1 and extract S1.

After centrifugation and filtration, both extracts were analyzed for the total phenolic content (Folin-Ciocalteu assay), flavonoid concentration (AlCl₃ method) and the antioxidant activity (DPPH assay). All determinations were run in triplicate.

The polyphenolic and flavonoid fractions obtained were both a) enzymatically hydrolyzed and analyzed for the content of bioactive compounds, and b) partitioned with EtOAc. The procedures were repeated three times. Finally, the organic phase was collected and evaporated under vacuum and analyzed for the content of bioactive compounds by GC-MS analysis after derivatization, by HPLC and by LC/MS/QTOF analysis.

2.3 Ionic liquid synthesis, lignin nanoparticles obtainment and their characterization

Based on the previous characterization, we considered the three-phase pomace the suitable matrix for obtaining lignin. To this scope, the treatment with an ionic liquid (IL - triethylamine-sulfuric acid - [Et₃NH][HSO₄]) was considered. IL was synthesized by modifying the stoichiometric ratio Et₃N/H₂SO₄. Then, different concentrations of IL (80%, 90% and 95%), obtained by adding aliquots of water (20 %, 10 % and 5 %), referred to as LN_IL80, LN_IL90 and LN_IL95, were used to treat the pomace. Once the pretreatment step was completed, filtration to remove the pulp rich in cellulose and other interfering substances, elimination of hemicelluloses and precipitation of lignin in water, and repeated cycles of washing using formic acid and water allowed for obtaining pure and nano-scaled lignin.

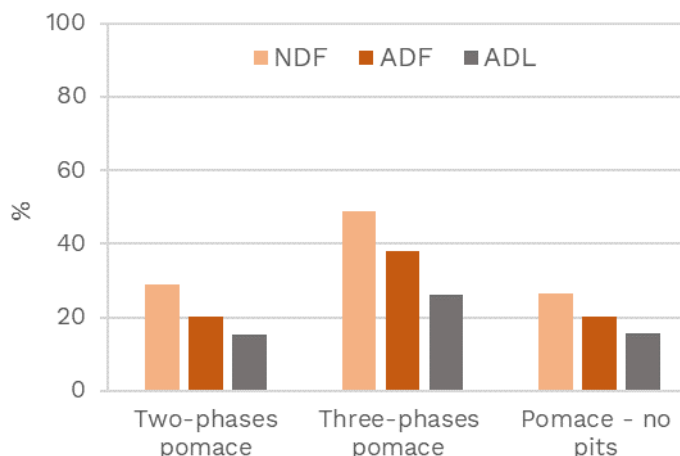
2.4 Experiments on maize plants

The effect of lignin nanoparticles obtained treating pomace with IL_95 was assessed in maize grown under controlled conditions. Specifically, the plant was subjected to several treatments with LNPs, suspended in water (pH 7) by sonication. The doses selected for were 25, 50 and 200 mg L⁻¹. LNPs were applied to maize shoots one and two weeks after sowing, and measurements were made after an additional week (in total, three weeks of growth).

3. Results

3.1. Main physico-chemical properties of pomaces

The results of the characterization showed that the three-phase pomace had the lowest content of total N, total P and total K among all pomaces, but the highest content of lignin fraction, represented by the Acid Detergent Lignin fraction (ADL) as reported in **Figure 3**. Based on the obtained results, pomace derived from the three-phase has been considered suitable for lignin isolation.

Figure 3. Fiber analysis of pomaces

3.2. Characterization of OMWW extracts

The results showed that the extract L1 after enzymatic hydrolysis has a higher content of TPC and TF, but a low antioxidant activity with respect to extract S1, which has a similar TPC and TF content but an antioxidant activity twice than the previous. The undetectable presence of gallic acid in L1 extract and the high concentration of chlorogenic acid and rutin, in comparison to the S1 extract, has suggested calculating the total phenolic and flavonoids compounds concentration, and the related antioxidant activity, also by using chlorogenic acid and rutin as reference standards in the respective assay. The results confirmed that the L1 extract possessed the best characteristics in terms of concentration of bioactive compounds, such as hydroxytyrosol, homogentisic acid, chlorogenic acid and related antioxidant activity.

3.3. Ionic liquid characterization and obtainment of LNPs from pomace

Figure 4 shows some pictures of the IL during synthesis and the results of its FTIR characterization. The data indicate the typical functional groups present in this compound. Specifically, the absorptions at 2815 cm^{-1} , 1398 cm^{-1} , 1233 cm^{-1} and 869 cm^{-1} are due to NH bonds, methyl group, CN and SO_2 . The IR absorption peak at 1438 cm^{-1} is due to the specific absorption of the CH_2 group, and 1041 cm^{-1} indicates the SO group.

Figure 4: IL during the synthesis, cooling and precipitation phase and its FTIR spectrum

The signals of FTIR characterization (ATR, KBr transmission mode, 4000–600 cm^{-1} range) of lignin obtained after IL treatment were assigned to the characteristic lignin components. In particular, some signals were of guaiacyl and syringyl monolignol groups of lignin. Lignin thermal decomposition (TGA analysis by heating the samples from 30 to 900 °C at 10 °C min^{-1} under nitrogen flow) started by water release, followed by multiple peaks between 200 and 400 °C, with low molecular weight products formed.

The main decomposition peak was in the range 300–400 °C. The main thermal degradation peak (300-400°C) of LN_IL80 was characterized by the presence of double points centred at 340 °C and 366 °C: the IL treatment breaks down lignin and separates it into fractions with different chemical compositions. Finally, the cleavage of the main lignin chain was followed (above 500 °C) by condensation reactions and several rearrangements of the aromatic structure that led to the formation of char structures.

The residual mass values at 900 °C were estimated to be 33%, 44% and 47% for LN_IL80, LN_IL90 and LN_IL95, respectively: the difference in the loss weight of the three lignins can be explained by considering that decrease in the hydroxyls groups from phenolic in lignins allow the prevention of auto condensation of lignin during thermal decomposition. IL treatment would generate some more condensed aromatic structures leading to higher stability.

The morphology of lignin obtained by extracting olive pomace with different percentages of IL (FESEM morphology by Supra 25-Zeiss microscope) showed the extractive method efficacy, which permits obtaining lignin-based materials at the nanoscale (less than 100 nm). LN_IL80 showed the presence of unreacted particles, while LN_IL90 and LN_IL95 showed the presence of more defined nanostructures.

The amount of unreacted material decreased by increasing the IL concentration. We found that the higher concentration of the IL and the applied procedure can control the particle size of the lignin.

3.4. Biostimulants effect of lignin nanoparticles on maize

Generally, the LNPs positively influenced shoot length and weight compared to control samples. In addition, the treated samples exhibited longer roots and increased volume and surface area. The leaf area was significantly increased by the LNPs concentration of 25 mg L^{-1} . Likewise, it has been demonstrated as lignin can stimulate shoot and biomass production in other species, in a dose-dependent manner [6].

Lignin and its phenolic compounds can stimulate plant growth thanks to a hormone-like effect occurring during the early phase of seedling [7-8] development. In particular, the syringyl group can exert a gibberellin-like activity which prompts seedling development. The effect on shoot and root development can also be ascribed to the guaiacyl group of lignin, which can exert a biostimulating effect on plants [9].

Regarding photosynthetic pigments, an increase in those primarily involved in photosynthesis was recorded. The increased chlorophyll content can be linked to improved efficiency in N acquisition in LNPs treated plants [10].

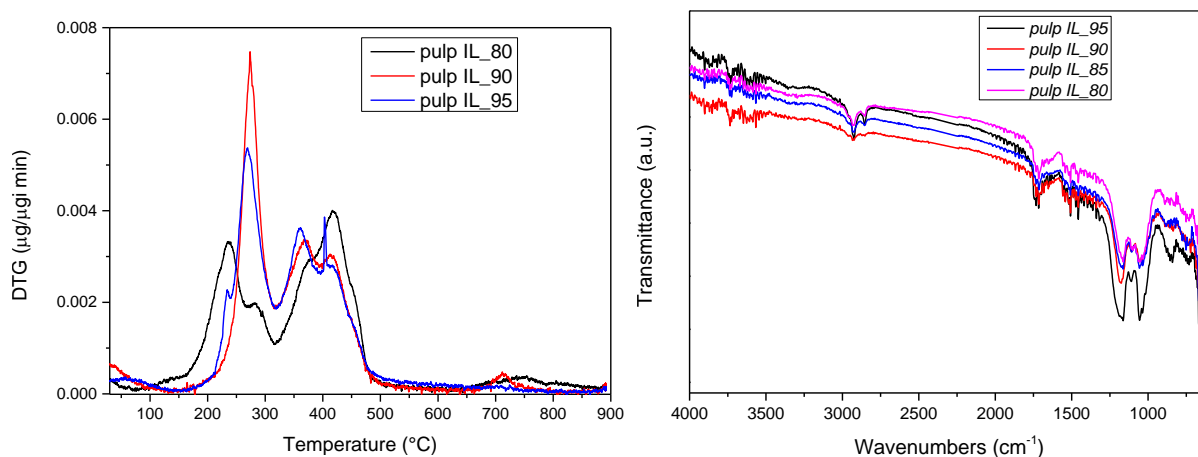
3.5. Formulation of a biostimulant based on lignin nanoparticles and phenolic extracts

Known that lignin-based nanoformulations can encapsulate both hydrophobic and hydrophilic compounds, due to their unique properties and owing to their small size, lignin nanoparticles could also enhance the uptake and translocation of substances in plants. According to these promising results, different LN-PCs (combination of phenolic extracts and lignin nanoparticles) have been considered to find a possible synergy between lignin and phenolic extracts (tip sonication for 10 minutes with Vibracell750 of the extract-LN combined to give 200 ppm) of RL, S1 and L1 extract (RL = freeze-dried aqueous fraction from OMWW after extraction of the lipid fraction; S1 = SLE with EtOAc at the ratio sample/solvent 1:1, for 1h in an ultrasound bath, at room temperature; L1 = MeOH/H₂O/MeOH-HCOOH 0.1%/MeCN (1/1/8/5) at the ratio sample/solvent 1:1, for 1h in an ultrasound bath, at room temperature) with LN.

3.6. Characterization of residual biomass

The cellulosic biomass as the residue of IL treatment of OMSW was characterized by TGA and FTIR, results can be found in **Figure 5**.

Figure 5. Results of TGA and FTIR characterization of residual biomass (pulp) after lignin extraction



We observed that, during the thermal degradation in inert conditions, pulp samples exhibited a multistep decomposition profile, with enhanced stability for the sample pulp IL_95: the first step between 40 and 130 °C, corresponds to the evaporation of water entrapped into the molecular structure of each fraction. The second step starts around 150 °C and extends to 500 °C. In the first, the degradation of hemicellulose between 150 and 300 °C followed by degradation of cellulose up to 400 °C was found. Thermal degradation of the hemicellulose is between 220 and 315 °C, and cellulose thermal degradation ranges from 315 to 400 °C. Regarding FTIR results, the major peak assignments include polysaccharides components: multiple C-H stretching vibrations at 2850 that assigned to CH₂ and 2919 cm⁻¹ ascribed to CH₂ and C-H in cellulose. The absorption bands at 1167 cm⁻¹ is related to the crystalline form of cellulose, characteristics of the C-O-C asymmetric bridge stretching vibration of the glycosidic ring. The fingerprint region of cellulose showed a prominent signal centered at 1052

cm⁻¹ (C-O). Concerning the band at 843 cm⁻¹ ascribed to C-O-C stretching vibration mode of cellulose is completely in accordance with published literature studies.

4. Conclusions

The results showed that olive mill wastes can be valorized for the production of biostimulants for their high content of added-value compounds, such as polyphenols, flavonoids and lignin. Specifically, the lignin nanoparticles used as biostimulants had a positive effect on maize (shoot length and weight), as well as on photosynthetic pigments. Even the analysis of bioactive compounds showed encouraging results, hence a new formulation of a biostimulant based on lignin nanoparticles and phenolic extracts has been considered. Finally, the characterization of the pulp (residual biomass) by TGA and FTIR showed, as expected, a high presence of cellulose.

Acknowledgments

This work received support from the PRIMA program (supported by EC) under grant agreement ID 1551, Project 4BIOLIVE.

References

- [1] Del Buono, D.; Terzano, R.; Panfili, I.; Bartucca, M.L. Phytoremediation and detoxification of xenobiotics in plants: herbicide-safeners as a tool to improve plant efficiency in the remediation of polluted environments. A mini-review. *International journal of phytoremediation*, **22**(8), 789-803.
- [2] Duque-Acevedo, M.; Belmonte-Urena, L. J.; Cortés-García, F. J.; Camacho-Ferre, F. Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. *Global Ecology and Conservation* **2020**, *22*, e00902.
- [3] Puglia, D.; Pezzolla, D.; Gigliotti, G.; Torre, L.; Bartucca, M.L.; Del Buono, D. The Opportunity of Valorizing Agricultural Waste, Through Its Conversion into Biostimulants, Biofertilizers, and Biopolymers. *Sustainability* **2021**, *13*, 2710.
- [4] Berbel, J.; Posadillo, A. Review and Analysis of Alternatives for the Valorisation of Agro-Industrial Olive Oil By-Products. *Sustainability* **2018**, *10*, 237.
- [5] Caputo, M. C.; De Girolamo, A. M.; Volpe, A. Soil amendment with olive mill wastes: Impact on groundwater. *Journal of environmental management* **2013**, *131*, 216-221.
- [6] Zhu, J.; Tan, X.; Hafid, H. S.; Wakisaka, M.. A novel strategy to promote microalgal growth and lipid productivity by supplementation of lignin related phenolic elicitors. *Fuel* **2023**, *334*, 126775.
- [7] Savy, D.; Cozzolino, V.; Drosos, M.; Mazzei, P.; Piccolo, A. Replacing calcium with ammonium counterion in lignosulfonates from paper mills affects their molecular properties and bioactivity, *Science of The Total Environment* **2018**, *645*, 411-418,
- [8] Savy, D.; Cozzolino, V. Novel fertilising products from lignin and its derivatives to enhance plant development and increase the sustainability of crop production. *Journal of Cleaner Production* **2022**, *366*, 132832.

- [9] Savy, D.; Brostaux, Y.; Cozzolino, V.; Delaplace, P.; Du Jardin, P., Piccolo, A. Quantitative structure-activity relationship of humic-like biostimulants derived from agro-industrial byproducts and energy crops. *Frontiers in Plant Science* **2020**, *11*, 581.
- [10] Del Buono, D.; Luzi, F.; Puglia, D. Lignin Nanoparticles: A Promising Tool to Improve Maize Physiological, Biochemical, and Chemical Traits. *Nanomaterials* **2021**, *11*, 846.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Combining Slinky GHEX and hybrid heat pump for renewable energy retrofit of a historic building: results from an in-field monitoring campaign

Silvia Cavagnoli^{1,*}, Claudia Fabiani^{1,2}, Henk Witte³, Antonino Bonanno⁴, Valeria Palomba⁴, Andrea Frazzica⁴, Franco Cotana^{1,2} and Anna Laura Pisello^{1,2}

¹ CIRIAF - Interuniversity Research Center, University of Perugia, Perugia, Italy

² Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 97, 06125 Perugia, Italy

³ Groenholland Geo-Energysystems, Valschermkade 26, 1059CD Amsterdam, The Netherlands

⁴ Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia "Nicola Giordano", CNR ITAE, Messina, 98126, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: silvia.cavagnoli@studenti.unipg.it

Abstract: Italy boasts a rich cultural heritage, with many historic buildings dating back to the mid-1900s. However, these buildings are in dire need of energy retrofit, as the building sector is responsible for a significant portion of the EU's greenhouse gas emissions. Even in historic contexts, building energy efficiency has become essential. To address this issue, an innovative geothermal system has been installed in a historic fortress in a rural central Italy. The system harnesses the shallow geothermal energy of the ground for internal conditioning, with a crucial role played by the Slinky horizontal Geothermal Heat EXchangers (Slinky GHEX). These closed-loop polyethylene pipes allow a fluid to flow and exchange thermal energy with the ground. An innovative thermal monitoring system using a fiber optic cable (FOC) continuously monitors the temperature field in the ground. This system evaluates the effect of the GHEX on the underground and better evaluates the performance of the new technology. The Building Management System (BMS) controls the complex hybrid solution employing dedicated setpoints and time schedules and monitors both system and building room temperatures. To demonstrate its potential, monitoring and analysis of the system during specific selected dates of the winter period are presented, combining ground monitoring and heat pump data. Results show that the presented geothermal system allows for the pursuit of sustainability goals, enables the installation of a shallow geothermal system, and makes the fortress more energy efficient with a single heating/cooling system by taking advantage of renewable energy.

Keywords: Renewable energy; Geothermal energy; Ground Source heat pump; Hybrid system; Historic building; Energy efficiency; Energy retrofit; Building Management System; Geofit H2020.

1. Introduction

Energy efficiency is a critical issue that must be prioritized in the construction sector. Energy upgrading allows a structure's cost-benefit ratio to be reviewed and improved, seeking to take action to reduce energy expenditures, strengthen energy supply, and reduce emissions of gases and other pollutants. To this end, the European Commission recognizes the importance of energy efficiency and has made it a key principle for future projects and decisions [1]. To achieve this goal, researchers and practitioners must focus on circularity and improved resource use, including a transition to renewable energy sources. This approach should be applied to both new constructions and existing buildings, only as only a small percentage of Italy's building stock has undergone improvements.

According to the ISTAT census [2], it was found that about a quarter of Italy's residential stock consists of buildings constructed in the mid-1900s and 15 % in the early 1900s, with many abandoned or unused due to structural problems or disrepair. For these reasons, there are studies in the literature that seek effective solutions for the renovation of Italy's building stock. For example, Ballarini et al. [3] analyzed the energy performance of various buildings and proposed four different energy efficiency measures that could be implemented at both the building envelope and system level. Similarly, Ascione et al. [4] conducted a case study on the efficiency upgrading of buildings located in three different Italian cities, which involved interventions in both the thermal and the lighting systems [5].

In addition to taking action on envelopes and systems, a highly effective strategy for meeting energy demand is to harness renewable energy [6]–[8]. Renewable energy is a viable alternative to fossil fuels such as oil, gas, and coal, which are widely used daily but are produced by the environment very slowly. In contrast, renewable energies offer several advantages: they are stable and steady, simple to harness, and most importantly, do not emit pollutants [9].

Integrating renewable energy systems into structures is a crucial aspect of achieving energy efficiency. With these innovative systems, it is possible to cover the demand for heating/cooling, electricity, and domestic hot water production. Indeed, energy demand is always growing, and several technologies are being developed to achieve savings. The application and development of a solar [10], [11], wind [12], [13], biomass [14], [15], hydro [16], [17] and hybrid [18]–[20] systems allow for the development and production of clean energy for use in different areas.

These systems have the potential to revolutionize the implementation of Nearly Zero Energy Buildings (NZEB) [21], [22] and can even be integrated façade retrofits [23], [24], combined with passive strategies [25] or applied to systems [26].

One of the most promising renewable sources is the geothermal energy, can be harnessed for building retrofits. In general, geothermal energy is generated from geological sources of heat and a

reliable and renewable energy source that relies on harnessing the heat contained in the planet.

Geothermal heat exchangers are usually connected to a Ground Source Heat Pump (GSHP), which is an active system that, using heat exchangers, extracts heat from the ground and transfers it to a building for heating (in winter) or for cooling (in summer) by reversing the direction of the heat pump [27]. There are numerous applications that analyze the performance of these heat pumps. For instance, Luo et al. [28], conducted a study that examined the thermal performance of a GSHP installed for air conditioning a building.

They analyzed the coefficient of performance (COP) and energy efficiency index, along with additional benefits achieved. It is worth noting that heat pumps can also extract heat from solar energy. In this case they are coupled with rooftop solar thermal collectors that are useful for balancing ground loads in cold climates [29]. Recent research studies have found that combining a GSHP with solar collectors can increase the COP of the system in mild climates [30]. Given the importance of the climatic conditions in which the system has to be installed and the proper design of the system without over/under-dimensioning it, Carnieletto et al. [31] developed a profile database that takes into consideration the relationship among building type, energy demand, and climatic conditions. The extreme optimization of these systems makes them particularly in need of continuous thermal and energy monitoring. This is usually done by using a network of one-spot thermal sensors such as thermocouples or thermoresistors. However, recent advancements have been considering the possibility of using fiber optic cables (FOC). Okazaki et al. [32] used this type of sensor to detect silica scale formation in geothermal water. On the other hand, Scholderle et al. [33] used FOC to monitor a geothermal well in Germany, while Yu et al. developed a prototype FOC that can measure at great depths and was tested in a geothermal site in Taiwan [34].

In this context, this paper introduces an innovative retrofitting an Italian fortress with an energy efficient geothermal system. An innovative strategy involving the integration of a hybrid geothermal heat pump, which can both heat and cool the fortress, with shallow slinky heat exchangers (SLINKY GHX) is presented. The goal is to showcase the potential of this system and to establish a correlation between the ground thermal monitoring data, GSHP data, and building environmental data. By doing so, we hope to demonstrate the effectiveness of this approach and its potential for widespread adoption in similar retrofitting projects. Overall, this paper represents a significant step forward in the field of energy-efficient historic building retrofits and highlights the importance of innovative solutions in addressing the challenges of climate change.

2. Case study

The subject of this case study is the stable building of the medieval fortress of Sant'Apollinare, located in Marsciano, Italy (represented in Figure 1). This impressive structure dates back to the 17th-18th centuries and has undergone various restoration and seismic adaptation processes. These efforts have included the implementation of innovative strategies for urban heat island mitigation. Today, the fortress serves as a research center and interdisciplinarity hub for congresses, laboratories, and demonstrator of retrofit applications and technologies. It is also open to the public, providing a unique

opportunity for visitors to witness the successful integration of historical preservation and modern sustainability practices.

Figure 1. Fortress of Sant'Apollinare in maps [Google Maps] and exterior and interior view.



The building boasts three floors, including two spacious 140 m² floors and a basement of 70 m². The ground floor houses the secretary's and management office, a waiting room, and a multi-purpose meeting room. Meanwhile, the second floor houses the offices of professors and doctoral students working in the fortress. On the other hand, the basement has a small workshop/storage room and has access to the outside.

The interventions carried out in the Sant'Apollinare Fortress resulted in a building that is highly sustainable. In fact, it is the first example of the implementation of the GBC HB (Historic Building) protocol to achieve gold certification. All interventions carried out with the utmost care to safeguard the pre-existing structure, using materials that did not alter its appearance while respecting its historical and cultural value.

The application of aged-effect tiles made of brick with spray engobe produce cooling benefits for the building due to its high solar reflectance, a common characteristic of the gravel used for the outdoor space that improves its albedo.

Special attention was paid to input and output materials. Low-impact materials were chosen for restoration work, and reusable materials were recycled or salvaged. Separate waste collection was also arranged along with an area for storing materials for recycling. Rainwater is also reclaimed with special pipes to reuse it for irrigation and feeding the toilets.

To ensure optimal air recirculation and high level of indoor air quality, a mechanical ventilation system was designed, and smoking was prohibited near the fortress. Also inherent to indoor comfort, each room has a lighting system with energy-saving LED lamps and is equipped with a thermostat to adjust the temperature to the occupants' liking (Figure 2).

To further increase the sustainability of the site and improve indoor thermal comfort, a ground source heat pump was installed during the GEOFIT H2020 project (Deployment of novel geothermal systems, technologies, and tools for energy efficient building retrofitting). The innovative system features a hybrid heat pump connected to a geothermal field that can heat and cool the building through the HVAC system and radiant floor system.

Figure 2. Sustainability strategies for the site

3. Methodological framework

In this paper, the interaction between the ground and the innovative heat pump in heating operation (winter season) is presented and their detailed description are in Section 3.1 and Section 3.2.

The heat pump has been set in heating operation since 18th November 2022, and the whole system (heat pump + geothermal field) is in continuous monitoring with three levels of data acquisition and monitoring:

- Building management system (BMS)
- Heat pump detail monitoring (Climatix SCOPE software)
- Detailed temperature monitoring of the ground (Distributed Temperature Sensing - DTS)

BMS makes use of a MODBUS RS485 routine to monitor indoor microclimate parameters, outdoor temperature, and system operating parameters. It also allows to set the operation mode, setpoint parameters, and time schedules for all the systems in the building, including the heat pump. The BMS of the Sant'Apollinare Fortress consists of two interconnected environments: the XWEB EVO and the I-PRO (e.REMOTE) (Figure 3). Specifically, the XWEB EVO continuously processes and analyzes all parameters and sensors placed within the Fortress and connected to the BMS, it provides triggers and alarm messages, highlighting any problems or disconnections. All monitored parameters can be read in real time, or in a specific time window with a specific sampling rate and the data can be downloaded as Excel files.

Some of the main system parameters that can be monitored are the following:

- Internal inlet and outlet circuits of the high, medium and low temperature of the heat pump (HT, MT and LT circuits);
- the flow and return fluid temperatures to the geothermal field;
- the fluid temperatures inside the heat exchangers and their pressure.

Figure 3. Fortress BMS – XWEB EVO (left) and e.REMOTE (right)



The e.REMOTE manages the operation of the systems, and consequently, the heat pump. It allows the user to choose the mode of operation (heating or cooling) and define the setpoint temperatures for each floor of the building. These settings can be turned off, managed automatically, or manually. When the system is not working (OFF), the system operates according to the antifreeze temperature. If the heat pump is turned on and set on automatic (AUTO), the system operates according to the economy and comfort temperature according to certain time schedules. Finally, when it is on manual mode (MAN) the system operates according to the temperature levels set manually for each room.

During the monitored period, the system was in heating operation and automatic mode. The economy and comfort temperature set for the ground floor and second floor are the same, while for the basement they are lower. In more detail, the economy temperature refers to the minimum temperature that should be maintained inside the room when the building is unoccupied. The comfort temperature is the minimum temperature that should be guaranteed when the building is occupied. For this purpose, time schedules have been set to run at comfort temperature from 7 a.m. to 7 p.m. on working days, and at economy temperature in the remaining hours and on holidays. In the winter case, the economy temperature set is 16 °C for the basement and 18 °C for the other two floors, while the comfort temperature is 18 °C and 20 °C, respectively. In addition to this, a more detailed monitoring of the heat pump was also carried out by using a dedicated piece of software the Climatix SCOPE software, which was installed locally in the technical room. With this software, internal pump circuits (HT IN-OUT, MT IN-OUT, LT IN-OUT) can be monitored with high accuracy and denser sampling time compared to the BMS, that having to read and store a large amount of data has a minimum reading rate of 1 minutes, and usually stores data every 10 minutes. Thermal ground monitoring with Distributed Temperature Sensing (DTS) enables temperature monitoring with high accuracy. The fiber optic cables (FOC) were directly located into the geothermal field during installation and are now able to provide a temperature profile in time and space with a high point density.

In this paper, monitoring and analysis on sample days of classic heat pump operation is presented:

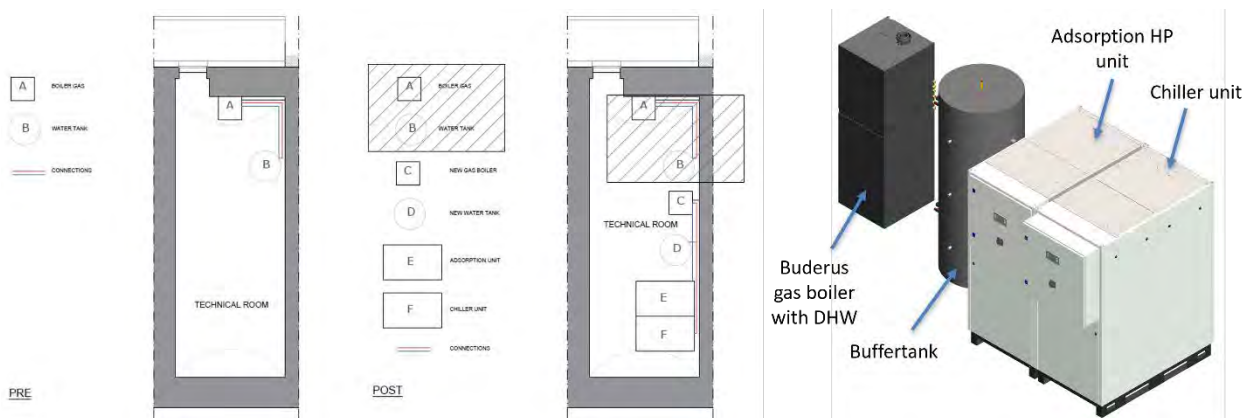
- 29/11/2022 – Steady state operation of the system (warm weather conditions).
- 28/02/2023 – Start up day (after 4 days of shutdown, cold weather conditions).
- 01/03/2023 – Second day of operation after start-up (cold weather conditions).

With the data obtained from the various monitoring, an assessment is made of the performance of the heat pump and the trend and evolution of temperatures over time of the geothermal field, looking for their correlation.

3.1. Energy system

The innovative heat pump was installed in the technical room of the building, adapting to the pre-existing system. This system consists mainly of 3 components: a gas condensing boiler (model BT 192iT - Buderus) with buffer tank, an adsorption heat pump unit, and a vapor compression chiller unit (Fahrenheit) (Figure 4).

Figure 4. Pre- and Post-design of the technical room and new system components



The heat pump is connected to the gas boiler, which is used as the source for driving the adsorption cycle through the Hot Temperature drive circuit, which is one of the 3 main circuits that work at certain temperatures:

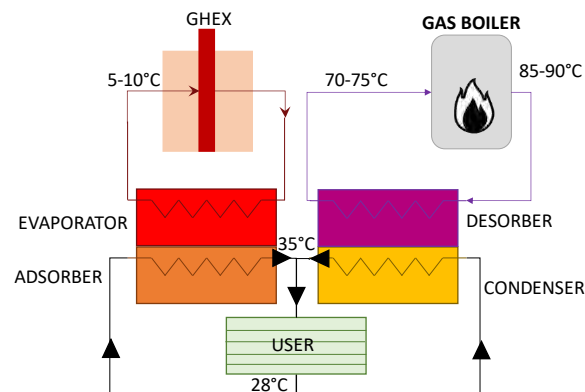
- Adsorption temperature, Hot Temperature (HT) – 55-95 °C
- Re-cooling temperature, Medium Temperature (MT) – < 45°C
- Chilled water temperature, Low Temperature (LT) – > 5°C

The HT drive circuit is used in the winter season for heating the building, while during the summer season (in cooling mode) the compression cycle of the chiller is used. This system is designed to provide both heating and cooling to the structure, making it a versatile and efficient solution.

The adsorption heat pump unit consists of two heat exchangers: adsorber/desorber and evaporator/condenser (Figure 5). The desorber is connected to the boiler through the heat transfer fluid (HTF) circuit, and the fluid flows from the desorber to the condenser, providing space heating. The heat released during condensation is dissipated to the indoor environment. The condenser is also connected to the adsorber and the refrigerant flows from the evaporator to the adsorber through appropriate hydraulic circuits. Indeed, the heat of evaporation flows to the adsorber, which is received by an adsorbent material (i.e., zeolite). To dissipate the heat, cooling water flows into the adsorber and heats up and then transfers the heat to the environment. Additionally, the evaporator is connected to

geothermal probes (Slinky GHEX) to harness the ground as a heat source during winter functioning. The heating provided to the building is given by condensation heating combined with adsorption heating. Depending on the required load, it is possible to choose whether to heat the structure with the adsorption module alone (base load) or to combine it with the condensation module (peak load with boiler). Finally, the compression chiller operates in cooling mode, making use of the geothermal probes as a heat sink system to which condensation heat is discharged.

Figure 5. Hydraulic heat pump operation diagram



3.2. Geothermal field

Preliminary ground analysis is of paramount importance before the installation of a geothermal system. Indeed, from these analyses it is possible to assess the type of soil in which intervention is planned and the characteristics of its properties.

From the geological analysis of the ground in Sant'Apollinare, an average density of about 1.8-2.2 kg/dm³, a thermal conductivity of 1.0 W/mK and a volumetric heat capacity of 1.34 MJ/(m³K) were evaluated, while the rock substrate reported higher values.

The area involved in the geothermal field is highlighted in green. The installed heat exchangers are connected to the system in the technical room through insulated pipelines (Figure 6).

Figure 6. Excavation area and technical room



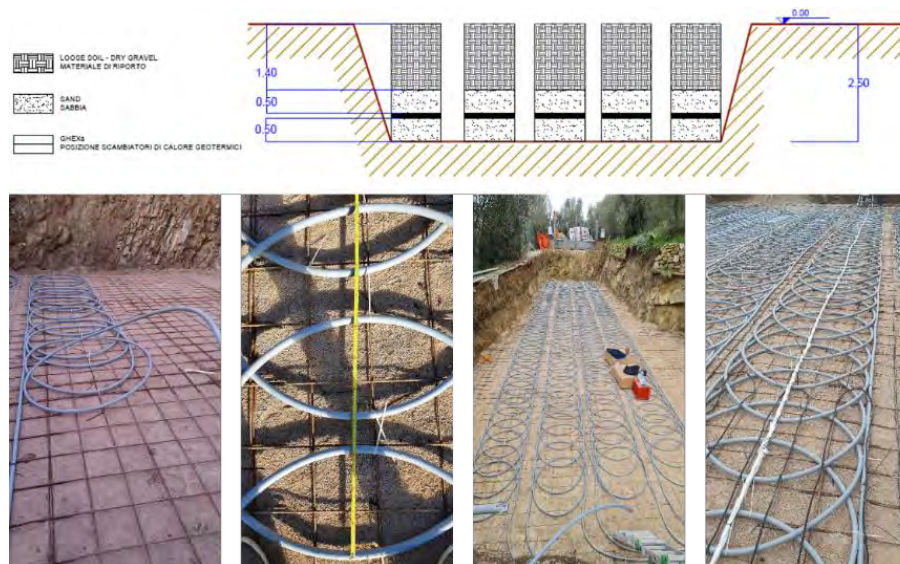
The installed geothermal system features Slinky-type heat exchangers. It is a closed system of pipes where a heat transfer fluid flows, exchanging heat with the ground due to the thermal gradient. When

the fluid flowing in the pipes is warmer than the ground, the whole system provides cooling to the building, otherwise it works to provide heating. In the latter case, the heat pump works to raise the temperature level to the required setpoint in case the geothermal field cannot reach it (the same happens in cooling with the chiller).

The innovativeness of this system lies in being able to install a shallow geothermal field by realizing a heat exchanger surface. Indeed, the geothermal system was installed at a depth of only 2 meters (2.5 m + 50 cm of sand). Then, the system was covered with an additional 50 cm of sand and the excavation was covered with the ground. The geothermal exchangers, where brine circulates, were installed in 5 parallel trenches about 24 m long, each about 1.35 m apart. These exchangers were arranged in a ring pattern (1.1 m diameter) overlapping each other at half diameter. Indeed, there are about 50 rings for each trench. To comply with the design dimensions and correct distances, a metal grid was used.

Slinky GHEXs can work in a temperature range of 7.9 °C to 25.3 °C. In addition, two of the five trenches have an irrigation system to evaluate the ground behavior under different boundary conditions, and a thermal monitoring system via fiber optic cables (FOC) has been installed to remotely monitor soil temperature (DTS) (Figure 7). Moreover, there are 10 temperature sensors to monitor the temperature of the fluid flowing inside the Slinky GHEXs (5 for the flow 5 for the return) and 2 pressure sensors (1 for the supply and 1 for the return). This provides even more complete monitoring and the latter data listed are monitored via BMS.

Figure 7. Ground stratification and heat exchangers and Slinky GHEX (2 m deep)



4. Energetic assessment

As explained in a previous section, the adsorption heat pump is a discontinuous machine. Figure 8, illustrates the powers exchanged during a typical working cycle, with the blue line representing the power from the boiler (HT power); the red line representing the power sent to the building (MT power), and the yellow line representing the power absorbed from the soil (LT power).

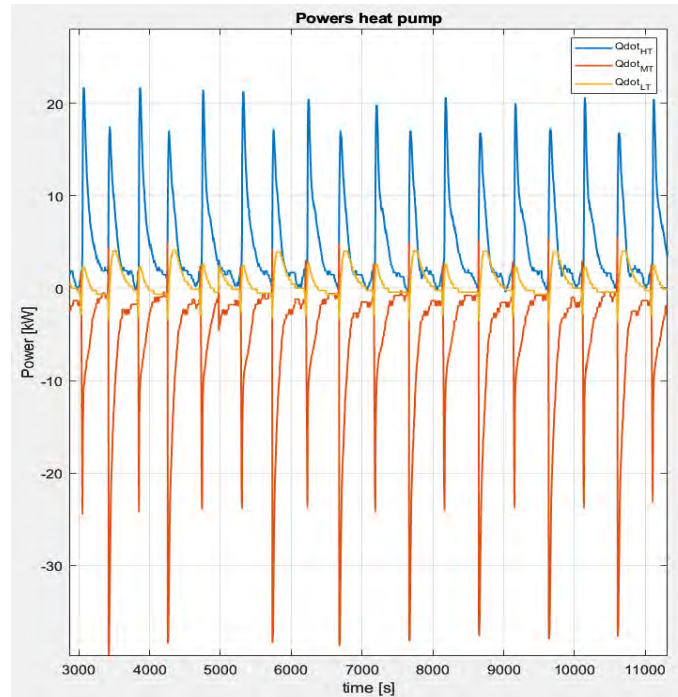
Figure 8. Adsorption heat pump typical working cycle.

Table 1 presents some results from three different working days, including the daily mean HT Power from the gas boiler, the daily mean MT Power sent to the building from the adsorption heat pump, and the daily mean LT Power absorbed from the geothermal field. The Thermal COP (Coefficient Of Performance) was calculated using the parameters acquired during the monitoring. In each sorption heat pump circuit (HT-LT-MT) the instantaneous power was calculated as:

$$\dot{Q} = \rho \dot{V} c_p (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

where \dot{Q} [kW] is the instant power, ρ [kg/m³] is the heat transfer fluid density, \dot{V} [m³/s] is the volumetric flow rate of the heat transfer fluid, c_p [kJ/(kg K)] is the specific capacity of the heat transfer fluid, and T_{in} and T_{out} [°C] are the inlet and outlet temperatures of the considered circuit. The Coefficient of Performance was calculated using the following equation:

$$COP = \frac{\int_{t_0}^{t_f} \dot{Q}_{MT}}{\int_{t_0}^{t_f} \dot{Q}_{HT}} \quad (2)$$

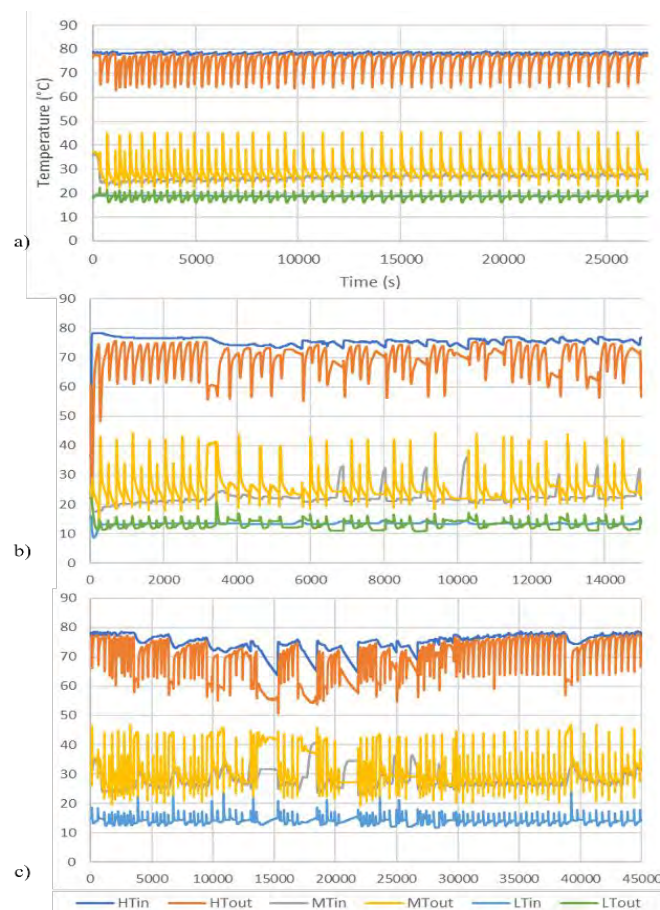
Therefore, the COP was calculated considering the ratio between the energy provided by the adsorption heat pump to the user \dot{Q}_{MT} and the energy provided by the gas boiler to the adsorption heat pump \dot{Q}_{HT} .

Table 1. Results for different dates

Date	Main results from the heat pump monitoring			
	Thermal COP	HT Power	MT Power	LT Power
29/11/2022	1.08	5.00	-5.62	0.58
28/02/2023	1.08	7.66	-7.58	0.05
01/03/2023	0.98	6.47	-6.35	-0.35

In two of the three days considered, the Thermal COP was higher than one. This indicates that the adsorption heat pump was able to provide more heat to the building compared to the gas boiler, thanks to the geothermal field's contribution. However, on March 1st, the Thermal COP was slightly lower than 1, which may be attributed to some issues with the heat pump controls. The matter should be discussed further with the manufacturer. Figure 9 displays the working temperature profiles for day considered. Section (a) shows the adsorption heat pump working as expected, while sections (b) and (c) reveal some problems related to the machine's controls. The primary issue encountered during the monitoring was with the ON-OFF control when the heat pump reached the target temperature. Further investigations will be conducted in the coming months in collaboration with the manufacturer to address this issue.

Figure 9. Adsorption heat pump temperature profiles at different dates. (a) November 29th, 2022; (b) February 28th, 2023; (c) March 1st, 2023.



5. Thermal analysis of the geothermal field

In this section, ground temperature values recorded on the days indicated in Section 3 are presented. Figure 10 presents a schematic of the geothermal terrain, indicating with the colored areas the area occupied by the FOC used to monitor the ground temperature. Specifically, the FOC placement is indicated by the yellow line with blue dots representing the monitored ground points.

One of the innovations for the monitoring system was to use a low-cost DTS monitoring system. One of the limitations of such a low-cost system is the relatively low spatial resolution (about 1.02 meters for 500 meters length). In addition, the geometry of the slinky ground heat exchanger is complex. To address this, the FOC was laid out in parallel lines of 10 meters length, with a distance of about 0.2 meter between the parallel runs. Furthermore, the runs were distributed over 6 zones, covering the temperature gradient from undisturbed to the GHEX (zone A) and several areas either near the start of each hydraulic circuit (zone B, D and F) and at the end of each hydraulic circuit (zone C and E). In this way, it is possible to obtain both the temperature distribution over a cross-section of the slinky GHEX as well as average zone temperatures. Due to limitations in the distance range of the DTS system, zone F is not fully represented in the data.

Figure 10. Geothermal field mapp

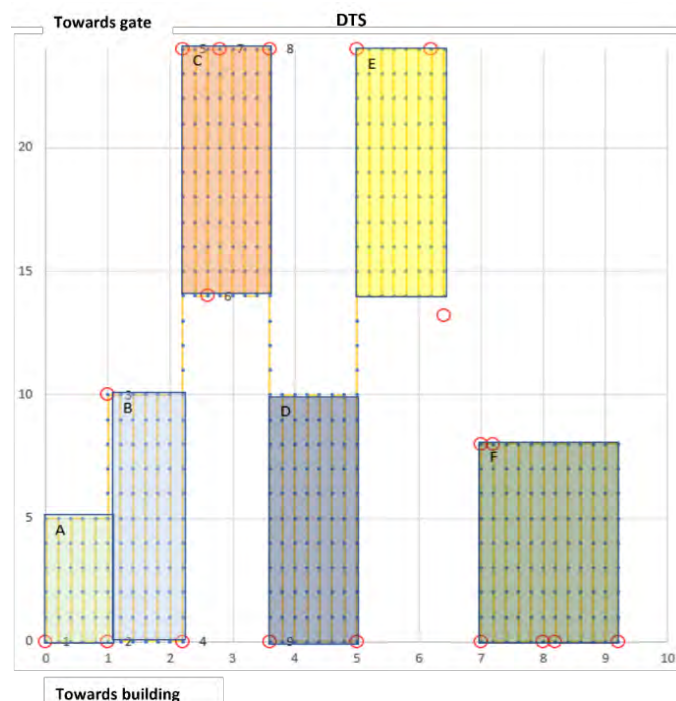


Figure 11 presents the data of the ambient temperature, the part of the ground without GHEX (A) and the parts with GHEX on the different days analyzed. The trends shown are the result of 10-minute averaged data for each GHEX zone. Table 2 shows the average standard deviations calculated for each zone for each day analyzed. The standard deviation of zone A is larger but is a reasonable data: as we go from undisturbed ground nearer and nearer to the actual slinky, the variation of temperature in the cross section of this zone should be larger.

Figure 11. Monitoring of the zone temperatures

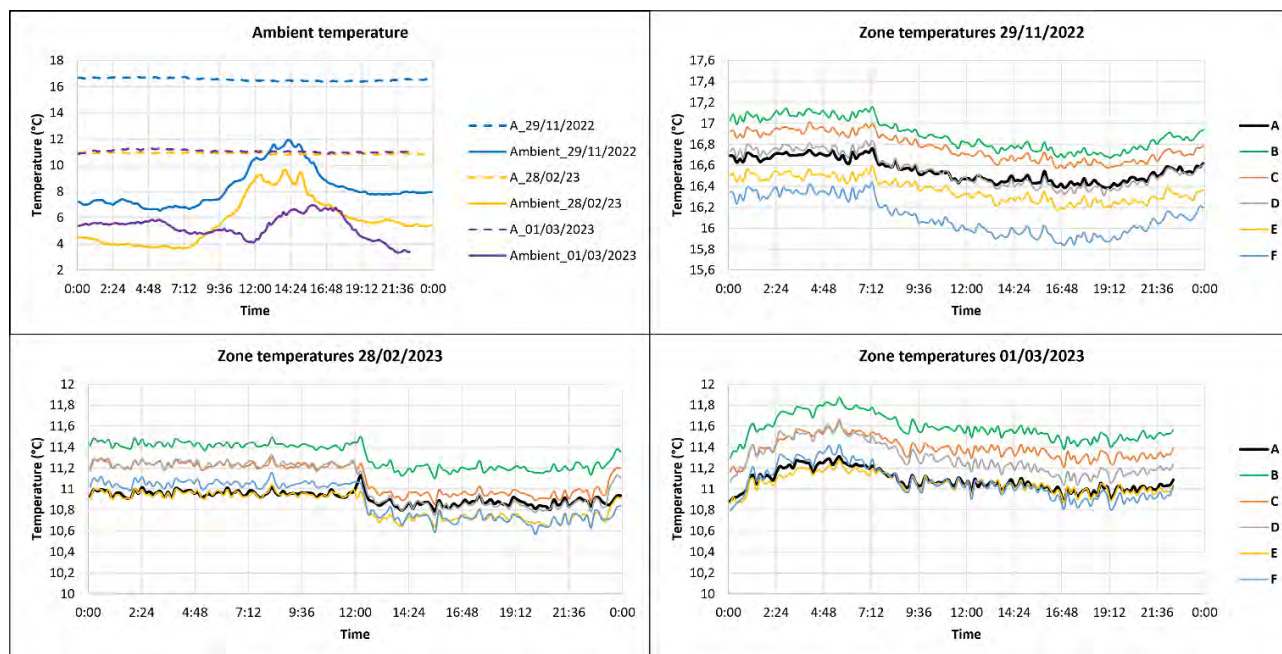


Table 2. Mean Standard Deviation for each trend

Date	Mean Standard Deviation					
	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Zone E	Zone F
29/11/2022	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
28/02/2023	0.7	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2
01/03/2023	0.7	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2

The November monitoring day represents a typical day of operation for the heat pump. As explained in Section 3, the heat pump operates according to time schedules, i.e., from 7 a.m. to 7 p.m. Indeed, on November 29th, 2022, we observed a trend of the ground temperature decreasing steadily from 7 a.m. onwards. This is because, during winter operation, the heat pump extracts heat from the ground.

On February 23rd, the geothermal heat pump was turned off to monitor the next turn-on phase. On February 28th, the system was turned back on. A constant ground temperature trend can be noticed at the beginning of the day because the heat pump had not yet been restarted. Indeed, the heat pump was restarted around noon, and from this time onward, a decrease in ground temperatures can be observed, particularly, in the zones equipped with the GHEx compared to Zone A. The day of March 1st corresponds to the day after the restart with cooler ambient temperatures, as shown in the first graph of Figure 11. On this particular day, it is evident from Figure 11.d that the black solid profile displays the lowest temperature value for the majority of the day. This observation suggests that the heat pump was not working properly. Additionally, Figure 11 illustrates that the soil gradually begins to warm up after 7 p.m. with varying rates on different days. This phenomenon could be attributed to solar heating. For instance, November 29th was a clear sky day, whereas February 28th and March 1st were both rainy days. Therefore, on a sunny day, passive solar gains could combine with the heat transfer from the surrounding soil and elevate the ground temperature in the shallow slinky GHEx application.

It is worth noting that the trends observed in areas with GHEXs do not differ significantly from those without. This indicates that while heat is being extracted in certain areas, the thermal gradient of the natural soil remains relatively unaffected. Overall, the graph shows that all zones exhibit similar behaviors, with a slight trend of lower temperatures the further away from the source. This could be adjusted through regression analysis, as it is possible that too few points were used for calibration or that there is some drift of calibrated values over time.

6. Discussions and conclusions

This paper explores the monitoring and operation analysis of a hybrid heat pump that serves as an energy retrofit strategy for the Sant'Apollinare fortress. The heat pump is connected to a geothermal field consisting of Slinky GHEX heat exchangers, which eliminates the need for drilling of boreholes (which can be costly) when building a geothermal system. The paper presents three monitoring days: one in November with stationary operation of the heat pump and warm external temperatures, one in February representing the monitoring phase of the heat pump turn-on, and one after the start of the heat pump with cooler external temperatures. The Coefficient Of Performance (COP) value and ground temperature monitoring by fiber optic cable (FOC) system are evaluated for all three days.

Upon comparing the operation of the heat pump with the thermal monitoring of the ground, it was observed that when the system is on, the machine absorbs heat from the ground, thereby cooling the ground. As soon as the heat pump is turned off (7 p.m.), there is an increase in soil temperatures, probably due to the machine no longer absorbing heat and surface heating phenomena in the ground during the day that slowly reach the depth level of FOC monitoring.

From this, it can be deduced that the heat pump is working correctly, but it needs improvements for on/off control. As future analyses, an implementation of system control is planned. Furthermore, the installed irrigation system will be activated to assess any changes in system performance as the ground boundary conditions change.

In conclusion, this paper provides valuable insights into the monitoring and operation analysis of a hybrid heat pump used for the energy retrofit of a historic building, i.e., the Sant'Apollinare fortress. The findings suggest that utilizing heat pumps and geothermal slinky heat exchangers for building energy retrofits is a promising strategy for the renovation of building stock, especially in countries such as Italy that have a vast number of buildings constructed prior to the mid-1900s.

By implementing these innovative technologies, building owners can significantly reduce their energy consumption and carbon footprint while simultaneously improving the overall comfort and efficiency of their properties.

Acknowledgements

Part of this work has received funding from the European Union's H2020 research and innovation program under the GEOFIT project (g.a. 792210).

References

- [1] European Commission, “Annex to the COMMISSION RECOMMENDATION on Energy Efficiency First: from principles to practice. Guidelines and examples for its implementation in decision-making in the energy sector and beyond.,” 08/09/2021.
- [2] ISTAT, “Annuario Statistico Italiano 2015 - Costruzioni,” 2015. [Online]. Available: <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>
- [3] I. Ballarini, V. Corrado, F. Madonna, S. Paduos, and F. Ravasio, “Energy refurbishment of the Italian residential building stock: energy and cost analysis through the application of the building typology,” *Energy Policy*, vol. 105, no. January, pp. 148–160, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.02.026.
- [4] F. Ascione, R. F. De Masi, M. Mastellone, S. Ruggiero, and G. P. Vanoli, “Improving the building stock sustainability in European Countries: A focus on the Italian case,” *J. Clean. Prod.*, vol. 365, no. May, p. 132699, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132699.
- [5] G. Rospi, N. Cardinale, and E. Negro, “Energy performance and economic feasibility study of historical building in the city of Matera, Southern Italy,” *Energies*, vol. 10, no. 12, 2017, doi: 10.3390/en10122009.
- [6] A. G. Olabi, “Renewable energy and energy storage systems,” *Energy*, vol. 136, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.07.054.
- [7] J. Mohtasham, “Review Article-Renewable Energies,” in *Energy Procedia*, 2015, vol. 74, pp. 1289–1297. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.774.
- [8] J. Twidell, *Renewable Energy Resources*, Fourth. 2022.
- [9] S. B. Tsai *et al.*, “Models for forecasting growth trends in renewable energy,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. July 2016, pp. 1169–1178, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.001.
- [10] N. Kannan and D. Vakeesan, “Solar energy for future world: - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1092–1105, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.022.
- [11] J. Khan and M. H. Arsalan, “Solar power technologies for sustainable electricity generation - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 414–425, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.135.
- [12] F. Blaabjerg and K. Ma, “Wind Energy Systems, reviews application of power electronics in wind energy systems,” *IEEE Power Energy Soc.*, vol. 105, no. 11, pp. 2116–2131, 2017, [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123972705000133>
- [13] P. Veers *et al.*, “Grand challenges in the science of wind energy,” *Science (80-.)*, vol. 366, no. 6464, 2019, doi: 10.1126/science.aau2027.
- [14] L. J. R. Nunes, T. P. Causer, and D. Ciolkosz, “Biomass for energy: A review on supply chain management models,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 120, no. December 2019, p. 109658, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109658.
- [15] A. Golberg *et al.*, “Energy-efficient biomass processing with pulsed electric fields for bioeconomy and sustainable development,” *Biotechnol. Biofuels*, vol. 9, no. 1, pp. 1–22, 2016, doi: 10.1186/s13068-016-0508-z.
- [16] D. Zhou and Z. (Daniel) Deng, “Ultra-low-head hydroelectric technology: A review,” *Renew.*

- Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. May, pp. 23–30, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.086.
- [17] E. Barbour, I. A. G. Wilson, J. Radcliffe, Y. Ding, and Y. Li, “A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, pp. 421–432, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.019.
- [18] V. Khare, S. Nema, and P. Baredar, “Solar-wind hybrid renewable energy system: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 23–33, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.223.
- [19] Y. Sawle, S. C. Gupta, and A. K. Bohre, “Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. May 2017, pp. 2217–2235, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.033.
- [20] K. Shivarama Krishna and K. Sathish Kumar, “A review on hybrid renewable energy systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 907–916, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.187.
- [21] W. Wu and H. M. Skye, “Residential net-zero energy buildings: Review and perspective,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 142, no. March, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110859.
- [22] A. Ahmed, T. Ge, J. Peng, W. C. Yan, B. T. Tee, and S. You, “Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings: A review,” *Energy Build.*, vol. 256, p. 111755, 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111755.
- [23] A. Giovanardi, A. Passera, F. Zottele, and R. Lollini, “Integrated solar thermal façade system for building retrofit,” *Sol. Energy*, vol. 122, pp. 1100–1116, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.10.034.
- [24] H. Du, P. Huang, and P. Jones, “Modular facade retrofit with renewable energy technologies: The definition and current status in Europe,” *Energy Build.*, vol. 205, no. 2019, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109543.
- [25] A. Chel and G. Kaushik, “Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 2, pp. 655–669, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2017.02.027.
- [26] R. Wu, G. Mavromatidis, K. Orehounig, and J. Carmeliet, “Multiobjective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community,” *Appl. Energy*, vol. 190, pp. 634–649, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.161.
- [27] M. H. Ahmadi, M. A. Ahmadi, M. S. Sadaghiani, M. Ghazvini, S. Shahriar, and M. Alhuyi Nazari, “Ground source heat pump carbon emissions and ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings: A review,” *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 37, no. 4, pp. 1241–1265, 2018, doi: 10.1002/ep.12802.
- [28] J. Luo, J. Rohn, M. Bayer, A. Priess, L. Wilkmann, and W. Xiang, “Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany,” *Geothermics*, vol. 53, pp. 57–66, 2015, doi: 10.1016/j.geothermics.2014.04.004.
- [29] G. Emmi, A. Zarrella, M. De Carli, and A. Galgaro, “An analysis of solar assisted ground source heat pumps in cold climates,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 106, pp. 660–675, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.10.016.
- [30] A. Girard, E. J. Gago, T. Muneer, and G. Caceres, “Higher ground source heat pump COP in a residential building through the use of solar thermal collectors,” *Renew. Energy*, vol. 80, pp. 26–

- 39, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.01.063.
- [31] L. Carnieletto *et al.*, “A European database of building energy profiles to support the design of ground source heat pumps,” *Energies*, vol. 12, no. 13, 2019, doi: 10.3390/en12132496.
- [32] T. Okazaki, T. Orii, A. Ueda, A. Ozawa, and H. Kuramitz, “Fiber Optic Sensor for Real-Time Sensing of Silica Scale Formation in Geothermal Water,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-03530-1.
- [33] F. Schölderle *et al.*, *Monitoring cold water injections for reservoir characterization using a permanent fiber optic installation in a geothermal production well in the Southern German Molasse Basin*, vol. 9, no. 1. Springer Berlin Heidelberg, 2021. doi: 10.1186/s40517-021-00204-0.
- [34] C. wen Yu, S. chang Lei, W. shan Chen, and S. rong Song, “Downhole fiber optic temperature-pressure innovative measuring system used in Sanshing geothermal test site,” *Geothermics*, vol. 74, no. March, pp. 190–196, 2018, doi: 10.1016/j.geothermics.2018.03.005.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Environmental Assessment of eco-sustainable plasters additivated with hydrochar

Carolina Santini^{1,*}, Claudia Fabiani^{1,2}, Fabiana Frota de Albuquerque Landi¹, Marco Barbanera³, Alessandro Cardarelli³, Franco Cotana^{1,2}, Anna Laura Pisello^{1,2}

¹ CIRIAF - Interuniversity Research Centre, Perugia, Italy

² Department of Engineering, University of Perugia, Perugia, Italy

³ Department of Economics, Engineering, Society and Business Organization, University of Tuscia, Viterbo, 01100, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: carolina.santini@studenti.unipg.it

Abstract: The building industry constantly seeks solutions to safeguard the ecosystem due to its high contribution to worldwide pollution and growing market pressure. Developing products with lower environmental impact, such as innovative solutions including recycled materials represents a feasible way of making the construction industry "greener". In particular, combining recycled and standard building materials produces eco-sustainable plasters as an adequate alternative to solid municipal waste management and natural resources depletion. This research aims to assess the potential environmental impact of plaster added with hydrochar and compare it to standard lime and cement-based solutions from a life cycle perspective. Hydrochar is an activated solid fraction resulting from the Hydrothermal Carbonization (HTC) process of wet biomass. It is added to plaster mix as a percentage of 4% of the total weight. The results from the life cycle analysis reveal that hydrochar can be considered a promising material as recycled materials applications in buildings as it reduces the impacts of most of the categories analyzed and avoids landfill impacts

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), innovative plaster, HTC process, hydrochar.

1. Introduction

Climate change and related issues, such as air pollution, extreme heat, food scarcity, and impaired mental health, have become top priorities for governments worldwide. In recent years, various agreements have been signed to achieve sustainable development, including "The 2030 Agenda" and

“The Paris Agreement” in 2015, and “The European Green Deal” in 2019. To address these challenges, Fawzy S. et al.(1) identified three main strategies: reducing CO₂ emissions, capturing CO₂ from the atmosphere, and managing solar and terrestrial radiation. The first strategy, reducing emissions, has gained popularity through the use of life cycle assessment (LCA) approaches to evaluate environmental impact of products or services(2),(3),(4). However, assessing the impact of the construction sector is challenging due to the many variables involved (5). One solution is to choose materials with low embodied energy, which reduces the overall impact of construction (6). Waste materials can be a good an excellent choice for this purpose, promoting the development of a circular economy and reducing emissions from incineration. Monni Suvi et al.(7) evaluated emissions from waste incineration and simulated five scenarios to analyze the emission reduction by recovering gas from the disposal process. The amount of waste produced from biomass is increasing at an alarming rate. Unfortunately, the burning of this waste produces large amounts of greenhouse gases, making it crucial to raise awareness regarding waste management. Sri Shalini S. et al. focus on the reuse of biochar derived from biomass for different applications, thanks to its properties that facilitate climate change mitigation(8). Biochar mixed with cementitious material gives the compounds an excellent capacity for CO₂ sequestration(9). Zhang Y. et al. investigate other properties of biochar, such as thermo-hygrometric regulation and chemical compatibility with cement and asphalt (10). The review of Mensah R. A. (11) shows how biochar added to cementitious materials can increase thermal, mechanical, and environmental benefits. This is an important aspect considering that cement without partial replacement by other materials has a great impact even when used as mortar. Moropoulou A. et al. demonstrated that standard mortars with aerial lime binder and artificial pozzolanic additive are more sustainable compared to cement-based mortars through LCA (12). The properties of produced chars depend also on the production methods; the final results are biochar or hydrochar. While biochar is generated from pyrolysis, that involves the thermal decomposition of dry biomass at a higher temperature (400–700 °C) in the absence or partial supply of oxygen, hydrochar derives from the wet feedstock, with burning process of wet waste (13). The process involved is called Hydrothermal Carbonization (HTC) and it is analyzed in various LCA studies.

For example, Song E. et al (14) estimated the characteristics of HTC hydrochar derived from cattle manure and conclude that when the HTC reaction temperature increased, the global activation energy and the pre-exponential factors of hydrochars reduced in the low-temperature portion and rised in the high-temperature portion. Instead, Roy P. et al (15) estimated the environmental performance of hydrothermally carbonized biomass of soil amendment and that of untreated biomass. Their comparison shows a better performance of hydrochar products with respect to pure biomass. The environmental impacts of three biomass blends as raw materials in HTC are analyzed by Perez L. E. et al. (16) obtaining that the processing of blends has excellent potential in the context of municipal solid wastes. The HTC process converts biomass residue into high-value products. However, it requires a lot of energy for electricity. Therefore, it is important to pay attention to the evaluation of the final products. In the research of Chaparro-Garnica J. et al. (17), the obtained hydrochar was activated before being combined with the H₃PO₄. Other research focus on the use of hydrochar as a substitute for different materials. Cardarelli A. et al.(18) investigate the effects induced

by the replacement of hydrochar instead of fossil coal in Electric Arc Furnace (EAF) revealing that the use of hydrochar did not involve significant negative differences. In the study conducted by Marangon B. et al (19), as well as the valorization of the solid product (hydrochar, HC) derived by the HTC as a fuel substituting lignite, they evaluate also the possibility of the valorization of the liquid fraction (process water, PW), by anaerobic digestion to produce biogas.

In this work, LCA is used to quantify the impacts of innovative plasters that incorporate hydrochar deriving from HTC process of the organic fraction of municipal solid waste. Further, the prototype is compared to a standard mix to identify hotspots and propose optimization alternatives. The aim of the research is dual: reusing hydrochar on construction materials to reduce the energy impact of the buildings and evaluating in terms of environmental emissions the possible advantages of combining recycled content material and standard building materials.

2. Methodology

The LCA is a standardized methodology used to assess the environmental impacts of products and services during their complete life cycle. In this study the characterization and impact categories were calculated using the software SimaPro 9.4.0.2 with the reference database ecoinvent v3.8(20). The following phases, in accordance with ISO 14044:2006(21) are goal and scope definition, declared unit and boundaries, inventory analysis, impact assessment, and interpretation.

The processes selected are in cut-off, unit mode. A recycled material is such that the primary producer does not receive credits for its supply. This results in recyclable materials being available without charges for their recycling and recycled secondary materials bear only the impacts that result from the recycling process. Therefore, hydrochar was considered as by-product with an initial impact due to its transportation and production (HTC process). The municipal solid waste, from which hydrochar is derived, was considered as waste materials and their reuse was evaluated as avoided landfill impact. The emission streams collected in the inventory are organized and classified into characterization factors and afterwards allocated into impact categories associated with specific environmental issues. The calculation method EN 15804 + A2 Method V1.02 / EF 3.0 normalization and weighting set(22) is in accordance with the product category rules for construction products.

2.1 Goal and scope

The aim of this study is to carry out an exploratory environmental evaluation of a novel plaster mixture and benchmark the prototype to a standard mix-design. The innovative plaster is additivated with hydrochar in addition by weight of 4%. The reuse of hydrochar as a component of the mix allows the production of an eco-sustainable plaster whose environmental assessment is a key aspect to be analyzed.

2.2 Declared unit and boundaries

The declared unit should be related to the typical applications of products that result as one can no longer be separated after the end of life, or that are no longer characterizable by physical or

chemical transformation processes after the end of life, or that do not contain biogenic carbon. This analysis is based on the declared unit for plasters in accordance with the product category rules for construction materials. The declared unit is defined as 1500 kg (dry weight) of plaster production and the proportions of all the components of the plaster in weight were provided by the manufactory company.

Boundaries define the inputs and outputs fluxes included in the study based on technology, geography, time, production systems, study approach, and other life cycles. In this research, boundaries included the materials extraction, processing and transportation and their manufacturing until the factory gate. The transportation to the construction site, onsite application, use phase, demolition, and disposal are excluded from the boundaries. The preferred database geography is Italy, Europe and if not available the Rest of the World (RoW).

2.3 Life cycle inventory

The inventory construction collects resources and emissions data to be processed as potential impacts. The allocation process follows the attributional approach. Weight distributions for the dry mortar components are reported in **Table 1.**

Table 1. Reference flows and conversion for one production of plaster

Materials	Standard plaster		Plaster additivated with hydrochar	
	%	kg	%	kg
Cement cpc cem i 42.5 r	0,13	195	0,125	188
Quicklime	0,13	195	0,125	188
Calcium carbonate	0,74	1110	0,712	1071
Hydrochar	-	-	0,038	57,15
Total	1	1500	1	1504

In addition to the components, the concrete mixing factory (CMF) was considered from ecoinvent database. The software refers this consumption to 10000 tons of material produced every 50 years, so the conversion was made to 1500 kg in a year.

$$CMF = 1,5 \div (10000 \times 50)$$

Finally, the plaster mixing processing is also accounted. The activity begins at the gate considering all upstream flows and ends with the consumer including transport based on statistics and eventual significant losses.

2.3.1. Binders

Cement Portland CP42.5 is considered mixed with quicklime. Cement has a particular composition; it is constituted by 65% of clinker and 35% of Ground Granulated Blast-furnace (GGBS), a by-product

from the blast-furnaces used to make iron. **Table 2. Cement and quicklime inputs** lists the inputs of the two binders.

Table 2. Cement and quicklime inputs

Cement inputs	Amount	Unit
Transports		
Transport, freight train {CH} market for Cut-off, U	0,0037	tkm
Transport, freight, lorry, unspecified {RER} market for Cut-off, U	0,0259	tkm
Materials/fuels		
Clinker {CH} production Cut-off, U	0,90	kg
Ethylene glycol {GLO} market for Cut-off, U	0,00019	kg
Gypsum, mineral {RER} market for Cut-off, U	0,052	kg
Limestone, crushed, for mill {CH} market for Cut-off, U	0,045	kg
Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, U	0,00005	kg
Electricity/heat		
Electricity, medium voltage {CH} market for Cut-off, U	0,0292	kWh
Quicklime inputs		
Transports		
Transport, freight train {RER} market group for Cut-off, U	0,0075	tkm
Transport, freight, inland waterways, barge {RER} market for Cut-off, U	0,0015	tkm
Transport, freight, lorry, unspecified {RER} market for Cut-off, U	0,0757	tkm

2.3.2. Aggregates

Calcium carbonate is the main component of limestone. The majority of product used comes from mining and quarrying. Calcium carbonate can also be produced industrially and referred to as precipitated calcium carbonate. Table 3. *Calcium carbonate inputs/output* shows input and output dataset for the plaster aggregate.

Table 3. Calcium carbonate inputs/outputs

Calcium carbonate inputs	Amount	Unit
Materials/fuels		
Chemical factory, organics {RER} construction Cut-off, U	4,00E-10	p
Industrial machine, heavy, unspecified {RER} market for Cut-off, U	9,23E-06	kg
Limestone, crushed, washed {CH} market Cut-off, U	1,29	kg
Nitrogen, liquid {RER} market for Cut-off, U	0,015	kg
Tap water {RER} market for Cut-off, U	0,023	kg
Water, decarbonised {CH} market for Cut-off, U	7,67E-05	kg
Water, decarbonised {DE} market for Cut-off, U	1,21E-01	kg
Water, decarbonised {ES} market for Cut-off, U	0,024	kg
Water, decarbonised {FR} market for Cut-off, U	0,08	kg
Water, decarbonised {GB} market for Cut-off, U	0,004	kg

Electricity/heat

Electricity, medium voltage {RER} market group for Cut-off, U	0,06	kWh
Heat, district or industrial, natural gas {RER} market group for Cut-off, U	3,67	MJ
Heat, from steam, in chemical industry {RER} market for Cut-off, U	0,41	MJ

Emissions to air

Carbon dioxide, fossil	0,028	kg
Carbon monoxide, fossil	0,0048	kg
Nitrogen oxides	3,36E-04	kg
Nitrogen, atmospheric	0,015	kg
NM VOC, non-methane volatile organic compounds	4,55E-05	kg
Particulates, < 2.5 um	1,36E-05	kg
Particulates, > 10 um	2,73E-05	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	2,73E-05	kg
Sulfur dioxide	3,36E-04	kg
Water/m3	0,0015	m3

Emissions to water

Calcium	0,125	kg
Carbonate	0,099	kg
Water, RER	0,0125	m3

Calcium carbonate outputs

	Amount	Unit
Wastewater, average {CH} market for Cut-off, U	2,25E-07	m3
Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U	2,08E-06	m3

2.3.3. Liquids

Treated water is used to mix the components of the plasters. Its content is different between the two types of plaster because of the high-water absorption capacity of hydrochar and it is shown in **Table 4. Ratio of water for declared unit of plaster**. The greater amount of water can affect mechanical performance of the plaster by lowering it (23).

Table 4. Ratio of water for declared unit of plaster

Scenario	% of water	kg of water	w/c
Standard plaster	22	330	1,69
Plaster additivated with hydrochar	26	391,04	2,08

2.3.4. Hydrochar

Hydrochar is a by-product deriving from HTC process for wet waste treatment. HTC is a thermochemical process which convert raw biomass into a coal-like material (hydrochar), along with a liquid product (process water), rich in readily biodegradable organics (e.g. organic acids, furfurals, sugars, phenols), and a small amount of gaseous products, mainly CO₂ (24).

The hydrochar sample using SOF as feedstock and LL as moisture source was obtained at the optimal condition of 232°C for 2.65 h and a solid-to-liquid ratio (S/V) of 1/10. Energy and mass

balance of the HTC process was calculated based on laboratory experimental results. HTC tests were performed in a 600 mL Parr batch reactor (reactor series 4560, Moline, IL) under autogenic pressure. The system was purged with nitrogen gas to remove air from the reactor. The loaded reactor was heated up to 232 °C with a heating rate of 3°C/min and kept at that temperature for 2.65 h. The stirring rate of the agitator was set to 200 rpm. The residence time started after the reactor reached the set temperature. Then, the reactor was cooled to room temperature and the slurry was filtered by using a vacuum pump and a Büchner funnel with a filter paper of 8 µm. The hydrochar was washed with distilled water for several times and oven-dried at 105°C for 24 h to remove residual moisture. The main phases to obtain hydrochar are summarized in **Figure 1. Scheme of HTC production.**

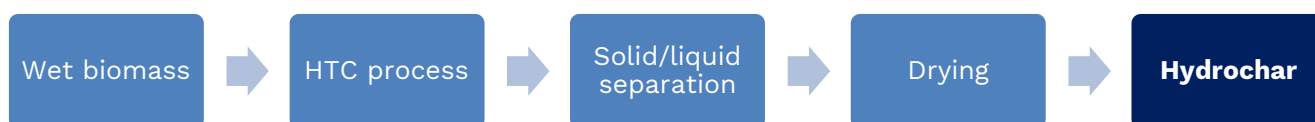
Inputs and outputs associated to hydrochar’s production are listed in **Table 5.HTC process inputs/outputs** and are derived from literature (25).In particular, electricity consumptions are considered medium voltage in Italy while the avoided products (initial wet mass of the process) are obtained considering the reactory yield (RY) OF 68,5% of dry product using the following equation:

$$\text{wet biomass} = \text{dry mass} \div \text{RY} = 1000 \div 0,685$$

Table 5.HTC process inputs/outputs

HTC process inputs	Amount	Unit
Avoided products		
Process-specific burdens, sanitary landfill landfill Cut-off, U	1460	kg
Electricity/heat		
Electricity, dewatering sludge market for Cut-off, U	115	kWh
Electricity, HTC process market for Cut-off, U	120	kWh
Electricity, dewatering slurry HC market for Cut-off, U	13	kWh
Electricity, wastewater treatment market for Cut-off, U	296	kWh
Electricity, pelletizing hydrochar market for Cut-off, U	33	kWh
Heat, district or industrial, natural gas {RER} market group for drying HC Cut-off, U	94	MJ
Heat, district or industrial, natural gas {RER} market group for HTC process Cut-off, U	4,32	GJ
Emission to air		
Methane	231	g
Carbon monoxide	474	g
Hydrogen	0,92	g
HTC process outputs - Waste to treatment		
Sewage sludge, dried {RoW} market for sewage sludge, dried Cut-off, U	1000	kg

Figure 1. Scheme of HTC production.



3. Results of the life cycle impact assessment

All the inventory inputs are allocated into impact category indicators associated with specific environmental issues. More specifically this study used the method ISO EN 15804 + A2 with selected 13 impact categories for environmental certifications. The comparison between the obtained values is shown in **Table 6. Comparison from standard plaster and plaster with hydrochar impacts**

Table 6. Comparison from standard plaster and plaster with hydrochar impacts

Impact category	Acronym	Unit	Plaster additivated w/hydrochar	Standard plaster
Climate change	CC	kg CO2 eq	815,06	814,72
Ozone depletion	OD	kg CFC11 eq	0,000067	0,000065
Photochemical ozone formation	POF	kg NMVOC eq	2,019	2,048
Acidification	Ac	mol H+ eq	3,04	3,07
Eutrophication, freshwater	Eut, fw	kg P eq	0,01598	0,01604
Eutrophication, marine	Eut, mr	kg N eq	0,531	0,537
Eutrophication, terrestrial	Eut, tr	mol N eq	6,14	6,20
Water use	Wu	m3 depriv.	155,92	148,68
Resource use, fossils	Res, f	MJ	8367,75	8212,29
Resource use, minerals and metals	Res, m,m	kg Sb eq	0,014	0,015
Climate change - Fossil	CC, F	kg CO2 eq	805,19	805,72
Climate change - Biogenic	CC, B	kg CO2 eq	9,50	8,62
Climate change - Land use and LU change	CC, LuL	kg CO2 eq	0,3742	0,3762

Among the 13 categories analyzed, plaster additivated with hydrochar compared to standard plaster has lower impacts on eight categories, insignificantly higher impacts, with a variation of less than 2.5 %, on three categories (CC, OD and Res, f) while for the two categories highlighted in gray in the table (Wu and CC, B) it has higher impacts that can be seen also in **Figure 2. Incidence of the two types of plasters on impacts**. The result for Wu category is due to the greater amount of water used for plaster with hydrochar (see **Table 4. Ratio of water for declared unit of plaster**) while for CC, B category can be associated with the high carbon content present in hydrochar (26),(27).

Figure 2. Incidence of the two types of plasters on impacts

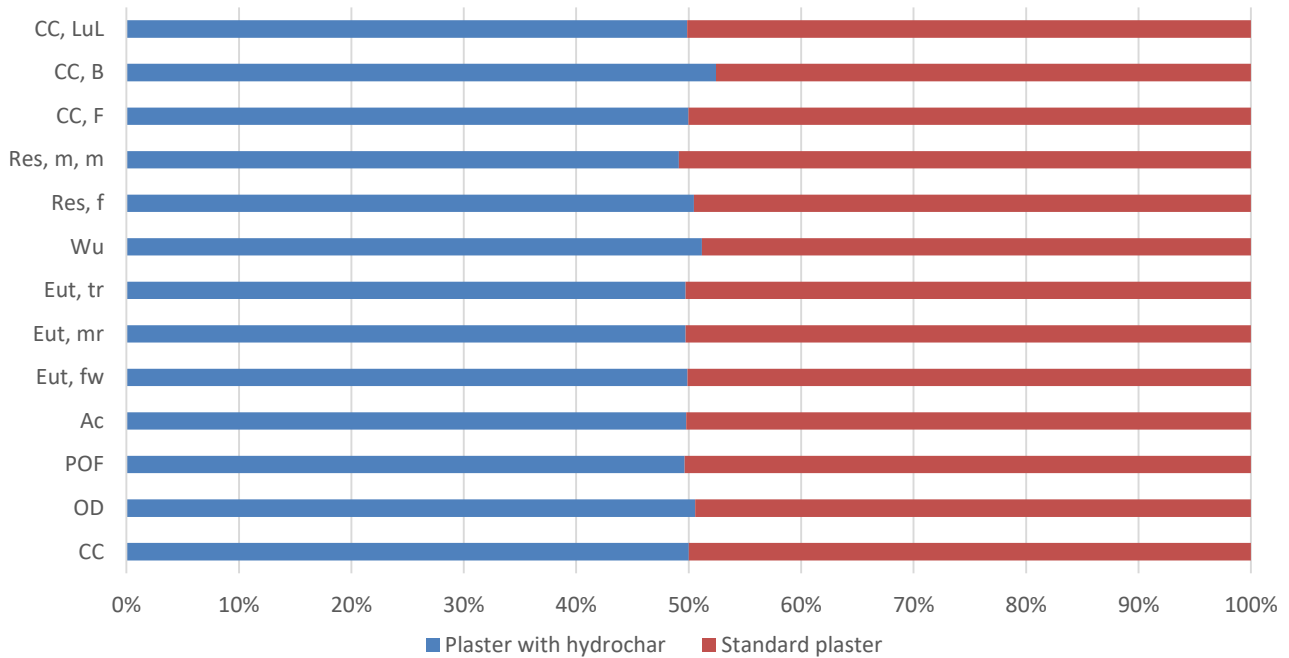
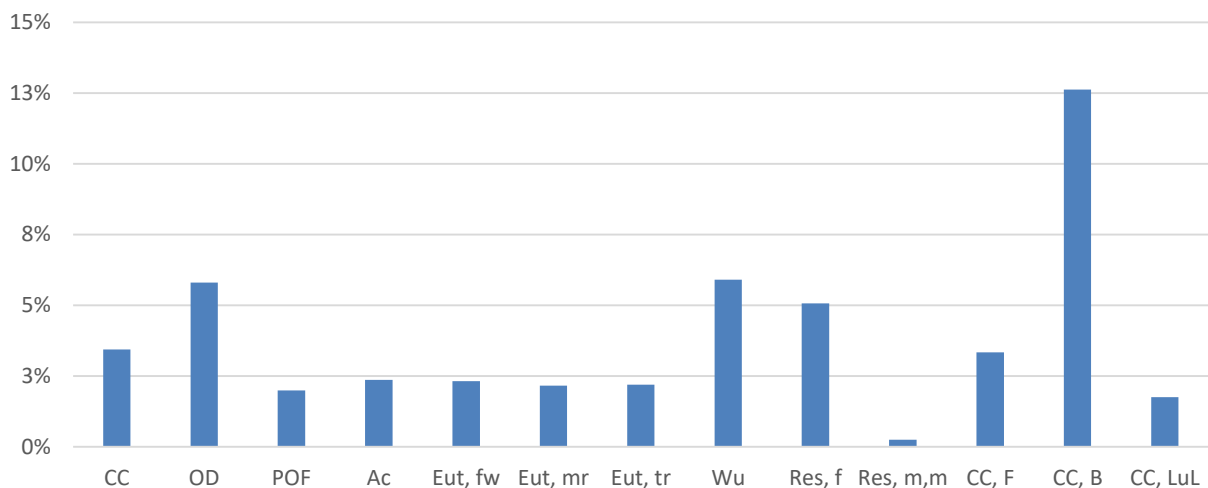


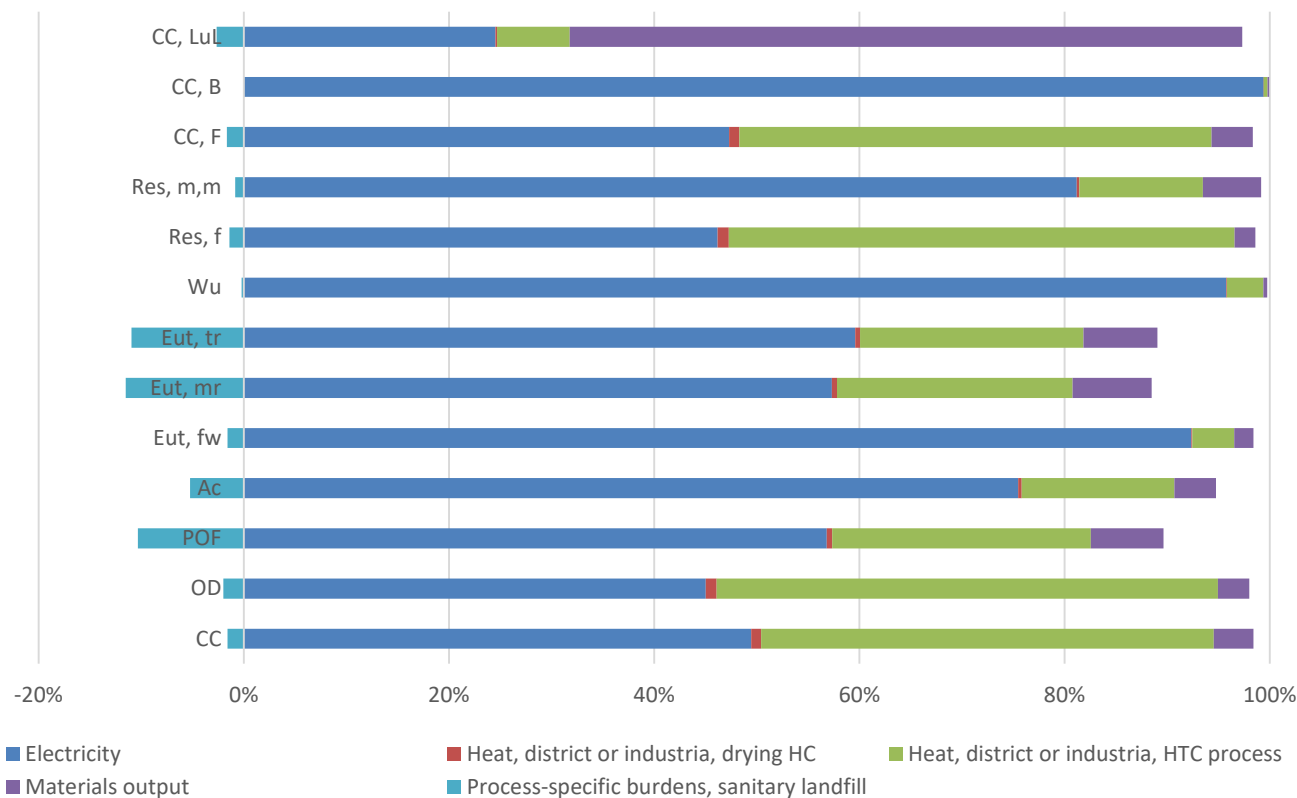
Figure 3. Incidence of hydrochar on impacts highlights how compared to the other components of the production mix, hydrochar has greater weight in precisely the two categories where impacts are highest (Wu and CC, B).

Figure 3. Incidence of hydrochar on impacts



From a deeper analysis of the impacts due to the hydrochar production process (see **Table 7. Impacts of HTC process and**

Figure 4. Contribution of each hydrochar component production

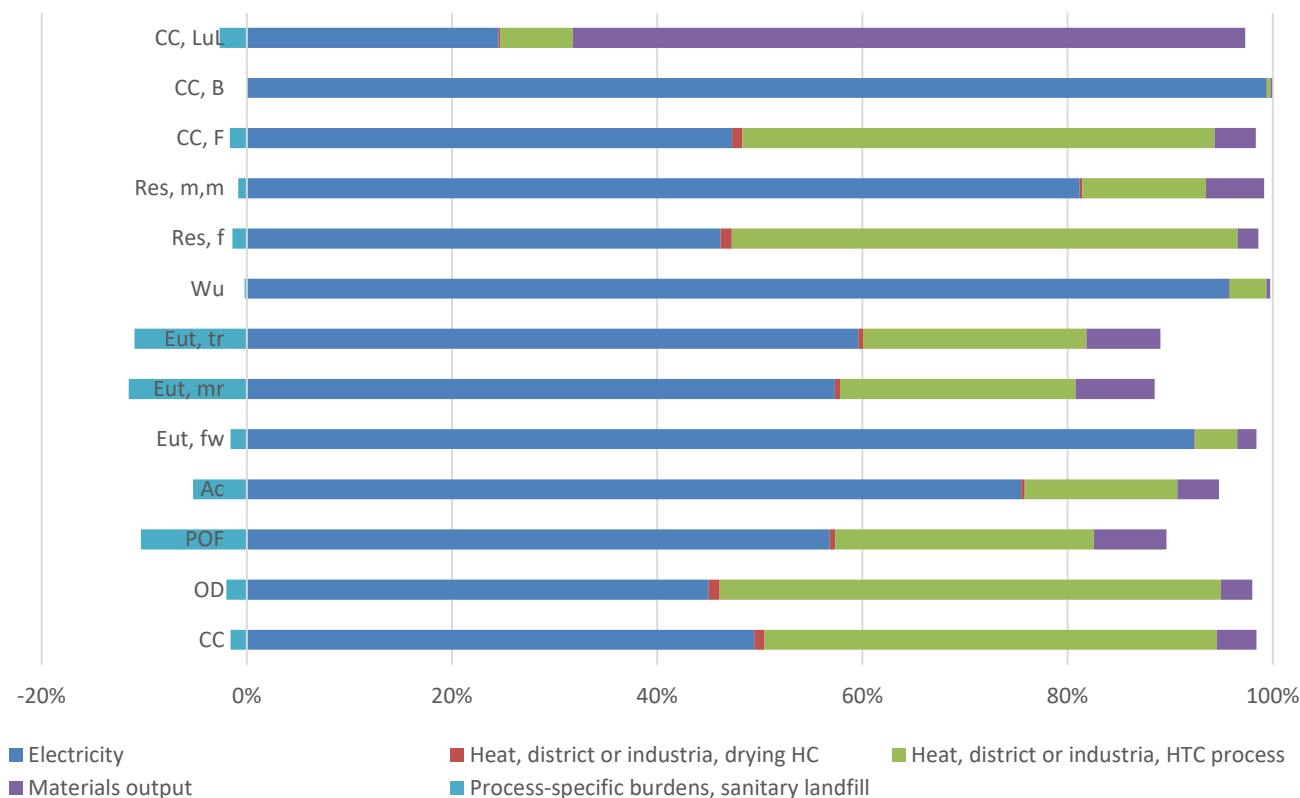


) it is noticed that the largest impact turns out to be electricity while the impact avoided by recycling the wet biomass decreases the overall impacts.

Table 7. Impacts of HTC process

Impact category	Electricity	Heat, district or industria, drying HC	Heat, district or industria, HTC process	Hydrochar produced	Process-specific burdens, sanitary landfill
CC	0,25	0,00487	0,22	0,02	-0,008
OD	3,18E-08	7,50E-10	3,45E-08	2,17E-09	-1,39E-09
POF	5,05E-04	4,87E-06	2,24E-04	6,30E-05	-9,19E-05
Ac	1,06E-03	4,56E-06	2,10E-04	5,68E-05	-7,36E-05
Eut, fw	6,18E-06	5,97E-09	2,74E-07	1,24E-07	-1,06E-07
Eut, mr	1,50E-04	1,31E-06	6,01E-05	2,01E-05	-3,01E-05
Eut, tr	1,80E-03	1,43E-05	6,59E-04	2,18E-04	-3,31E-04
Wu	0,155	1,26E-04	0,006	6,20E-04	-3,66E-04
Res, f	3,5	0,08	3,77	0,16	-0,11
Res, m,m	5,05E-07	1,63E-09	7,47E-08	3,53E-08	-5,19E-09
CC, F	0,23	0,005	0,22	0,02	-0,008
CC, B	0,02	1,78E-06	8,18E-05	3,07E-05	-1,03E-05
CC, LuL	2,99E-05	1,88E-07	8,63E-06	7,98E-05	-3,23E-06

Figure 4. Contribution of each hydrochar component production



4. Conclusions and future developments

This paper presents a comprehensive analysis of life cycle assessment of innovative plasters that have been additivated with hydrochar. The aim of this research is to compare the environmental impacts resulting from the production processes of these plasters with those of their standard alternatives. The addition of hydrochar (4% by weight) makes it possible to produce an environmentally sustainable plaster. The inventory of all the materials used for producing 1500 kg of plasters (d.u.) was made and the impacts avoided by landfilling wet biomass are considered. Results show that, in almost all categories, plasters additivated with hydrochar have a lower environmental impact than standard plasters. However, there are some categories where water and carbon content in the mix are influential. Next steps involve the sensitivity analysis considering different ratio of water and fluidifiers and the comparison of environmental impacts considering other percentages of hydrochar as a partial replacement of binders. Before making this comparison, it is necessary to identify the mechanical performances of plasters to verify the influence of the content of water on the strength of the mix.

To complete the characterization of the final products in terms of their sustainability, TGA analysis and thermo-acoustic tests on samples will be done to obtain physical properties, thermal conductivity, transmission loss, and sound absorption of standard plasters and plasters with hydrochar.

5. References

1. Fawzy S, Osman AI, Doran J, Rooney DW. Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environ Chem Lett* [Internet]. 2020;18(6):2069–94. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
2. Klopffer W. Life Cycle Assessment - From the Beginning to the Current State. *Environ Sci Pollut Res*. 1997;4(4):223–8.
3. Curran MA. LIFE CYCLE ASSESSMENT: PRINCIPLES AND PRACTICE. SAIC. 2006;
4. Curran MA. Life Cycle Assessment: A review of the methodology and its application to sustainability. *Curr Opin Chem Eng* [Internet]. 2013;2(3):273–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coche.2013.02.002>
5. Khasreen MM, Banfill PFG, Menzies GF. Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: A review. *Sustainability*. 2009;1(3):674–701.
6. Zabalza Bribián I, Valero Capilla A, Aranda Usón A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build Environ* [Internet]. 2011;46(5):1133–40. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
7. Monni S, Pipatti R, Syri S. Global climate change mitigation scenarios for solid waste. 2006.
8. Sri Shalini S, Palanivelu K, Ramachandran A, Raghavan V. Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review. *Biomass Convers Biorefinery*. 2021;11(5):2247–67.
9. Chen L, Zhang Y, Labianca C, Wang L, Ruan S, Poon CS, et al. Carbon-negative cement-bonded biochar particleboards. *Biochar* [Internet]. 2022;4(1). Available from: <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00185-8>
10. Zhang Y, He M, Wang L, Yan J, Ma B, Zhu X, et al. Biochar as construction materials for achieving carbon neutrality. *Biochar* [Internet]. 2022;4(1). Available from: <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00182-x>
11. Mensah RA, Shanmugam V, Narayanan S, Razavi SMJ, Ulfberg A, Blanksvärd T, et al. Biochar-added cementitious materials—a review on mechanical, thermal, and environmental properties. *Sustain*. 2021;13(16):1–27.
12. Antonia M, Christopher K, Mariu K, Eleni A, Asterios B, Aris D. Life cycle analysis of mortars and its environmental impact. *Mater Res Soc Symp Proc*. 2006;895(January):145–50.
13. Kumar A, Saini K, Bhaskar T. Hydrochar and biochar: Production, physicochemical properties and techno-economic analysis. *Bioresour Technol* [Internet]. 2020;310(April):123442. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123442>
14. Song E, Park S, Han S, Lee E, Kim H. Characteristics of Hydrothermal Carbonization Hydrochar Derived from Cattle Manure. *Energies*. 2022;15(23).
15. Roy P, Dutta A, Gallant J. Evaluation of the life cycle of hydrothermally carbonized biomass for energy and horticulture application. *Renew Sustain Energy Rev*. 2020;132(April 2019).
16. Espinoza Pérez L, Espinoza Pérez A, Pino-Cortés E, Vallejo F, Díaz-Robles LA. An environmental assessment for municipal organic waste and sludge treated by hydrothermal carbonization. *Sci*

- Total Environ [Internet]. 2022;828:154474. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154474>
17. Chaparro-Garnica J, Guiton M, Salinas-Torres D, Morallón E, Benetto E, Cazorla-Amorós D. Life Cycle assessment of biorefinery technology producing activated carbon and levulinic acid. *J Clean Prod*. 2022;380(November 2021).
 18. Cardarelli A, De Santis M, Cirilli F, Barbanera M. Computational fluid dynamics analysis of biochar combustion in a simulated ironmaking electric arc furnace. *Fuel* [Internet]. 2022;328(June):125267. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125267>
 19. Marangon BB, Castro JS, Assemany PP, Couto EA, Calijuri ML. Environmental performance of microalgae hydrothermal liquefaction: Life cycle assessment and improvement insights for a sustainable renewable diesel. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2022;155(November 2021):111910. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111910>
 20. Database & Support team at PRé Sustainability. *Simapro Database Manual*. 2022;(June):3–48. Available from: <http://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>
 21. British Standards Institution (BSI). *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Iso 140442006*. 2020;(May).
 22. British Standards Institution. *Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products. EN 158042012+A22019*. 2013;(February):70.
 23. Reynaud P, Saâdaoui M, Meille S, Fantozzi G. Water effect on internal friction of set plaster. *Mater Sci Eng A*. 2006;442(1-2 SPEC. ISS.):500–3.
 24. Wang T, Zhai Y, Zhu Y, Li C, Zeng G. A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2018;90(December 2016):223–47. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.071>
 25. Mohammadi A, Venkatesh G, Sandberg M, Eskandari S, Joseph S, Granström K. A comprehensive environmental life cycle assessment of the use of hydrochar pellets in combined heat and power plants. *Sustain*. 2020;12(21):1–15.
 26. Volta A, Gherardi G, Villani G, Marletto V. Carbonizzazione idrotermale e hydrochar. *Ecoscienza*. 2020;2:50–1.
 27. Garcia R, Freire F. Carbon footprint of particleboard: A comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. *J Clean Prod* [Internet]. 2014;66:199–209. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.073>

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Determinazione dell'impronta di carbonio di edifici pubblici: due casi di studio di impianti sportivi di nuova progettazione

Claudia Pacchiega¹, Agnese Marcazzani², Laura Mazzini², Carlotta Tasca², Patrizio Fausti^{2*}

¹ Libera professionista, Ferrara, 44122.

² Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Ingegneria, Via Saragat 1, 44122, Ferrara.

* Autore di riferimento. E-Mail: patrizio.fausti@unife.it

Abstract: Lo studio si è proposto di analizzare ed applicare le procedure per la quantificazione degli impatti ambientali, in particolare dell'impronta di carbonio, nella realizzazione e gestione di edifici pubblici. A tale scopo sono stati studiati due edifici sportivi di nuova progettazione: un palazzetto dello sport e l'edificio di supporto ad una pista per atletica, ubicati rispettivamente in Lombardia ed in Emilia-Romagna. Le procedure per la valutazione dell'impronta di carbonio sono ampiamente descritte in letteratura e nelle applicazioni professionali correnti, soprattutto per l'ambito industriale (UNI EN ISO 14064-1:2019) [1] e per le certificazioni di prodotto (UNI EN ISO 14067:2018) [2]. Per la filiera dell'edilizia, invece, tali procedure sono ancora in fase di sviluppo ed alcuni protocolli di sostenibilità ambientale internazionale applicano analisi basate sulla metodologia del Life Cycle Assessment (LCA). A tale scopo è stata applicata la metodologia LCA, secondo le procedure proposte dalle norme UNI EN 15978 del 2011 [3] e UNI EN ISO 14040 del 2021 [4]. Nei due casi studiati tale metodologia ha consentito di calcolare la quantità totale di emissioni generate, in termini di anidride carbonica (CO₂), da materiali, lavorazioni, consumi energetici, attività antropica e rifiuti. Gli obiettivi sono quelli di applicare la metodologia di analisi della Carbon Footprint, tipica dell'ambito industriale, al contesto edile, oltre che di fornire utili indicazioni a progettisti e tecnici del settore. Dall'applicazione delle procedure è emersa la necessità di avere a disposizione dati dettagliati solitamente disponibili ad un livello di progettazione avanzata. Questo rappresenta un elemento di criticità se si pensa che, in ambito nazionale, è necessario fornire informazioni sugli impatti ambientali già per la prima fase di progettazione relativa allo studio di fattibilità tecnico economica.

Parole chiave: Carbon footprint; Life Cycle Assessment; Sustainability; Operational energy; Embodied energy.

1. Introduzione

La sostenibilità di una soluzione edilizia è strettamente correlata ai materiali utilizzati, al contenimento dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra. Il primo passo verso una progettazione sostenibile consiste nel determinare la soluzione progettuale migliore che deve possedere un edificio, le soluzioni impiantistiche, la scelta di materiali e lavorazioni, l'utilizzo del verde.

La metodologia del Life Cycle Assessment (LCA), permette di valutare l'impatto ambientale di un prodotto o di un servizio durante tutto il suo ciclo di vita: dall'estrazione delle materie prime, allo smaltimento o fine vita.

Tra i possibili indicatori ambientali calcolabili mediante tale metodologia, quello di interesse nell'ambito di questo studio è il potenziale di riscaldamento globale, strettamente correlato alla carbon footprint.

La carbon footprint o "impronta di carbonio" è un indicatore che quantifica le emissioni di gas climalteranti che hanno effetto sul riscaldamento globale e si misura in KgCO₂ equivalente o tonnellate di CO₂ equivalente. Per quanto riguarda la determinazione della carbon footprint di un prodotto o di un'organizzazione vi sono diverse normative [1-2]. Al contrario, per gli edifici, ritenuti responsabili dalla commissione europea del 40% di emissioni di gas climalteranti, non vi sono normative specifiche. Come normativa di riferimento ai fini dell'analisi è stata usata la Norma UNI EN 15978 [3] che fornisce una metodologia di calcolo per la prestazione ambientale di un edificio, basata sull'analisi LCA, applicabile sia a edifici di nuova costruzione sia soggetti a ristrutturazione.

A livello Europeo uno dei requisiti richiesti dalla versione non ancora approvata della EPBD recast v.4 è il calcolo del potenziale di riscaldamento globale sull'intero ciclo di vita dell'edificio per le nuove costruzioni a partire dal 2030 [5].

A livello nazionale, ad oggi, le linee guida emesse dal Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibile e dal Consiglio superiore dei lavori pubblici per la redazione del progetto di fattibilità tecnica ed economica da porre a base dell'affidamento di contratti pubblici di lavori del PNRR e del PNC, prevedono che all'interno dell'analisi di sostenibilità dell'opera vi sia "una stima della Carbon Footprint dell'opera in relazione al ciclo di vita e il contributo al raggiungimento degli obiettivi climatici"[6-7].

Nel presente studio sono stati presi in esame due edifici pubblici di recente progettazione. Per effettuare il calcolo della carbon footprint si è utilizzato l'ausilio del software OneClick LCA basato sulla norma UNI EN 15978 [3].

2. Procedure operative

Per svolgere l'analisi in riferimento alla normativa, oltre alla definizione dell'obiettivo e dell'ambito di applicazione, sono stati raccolti i dati necessari al calcolo tramite analisi di inventario, sono stati poi implementati i calcoli ed infine si sono analizzati i risultati.

Complementarmente, sono stati effettuati dei confronti al fine di valutare eventuali scelte progettuali volte a ridurre le emissioni e si è verificata l'avvenuta compensazione.

2.1 Life Cycle Assessment

La metodologia LCA si suddivide principalmente in tre fasi:

- a. La definizione dell'obiettivo e dell'ambito di applicazione
- b. L'analisi di inventario LCI.
- c. L'analisi degli impatti e interpretazione dei risultati.

2.1.1 Definizione dell'obiettivo e dell'ambito di applicazione

In questa fase si definiscono l'obiettivo, l'ambito di applicazione, il periodo di riferimento e i confini del sistema dell'analisi.

L'obiettivo dello studio è stato quello di determinare l'impronta di carbonio di due edifici pubblici di recente progettazione ai fini della contabilizzazione e della compensazione delle emissioni di CO₂.

Il periodo di studio di riferimento adottato è un arco temporale di 50 anni in quanto si ritiene che nel contesto italiano questo sia uno standard di vita utile per gli edifici pubblici sportivi di questo tipo.

L'ambito è costituito da:

- Un edificio sportivo destinato ai servizi e alla tribuna di una nuova pista di atletica comunale. Il blocco dei servizi è costituito da un'area destinata al pubblico in cui si trova una sala polivalente/bar, l'infermeria e i servizi igienici; ed un'area riservata agli atleti e ai giudici in cui sono presenti gli spogliatoi, servizi igienici, le docce, l'infermeria, il locale tecnico e un deposito. Il blocco servizi è caratterizzato da un volume lordo riscaldato di 5385 m³.
- Un edificio sportivo destinato a palazzetto comunale dello sport. Esso è caratterizzato da un'area a doppio volume destinata al campo da gioco e alle tribune per il pubblico e da un'area servizi ad un piano comprendente. L'edificio è caratterizzato da un volume lordo riscaldato di 16773 m³.

Per determinare i confini del sistema sono state prese in considerazione le seguenti fasi, come indicato nella norma UNI EN 15978 [3]:

- La fase di produzione dei materiali (A1-A3) che comprende estrazione delle materie prime (A1), trasporto di queste al sito di produzione (A2) e la loro lavorazione (A3).
- La fase di costruzione (A4-A5) che comprende il trasporto dei materiali dal sito di produzione al cantiere (A4) e il processo di costruzione/installazione (A5)
- La fase d'uso (B1-B6) che comprende utilizzo, manutenzione e sostituzione (B1-B5) e utilizzo di energia operativa (B6).
- La fase di fine vita (C1-C4) che comprende: demolizione/decostruzione dell'edificio (C1), trasporto (C2), trattamento (C3) e smaltimento (C4) dei rifiuti.
- La fase di quantificazione dei benefici ambientali (D). Tale modulo non è stato conteggiato nell'impatto complessivo in quanto in tale modulo si quantificano i benefici ambientali considerati come potenziali risorse per un uso futuro. Essi sono dovuti al riutilizzo, riciclo o recupero energetico dei materiali e all'energia esportata. Il valore è espresso come valore negativo in quanto non costituisce un impatto, bensì un beneficio.

2.1.2 Analisi di inventario LCI e fattori di emissione dei materiali

In tale fase si raccolgono i dati necessari ai fini del calcolo, suddivisi per le varie fasi del ciclo di vita. È la fase in cui, a fronte della quantificazione e definizione delle attività, devono essere associati ad esse i fattori di emissione.

Per quanto riguarda la fase di produzione dei materiali (A1-A3), i dati e le quantità relative sono state ricavate dai computi metrici estimativi di progetto; perciò, in quanto tali, sono da considerarsi accurate. I coefficienti di emissione dei materiali, ricavabili solitamente da banche dati online [8] e dai certificati EPD dei produttori [9], nel caso in esame sono stati ricavati dalle banche dati presenti nel software (Ecoinvent e Gabi).

Per le fasi di: trasporto al cantiere, costruzione e installazione, manutenzione e sostituzione, demolizione e decostruzione, trasporto, trattamento e smaltimento dei rifiuti, non disponendo di dati certi relativi a progetto sono state fatte delle ipotesi e delle stime sulla base di dati medi presenti nelle banche dati dei software sopra menzionati.

2.1.3 Analisi della fase operativa e fattori di emissione dei vettori energetici

I dati degli usi energetici della fase operativa sono stati ricavati dalle relazioni energetiche di progetto, in termini di fabbisogno di combustibile (gas naturale ed energia elettrica da rete) e di energia elettrica prodotta on-site. Questi valori sono il risultato della valutazione energetica di tipo A1 "Design Rating" prevista dalla UNI TS 11300-1 [10] per applicazioni "sul progetto", cioè caratterizzate da uso standard, clima standard ed edificio di progetto.

I dati di consumo dell'energia elettrica di progetto e di produzione dell'energia elettrica da fonte rinnovabile, riscontrabile negli elaborati di progetto, sono calcolati applicando il metodo mensile di cui alla UNI TS 11300-5 [11]. Tale metodo prevede che il fabbisogno annuale di energia primaria per ogni servizio considerato è dato dalla somma dei fabbisogni di energia primaria dei singoli servizi per ogni intervallo di tempo assunto come base di calcolo (il mese). Pertanto, il bilancio mensile tra energia esportata ed energia prodotta prevede che il fabbisogno di energia primaria per ogni servizio considerato sia dato dalla differenza dell'energia mensilmente consegnata (delivered) e dell'energia mensilmente esportata (exported). Ne risulta che, se mensilmente ci sono dei casi di energia esportata maggiore di quella consegnata per tutti i servizi energetici, si ottiene l'azzeramento del fabbisogno ed un eventuale surplus di energia prodotta e non utilizzata (per alcun servizio energetico). Possono però essere presenti dei mesi in cui accade il contrario in cui cioè i risultati del bilancio mostrano meno energia prodotta di quella consegnata e pertanto un consumo di energia elettrica diverso dallo zero.

I dati di consumo dell'energia elettrica utilizzati nella presente analisi LCA, invece, pur partendo dai risultati di progetto di tipo A.1, considerano come base di calcolo l'anno e pertanto il bilancio energetico fra energia esportata e consegnata è valutato sul totale annuo. In tal modo, se ci sono mesi con surplus di produzione e mesi con fabbisogno di energia consegnata diverso da zero, i primi andranno a compensare i secondi costituendo di fatto un bilancio annuale.

I fattori di emissione dei vettori energetici sono definiti a livello nazionale ed aggiornati periodicamente sulla base degli sviluppi energetici nazionali riguardanti la produzione lo stoccaggio e il trasporto dei combustibili e dell'energia elettrica [12]. Nel presente studio sono stati usati i fattori di emissione del medesimo data base utilizzato per i materiali sebbene non siano i più aggiornati a livello nazionale.

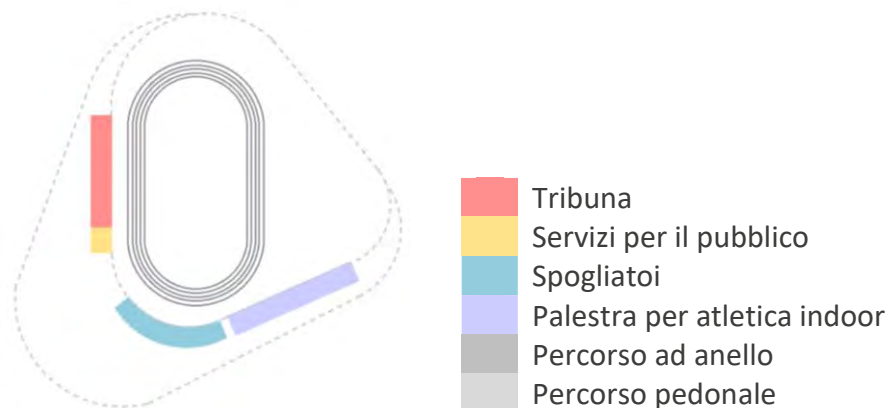
Tabella 1. Fattori di emissione utilizzati nell'analisi

Gas naturale	2,26 KgCO ₂ eq/Nm ³
Energia elettrica	0,49 KgCO ₂ /kWh
Energia elettrica da produzione fotovoltaica	0,01 KgCO ₂ eq/kWh

3. Caso studio: Stadio di atletica, Reggio Emilia.

Il primo edificio studiato è un edificio ad uso sportivo, inserito nel nuovo Stadio di atletica del comune di Reggio Emilia, in Emilia-Romagna.

Figura 1. Schema planimetrico dello Stadio di atletica del comune di Reggio Emilia.



L'edificio è stato recentemente (2022) progettato dallo studio Teco+ Partners STP Srl, ma non è stato ancora realizzato. L'intero contesto è composto dalla pista di atletica, dal blocco servizi e tribuna e dalla palestra indoor è inserito in un ambito urbano sostenibile pienamente accessibile con percorsi di accesso sia carrabili che ciclo pedonali e prevede inoltre la piantumazione di nuovi alberi.

Lo studio LCA è stato condotto sulla sola parte di servizi all'attività sportiva che è contenuta all'interno di un elemento lineare che circonda la pista di atletica. Essa è composta da spogliatoi e servizi per atleti ed arbitri, servizi igienici per il pubblico, palestra indoor e atrio/bar. La tecnologia costruttiva dell'edificio è di tipo a telaio in c.a. e tamponamenti in laterizio con cappotto in lana minerale e rivestimento in lamiera ondulata per formare una facciata ventilata. Per i tamponamenti interni è prevista la tecnologia a secco. I solai di copertura, con struttura di tipo predalles, saranno caratterizzati da isolamento in estradosso e finitura in parte con tetto a verde intensivo e in parte con lamiera graffiata. I controsoffitti, accessibili per la manutenzione degli impianti saranno realizzati in cartongesso, mentre nella zona adibita a palestra il controsoffitto sarà in lamiera microfonata

fonoassorbente. La pavimentazione sarà in gres porcellanato in tutti gli ambienti fatto salvo per la palestra dove è previsto un rivestimento in materiale sintetico, adatto per l'attività sportiva indoor. I serramenti esterni saranno in alluminio a taglio termico, con vetrocamera di sicurezza mentre quelli interni in alluminio con pannello in laminato plastico. La tribuna è realizzata in gradoni di cemento armato e una finitura superficiale lisciata.

Non è previsto l'uso né di gas naturale né di altri tipi di combustibili fossili. Inoltre, è previsto un sistema di recupero delle acque piovane per il completo soddisfacimento del fabbisogno irriguo delle aree verdi, volto al contenimento del consumo idrico. L'obiettivo di queste soluzioni impiantistiche è quello di raggiungere le prestazioni di un edificio NZEB, come richiesto, per gli edifici pubblici di nuova costruzione, dalla Deliberazione di Giunta Regionale Emilia-Romagna concernente i requisiti minimi di risparmio energetico in edilizia [13].

Per quanto riguarda gli impianti sono presenti i seguenti servizi energetici: riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione ed illuminazione. Relativamente agli impianti termici il progetto prevede la generazione combinata per riscaldamento e acqua calda sanitaria mediante un sistema di pompe di calore aria-acqua ad assorbimento elettrico. Il fluido termovettore viene accumulato nel serbatoio inerziale, da tale accumulo partono i circuiti di produzione ACS, riscaldamento e UTA.

La regolazione del riscaldamento è di tipo climatica e di zona; la distribuzione è a collettori; il sottosistema di emissione è composto da radiatori, ventilconvettori e bocchette in sistemi di aria calda. L'acqua calda sanitaria prevede un accumulo da 2000 litri con due scambiatori a fascio tubiero in acciaio inox alimentati dal fluido termovettore riscaldato dalla pompa di calore. Nella zona bar e infermeria l'ACS è garantita da due ulteriori accumuli dedicati in pompa di calore.

Nel blocco servizi è presente un impianto ad aria primaria, in cui il trattamento dell'aria è fornito da unità termoventilante UTA completa di sistema di recupero a flussi incrociati; nella zona palestra l'impianto è a tutt'aria tramite un UTA con recuperatore di calore ad alta efficienza.

Il progetto è conforme alla legislazione regionale dell'Emilia Romagna del 2022 [13] in materia di requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e pertanto, in materia di fonti energetiche rinnovabili, l'impianto termico e l'impianto tecnologico idrico-sanitario è progettato e realizzato in modo da garantire il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili di almeno il 66% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e di almeno il 66% della somma dei consumi previsti per la produzione di acqua calda sanitaria e la climatizzazione invernale e la climatizzazione estiva. Per quanto riguarda le fonti rinnovabili elettriche, sempre in rispondenza della legislazione Regionale [13], è previsto un impianto fotovoltaico della potenza complessiva di picco pari a 74 kW.

Come richiamato al par. 2.1.4, si considera per il presente studio un bilancio annuale dell'energia elettrica prodotta on-site da fonti rinnovabili e dell'energia elettrica consegnata. Dagli elaborati di progetto risulta una produzione di energia elettrica dall'impianto fotovoltaico pari a 77856 kWh/anno e il fabbisogno annuale di energia elettrica dell'edificio pari a 77426 kWh/anno.

3.1 Analisi degli impatti

L'analisi effettuata ha determinato che per l'edificio l'impronta di carbonio totale è di 2446 tCO₂eq corrispondente a 15,49 KgCO₂eq/m²anno.

In particolare, la fase del ciclo di vita più incidente è quella relativa alla fase di produzione (A1-A3) dei materiali con il 77% di incidenza sul totale, ed inoltre risulta che il consumo di energia è la componente che ha il minor impatto con il 2% di incidenza sul totale (Figura 2).

Analizzando poi l'incidenza delle componenti strutturali dell'edificio emerge che le strutture orizzontali (solai, travi e tetti) sono le più impattanti con il 32% di incidenza e, a seguire, le strutture verticali e fondazioni rispettivamente con il 26% e il 25%.

Questo è dovuto al fatto che tali strutture sono in cemento armato e, come si può vedere dal grafico (successivo) relativo agli impatti sui materiali, il calcestruzzo è il materiale più impattante con il 53%, a seguire l'acciaio con il 13%, tutti gli altri materiali hanno invece impatti minori (Figura 3).

Figura 2. Impatto delle fasi del ciclo di vita. Caso studio: Stadio di atletica, Reggio Emilia.

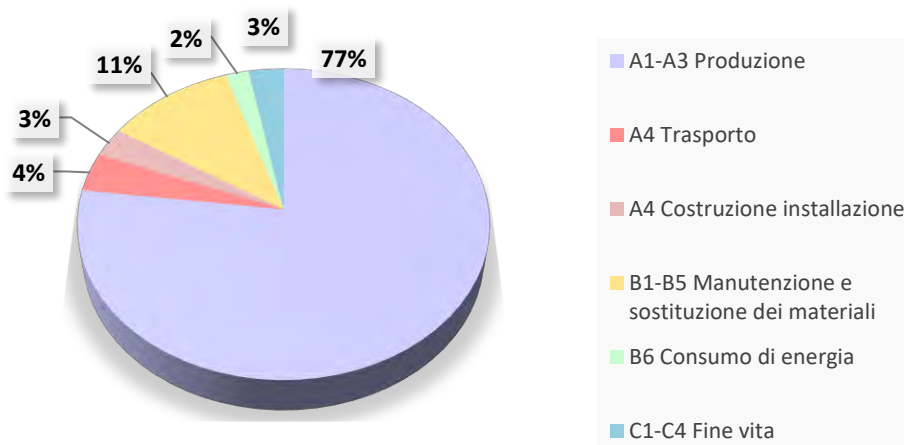
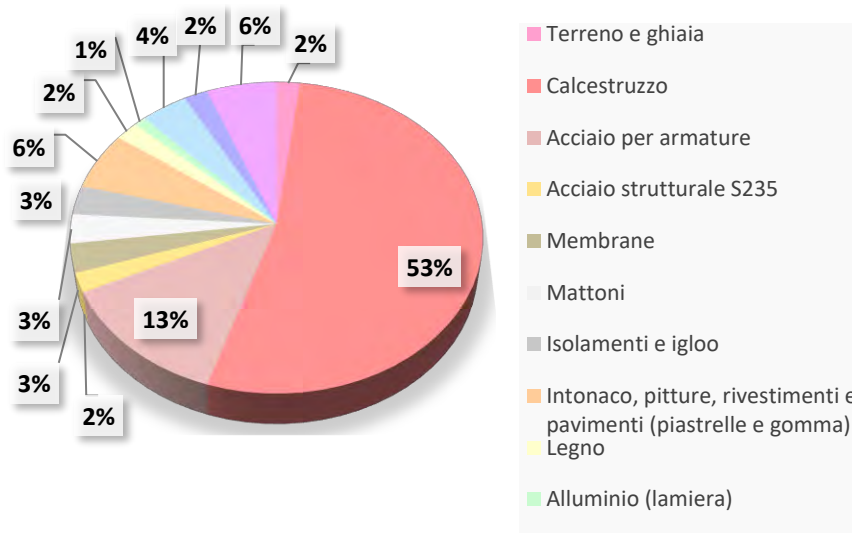


Figura 3. Impatto dei materiali dell'edificio. Caso studio: Stadio di atletica, Reggio Emilia.



Un'ultima valutazione riguarda il carbonio operativo e quello incorporato dove si evidenzia come il carbonio operativo, relativo alla componente energetica, abbia un minimo impatto (2%) rispetto al carbonio incorporato, relativo a tutte le altre fasi del ciclo di vita la cui incidenza è pari al 98%.

3.2 Confronti tra modelli

Il modello di base è stato confrontato con altri due modelli:

- modello con bilancio energetico mensile
- modello con materiali sostenibili.

3.2.1 Confronto tra modello di base con bilancio energetico annuale e modello con bilancio energetico mensile

Questo modello differisce dal caso base per la valutazione energetica di cui al par. 2.1.3. In particolare, invece di considerare un bilancio annuale fra energia elettrica esportata ed energia elettrica consegnata, sono stati considerati i consumi derivanti dagli elaborati di progetto, ovvero relativi al bilancio mensile effettuato ai sensi della UNI TS 11300-5 [11]. In tal modo l'energia consegnata non risulta più compensata dalla produzione, perché alcuni mesi sono caratterizzati da una produzione da fonte rinnovabile inferiore al fabbisogno.

Ne risulta pertanto un consumo di energia elettrico totale annuale, richiesto alla rete nazionale non più nullo ma pari a 29227 kWh/anno, a fronte di una produzione di energia elettrica da fotovoltaico consumata dai servizi energetici pari a 48199 kWh/a, determinata dalla somma dei contributi mensili, e ad una produzione di energia elettrica da fotovoltaico ma non consumata di 29652 kWh/a, determinata dalla somma dei surplus mensili. Tali dati sono ricavati dalla documentazione di progetto.

Tabella 2. Fabbisogno e produzione annuali di energia elettrica, calcolo mensile.

Caso studio: Stadio di atletica, Reggio Emilia.

Produzione energia elettrica impianto fotovoltaico	77856 kWh/anno
Energia elettrica da produzione fotovoltaica utilizzata dai servizi di riscaldamento, acqua calda sanitaria, raffrescamento, ventilazione, illuminazione (somma dei contributi mensili)	48199 kWh/anno
Energia elettrica da produzione fotovoltaica non consumata (somma dei surplus mensili)	29652 kWh/anno

L'impronta di carbonio totale del modello di confronto è di 3123 tCO₂eq corrispondente a 19,77 KgCO₂eq/m²anno; relativamente alle fasi del ciclo di vita è aumentata la componente energetica, in percentuale si passa dal 2% nel modello di base con bilancio annuale ad un 23% nel modello di confronto con calcolo energetico mensile.

3.2.2 Confronto tra modello di base con bilancio energetico annuale e modello con materiali sostenibili

Nel modello non è stata sostituita la tipologia costruttiva in cemento armato ma sono stati sostituiti i materiali più impattanti come calcestruzzo e acciaio con calcestruzzo contenente “cemento di scorie”, materiale cementizio, sottoprodotto degli alti forni utilizzati per la produzione del ferro e con acciaio contenente materiale riciclato. L'impronta di carbonio totale nel modello in cui sono stati utilizzati materiali sostenibili è di 1789 tCO₂eq corrispondente a 11,33 KgCO₂eq/m²anno ed in particolare si nota che per la fase di produzione in termini di tonnellate si passa da un valore di 1883 tCO₂eq nel modello di base ad un valore di 1257 tCO₂eq nel modello di confronto, con una riduzione complessiva del 33%.

Nel dettaglio si è visto che per ogni tipologia strutturale che nel modello di base aveva una maggiore incidenza, si ottiene una riduzione dell'impatto, in particolare per quanto riguarda fondazioni, strutture orizzontali e strutture verticali.

3.3. Verifica di compensazione

Si è inoltre verificata la compensazione dell'impronta di carbonio emessa dal complesso sportivo tramite la piantagione di alberi.

Da progetto, le tipologie di alberi previste sono di sei specie differenti:

- Acer Rubrum (acero rosso) - 12 piante
- Populus Alba (pioppo bianco) - 169 piante
- Quercus Palustris (quercia di palude) - 41 piante
- Quercus Rubra (quercia rossa) - 18 piante
- Morus Platanifolia – 47 piante
- Pyrus Calleriana (pero chanticleer) – 34 piante

Per prima cosa è stata determinata, per ogni specie di albero, la quantità di CO₂ che questo può assorbire, sia per quanto riguarda un albero maturo, sia per quanto riguarda un nuovo impianto. Tali dati sono stati ricavati dalle schede tecniche relative alla tipologia di albero [14]. È stata poi eseguita verifica di compensazione ipotizzando sia piantagione di alberi maturi che nuovi individui.

Per procedere alla verifica di compensazione da parte di tali specie arboree, si è ipotizzato inizialmente di piantare solo piante mature ed è risultato una quantità di assorbimento complessivo della CO₂ di 68,68 tCO₂/anno. Tale verifica si è svolta, in primo luogo senza considerare lo stoccaggio di carbonio da parte dei materiali come il legno che ha proprietà di assorbimento.

Si stima, in media, che un albero raggiunga la sua maturità in un range temporale compreso tra i 20 e i 40 anni e che durante il suo accrescimento la capacità di assorbimento dell'anidride carbonica sia tra i 10 e i 30 KgCO₂/anno [15]. Tali valori sono variabili in base alla tipologia di albero: alcune specie hanno velocità di accrescimento maggiori rispetto ad altre e, a sua volta, tale velocità può dipendere da altre variabili quali il clima e l'ambiente. Per questo motivo non si può calcolare con certezza la quantità di CO₂ effettivamente assorbita da un albero in fase di accrescimento, è possibile però effettuarne una stima sulla base di dati medi.

Si è ipotizzato, pertanto, che in media le diverse tipologie di albero raggiungano la maturità dopo trenta anni (questo dato è stato preso come valore intermedio di 20-40 anni) e che l'assorbimento medio di CO₂ durante l'accrescimento sia pari a 20 KgCO₂/anno (media tra 10 e 30 KgCO₂/anno). Per il primo anno, si è considerato come valore di riferimento il dato ricavato dalle schede tecniche relativo all'assorbimento di CO₂ da parte di un nuovo individuo, mentre al trentesimo anno si è considerato che la pianta sia matura. Pertanto, per i successivi venti anni, è stata utilizzata la capacità di assorbimento dell'albero pari al valore riportato nelle schede tecniche per una pianta matura.

Tabella 3. Verifica compensazione della CO₂. Caso studio: Stadio di atletica, Reggio Emilia.

Verifica di compensazione	Con piante mature	Con nuovi individui	Con nuovi individui e stoccaggio di carbonio
Edificio di riferimento	Sì	No	No
Modello di confronto con vita utile di 80 anni	Sì	Sì	Sì
Modello di confronto con materiali sostenibili	Sì	No	Sì

Come si osserva dalla tabella 3, la verifica di compensazione risulta positiva o negativa in base alle ipotesi effettuate. Nell'ipotesi di ipotizzare fin dall'inizio l'utilizzo di piante mature, la verifica è sempre soddisfatta per qualsiasi condizione. Considerando nuovi individui, la verifica è soddisfatta solo considerando l'ipotesi di una vita utile maggiore. Con l'utilizzo della capacità di stoccaggio dei materiali utilizzati nella costruzione, in particolare de legno, la verifica risulta valida ad eccezione del caso iniziale di edificio senza materiali sostenibili.

4. Caso studio: Palasport, Casalmaggiore.

Il secondo edificio studiato è un palasport sito a Casalmaggiore (CR), adibito ad ospitare manifestazioni sportive ed eventi pubblici. Anche questo edificio è stato recentemente progettato (2022) dallo studio Teco+ Partners STP Srl.

L'edificio si sviluppa prevalentemente su un solo piano con l'eccezione del volume collocato al di sopra del campo da gioco e delle tribune.

Figura 4. Planimetria funzionale del Palasport del comune di Casalmaggiore.

PT a sinistra, P1 a destra.



Costruttivamente l'edificio è caratterizzato da due tecnologie principali. Il doppio volume, con struttura prefabbricata in c.a. c.a.p. (pilastri, travi e strutture della gradonata), prevede dei tamponamenti in pannelli di calcestruzzo prefabbricato con coibentazione sia interposta che sul lato esterno a cappotto in lana di roccia. La parte più bassa dell'edificio, dedicata agli spogliatoi, è prevista in c.a. gettato in opera (fondazioni, pilastri, travi) e con tamponamenti in blocchi di laterizio termico rivestiti con cappotto in lana di roccia.

Le fondazioni sono costituite da: una sottofondazione in calcestruzzo C12/15, una fondazione in calcestruzzo C25/30 e ulteriori strutture in calcestruzzo armato C28/35.

Il solaio contro terra presenta un vespaio areato con elementi igloo; la copertura del blocco spogliatoi è piana e di tipo predalles isolata all'estradosso; la copertura del campo da gioco ha una struttura costituita da travi in legno lamellare ed un pacchetto di finitura di tipo sandwich a secco con isolamento interposto.

Come finiture esterne, oltre all'intonaco del cappotto, sono previsti anche listelli di mattone facciavista nella parte di basamento.

I tamponamenti interni sono progettati in laterizi forato rivestiti su entrambi i lati con intonaco. Le finiture interne comprenderanno: controsoffitto a "lastra unica" intonacato e tinteggiato nella zona spogliatoi; controsoffitto modulare nell'atrio di ingresso e nei distributivi; pavimentazione in gres negli spogliatoi e nei distributivi; listoni in legno massello posati in modo flottante su piedini nel campo da gioco.

Per i serramenti esterni è previsto un tipo di serramento in alluminio a taglio termico e vetrocamera di sicurezza; per i serramenti interni è previsto un tipo di serramento in alluminio anodizzato con pannello in laminato plastico.

Gli impianti previsti all'interno dell'edificio oggetto di studio sono i seguenti:

- Riscaldamento: è presente un impianto bivalente in pompa di calore aria-acqua ad assorbimento elettrico e uno scambiatore del teleriscaldamento locale alimentato dalla centrale termica esistente (caldaie a gas metano). L'emissione nei locali avviene tramite bocchette in sistemi a tutt'aria (campo da gioco), radiatori (per spogliatoi e servizi igienici) e ventilconvettori (per l'atrio, infermeria, ufficio e antidoping).
- Acqua calda sanitaria: La generazione è combinata con il riscaldamento ed inoltre sono presenti due accumuli, uno di preriscaldamento da 1000 litri alimentato prevalentemente dalla pompa di calore ed uno ad alta temperatura con scambiatore esterno.
- Ventilazione: la zona campo da gioco ha un sistema a tutt'aria, con UTA a batterie idroniche alimentate dalla centrale termica. Nella zona spogliatoi e servizi igienici è presente un impianto ad aria primaria con UTA dedicata posta in copertura. Le UTA sono dotate di recuperatori a flussi incrociati.

L'edificio ha visto la progettazione definitiva ante giugno 2022 pertanto per i requisiti minimi di risparmio energetico risponde alla legislazione regionale di riferimento [16] e per quanto riguarda le fonti energetiche rinnovabili risponde al Decreto Legislativo 3 marzo 2011 n. 28 [17]. In rispondenza a

quest'ultimo riferimento l'edificio è pertanto dotato di un impianto fotovoltaico costituito da 140 moduli in silicio monocristallino aventi potenza di picco di 360 W ciascuno, per un totale di 50,40 kWp. La produzione di energia elettrica annuale dell'impianto fotovoltaico risulta in progetto pari a 57228 kWh/a, a fronte di un fabbisogno di energia elettrica annuale dell'edificio di 106771 kWh/a. Ne risulta un fabbisogno di energia elettrica annuale da rete pari a 49543 kWh/a. Oltre al consumo di energia elettrica è presente anche un consumo di gas metano per riscaldamento e ACS pari a 1266 Nm³/anno.

4.1 Analisi degli impatti

L'analisi effettuata ha determinato che per l'edificio l'impronta di carbonio totale è di 3014 tCO₂eq corrispondente a 21,70 KgCO₂eq/m²anno.

In particolare, la fase del ciclo di vita più incidente è quella relativa al consumo di energia con il 46% di incidenza sul totale, ed inoltre risulta che il fine vita è la componente che ha il minor impatto con l'1% di incidenza sul totale (Figura 5).

Analizzando l'incidenza dei materiali utilizzati emerge che le opere in calcestruzzo sono le più impattanti con il 34% di incidenza e, a seguire, le finiture e gli infissi rispettivamente con il 10% e il 9% (Figura 6).

Figura 5. Impatto delle fasi del ciclo di vita. Caso studio: Palasport, Casalmaggiore.

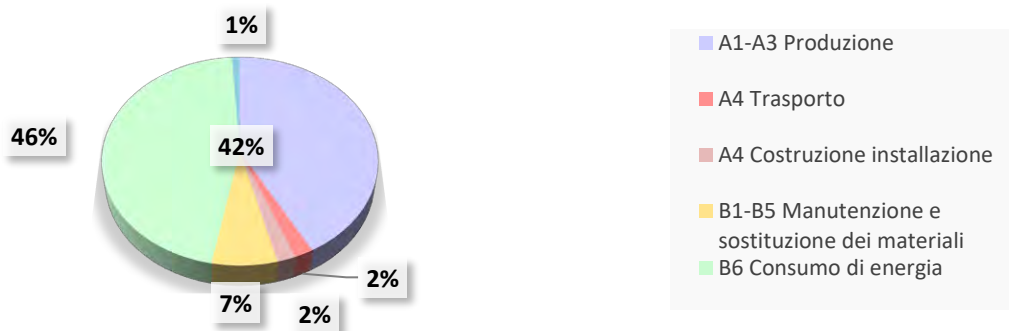
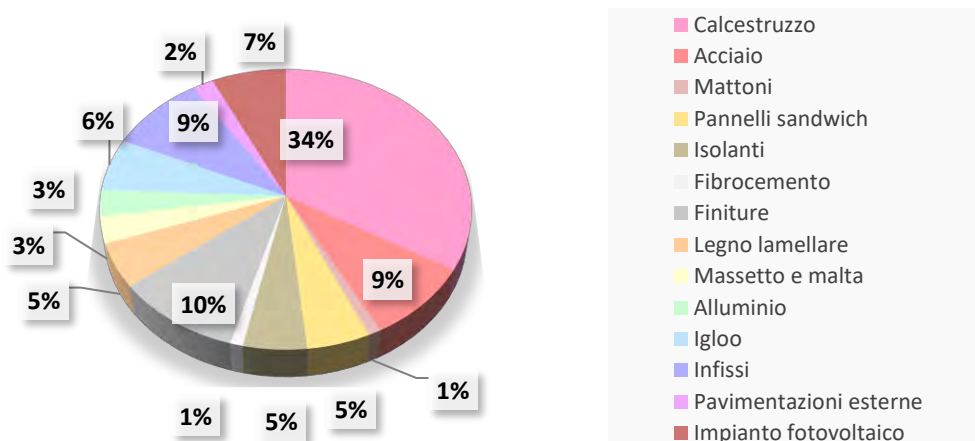


Figura 6. Impatto dei materiali costruttivi dell'edificio. Caso studio: Palasport, Casalmaggiore.



Un'ultima valutazione riguarda il carbonio operativo e quello incorporato e i risultati mostrano che il carbonio operativo, relativo alla componente energetica, ha un impatto del 46% rispetto al carbonio incorporato, relativo a tutte le altre fasi del ciclo di vita la cui incidenza è pari al 54%.

4.2 Confronti tra modelli

In questo caso, oltre al modello di base con vita utile di 50 anni si sono analizzati altri due modelli: uno con vita utile 80 anni e uno nel quale il calcolo della potenza di picco dei pannelli fotovoltaici è rispondente al D.Lgs. 199/2021 [18].

Tabella 4. Impatto complessivo e confronto percentuale. Caso studio: Palasport, Casalmaggiore.

	Impatto complessivo [tCO₂/eq]	Confronto con modello base [%]
Modello con vita utile 80 anni	4104	+36%
Modello con calcolo della potenza di picco dei pannelli fv mediante D.Lgs. 199/2021	1997	-34%

4.2.1 Confronto tra modello di base e modello con vita utile 80 anni

Considerando una vita utile di 80 anni, l'aumento complessivo dell'impronta di carbonio rispetto al modello con vita utile 50 anni è del 40%. Tale valore è dovuto all'aumento del 130% dell'impatto per la fase B1-B5, ossia la fase di manutenzione e sostituzione dei materiali e all'aumento del 60% dell'impatto per la fase di consumo di energia operativo. Queste due fasi sono le uniche sensibili alla variazione di vita utile scelta per l'edificio oggetto di studio.

L'analisi così effettuata ha determinato che per l'edificio l'impronta di carbonio totale è di 4104 tCO₂eq corrispondente a circa 18,47 KgCO₂eq/m²anno.

4.2.2 Confronto tra modello di base e modello con calcolo della potenza di picco complessiva dei pannelli fotovoltaici mediante il nuovo D.Lgs. 199/2021

Per il presente modello si è supposto di installare un impianto fotovoltaico conforme alle richieste minime del D.Lgs 199/2021 [18] cioè di aumentare la potenza di picco da installare da 50 kW a 125 kW.

Tale configurazione consente una produzione di energia elettrica annuale da fotovoltaico pari a 141436 kWh/a che copre l'intero fabbisogno annuale di energia elettrica dell'edificio.

Tabella 5. Confronto fabbisogni tra modello di base - modello con applicazione del D.Lgs. 199/2021. Caso studio: Palasport, Casalmaggiore.

	Modello di base	Modello con calcolo D.Lgs. 199/2021
Fabbisogno elettrico totale dell'edificio	106771 kWh/anno	106771 kWh/anno
Energia elettrica da produzione fotovoltaica	57228 kWh/anno	141436 kWh/anno
Energia elettrica da rete	49543 kWh/anno	0

L'analisi così effettuata ha determinato che per l'edificio l'impronta di carbonio totale è di 1997 tCO₂eq corrispondente a circa 14,38 KgCO₂eq/m²anno.

Sono stati inoltre confrontati i risultati relativi agli impatti delle fasi del ciclo di vita. Confrontando il modello di base con quello riportante l'applicazione del D.Lgs. 199/2021 [18], per quanto riguarda il confronto sulle fasi di vita, si nota che per il modello base, le fasi di produzione hanno un impatto del 42%, mentre nel secondo modello del 66%. Un'altra variazione importante riguarda la componente energia, quindi la fase d'uso che passa dal 46% del modello base all'11% del modello secondo D.Lgs. 199/2021.

Un'ultima valutazione su questo modello riguarda il carbonio operativo e quello incorporato che passano rispettivamente da 54% e 46% del caso base al 11% e 89% del caso alternativo.

4.3. Verifica di compensazione

Il calcolo di compensazione è stato in primo luogo eseguito considerando l'impatto in termini di Kg di CO₂eq annui, successivamente si è introdotta un'ulteriore ipotesi considerando lo stoccaggio di carbonio biogenico all'interno dei materiali costruttivi a base naturale, come i materiali in legno.

Sviluppando l'analisi è risultata evidente il non soddisfacimento della verifica compensazione in quanto il numero di individui da piantare si aggira attorno ai 300, numero non confrontabile con i 20 previsti dal progetto. Non si riporta l'analisi nel suo complesso in quanto non ritenuta rilevante.

5. Conclusioni

Lo studio evidenzia l'importanza di stabilire l'impronta di carbonio di un edificio ai fini di un'adeguata compensazione della CO₂ prodotta; tale compensazione gioca un ruolo fondamentale per il raggiungimento della neutralità climatica attraverso il bilanciamento dell'anidride carbonica prodotta e assorbita. Determinare l'impatto ambientale in fase di progettazione, tramite analisi LCA, consente di valutare, tra le opzioni possibili, quale sia la migliore in termini di ottimizzazione delle emissioni, prevedendo metodi di adeguata compensazione. Dallo studio emerge che la mole di dati per l'analisi della carbon footprint è disponibile ad un livello di progettazione avanzata. Infatti, per i casi studio analizzati, sono stati utilizzati gli elaborati di progetto della fase definitiva (computi metrici di ogni disciplina, analisi energetica, elaborati stratigrafici e delle finiture, schemi impianti meccanici ed elettrici). Questo è un primo elemento di criticità se si pensa che le prime richieste avanzate in ambito nazionale [6] vengono effettuate per la prima fase di progettazione relativa allo studio di fattibilità tecnico economica.

Per quanto riguarda la pista di atletica, la stima della carbon footprint mediante analisi LCA ha evidenziato quanto sia importante la scelta di materiali sostenibili ai fini di ridurre l'impatto ambientale. Nell'edificio, avente struttura portante in cemento armato, l'incidenza della fase di produzione dei materiali è del 77%, gravando per più della metà sull'impronta climatica dell'edificio mentre, la fase d'uso produce meno del 2% delle emissioni di CO₂ totali. Questo è un dato significativo se correlato alla legislazione energetica di riferimento con cui è stato progettato l'edificio, ovvero la

recente Delibera di Giunta Regionale 1261/2022 [13] che recepisce la direttiva europea sulle fonti energetiche rinnovabili [19] al pari del D.Lgs 199/2021 [18] a livello nazionale.

Osservando i risultati ottenuti, è importante sottolineare che dal punto di vista dell'impronta di carbonio, la progettazione di un edificio nZEB ha garantito la riduzione degli impatti relativi all'utilizzo di energia. La progettazione energetica, privilegiando l'uso di fonti rinnovabili, è dunque uno dei mezzi essenziali per ridurre le emissioni di carbonio nel periodo di vita utile dell'edificio. Per raggiungere gli obiettivi di "edificio a basse emissioni" non è tuttavia sufficiente limitarsi all'efficienza energetica, ma è necessario prevedere, già in fase di progettazione, l'uso di materiali eco-sostenibili ed innovativi che permettano di ridurre le emissioni anche in tutte le altre fasi del ciclo di vita. Inoltre, l'utilizzo di materiali riciclati, o con contenuto di riciclato consente di ridurre la quantità di "rifiuto" da conferire in discarica, favorendo un'economia circolare e riducendo le emissioni dovute alla fase di smaltimento del rifiuto stesso [21-22-23].

Relativamente al palasport invece, si evidenzia che la fase a maggior impatto è quella relativa al consumo operativo di energia, dunque alla fase d'uso, dovuto principalmente alla presenza di fonti fossili oltre che di energia elettrica da rete e al quantitativo di fotovoltaico previsto dai decreti nazionali ante 2021 (D.M. 26 giugno 2015 [20] e D.Lgs. 28/2011 [17]).

Ciò che emerge è che la componente energia non è più quella preponderante rispetto alle altre componenti dell'LCA (ma scende al terzo posto, dopo la fase di produzione e quella di manutenzione dei materiali costruttivi) applicando i decreti nazionali sull'uso delle fonti rinnovabili pubblicati nel 2021, in vigore dal 2022 (D.Lgs 199/2021 [18]), arrivando a pesare circa 11% sul totale LCA, in linea con altre esperienze bibliografiche [22].

È stato rilevato, inoltre, un impatto importante riguardante i materiali da costruzione utilizzati. Il ruolo più importante è quello del cemento e del calcestruzzo che ricoprono la percentuale maggiore di impatto [24].

Dalle due esperienze è dunque evidente che più si incrementano le tecnologie rinnovabili ed efficienti, limitando l'impatto associato all'energia della fase di esercizio, più diventa proporzionalmente impattante la componente dell'energia incarnata e quindi risulta importante analizzare i materiali ed agire su essi [22].

Bibliografia

1. UNI EN ISO 14064-1:2019. Gas ad effetto serra - Parte 1: Specifiche e guida, al livello dell'organizzazione, per la quantificazione e la rendicontazione delle emissioni di gas ad effetto serra e della loro rimozione.
2. UNI EN ISO 14067:2018. Gas ad effetto serra - Impronta climatica dei prodotti (Carbon footprint dei prodotti) - Requisiti e linee guida per la quantificazione.
3. UNI EN 15978:2011. Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo.
4. UNI EN ISO 14040: 2021. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento.

5. Commissione Europea, Proposta direttiva del parlamento europeo e del consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione), COM (2021) 802 final.
6. MIMS - Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti; Consiglio superiore dei lavori pubblici. Linee guida per la redazione del progetto di fattibilità tecnica ed economica da porre a base dell'affidamento di contratti pubblici di lavori del PNRR e del PNC. (Art. 48, comma 7, del decreto-legge 31 maggio 2021, n. 77, convertito nella legge 29 luglio 2021, n. 108), 2021.
7. Decreto-legge 31 maggio 2021, n. 77 (in Gazzetta Ufficiale - Serie generale - n. 129 del 31 maggio 2021 - Edizione straordinaria), coordinato con la legge di conversione 29 luglio 2021, n. 108 (in questo stesso S.O.), recante: «Governance del Piano nazionale di ripresa e resilienza e prime misure di rafforzamento delle strutture amministrative e di accelerazione e snellimento delle procedure.». GU Serie Generale n.181 del 30-07-2021 - Suppl. Ordinario n. 26.
8. The Clim'Foot databases available online www.climfoot-project.eu/en/overview-0
9. Programma EPDIItaly available online www.epditaly.it/
10. UNI/TS 11300-1:2014 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.
11. UNI/TS 11300-5:2016 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili.
12. ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Fattori di emissione atmosferica di gas ad effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei. Rapporto 303/2019.
13. Deliberazione della giunta regionale 25 luglio 2022, N. 1261. Approvazione delle modifiche all'«Atto di Coordinamento Tecnico regionale per la definizione dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici» di cui alla propria deliberazione n. 967/2015 e s.m.i.
14. Associazione vivaisti italiani. www.vivaistiitaliani.it/qualiviva/consultazione-shede-tecniche.
15. Assorbimento forestale di CO₂,» [Online]. Available online: <https://www.reteclima.it/>
16. D.D.U.O. 18 dicembre 2019 - n. 18546. Aggiornamento delle disposizioni per l'efficienza energetica degli edifici approvate con decreto n. 2456 del 8 marzo 2017.
17. Decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28. Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.
18. Decreto legislativo 8 novembre 2021, n. 199 Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.
19. Direttiva (ue) 2018/2001 del parlamento europeo e del consiglio dell'11 dicembre 2018 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (rifusione)
20. Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici
21. G. Lobaccaro; A. H. Wiberg; G. Ceci; M. Manni; N. Lolli; U. Berardi. Parametric design to minimize the embodied GHG emissions in a ZEB. Energy & Buildings 2018, 167, 106-123

22. C. Thiel. A material life cycle assessment of a net-zero energy building. *Energies*, 2013, 6, 1125-1141.
23. A. Houlihan Wiberg; L. Georges; T.H. Dokka; M. Haase; B. Time; A.G. Lien; S. Mellegård; M. Maltha. A net zero emission concept analysis of a single-family house. ZEB Project report. Publisher SINTEF Academic Press, Norway, 2013; Volume 9.
24. N. Lolli; S.M. Fufa; M. Inman. A parametric tool for the assessment of operational energy use, embodied energy and embodied material emissions in building. *Energy Procedia* 2017, 111, 21–30.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Health + VR: valutazione dell'impatto sulla salute di diverse configurazioni progettuali

Fabio Bianconi ¹, Marco Filippucci ¹, Filippo Cornacchini ¹ and Chiara Mommi ^{1,*}

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università degli Studi di Perugia, Via Goffredo Duranti, 93, 06125 Perugia PG

* Autore di riferimento. E-Mail: chiara.mommi@gmail.com

Abstract: La ricerca vuole promuovere l'approccio digitale come strumento di analisi e verifica di soluzioni progettuali tramite la valutazione di ciò che si percepisce e delle emozioni, conseguentemente dell'impatto sulla salute umana. Alla base del percorso c'è la comprensione dei meccanismi percettivi e degli effetti delle diverse strategie progettuali, e, conseguentemente, di come le scelte architettoniche svolgano un ruolo attivo in risposta alle esigenze psicofisiche di chi le vive, con l'obiettivo di migliorare l'impatto sulla loro salute. Si promuove la possibilità di individuare le soluzioni più performanti, verificate da un campione statistico significativo di utenti che co-partecipano nella proposta. Fondamentale per la ricerca è la ricostruzione del modello digitale della configurazione attuale dello spazio, per effettuare una prima analisi del luogo e comprenderne potenzialità e criticità relative alla sua percezione. Il suo rilievo si fonda su dati acquisiti tramite biosensors: attraverso neuroheadsets, eyetracking e la risposta galvanica della pelle si vuole studiare l'impatto dell'ambiente urbano sull'uomo. A partire dai risultati ottenuti vengono progettate variazioni allo scenario iniziale che possano influenzare positivamente la percezione e, quindi, l'esperienza del visitatore nel luogo. Con queste considerazioni è possibile, allora, realizzare analisi in ambiente virtuale delle soluzioni trasformative proposte, quantificando e qualificando così il loro impatto sul benessere. Tali dati sono poi trasformati in mappe, anche tridimensionali, nell'obiettivo di correlare i risultati delle analisi con i luoghi che li hanno generati.

Keywords: Realtà Virtuale; Percezione; Biosensor; Heatmap; Digital Twin; Simulazione Digitale.

1. Introduzione

La presente ricerca si inserisce all'interno della collaborazione fra il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Perugia ed il Comune di Perugia, a seguito dello sviluppo del Piano Periferie per i quartieri di Fontivegge e Bellocchio. L'obiettivo è quello di sperimentare nuovi metodi di lettura dell'impatto dell'ambiente sulla persona [1] utilizzando il valore delle immagini [2] per il valore della visione [3,4], intraprendendo un percorso dove si pone al centro la percezione dei luoghi [5–10] per il benessere di chi li vive.

Il tema centrale viene impostato sulla simulazione digitale come analisi del reale, che permette l'analisi dello spazio identificando potenzialità e criticità. Partendo da esse vengono progettate variazioni allo scenario iniziale che possono influenzare positivamente la percezione e, conseguentemente, l'esperienza del visitatore nel luogo [11,12]. Con queste considerazioni è possibile, allora, realizzare analisi in ambiente virtuale delle soluzioni trasformative proposte, quantificando e qualificando così il loro impatto sul benessere [13].

La ricerca si propone di far divenire l'immateriale materiale [10,14–17] concretizzando e rendendo visibili, tramite gemello digitale [18], percezioni ed emozioni [19][20][21], e, quindi, il benessere del vivere, permettendo una chiara lettura [22,23] ed interpretazione dello spazio [12] [24].

2. Materiali e metodi

2.1 Modellazione

Il caso studio selezionato è rappresentato dalla stazione ferroviaria di Perugia, luogo di interscambio tra il trasporto ferroviario, la metropolitana leggera della città (Minimetrò) e il terminal degli autobus. Si tratta di un polo interessato da numerosi cambiamenti che hanno portato a una situazione caotica e discontinua che si riflette sul comportamento e sull'orientamento degli utenti ed è attualmente coinvolto in un progetto di rigenerazione urbana (Figura 1).

Figura 1. Renderizzazione del modello 3d del prospetto della stazione di Fontivegge.



La stazione è stata riprodotta in un oggetto 3D creato con il software di modellazione 3D Studio Max, partendo da rilievi effettuati in loco e tavole progettuali (Figura 2). Il livello di dettaglio della riproduzione non punta al fotorealismo, ma si attesta su un livello medio, con l'obiettivo di rendere lo scenario riconoscibile e facilmente navigabile, senza conseguenze sulla fluidità dell'esperienza. In un secondo momento, successivo alle analisi relative allo stato attuale del luogo, vengono ipotizzate delle varianti per distinguere le quattro diverse aree dell'esplorazione.

Si identificano in:

- Stato attuale senza modifiche;
- Stato attuale con l'inserimento di cartellonistica con indicazioni sui luoghi della stazione;
- Stato attuale con l'inserimento di panchine;
- Stato attuale con l'inserimento di un'aiuola contenente un albero al centro dell'atrio, secondo un design biofilico (Figura 2).

Figura 2. Renderizzazione dell'atrio di ingresso della stazione di Fontivegge.



2.2 Unity

Al fine di rendere lo scenario interattivo, si è scelto di sviluppare la programmazione all'interno dell'ambiente Unity. Il modello tridimensionale della stazione è stato importato tramite il formato di scambio fbx e inserito nella scena, così come le varianti che definiscono i diversi scenari e che, una volta disattivate, sono state inserite nella piattaforma per essere attivate a seconda del loro utilizzo.

In una fase successiva sono stati assegnati i materiali agli oggetti modellati in precedenza ed, in seguito, impostate le luci. Per quanto riguarda i materiali, sono stati realizzati semplici shader utilizzando la Universal Render Pipeline (URP), una pipeline di rendering precostruita all'interno del software che permette di ottenere una resa grafica soddisfacente e ottimizzata, senza influenzare in modo pesante le prestazioni di esecuzione. Per quanto riguarda, invece, l'illuminazione della scena si

è scelto di procedere con una GI (Global Illumination) completamente in tempo reale, evitando così il processo di "baking" delle lightmap, in quanto il basso numero di vertici contenuti nel modello consente di ottenere comunque una esecuzione fluida dell'esperienza immersiva su un notebook di medio livello.

Figura 3. Renderizzazione dell'atrio di ingresso della stazione di Fontivegge.



2.2 Strumentazione

Per condurre le analisi sono stati utilizzati, oltre ad un notebook (Figura 4):

- HTC Vive che registra il movimento dell'utente e permette la visione del progetto in realtà virtuale;
- Muse2 che acquisisce EEG analizzando, monitorando e registrando l'attività elettrica del cervello;
- Mindfield eSense per i dati GSR.

Figura 4. Strumentazione utilizzata per rilevare la percezione del luogo.



Lo strumento HTC Vive è un display di Virtual Reality 6DOF che, una volta posizionato sul capo dell'utente, registra i movimenti su 6 assi in un'area di 3 metri per 3 definita dalle due stazioni di

tracciamento esterne. Grazie a questa tecnologia gli utenti possono muoversi liberamente e guardarsi intorno, interagendo con l'ambiente virtuale tramite i due controller manuali. Il FOV orizzontale dell'HTC VIVE è di 110 gradi, mentre la visione periferica dell'occhio umano è di 60 gradi per la zona periferica vicina, 120 gradi per la zona periferica media e 220 gradi per la zona periferica lontana.

Durante l'esperienza immersiva vengono acquisiti i dati EEG tramite Muse2, che permette di registrare 4 canali (TP9, AF7, AF8, TP10) e le loro frequenze (α , β , γ , δ , θ), nonché il timestamp per la sincronizzazione temporale con gli scenari e il GSR.

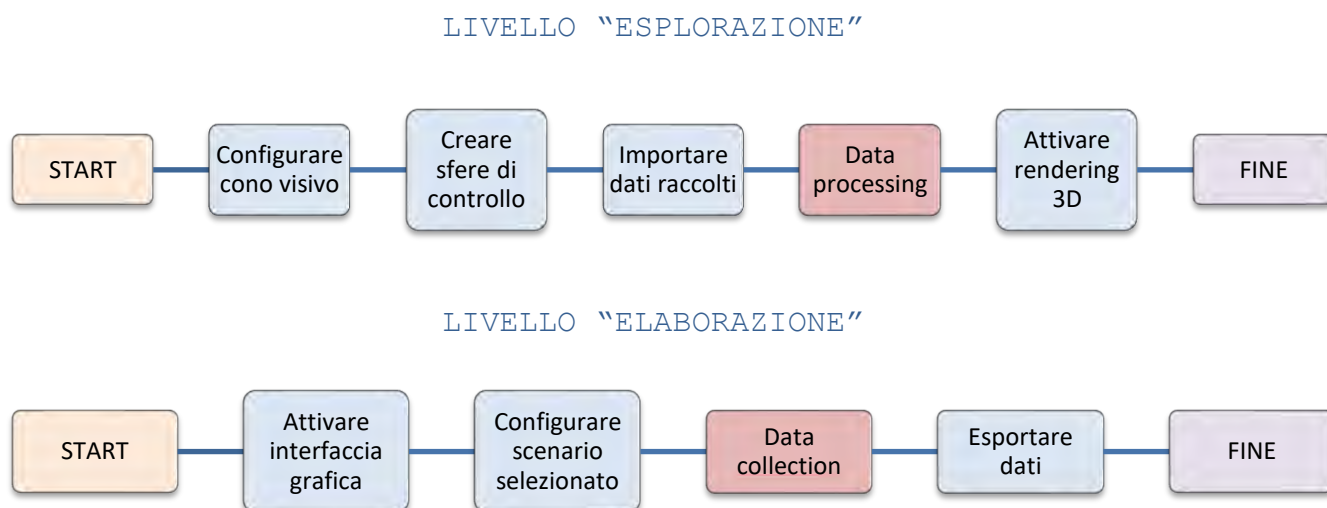
Il dispositivo di rilevamento del GSR è il Mindfield eSense, che consente di registrare la conduttanza elettrica cutanea con una frequenza di 5 Hz. Inoltre, in questo caso è presente il timestamp in modo per poter sincronizzare questa registrazione con quelle degli altri dispositivi. Dai dati RAW dell'EEG, attraverso un modello interpretativo, è possibile ricavare le emozioni provate dall'osservatore, confermate, inoltre, dalle variazioni di emozioni registrate tramite GSR. I dati così elaborati mirano a interpretare e caratterizzare le heatmap dal punto di vista delle emozioni.

2.3 Programmazione

La prima parte della programmazione è stata dedicata al codice necessario ai movimenti dell'utente nella scena virtuale, sia attraverso mouse e tastiera, sia attraverso un Head Mounted Display. Successivamente è stata programmata l'interfaccia per la selezione delle varianti da testare, che, in modo automatico, configura opportunamente la scena, grazie a specifiche funzioni attivate dai pulsanti visualizzati.

Per quanto riguarda la programmazione delle esperienze virtuali immersive e la relativa elaborazione dei dati, sono stati realizzati due livelli di "gioco", del tutto identici nelle geometrie ma con funzioni diverse e complementari: il primo livello è stato creato per consentire l'esperienza virtuale agli utenti, il secondo per elaborare i dati raccolti durante l'esplorazione (Figura 5).

Figura 5. Schema esplicativo delle logiche dei "livelli".



Questa separazione si è resa necessaria in quanto l'eventuale contemporaneità dell'esperienza e dell'elaborazione delle informazioni avrebbe causato un elevato numero di operazioni da eseguire per ogni fotogramma della riproduzione, portando a un significativo rallentamento anche su PC con elevata potenza di calcolo.

Nel primo livello, denominato "Esplorazione", viene inizialmente preparata la scena e avviato il rendering 3D della telecamera corrispondente alla vista dell'utente e, infine, viene attivata la navigazione attraverso i controller dell'HMD o gli input di mouse e tastiera. L'utente ha la possibilità di muoversi liberamente nello scenario e di ruotare l'inclinazione della sua visuale per portare a termine alcuni obiettivi prefissati, come, ad esempio, il raggiungimento dei binari. Contemporaneamente, inizia la registrazione dell'interazione del visitatore con la scena: a ogni fotogramma, infatti, viene eseguita una funzione che registra su una lista di variabili le stesse coordinate cartesiane relative alla posizione nella scena dell'utente, le tre coordinate di rotazione che identificano l'angolo della telecamera e, quindi, della visuale e un riferimento temporale del momento in cui vengono raccolti i dati. Da questo momento in poi, la registrazione avverrà automaticamente fino a quando, attraverso un input, l'esperienza immersiva non verrà interrotta. Con l'arresto della riproduzione si attiva la funzione finale di salvataggio dei dati raccolti nella lista su un file di testo in formato csv in una cartella del PC selezionata dall'utente in una prima fase di configurazione dell'algoritmo.

La logica del secondo livello, denominato "Elaborazione", inizia con una fase di configurazione del cono visivo da utilizzare nella fase di analisi dei dati. Nelle configurazioni è possibile personalizzare alcuni parametri relativi alla forma del cono che verrà proiettato, tra cui l'angolo di apertura e l'altezza, che determinano la profondità del campo visivo in relazione all'ipotetica velocità dell'utente. Iniziando l'elaborazione, poi, un algoritmo raccoglie queste informazioni e le applica alla geometria del cono per ridimensionarlo.

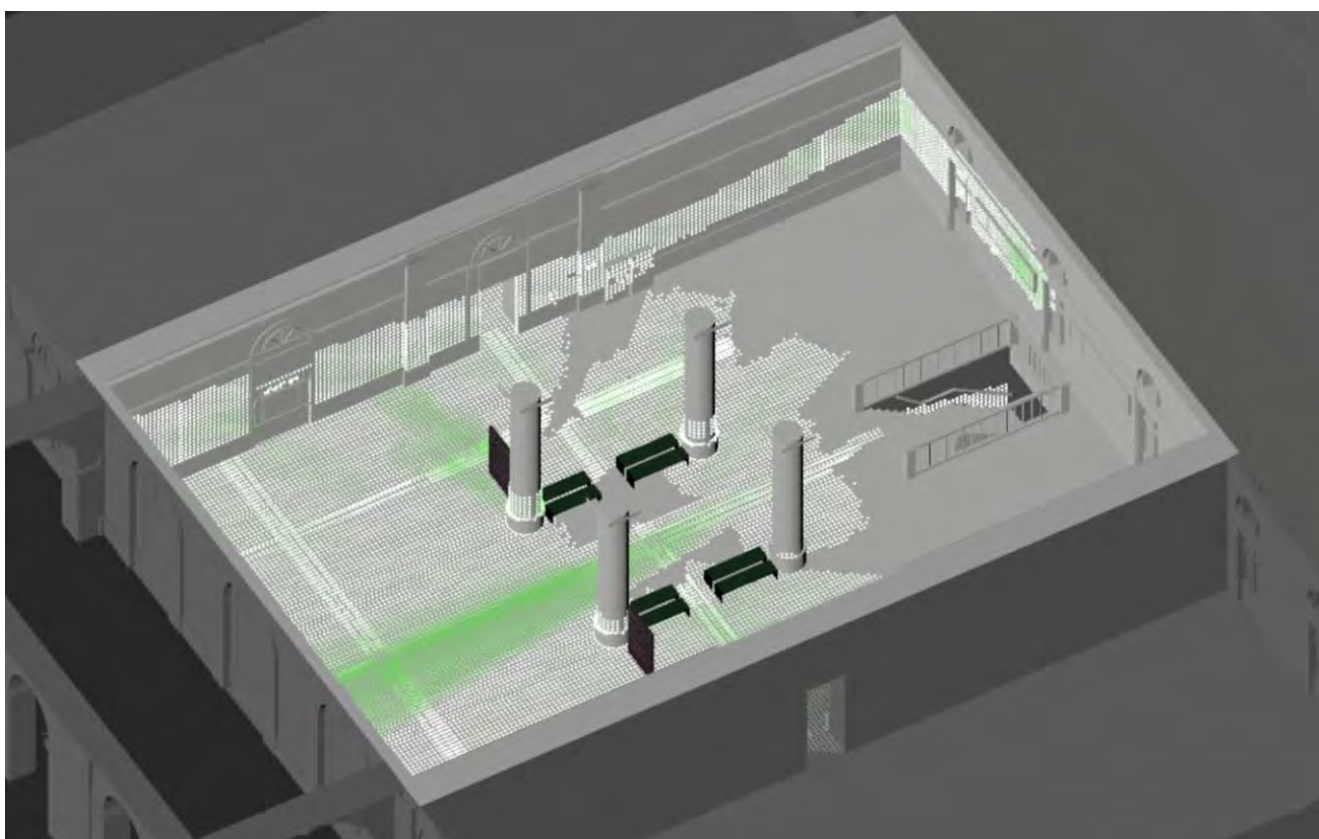
Successivamente l'algoritmo istanzia nella scena tante piccole sfere di controllo con coordinate elaborate tramite una fase di discretizzazione delle mesh eseguita in Rhinoceros/Grasshopper. Ad ognuna di queste sfere, infatti, è stato associato un piccolo script in grado di riconoscere le collisioni con la geometria del cono visivo e tenerne il conteggio su una variabile apposita. Il passo successivo consiste nel recuperare ed elaborare il file csv prodotto nel livello precedente: l'algoritmo è configurato per leggere i record del file e proiettare il cono a partire dal punto x, y e z salvato e orientarlo secondo le coordinate della rotazione. Ripetendo questa procedura per tutte le coordinate annotate le sfere di controllo sono in grado di registrare tutti i punti in cui l'occhio del visitatore virtuale ha intercettato la specifica porzione del modello 3D. In questa fase viene disattivato il rendering tridimensionale, in quanto avrebbe comportato un aumento del numero di calcoli e quindi un inutile impiego di potenza di calcolo. L'algoritmo, invece, attraverso messaggi di controllo, informa l'operatore sulle operazioni in elaborazione, descrivendo le fasi in corso e, attraverso un contatore dei calcoli effettuati, confronta il numero totale delle operazioni.

La logica del livello procede con la parte di colorazione delle sfere create in base alle sensazioni provate dagli utenti. Per fare ciò si vanno ad intersecare i dati relativi alla posizione e alla direzione dello sguardo con i dati EEG e GSR raccolti durante il livello di "esplorazione". I dati EEG, in particolare,

sono elaborati utilizzando modelli interpretativi propri delle neuroscienze quali, in particolare, il diagramma circomplesso [25]. Le sfere, quindi, vengono colorate tramite un gradiente che parte dal verde per le emozioni positive, fino al bianco per quelle negative. Le sfere che, invece, non hanno registrato contatti vengono completamente nascoste per non appesantire troppo il modello, sia dal punto di vista dell'elaborazione del rendering che dell'estetica.

Terminata la parte di elaborazione, l'algoritmo lancia il rendering della scena, in modo da poter confrontare graficamente i risultati (Figura 6). Viene salvato un file csv, derivato da quello contenente le coordinate dei punti di inserimento della sfera, a cui vengono aggiunti i dati elaborati di EEG + GSR. Infine, vengono attivate le funzioni di navigazione, che consentono di muovere liberamente la telecamera nella scena per visualizzare i risultati dal punto di vista necessario.

Figura 6. Rendering della scena.



3. Risultati

L'algoritmo è stato verificato eseguendo test sullo stato attuale e su tutti gli scenari configurati e i dati sono stati raccolti simultaneamente dai biosensori descritti in precedenza. Questi dati mostrano risultati diversi per ogni configurazione testata.

Per quanto riguarda lo stato attuale emerge una situazione di disorientamento dell'utente, confermata anche dai dati raccolti con i sensori: è possibile notare, infatti, come l'utente abbia ispezionato l'intera area alla ricerca di informazioni spaziali, invano, sperimentando in media stati emotivi negativi come "stress" e "infelicità".

Dai dati raccolti in questa fase si è, quindi, provveduto a progettare le tre soluzioni alternative proposte, che hanno portato i seguenti risultati:

- Scenario 1: rappresenta lo stato attuale con l'aggiunta dei totem informativi e descrive esperienze più brevi, in quanto l'utente raggiunge più facilmente l'obiettivo assegnato, sfruttando, come indicano le heatmap, le informazioni incluse nella scena. Dal punto di vista emotivo non ci sono emozioni predominanti, ma in media rimangono nel quadrante negativo (Figura 7).
- Scenario 2: con l'inserimento delle panchine al centro dell'atrio non si ottiene un cambiamento nel superamento dei test proposti, ma si registrano dati EEG e GSR che testimoniano l'apprezzamento per la nuova configurazione; infatti, le emozioni provate rimangono nel quadrante positivo con una caratterizzazione di "piacere" e "sereno" (Figura 8).
- Scenario 3: l'aiuola con le sedute e l'albero al centro hanno generato i dati più significativi: le heatmap confermano attraverso le sfere piene di colore verde l'attrazione esercitata dall'albero durante l'esperienza. Questo interesse ha prodotto dati da biosensori che certificano un'influenza positiva dell'inserimento di elementi naturali; infatti, dall'analisi risulta predominante come emozione la "tranquillità" (Figura 9).

I risultati ottenuti sottolineano la necessità di riprogettare lo spazio e l'orientamento all'interno delle informazioni. Inoltre, i grafici prodotti dall'algoritmo evidenziano aree della struttura potenzialmente ottimali per l'inserimento di nuovi cartelli o lo spostamento di quelli presenti.

Figura 7. Heatmap del primo scenario.

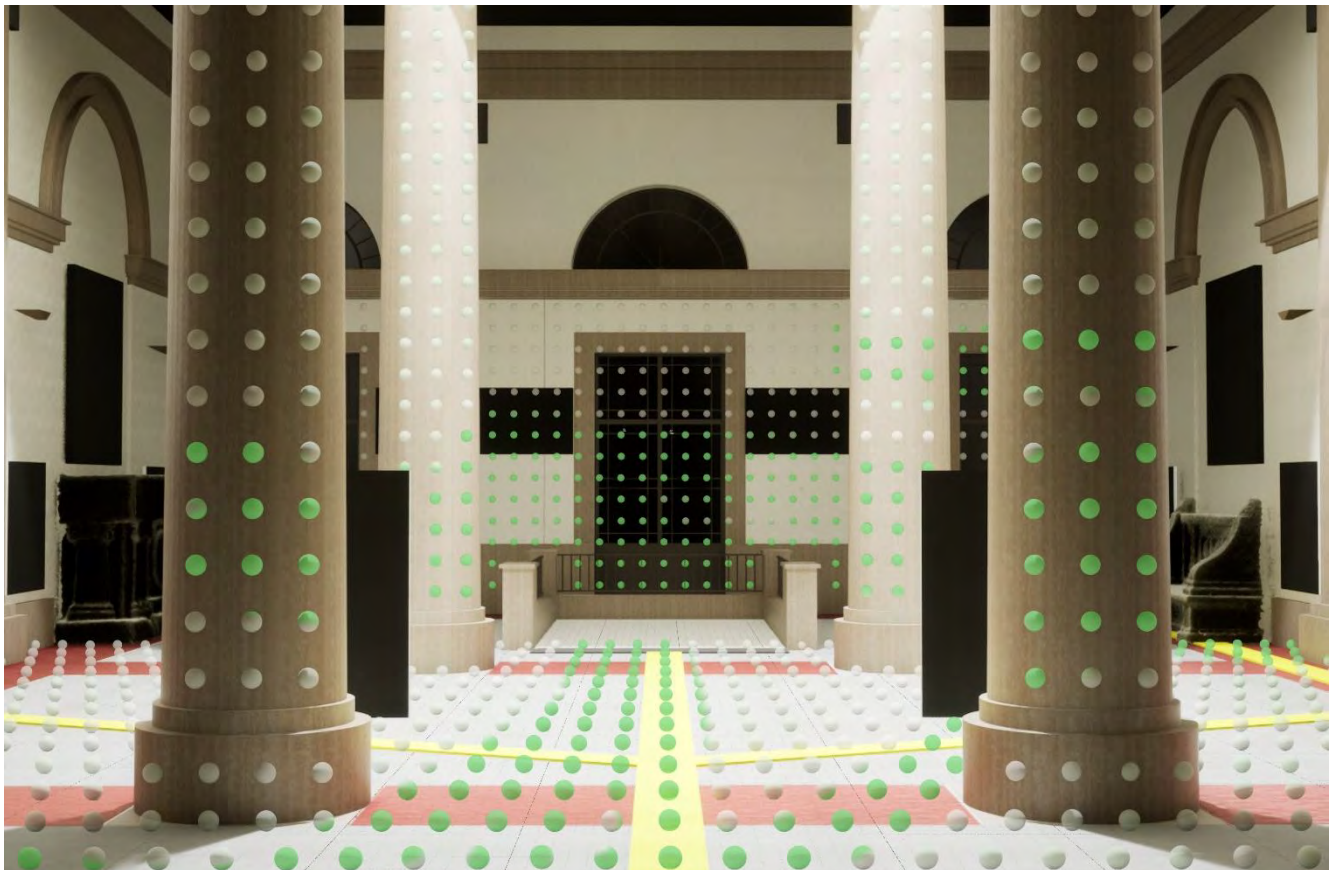
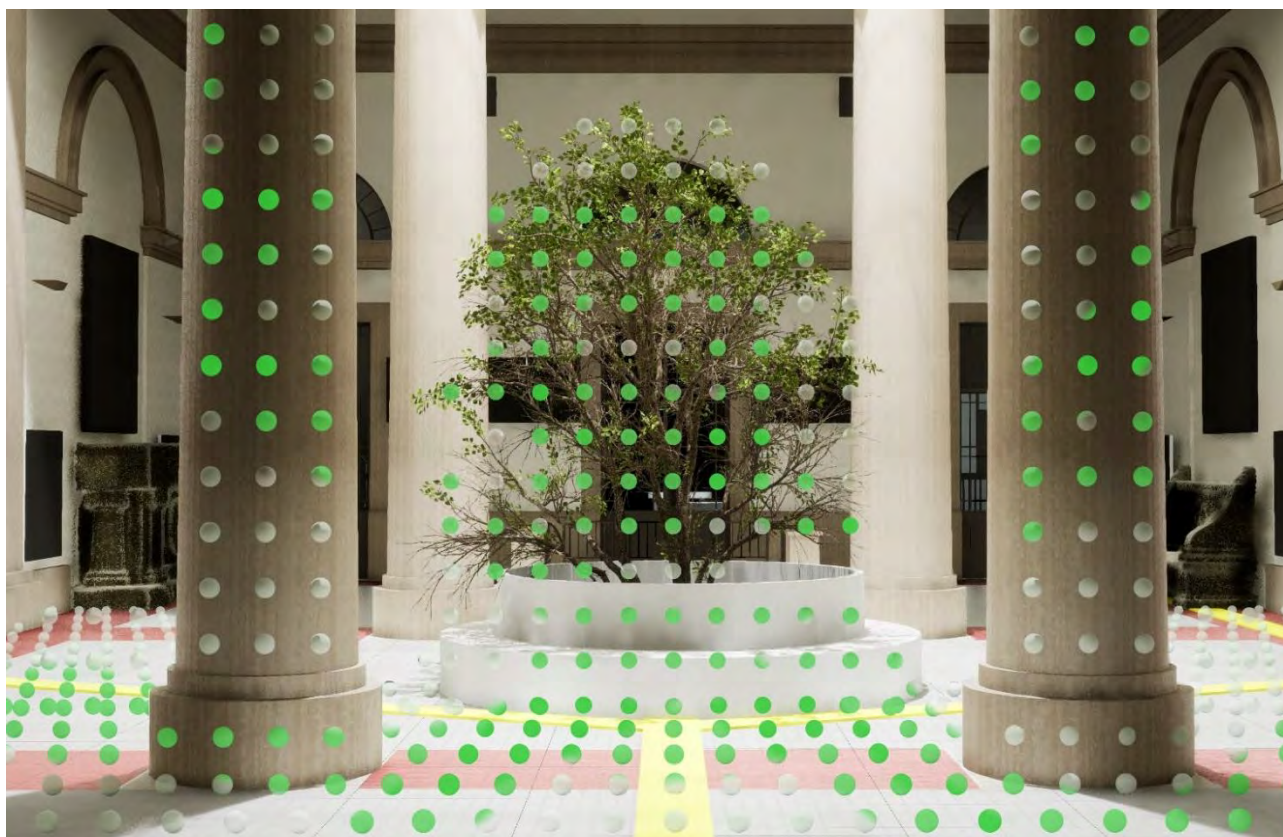


Figura 8. Heatmap del secondo scenario.



Figura 9. Heatmap del terzo scenario.



4. Conclusioni

L'algoritmo sviluppato si è rivelato un utile strumento per l'individuazione di alcune criticità nell'area di interesse e per estrapolare alcuni spunti per futuri progetti nella zona coinvolta. La matematizzazione dello spazio, insita nel processo di rappresentazione digitale, si propone come presupposto ottimale per sviluppare analisi e quantificare l'impatto di un ambiente su chi lo vive, condizione analitica che diventa di primario supporto alle scelte progettuali, per la capacità di quantificare in anticipo l'impatto delle possibili scelte ipotizzate.

Le esperienze visive, anche nella realtà immersiva, rappresentano il pretesto utile per estrarre relazioni tra spazi e comportamenti diversi, in funzione della centralità dell'occhio nella nostra cultura visiva. L'arricchimento dello spazio virtuale, modellato con le informazioni delle esperienze visive, si presenta come una dimostrazione concreta della rappresentazione delle relazioni immateriali che definiscono la qualità del luogo.

L'algoritmo programmato si apre a molteplici aggiornamenti che riguardano una diversa descrizione dell'interpretazione visiva trasposta nell'attribuzione di valori in corrispondenza di intervalli definiti dai gradi di apertura del cono visivo, una diversa applicazione in campo aperto o nel dettaglio degli studi di graphic design. Le analisi sviluppate in realtà immersiva offrono la possibilità di dimostrare le ipotesi di scelte progettuali nei processi di identificazione e orientamento, analizzando gli impatti che queste hanno sugli utenti e, quindi, l'effetto sulla qualità della vita e della salute. Il modello digitale diviene così il campo di sperimentazione, di variazione del progetto architettonico e di supporto alla sua futura concretizzazione.

References

1. Gibson, J.J. *The Ecological Approach to Visual Perception*; Routledge: London, 2014; ISBN 1848725787.
2. Bianconi, F.; Filippucci, M.; Mommi, C. The Seduction of the Simulation. 3D Modelling and Storytelling of Unrealized Perugia Rail Station. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* **2022**, *43*, 1145–1152, doi:10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-1145-2022.
3. Barnard, M. What Is Visual Culture? In *Art, Design and Visual Culture*; 1998; pp. 10–31.
4. Mirzoeff, N. An Introduction to Visual Culture. *Routledge* **1999**, 274.
5. Maffei, L. I Diversi Sentieri Della Memoria e l'arte Visiva. In *Immagini della mente : neuroscienze, arte, filosofia*; Pinotti, A., Lucignani, G., Eds.; Cortina Raffaello: Milano, 2007; pp. 69–81 ISBN 9788860301086.
6. Bianconi, F.; Filippucci, M.; Seccaroni, M. Analisi e Rappresentazione Del Benessere Psicofisico Dell'uomo Nello Spazio Urbano. In *Proceedings of the XX Congresso Nazionale CIRIAF Sviluppo Sostenibile Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana*; Morlacchi Editore University Press, 2020; pp. 154–162.
7. Bianconi, F.; Filippucci, M. Visione e Disegno. Percezione, Rilievo e Progetto per Nuovi Modelli Di Spazi Urbani. In *Mondi e modi dell'abitare Per una Sociologia della convivenza*; Rubbettino: Soveria

- Mannelli (CZ), 2019; pp. 81–104.
8. Bianconi, F.; Filippucci, M.; Seccaroni, M. Il Rilievo Digitale Della Percezione. Reinterpretazioni Parametriche Dell’impatto Dell’ambiente Sull’uomo. The Digital Survey of Perception. Parametrics Reinterpentations of the Impact of the Environment on Men. In *3D MODELING - DATA MODELING & MANAGEMENT FOR AECO INDUSTRY*; DEI s.r.l. TIPOGRAFIA DEL GENIO CIVILE: Roma, 2020; pp. 228–243 ISBN 9788849619324.
 9. Bianconi, F.; Filippucci, M.; Seccaroni, M.; Aquinardi, C.M. Urban Parametric Perception. The Case Study of the Historic Centre of Perugia. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2021**, *XLIII-B2-2*, 839–846, doi:10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-839-2021.
 10. Filippucci, M. Rappresentazione e Percezione per Nuove Strategie Di Sviluppo Territoriale Dell’Umbria. Il Cibo Come Riflesso Del Paesaggio, Il Paesaggio Come Riflesso Del Cibo. In Proceedings of the Riflessioni: l’arte del disegno/il disegno dell’arte; Gangemi, 2019; pp. 1589–1602.
 11. Kuliga, S.; Mavros, P.; Brösamle, M.; Hölscher, C. Comparing Human Wayfinding Behavior Between a Real, Existing Building, a Virtual Replica, and Two Architectural Redesigns. In Proceedings of the Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics); Springer, 2020; Vol. 12162 LNAI, pp. 160–179.
 12. Picazo, J.; Hazenoot, A.; Otaduy, C.; Braux, M.; Bong, W. User-Centred Design for a Not Straightforward University Wayfinding. In Proceedings of the Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering and Product Design Education, E and PDE 2020; The Design Society, 2020.
 13. Ewing, R.; Handy, S. Measuring the Unmeasurable: Urban Design Qualities Related to Walkability. *J. Urban Des.* **2009**, *14*, 65–84, doi:10.1080/13574800802451155.
 14. Bianconi, F.; Filippucci, M.; Cornacchini, F. PLAY AND TRANSFORM THE CITY. *sciresit.it* **2020**, *2*, 141–158, doi:10.2423/i22394303v10n2p141.
 15. Bianconi, F.; Filippucci, M.; Pelliccia, G.; Seccaroni, M.; Meschini, M. New Signs for the Urban Landscape. The Bus Rapid Transit Case Redesigns the City. In Proceedings of the De-Sign Environment Landscape City; Genova University Press, 2020; pp. 43–58.
 16. Bianconi, F.; Filippucci, M.; Seccaroni, M. SURVEY and CO-DESIGN the URBAN LANDSCAPE. INNOVATIVE DIGITAL PATH for PERCEPTION ANALYSIS and DATA-DRIVEN PROJECT. In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives; 2019.
 17. Bianconi, F.; Filippucci, M. *Iconografie Castiglionesi : Ricerche e Studi per La Rappresentazione e Il Rilievo Del Patrimonio Rurale*; Bettollini, E., Ed.; Maggioli: Santarcangelo di Romagna, 2018; ISBN 8891628603.
 18. Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C.; Barlow, C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access* **2020**, *8*, 108952–108971, doi:10.1109/ACCESS.2020.2998358.
 19. Boschert, S.; Rosen, R. Digital Twin—The Simulation Aspect. In *Mechatronic Futures*; Springer International Publishing: Cham, 2016; pp. 59–74.

20. Clay, V.; König, P.; König, S. Eye Tracking in Virtual Reality. *J. Eye Mov. Res.* **2019**, *12*, doi:10.16910/jemr.12.1.3.
21. Mestre, D.; Vercher, J.L. Immersion and Presence. *Virtual Real. Concepts Technol.* **2011**, 93–102, doi:10.1201/b11612-12.
22. Lynch, K. *The Image of the City*; Harvard-MIT : Cambridge, 1960; ISBN 0262620014.
23. Lynch, K. *Good City Form*; Harvard-MIT: Cambridge, 1984; ISBN 0262620464.
24. Wilson, C.J.; Soranzo, A. The Use of Virtual Reality in Psychology: A Case Study in Visual Perception. *Comput. Math. Methods Med.* **2015**, *2015*, doi:10.1155/2015/151702.
25. Posner, J.; Russell, J.A.; Peterson, B.S. The Circumplex Model of Affect. *Dev Psychopathol* **2008**, *17*, 715–734.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Literacy ed Ecoliteracy: quando leggere contribuisce allo sviluppo dell'intelligenza ecologica

Maria Ermelinda De Carlo^{1*}, Giulia Toti ¹

¹ Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Filosofia Scienze Sociali, Umane e della Formazione, Piazza Ermini 1.

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: ermelinda.decarlo@unipg.it

Abstract: In questo studio si è messo in relazione l'abitudine personale alla lettura, in termini di ricorrenza e frequenza, con i livelli di ecoliteracy, ovvero la capacità di comprendere e interiorizzare la relazione ecologica sostenibile nella natura e nel trasferire questo stile di vita nella vita quotidiana. La domanda di ricerca parte dagli studi sui numerosi benefici della lettura in ambito nazionale e internazionale. La letteratura sul tema ha infatti ampiamente dimostrato come la lettura di fiction narrativa influenzi e operi su molti livelli cognitivi e affettivo-emotivi. Il contatto prolungato con la lettura di storie è una potente strategia anche per migliorare gli atteggiamenti verso gli altri. Nel corso dell'a.a. 2022/2023 si è provato a somministrare agli studenti e alle studentesse del Corso di laurea in Scienze dell'Educazione dell'Università degli Studi di Perugia la scala di disposizione alla lettura e la scala di ecoliteracy. Da un lato quindi si sono indagate le tre componenti della disposizione alla lettura: cognitiva; affettiva e conativa; dall'altro i livelli di intelligenza ecologica, sociale, emotiva, economica e dunque i comportamenti legati ad un consumo ecologico. I primi risultati dimostrano che esiste una correlazione positiva tra i totali delle due variabili, soprattutto rispetto alle componenti affettivo-conative che evidenziano una differenza statisticamente significativa tra lettori "forti" e lettori "deboli" in relazione ai livelli medi di intelligenza ecologica. La ricerca proseguirà con la somministrazione a circa 2100 dipendenti della TIM all'interno del progetto "Green Books aloud per una transizione ecologica".

Keywords: ecological intelligence; reading disposition; green books; ecoliteracy; reading.

1. Il contesto di riferimento

Dal primo summit mondiale sull'ambiente del 1992 a Rio [1] quando gli scienziati si raccomandarono sulla necessità di non superare le 350 parti per milione di CO₂ nell'atmosfera per scongiurare disastri

cambiamenti climatici è passato ormai del tempo. Eppure per certi versi siamo rimasti sordi di fronte a questo grido di aiuto del Pianeta. Oggi che abbiamo superato le 419 parti per milione con emissioni sempre in aumento, il degeneramento ecologico ed umanitario è una triste, quanto spaventosa realtà. Se non si interrompe il processo la nostra specie a breve sarà destinata all'estinzione.

Le emergenze climatiche ci stanno offrendo immagini che in passato potevano essere solo pura fiction narrativa o cinematografica, ma che invece non lo sono.

Questa consapevolezza si è tradotta, dall'Agenda 2030 in poi, nella presa di coscienza di attivare una "transizione ecologica giusta" [2], che possa impattare con il reale e consentire un'inversione di rotta.

Si è così mobilitato sia un piano internazionale con un quadro di accordi per l'ambiente e il clima; sia un piano europeo con una serie di azioni politiche ambientali e climatiche (Green Deal, l'8° Piano d'Azione per l'Ambiente, NextGenerationEU, RePowerEU) [3-5]; sia un piano nazionale che ha portato addirittura alla legge costituzionale dell'11 febbraio 2022, che ha introdotto modifiche agli articoli 9 e 41 Costituzione, inserendo la tutela dell'ambiente, della biodiversità e degli ecosistemi anche nell'interesse delle future generazioni [6].

Sul piano politico si promuovono azioni sinergiche finalizzate alla riduzione delle emissioni di gas climalteranti; alla mobilità sostenibile; al contrasto al dissesto idrogeologico e al consumo di suolo; alle risorse idriche e relative infrastrutture; alla qualità dell'aria; all'economia circolare.

Tuttavia, nei diversi documenti ritorna il tema della responsabilità individuale e la necessità di una transizione che sia anche di tipo culturale, in cui l'educazione è al centro. Nessuno, dunque, è escluso dal processo.

Il "Global Assessment Report on biodiversity and ecosystem services" del 2019 [7] richiede una riorganizzazione fondamentale, a livello di sistema, di fattori tecnologici, economici e sociali, compresi paradigmi, obiettivi e valori.

I processi educativi e formativi sono dunque centrali. L'Agenda 2030 nel Target 12.8 riporta "Entro il 2030, fare in modo che le persone abbiano in tutto il mondo le informazioni rilevanti e la consapevolezza in tema di sviluppo sostenibile e stili di vita in armonia con la natura" [8].

Il tema rilevante è che occorre lavorare per l'empowerment di bambine e bambini e delle giovani generazioni in un'ottica di favorire un vero e proprio protagonismo nel processo di transizione.

Uno dei punti cruciali in questa direzione è investire nell'alfabetizzazione ecologica (detta anche ecoliteracy), ovvero la capacità delle persone di comprendere e interiorizzare la relazione ecologica sostenibile presente nella natura e nel trasferire questo stile di vita sostenibile nella quotidianità. Essere "ecoliterate" significa comprendere i principi di organizzazione delle comunità ecologiche (cioè gli ecosistemi) e utilizzare tali principi per creare comunità umane sostenibili.

2. Literacy ed Ecoliteracy

2.1. Il costrutto di ecoliteracy

Il costrutto di ecoliteracy in letteratura non ha una definizione unica e univoca [9-10]. Il termine "alfabetizzazione ambientale" è stato usato per la prima volta 45 anni fa in un numero del Massachusetts Audubon da Roth (1968) che si è chiesto "Come possiamo conoscere il cittadino

ecologicamente alfabetizzato?”. Da allora, il significato del termine si è evoluto ed è stato ampiamente rivisto [11-15]. La nozione di alfabetizzazione ambientale è stata e continua ad essere promossa attraverso un discorso creativo e intenso da una varietà di prospettive. Il significato più ampiamente accettato di alfabetizzazione ambientale è quello che comprende la consapevolezza e la preoccupazione per l'ambiente e i suoi problemi associati, così come le conoscenze, le abilità e le motivazioni per lavorare verso soluzioni di problemi attuali e la prevenzione di nuovi [12].

Il tema al centro dell'ecoliteracy c'è certamente il concetto di comprensione della sostenibilità [16] e in senso più lato di comprensione verbale dei fenomeni ambientali.

Una ricerca condotta a Ponorogo ha dimostrato quanto sia fondamentale l'alfabetizzazione ambientale (EL) negli studenti per migliorare la loro consapevolezza sulle questioni ambientali. Lo studio ha confrontato gruppi di studenti in percorsi formativi in cui era presente un programma eco-scolastico (Adiwiyata) e gruppi in cui non era presente. Maggiore è il livello di adiwiyata, maggiore è il valore EL dell'ambiente [17].

Recentemente, Payne [18] ha anche respinto le nozioni di alfabetizzazione ambientale o ecologica come vaghe e disordinate, sostenendo invece una "ontologia ecologica critica", una teoria del curriculum incentrata sull'esperienza dello studente di essere nel mondo.

Nonostante l'uso diffuso e, talvolta, indiscriminato di questi termini, sono stati compiuti sforzi per stabilire una definizione e identificare i componenti chiave di alfabetizzazione ambientale, alfabetizzazione ecologica ed ecoalfabetizzazione e per ancorare saldamente le loro caratterizzazioni in ampi quadri teorici e filosofici. Uno scopo trainante alla base di questo lavoro è stato quello di promuovere quadri completi, di orientamento pedagogico, ampiamente applicabili, che consentano di stabilire standard e valutazioni del rendimento scolastico in materia di Educazione Civica [19]. Discorsi molto diversi sulla natura e sulle componenti essenziali dell'alfabetizzazione ambientale, dell'alfabetizzazione ecologica e dell'ecoalfabetizzazione sono sorti principalmente nei campi dell'educazione ambientale, dell'ecologia e delle discipline umanistiche [20-21].

Anche la Commissione Europea ha dato il suo contributo per definire un quadro di competenze per la sostenibilità che sostenga i processi di apprendimento dell'alfabetizzazione ambientale.

Lo studio alla base del GreenComp, 2022 [22] può essere messo in relazione con le dimensioni dei diversi modelli del costrutto (Tabella 1).

Tabella 1. Competenze, aree e dimensioni dell'Ecoliteracy a confronto

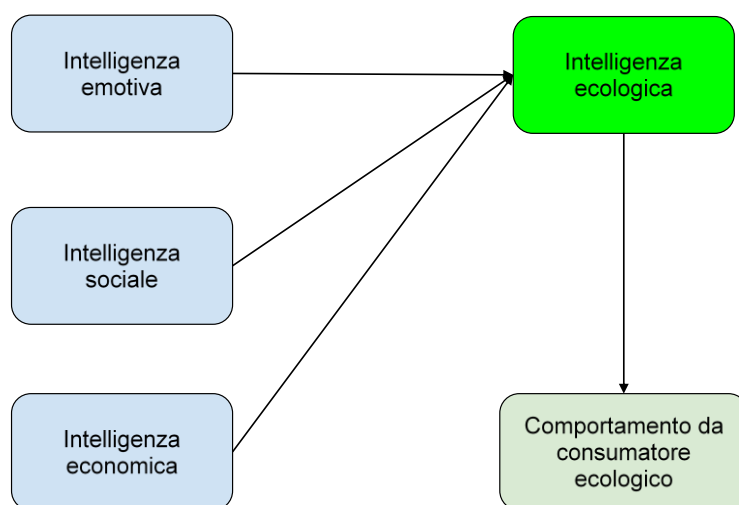
GreenComp, 2022	Aree in chiave pedagogica	Dimensioni del costrutto EL
l'incarnazione dei valori della sostenibilità	Sapere ecologico	Dimensione cognitiva
l'accettazione della complessità nella sostenibilità	Saper essere ecologico	Dimensione affettivo-relazionale
l'immaginazione dei futuri sostenibili	Saper fare ecologico	Dimensione sostenibile/economica
le azioni per la sostenibilità	Saper divenire ecologico	Dimensione comportamentale

Le dimensioni dell'ecoliteracy sono, dunque, quelle della sostenibilità, quelle affettive, quelle cognitive e quelle comportamentali [23-25]. Queste si riflettono su alcune sottocomponenti dell'intelligenza ecologica: l'intelligenza cognitiva; pro-sociale, emotiva e quella pratica. Okur-Berberoglu [26] rappresenta un modello di intelligenza ecologica "alternativo" (Figura 1) costituito da:

- l'intelligenza sociale, che si riferisce alle responsabilità sociali delle persone in termini di sostenibilità. Per esempio, le persone dovrebbero essere in grado di pensare a come viene realizzato un prodotto o se c'è uno sfruttamento ambientale o sociale/umano nel processo produttivo (Goleman 2006, 2009; McCallum, 2005; Orr, 2002).
- l'intelligenza emotiva, le persone dovrebbero essere in grado di percepire gli impatti negativi che hanno sulle altre persone, sull'ambiente naturale e sugli altri organismi viventi. McBride et al. [27] definiscono questo tipo di relazione ecologica, affettiva e cognitiva all'interno dell'ecoliteracy come connessioni "testa, cuore, mani e spirito".
- l'economia, le persone dovrebbero essere in grado di pensare che tutti i beni acquistati, come cibo, vestiti, ripari, si basano sul consumo di risorse naturali; quindi occorre pensare e percepire gli effetti sull'ambiente. Il sentire l'ambiente come parte di un sistema si riferisce all'intelligenza emotiva.

Tutte queste componenti vanno ad agire sui comportamenti "green", ovvero in grado di determinare l'azione collettiva dei consumatori, in un'ottica di sostenibilità. Gli effetti visibili/osservabili dell'ecoliteracy sono proprio i comportamenti responsabili nei confronti dell'ambiente o i comportamenti dei consumatori verdi [28]. Secondo questo modello, dunque, le intelligenze economica, emotiva e sociale sono sottoinsiemi dell'intelligenza ecologica. L'intelligenza ecologica è direttamente collegata ai comportamenti dei consumatori "verdi" nella seconda fase del modello.

Figura 1. Modello alternativo di Ecoliteracy tradotto da Okur-Berberoglu, 2018.



In una visione allargata di ecoliteracy, dunque, uno dei sottoinsiemi è l'intelligenza ecologica, l'altro è la sostenibilità in una prospettiva più olistica.

Gli obiettivi principali dell'intelligenza ecologica sono pertanto lo sviluppo della responsabilità sociale e ambientale [29] e della consapevolezza, il pensiero critico [30], l'apprendimento cooperativo

(Sterling, 2009) e il cambiamento comportamentale a lungo termine [31]. L'intelligenza ecologica è collegata alle aree cognitive e affettive del cervello [32].

Un aspetto da non trascurare, come la letteratura ci dimostra, è che l'intelligenza ecologica non ignora le differenze individuali, perché il background individuale ha un impatto sulla comunità sociale [33]. Un altro punto importante dell'intelligenza ecologica è avere una prospettiva olistica, perché nel mondo esistono reti visibili e invisibili tra fattori biotici (che hanno relazione con l'ambiente) e abiotici (che non hanno alcuna relazione con l'ambiente). Ogni comportamento, legato più o meno al consumo, può avere, dunque, un impatto diretto o indiretto sull'ambiente.

Gli esseri umani devono assumersi la responsabilità che ogni loro comportamento ha sempre un impatto nei confronti dell'ambiente e delle comunità sociali.

Questo significa che l'intelligenza ecologica è un processo sociale e collettivo. Ogni acquisizione ambientale viene trasferita dalla comunicazione intergenerazionale, come il linguaggio; pertanto, un comportamento responsabile dal punto di vista ambientale deve coinvolgere anche comportamenti sociali ed economici responsabili [34].

L'obiettivo delle azioni didattiche e dei modelli formativi deve essere quello di diminuire le distanze psicologiche ambientali [35-36] che si traducono stereotipi di pensiero ovvero:

- quella spaziale: è rilevante solo per chi vive in alcuni luoghi;
- quella temporale: sarà significativa solo per il futuro;
- quella sociale: riguarda persone diverse da noi;
- quella ipotetica: non è detto che accada.

Per mobilitare l'ecoliteracy e intervenire sulle distanze ci sono attivate nel tempo diverse ricerche. Di seguito se ne citano alcune tra le più significative:

- un modello di ecoalfabetizzazione collaborativa basata sulla famiglia per una città sostenibile [37];
- un modello di risoluzione dei problemi sull'impatto della gestione dei rifiuti organici [38];
- un modello di apprendimento basato su progetti (PBL) per sviluppare la creatività degli studenti nell'utilizzo dei rifiuti [39];
- un modello di apprendimento scientifico basato sul Web per migliorare la comprensione dell'eco - alfabetizzazione da parte degli studenti [40];
- un modello di apprendimento Hands on Activity (HoA) basato su un ambiente naturale nel tentativo di migliorare l'ecoalfabetizzazione e la motivazione all'apprendimento degli studenti della scuola elementare [41];
- un modello di ecoalfabetizzazione spaziale finalizzato all'educazione informale per l'empowerment della comunità [42].

2.3 Verso un modello di literacy per l'ambiente

Accanto a questi modelli attivi si stanno sviluppando modelli basati sui testi narrativi e sul ruolo del lessico. Ad esempio si pensi al modello di lettura di testi in inglese che utilizza l'approccio Ecoliteracy Lexicons [43] e che mira a sviluppare i lessici ecologici o ambientali. Lo studio condotto nel distretto di

Sumbawa, nella provincia di Nusa Tenggara occidentale, in Indonesia ha rivelato che ci sono quattro tipi di testi di lettura in inglese basati sui lessici di ecoalfabetizzazione: il primo è il lessico marino basato utilizzando il lessico ecologico di Jempol Beach e il lessico di Goa Beach; il secondo sono lessici dell'ambiente di architettura storica basata su due lessici ecologici del palazzo Dalam Loka e del palazzo Bala Puti; il terzo è il lessico dell'ambiente degli arcipelaghi marini basato sui lessici ecologici dell'isola di Moyo e dell'isola di Ngali. L'ultimo è il lessico dell'ambiente agricolo tradizionale basato a sua volta sui lessici ecologici di Orong e Uma.

Una ricerca interessante, sempre in questa direzione, è quella sull'utilizzo del fumetto tematico per coltivare l'eco-alfabetizzazione nei giovani studenti [44].

Lo studio in questione utilizza i fumetti come materiale didattico per coltivare l'ecoalfabetizzazione per gli studenti delle scuole primarie. I ricercatori hanno condotto l'indagine seguendo un modello di ricerca e sviluppo 4D che consisteva nella definizione, progettazione, sviluppo e diffusione di un fumetto appropriato per coltivare l'eco-alfabetizzazione, cercando di misurarne la validità, l'adeguatezza del contenuto e la praticità del fumetto stesso. Tra i vari risultati dello studio, eseguito con metodo misto, gli studenti dal punto di vista pratico ne hanno apprezzato proprio il processo di apprendimento.

D'altronde tra le diverse definizioni presenti, all'interno del campo delle scienze cognitive, l'alfabetizzazione viene riconcettualizzata come uno strumento per la costruzione della conoscenza (cioè, usando il ragionamento o la soluzione di problemi per ottenere nuove conoscenze). In questo processo la lettura diventa uno strumento essenziale.

Al di là dell'impatto sull'alfabetizzazione ecologica, sono noti i numerosi benefici della lettura in ambito nazionale e internazionale. Gli studi in letteratura hanno, infatti, ampiamente dimostrato come la lettura della narrativa influenzi e operi su molti livelli. Leggere consente di ottenere guadagni cognitivi [45-47] e anche affettivo-emotivi [48]

Le ricerche evidence based dimostrano come l'abitudine alla lettura influenza positivamente rendimento scolastico, arricchisce il vocabolario, migliora le abilità di ricezione scritta e orale [49-50], le capacità di ragionamento verbale, ma anche numerico e astratto. Il processare la narrazione comporta infatti l'attivazione del problem solving in cui il lettore deve verificare ipotesi e previsioni [52]. Numerosi sono pertanto i circuiti neurali coinvolti nella decodifica narrativa [51]. In questo processamento di materiale narrativo l'area della corteccia media prefrontale è particolarmente attiva quando il compito di ragionamento contiene materiale che include azioni umane o sociali e relazioni fra oggetti di uso. Il contatto prolungato con la lettura di storie è inoltre una potente strategia per migliorare gli atteggiamenti verso gli altri [52].

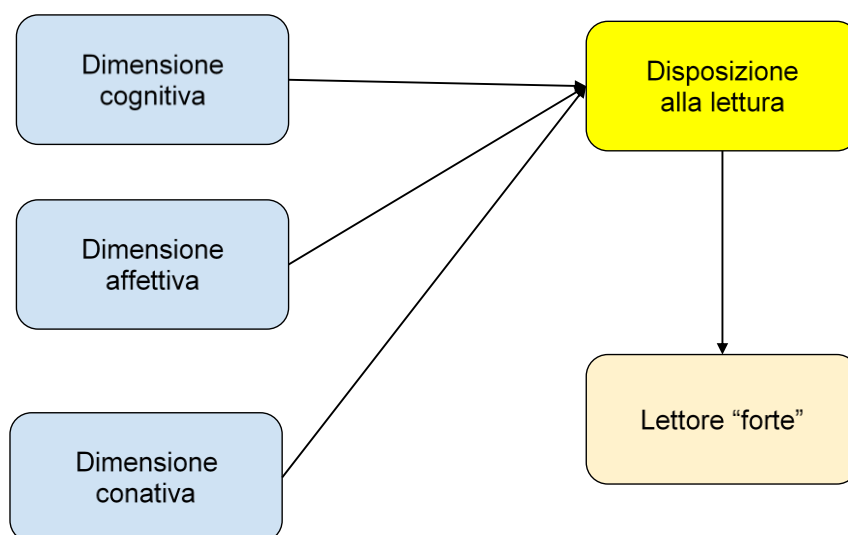
Se, dunque, la lettura può agire su dimensioni sociali, emotive e cognitive, componenti anche come si è illustrato dell'intelligenza ecologica, possiamo ipotizzare che di conseguenza i lettori "forti" possano avere una consapevolezza ecologica più sviluppata. Occorre pertanto individuare i lettori forti, ovvero quelli con una "reading attitude" più alta.

Pertanto si è ritenuto opportuno approfondire accanto al costrutto di intelligenza ecologica, quello di disposizione alla lettura (reading attitude, appunto). Essa in letteratura è definita come il sentimento individuale nei confronti della lettura, ovvero il "posizionamento" positivo o negativo nei confronti

della lettura dal quale dipendono situazioni di avvicinamento o di allontanamento dai libri come un sistema di sentimenti legati alla lettura che potrebbe portare l'allievo ad avvicinarsi o ad evitare una situazione di lettura [53] e ad influenzare scelte di comportamento futuro.

La letteratura di riferimento definisce l'atteggiamento verso oggetti, persone, idee o gruppi specifici [54] come un sistema stabile e relativamente duraturo di credenze o valutazioni (dominio cognitivo), di sentimenti affettivi (dominio affettivo) e di tendenze comportamentali (dominio conativo). Tale definizione individua, pertanto, le tre aree costituenti di ogni tipo di atteggiamento/disposizione, quindi anche quelle verso la lettura.

Figura 2. Modello di disposizione alla lettura



3. Metodi

Nell'ambito delle ricerche sugli effetti di lettura presso il Dipartimento di Filosofia, Scienze Sociali, Umane e della Formazione dell'Università di Perugia si è inteso procedere ad una ricerca sperimentale per verificare la relazione tra abitudini personali di lettura e l'intelligenza ecologica.

La domanda di ricerca è stata: la lettura può avere un impatto positivo sulla diffusione di comportamenti ecosostenibili? I libri possono avere un ruolo per salvare il domani del pianeta?

3.1. Campione

Lo studio, condotto in ambito universitario, ha coinvolto un campione di tipo non probabilistico, di 64 studenti dell'Ateneo di Perugia di età compresa tra i 20 e 45 anni ($M=22,66$; $DS 4,688$). Il 91% dei partecipanti (58) era di sesso femminile e il 9% (6) di sesso maschile. Gli studenti erano iscritti al secondo e terzo anno di Scienze dell'Educazione. I partecipanti sono stati reclutati durante le lezioni del corso di Metodologia della ricerca educativa, dell'osservazione e della valutazione nell'A.A. 2022-23. I dati sono stati raccolti nel mese di febbraio 2023. La partecipazione è stata volontaria.

3.2. *Analisi dei dati*

Nel presente studio sono state proposte due differenti scale, in grado di rendere conto della disposizione alla lettura degli studenti universitari e della loro intelligenza ecologica.

In particolare si è utilizzata la scala di disposizione alla lettura [55], validata dal gruppo di ricerca di Pedagogia Sperimentale dell'Università degli Studi di Perugia e la scala di ecoliteracy, validata da Okur-Berberoglu [56] e riadattata con back traslation in Italia.

La scala di disposizione alla lettura (DAL) è costituita da 92 item, raggruppati secondo i 3 fattori evidenziati dall'analisi fattoriale:

- componente cognitiva (idee, credenze e opinioni in relazione alla lettura);
- componente affettiva (sentimenti e emozioni evocati dalla lettura);
- componente conativa (tendenza ad attuare comportamenti in favore o contro la lettura stessa).

Considerare insieme queste tre componenti permette sia di ottenere un numero di informazioni maggiori, sia un livello di predittività superiore delle intenzioni comportamentali future [57].

L'obiettivo è quello di indagare la disposizione alla lettura, e dunque di ampliare il punto di vista in merito ai comportamenti di lettura, osservando il grado d'intensità, la valenza – positiva, neutra o negativa che sia - e l'influenza che la disposizione stessa ha sulle decisioni ed il comportamento futuro di una persona [58].

La scala di ecoliteracy invece è stata costruita esaminando i contributi di Daniel Goleman e Ian McCallum. La scala originale è stata costruita all'interno del contesto socioeconomico della Turchia (Paese d'origine dell'autore), e gli item sono stati generati tenendo conto degli indici OCSE presenti nel report Better life Index:alloggio, reddito, lavoro, comunità, istruzione, ambiente, impegno civico, salute, soddisfazione della vita, sicurezza e equilibrio tra lavoro e vita privata (OCSE, 2015).

Alla fine del presente studio si è utilizzata la scala originale composta da 30 item e tre aree: sociale, economica, olistica.

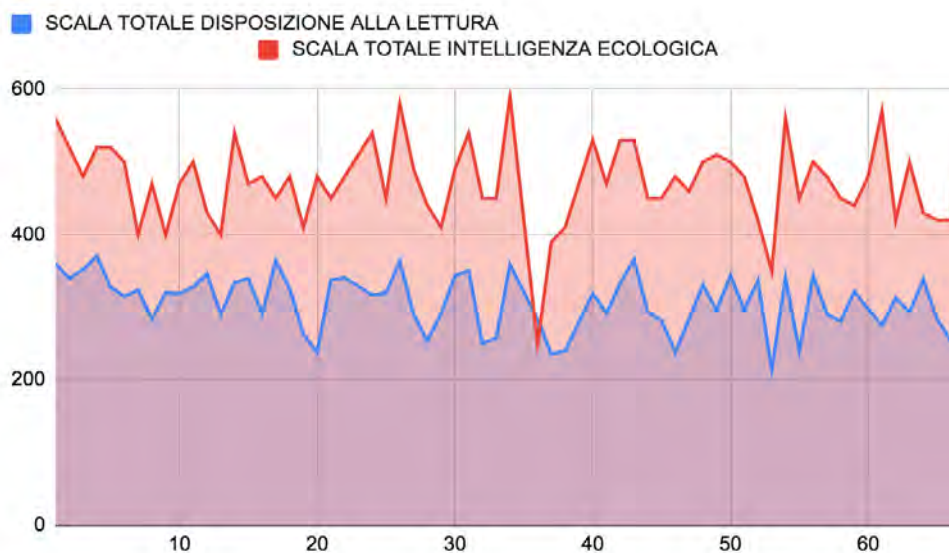
La scala è stata progettata sulla base dello stile Likert a cinque. Gli item affermativi sono stati valutati come 1-Completamente in disaccordo, 2-Parzialmente in disaccordo, 3-Non sono sicuro, 4-Parzialmente d'accordo e 5-Completamente d'accordo. Agli item negativi è stato applicato un punteggio completamente inverso.

Nel corso della validazione di Okur Berberoglu 18 item erano stati nel tempo eliminati. In effetti anche nello studio presente l'analisi dell'affidabilità alfa di Cronbach e l'analisi fattoriale ha rilevato che 15 item avevano bassi valori di correlazione e carichi fattoriali inferiori a 0,40, quindi sono stati rimossi dalla scala, così come altri 3 item che presentavano una covarianza di errore superiore a tre sono stati rimossi dalla scala, lasciando 12 item rimanenti. Per confrontare i risultati ottenuti nelle due differenti scale si è indagato la correlazione Rho di Spearman tra i punteggi delle scale totali e delle rispettive sottoscale, al fine di verificare la possibile correlazione tra la disposizione alla lettura e l'intelligenza ecologica.

4. Risultati

I risultati sono riportati nella tabella 2. Come si evince dai dati l'andamento delle due scale totali è simile.

Figura 3. Rappresentazione grafica dell'andamento delle due scale



Dai risultati le due scale totali risultano correlate tra loro, anche se la forza della correlazione risulta debole (Tabella 2).

Tabella 2. Correlazioni tra le due scale

		Ecol-SOCIALE	Ecol-ECONOMICO	Ecol-OLISTICO	Ecol-TOTALE
Disp-CONATIVO	Correlazione di Spearman	,459**	,132	,403**	,503**
	Sign. (a due code)	,000	,292	,001	,000
	N	64	64	64	64
Disp- COGNITIVO	Correlazione di Spearman	-,127	-,046	-,219	-,207
	Sign. (a due code)	,317	,716	,082	,100
	N	64	64	64	64
Disp- AFFETTIVO	Correlazione di Spearman	,403*	,056	,396**	,417**
	Sign. (a due code)	,001	,658	,001	,001
	N	64	64	64	64
Disp- TOTALE	Correlazione di Spearman	,500**	,081	,408**	,498**
	Sign. (a due code)	,000	,525	,001	,000
	N	64	64	64	64

**La correlazione è significativa a livello 0,01 (a due code).

Le correlazioni di Spearman evidenziano una significatività tra la scala totale di disposizione alla lettura e la scala di ecoliteracy ($r_s=0,498$, $p < 0,000$).

La scala totale di disposizione alla lettura correla inoltre con la sottoscala relativa alla dimensione sociale ($r_s=0,500$, $p < 0,000$) e con la sottoscala relativa alla dimensione olistica ($r_s=0,408$, $p < 0,001$).

La dimensione conativa della scala di disposizione alla lettura correla con la dimensione sociale ($r_s=0,459$, $p < 0,001$) e la dimensione olistica ($r_s=0,403$, $p < 0,001$), oltre a correlare con la scala totale di ecoliteracy ($r_s=0,503$, $p < 0,000$).

Lo stesso comportamento viene registrato per la dimensione affettiva che correla, anch'essa con la dimensione sociale ($r_s=0,403$, $p < 0,001$), la dimensione olistica ($r_s=0,396$, $p < 0,001$) e con la scala totale di ecoliteracy ($r_s=0,417$, $p < 0,001$).

Tuttavia, la dimensione cognitiva della scala di disposizione alla lettura e la dimensione economica della scala di ecoliteracy non correlano con nessuna delle due scale o sottoscale.

6. Discussione e conclusione

In questo studio si è messo in relazione l'abitudine personale alla lettura con l'intelligenza ecologica.

I risultati mostrano che nel gruppo di studenti e studentesse la disposizione alla lettura può essere un predittore a livello generale, dei livelli di consapevolezza ecologica. In particolare i lettori forti presentano un livello maggiore dei punteggi medi relativi alla dimensione sociale [60].

Il modello disegnato in questo lavoro dimostra come la componente affettiva e quella conativa, insieme, sviluppate dall'essere lettori, diventano determinanti nello sviluppare comportamenti ecologici.

L'intelligenza ecologica ha infatti esiti conativi e affettivi, come lo sviluppo della responsabilità e della consapevolezza sociale e ambientale [61], ovvero la capacità di pensare in modo critico, di servirsi dell'apprendimento cooperativo e di diventare in grado di apportare cambiamenti comportamentali a lungo termine, immaginando futuri possibili. Questo modello si collega con quello delle affordances, ovvero delle relazioni che si instaurano con altri esseri viventi [62-63].

Questa sovrapposizione può portare ad ipotizzare che i lettori forti, attivando tali regioni del cervello, possano indirettamente trarre beneficio anche sul piano dei comportamenti ecologici e sostenibili. Alcune correlazioni restano tuttavia deboli. Le motivazioni possono essere diverse. In primis certamente c'è da precisare che il campione è limitato e non consente grandi possibilità di inferenze.

Inoltre, per quanto riguarda la scala dell'intelligenza ecologica, essa è costruita rispetto alla cultura turca ed è stata difficile da generalizzare, nonostante gli effetti della globalizzazione e dell'industrializzazione sui Paesi in via di sviluppo possano considerarsi simili.

Resta inoltre il fatto che l'intelligenza ecologica è un concetto complesso, che richiede a sua volta un'altrettanta complessità di strumenti per indagarla.

I primi risultati dimostrano seppur in modo debole che esiste una correlazione positiva tra lettori "forti" e consumatori "ecologici" dal punto di vista della consapevolezza ecologica.

Poiché il costrutto di ecoliteracy contiene molti punti in comune con le dimensioni che traggono benefici dalla lettura, si ritiene di sviluppare ulteriori affondi.

La ricerca proseguirà con la somministrazione di entrambe le scale a circa 2100 dipendenti della TIM all'interno del progetto "Green Books aloud per una transizione ecologica" e successivamente proseguire con interviste ai testimoni privilegiati [64].

Si ritiene infatti che lettura di fiction narrativa, specie se orientata in modo specifico su tematiche ecologiche possa sostenere i processi di alfabetizzazione ecologica all'interno dei contesti educativi.

Bibliografia

1. Costantini, L. (2001). *Le Convenzioni di Rio ed il Protocollo di Kyoto: sinergie e questioni di compatibilità*.
2. Asvis (2022). *L'italia e gli obiettivi di sviluppo sostenibile. Rapporto Asvis 2022*. https://asvis.it/public/asvis2/files/Rapporto_ASviS/Rapporto_ASviS_2022/RapportoASviS2022.pdf
3. Italiano, G. (2021). *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)*. Disponibile online <https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf>
4. Giovanazzi, T. (2022). RiGenerazione Scuola. Un Piano per orientare l'educazione alla transizione ecologica. *FORMAZIONE & INSEGNAMENTO. Rivista internazionale di Scienze dell'educazione e della formazione*, 20(1), 127-135.
5. Claeyes, G.; Tagliapietra, S.; & Zachmann, G. (2019). *How to make the European Green Deal work*. Brussels, Belgium: Bruegel.
6. Aristei, L. (2022). Il Ministero della Transizione Ecologica e la sostenibilità dello sviluppo economico. *Il Ministero della Transizione Ecologica e la sostenibilità dello sviluppo economico*, 102-127.
7. Brondizio, E. S.; Settele, J.; Díaz, S.; & Ngo, H. T. (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
8. Assemblea Generale ONU (2015). *Risoluzione adottata dall'Assemblea Generale il 25 settembre 2015. Trasformare il nostro mondo: l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile*. Disponibile online <https://unric.org/it/wp-content/uploads/sites/3/2019/11/Agenda-2030-Onu-italia.pdf>
9. Kohn, H. (2017). Chapter 8 Future scenarios for sustainability education: the future we want?. In *Envisioning futures for environmental and sustainability education* (pp. 44-60). Wageningen Academic Publishers.
10. McBride, B. B.; Brewer, C. A.; Berkowitz, A. R.; & Borrie, W. T. (2013). Environmental literacy, ecological literacy, ecoliteracy: What do we mean and how did we get here?. *Ecosphere*, 4(5), 1-20.
11. Morrone, M. K.; Mancl, K.; Carr., K. (2001). Development of a metric to test group differences in ecological knowledge as one component of environmental literacy. *Journal of Environmental Education* 32: 33– 42.
12. North American Association for Environmental Education (NAAEE). 2000 /2004. *Excellence in environmental education: guidelines for learning (K–12)*. NAAEE, Washington, D.C., USA

13. O'Brien, S. R. M. (2007). *Indications of environmental literacy: using a new survey instrument to measure awareness, knowledge, and attitudes of university-aged students*. Dissertation 1446054. Iowa State University, Ames, Iowa, USA. Proquest UMI Dissertations Publishing.
14. Roth, C. E. (1968). On the road to conservation. *Massachusetts Audubon* 38– 41.
15. Simmons, D. (1995). *Papers on the development of environmental education*. North American Association for Environmental Education. USA: Troy, Ohio.
16. Orr, D. W. 1992. *Ecological literacy: education and transition to a postmodern world*. Albany, New York, USA: SUNY Press..
17. Nurwaqidah, S.; Suciati, S.; & Ramli, M. (2020). Environmental Literacy-Based on Adiwiyata Predicate at Junior High School in Ponorogo. *Journal of Biological Education Indonesia (Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia)*, 6(3), 405-412.
18. Payne, B. K. (2006). Weapon bias: Split-second decisions and unintended stereotyping. *Current directions in psychological science*, 15(6), 287-291.
19. Miur (2019). Legge 20 agosto 2019, n. 92 Introduzione dell'insegnamento scolastico dell'educazione civica. Disponibile online <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2019/08/21/19G00105/sg>
20. Iavarone, M. L.; Malavasi, P.; Orefice, P.; & Pinto Minerva, F. (2017). *Pedagogia dell'ambiente 2017. Tra sviluppo umano e responsabilità sociale*. Lecce-Brescia: Pensa MultiMedia.
21. Antonietti, M.; Bertolino, F.; Guerra, M.; & Schenetti, M. (2022). *Educazione e natura: Fondamenti, prospettive, possibilità*. FrancoAngeli: Milano.
22. Bianchi, G.; Pisiotis, U.; Cabrera Giraldez, M. (2022). *GreenComp – Il quadro europeo delle competenze in materia di sostenibilità*. Bacigalupo, M., Punie, Y. (a cura di), EUR 30955 IT, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea, Lussemburgo, 2022; ISBN 978-92-76- 53202-6, doi:10.2760/172626, JRC128040.
23. Goleman, D.; Bennett, L.; & Barlow, Z. (2012). *Ecoliterate: How educators are cultivating emotional, social, and ecological intelligence*. John Wiley & Sons.
24. Pilgrim, S.; Smith, D.; & Pretty, J. (2007). A cross-regional assessment of the factors affecting ecoliteracy: implications for policy and practice. *Ecological applications*, 17(6), 1742-1751.
25. Rahma, A.; Mardiatno, D.; & Hizbaron, D. R. (2020). Q methodology to determine distinguishing and consensus factors (a case study of university students' ecoliteracy on disaster risk reduction). In *E3S Web of Conferences* (Vol. 200, p. 01003). EDP Sciences.
26. Okur-Berberoglu, E. (2018). Development of an Ecoliteracy Scale Intended for Adults and Testing an Alternative Model by Structural Equation Modelling. *International Electronic Journal of Environmental Education*, 8(1), 15-34.
27. McBride et al. (2013). *Op. cit.*, p. 14
28. Locke, S.; Russo, R.; & Montoya, C. (2013). Environmental education and eco-literacy as tools of education for sustainable development. *Journal of Sustainability Education*, 4(1), 1-14.
29. Pan, X.; Sinha, P.; & Chen, X. (2021). Corporate social responsibility and eco-innovation: The triple bottom line perspective. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 28(1), 214-228.

30. Madsen, N. G. (2020). Thinking Globally, Acting Locally: Ecology and Human Rights in Gioconda Belli's Waslala. *Ecozon@: European Journal of Literature, Culture and Environment*, 11(1), 134-151.
31. Shumba, O. (2011). Commons thinking, ecological intelligence and the ethical and moral framework of Ubuntu: An imperative for sustainable development. *Journal of Media and Communication Studies*, 3(3), 84-96.
32. Stirling, A. C.; & Scoones, I. (2009). From risk assessment to knowledge mapping: science, precaution, and participation in disease ecology. *Ecology and Society*, 14(2).
33. Bennett, N. J.; Di Franco, A.; Calò, A.; Nethery, E.; Niccolini, F.; Milazzo, M.; & Guidetti, P. (2019). Local support for conservation is associated with perceptions of good governance, social impacts, and ecological effectiveness. *Conservation letters*, 12(4), e12640.
34. Brignone, L.; Cellamare, C.; & Simoncini, S. (2022). Cittadinanza attiva, reti ecologiche e beni comuni digitali: tecnologie e processi collaborativi per la mappatura e progettazione dal basso di una "corona verde" nella periferia Est di Roma. *TRIA*, 28, 41-58.
35. Rinaldi, A. (2020). Construal Level Theory of Psychological Distance e rischio per l'ambiente. *Euro-Balkan Law and Economics Review*, (1), 76-94.
36. Bosco, A.; Caffò, A. O.; & Lopez, A. (2023). La Psicologia dell'interazione Persona-Ambiente. *La Psicologia dell'interazione Persona-Ambiente*, 171-187.
37. Itafarida, S.; Herupradoto, E. B. A.; Rosyidah, U. N. D.; & Rusnaningtias, E. (2019). Family-based collaborative ecoliteracy model for sustainable city Model ekoliterasi kolaboratif berbasis keluarga untuk kota berkelanjutan. *Masyarakat, Kebudayaan Dan Politik*, 32(2), 168-178.
38. Syofyan, H.; & Rachmadtullah, R. (2019). Increasing ecoliteracy on the impact of organic waste management using a problem a problem-solving the model. *International Journal of Scientific and Technology Research*.
39. Putri, S. S.; Japar, M.; & Bagaskorowati, R. (2019). Increasing Ecoliteracy and Student Creativity in Waste Utilization. *International Journal of Evaluation and Research in Education*, 8(2), 255-264.
40. Firdausi, A., & Wulandari, F. E. (2021). Development of Web-Based Science Learning Module in Improving the Students' Understanding of Eco-Literacy. *Jurnal Penelitian dan Pengkajian Ilmu Pendidikan: e-Saintika*, 5(3), 241-252.
41. Risqiyah, S.; & Gayatri, Y. (2022). Hands on Activity (HoA) learning model based on natural surroundings in an effort to improve ecoliteracy and learning motivation of the students of elementary school. In *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Biologi* (Vol. 8, No. 1, pp. 150-165).
42. Venkataramaiah, J. (2021). Space Eco Literacy is Cost Free-Case Studies. *43rd COSPAR Scientific Assembly. Held 28 January-4 February*, 43, 2186.
43. Yadnya, I. B. P.; Simpen, I. W.; & Satyawati, M. S. (2021). English Reading Texts Model Using the Ecoliteracy Lexicons Approach. *International Journal of Linguistics, Literature and Translation*, 4(4), 145-154.
44. Rosidah, C. T.; Putrayasa, I. B.; Wesnawa, I. G. A.; & Candiasa, I. M. (2022). Thematic comic to cultivate eco-literacy for young learners. *Kasetsart Journal of Social Sciences*, 43(3), 735-740.
45. Nelson, K.; & Fivush, R. (2020). The development of autobiographical memory, autobiographical narratives, and autobiographical consciousness. *Psychological reports*, 123(1), 71-96.

46. Hoyne, C.; & Egan, S. M. (2019). Shared Book reading in early childhood: a review of influential factors and developmental benefits. *An Leanbh Og*, 12(1), 77-92.
47. Batini F.; Bartolucci, M. (2016). Chi legge...ragiona meglio? Ricerche di Pedagogia e Didattica – *Journal of Theories and Research in Education* 11(3).
48. Friso, V.; & Vidotto, M. (2019). Lettura, infanzia e disabilità visiva. Un connubio possibile?. *Formazione, lavoro, persona*, 29, 103-112.
49. Cardarello, R. (2022). 'Imparare dagli errori'. Linee di ricerca didattica sulla lettura-comprensione. *Effetti di lettura/Effects of reading*, 1(1), 005-016.
50. Batini, F.; Toti, G.; & Bartolucci, M. (2016). Neuropsychological benefits of a narrative cognitive training program for people living with dementia: A pilot study. *Dementia & Neuropsychologia*, 10(2), 127-133.
51. Mar, R. A.; Oatley, K.; Djikic, M.; & Mullin, J. (2011). Emotion and narrative fiction: Interactive influences before, during, and after reading. *Cognition & emotion*, 25(5), 818-833
52. White, F. A.; Borinca, I.; Vezzali, L.; Reynolds, K. J.; Blomster Lyshol, J. K.; Verrelli, S.; & Falomir-Pichastor, J. M. (2021). Beyond direct contact: The theoretical and societal relevance of indirect contact for improving intergroup relations. *Journal of Social Issues*, 77(1), 132-153.
53. Eagly, A. H.; & Chaiken, S. (1993). *The psychology of attitudes*. Harcourt brace Jovanovich college publishers.
54. Bastug, M. (2014). The structural relationship of reading attitude, reading comprehension and academic achievement. *International Journal of Social Sciences and Education*, 4(4), 931-946.
55. Albarracín, D.; Johnson, B. T.; & Zanna, M. P. (2014). *The handbook of attitudes*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
56. Batini, F.; Barbisoni, G.; Bartolucci, M.; Toti G. (in corso). *DAL validation: a scale to detect reading attitude. La Validazione della DAL: una scala per rilevare la disposizione alla lettura*.
57. Okur-Berberoglu, E. (2020). An ecological intelligence scale intended for adults. *World Futures*, 76(3), 133-152.
58. Amka, A. (2020). Social participation of deaf students within inclusive higher education. *Social Participation of Deaf Students within Inclusive Higher Education*, 11.
59. Eryaman, M. Y.; Okur, E.; Cetinkaya, Z.; & Uygun, S. (2010). A participatory action research study of nature education in nature: Towards community-based eco-pedagogy. *International Journal of Progressive Education*, 6(3), 26-37.
60. Nugraha, R. G.; Jalal, F.; & Boeriswati, E. (2022). THE URGENCY OF THE ECOLITERACY MODULE IN IMPROVING THE ECOLITERACY ABILITY OF ELEMENTARY SCHOOL STUDENTS. In *International Conference on Language and Language Teaching*, pp. 43-56.
61. Rosenberg, M.J.; & Hovland, C.I. (1960). Cognitive, Affective and Behavioral Components of Attitudes. In C.I. Hovland & M.J. Rosenberg (Eds). *Attitude Organization and Change: An analysis of consistency among attitude components* (pp. 1-14). New Haven, CT: Yale University Press.
62. Kyttä, M. (2002). Affordances of children's environments in the context of cities, small towns, suburbs and rural villages in Finland and Belarus. *Journal of environmental psychology*, 22(1-2), 109-123.

63. Waters, J. (2017). Affordance theory in outdoor play. In Waller T., Ärlemalm-Hagsér E., Hansen Sandseter E.B., Lee-Hammond L., Lekies K., Wyver S., eds, *The Sage handbook of outdoor play and learning*. Sage Publications: London, pp. 40- 54.
64. De Carlo, M. E.; Pugachowa, A. (2021). Le eco-narrazioni come dispositivo pedagogico sfidante dell'Agenda 2030. *Lifelong Lifewide Learning*, 17(39), 169-182

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

La scuola come modello di sostenibilità. Progetti, sperimentazioni e ricerche applicate

Paolo Verducci ^{1,*}, Valerio Palini ², Francesco Demma ³

¹ Paolo Verducci, Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Perugia, Via Oberdan, 119 - 06034 Foligno (PG)

² Valerio Palini, dottorando - Università degli Studi di Perugia, Via Oberdan, 119 - 06034 Foligno (PG)

³ Francesco Demma, dottorando - Università degli Studi di Perugia, Via Oberdan, 119 - 06034 Foligno (PG)

* Autore di riferimento. E-Mail: paolo.verducci@unipg.it

Abstract: Progettare scuole sostenibili significa produrre edifici che non solo possano costituire una prima forma di educazione (scuole dell'infanzia e primarie) per come sono progettati, costruiti e per le emozioni che trasmettono, ma che siano concepiti per 'legare' i saperi e non dividerli. "La conoscenza dei problemi fondamentali e globali", afferma Edgar Morin "necessita di legare le conoscenze separate, compartimentate, disperse. Ora, la nostra scuola ci insegna a separare le conoscenze, non a legarle. Tuttavia, abbiamo bisogno di una conoscenza che sappia legare"¹. La scuola diventa il risultato della sovrapposizione di diversi tessuti ambientali: quello delle informazioni, delle relazioni, degli spazi e dei componenti architettonici, dei materiali, che a volte interagiscono generando stati emergenti significativi. La struttura spaziale è interpretabile come matrice pedagogica con alcuni punti di maggiore specializzazione: dagli atelier ai laboratori, sino agli spazi connettivi che diventano relazionali e che offrono diverse modalità di attività informali individuali e di gruppo. Per questi motivi dobbiamo impegnarci per trasformare le scuole future in modelli sostenibili per una rigenerazione urbana condivisa. Si potrebbe definire sostenibile quella scuola che non solo si caratterizza per le sue qualità estetiche e tecnologiche, ma che riguarda molto da vicino il rapporto con il futuro, utilizzando gli spazi di cui l'edificio si compone come principale strumento di conoscenza del territorio. Nel capitolo, dopo una prima ricognizione sulle principali tendenze di carattere tipologico e dopo una breve storia dello sviluppo dei primi edifici scolastici in Italia, si descrivono strategie e soluzioni per la mitigazione e riduzione dell'impatto ambientale con particolare attenzione all'adattamento al cambiamento climatico in ottica smart city. Risulta evidente che affrontare oggi una

riflessione di carattere progettuale sulla scuola come modello di sostenibilità non significa analizzare solo le questioni dell'involucro e dei consumi energetici, ma occorre allargare lo sguardo ad esempio al tema dell'accessibilità, al disegno degli spazi aperti, al rapporto con il contesto in una logica integrata di formazione attiva degli studenti (edutainment) nel rispetto degli altri e dell'ambiente in cui viviamo.

Keywords: scuola; sostenibilità; ricerca; rigenerazione urbana.

1. Introduzione

L'edificio scolastico, concepito in senso moderno, nasce nel XIX secolo quando si definiscono gli stati nazionali. La spinta propulsiva data dal diffondersi del processo di industrializzazione e delle idee di riforma sociale, espressione della nuova classe operaia, favorisce la creazione di una politica volta alla diffusione dell'istruzione tra la popolazione. Con la rivoluzione industriale le città si formano, le idee di riforme sociali si cominciano a diffondere (Owen), i governi iniziano a promuovere l'istruzione popolare, soprattutto in paesi come Inghilterra, Germania e USA dove il processo di industrializzazione sarà più veloce ed incisivo. Fino ai primi del '900 le corridor school rimangono la tipologia dominante: edifici realizzati con grandi finestre sui lati est-ovest, aule ai piani superiori distribuite da corridoi centrali, palestre ed attività di gruppo ai piani terra. Dall'inizio del '900 grande attenzione agli spazi esterni, luce naturale rinnovamento d'aria lasciano il posto a costruzioni più articolate e complesse fino a culminare nelle scuole ad un piano: dalle side-corridor school con libero orientamento delle aule e corridoi esterni di connessione, alle pavillon school.

Nello stesso momento storico, si passa dal concetto di insegnamento a quello di apprendimento. John Dewey, filosofo e pedagogista americano, realizzerà in Usa esempi di scuola attiva (fonda la sua prima scuola elementare nel 1896), in cui l'attività del fanciullo rispecchia quella della sua vita associata fuori dalla scuola in relazione con la famiglia, la natura, la società, la città; l'attività deve svolgersi in gruppi in ambienti specifici per ogni tipo di attività, a loro volta raggruppati intorno ad un nucleo dall'importanza sociale e collettiva come una biblioteca. La scuola in Italia ai primi del '900 è ancora ispirata al tipo edilizio del Palazzo. Le aule affacciavano su un cortile porticato, la facciata monumentale dialoga con il contesto urbano, l'edificio è improntato su concetti di igiene, solidità, economicità. Successivamente, l'affermazione dell'innovativo metodo Montessori permetterà il passaggio dalla scuola passiva alla scuola attiva, diffondendo criteri di pedagogia scientifica grazie allo studio della psicologia infantile con meno imposizioni e rapporto gerarchico e insegnamento basato sul libero apprendimento guidato. In tal modo si vuol trasformare l'ambiente scolastico, anche nella sua igiene e salubrità, per renderlo più adatto all'interazione col fanciullo, affinché l'apprendimento avvenga in modo naturale, trasformando il luogo dell'insegnare come strumento stesso dell'educazione e della conoscenza.

2. Aspetti normativi e analisi situazione edilizia scolastica in Italia

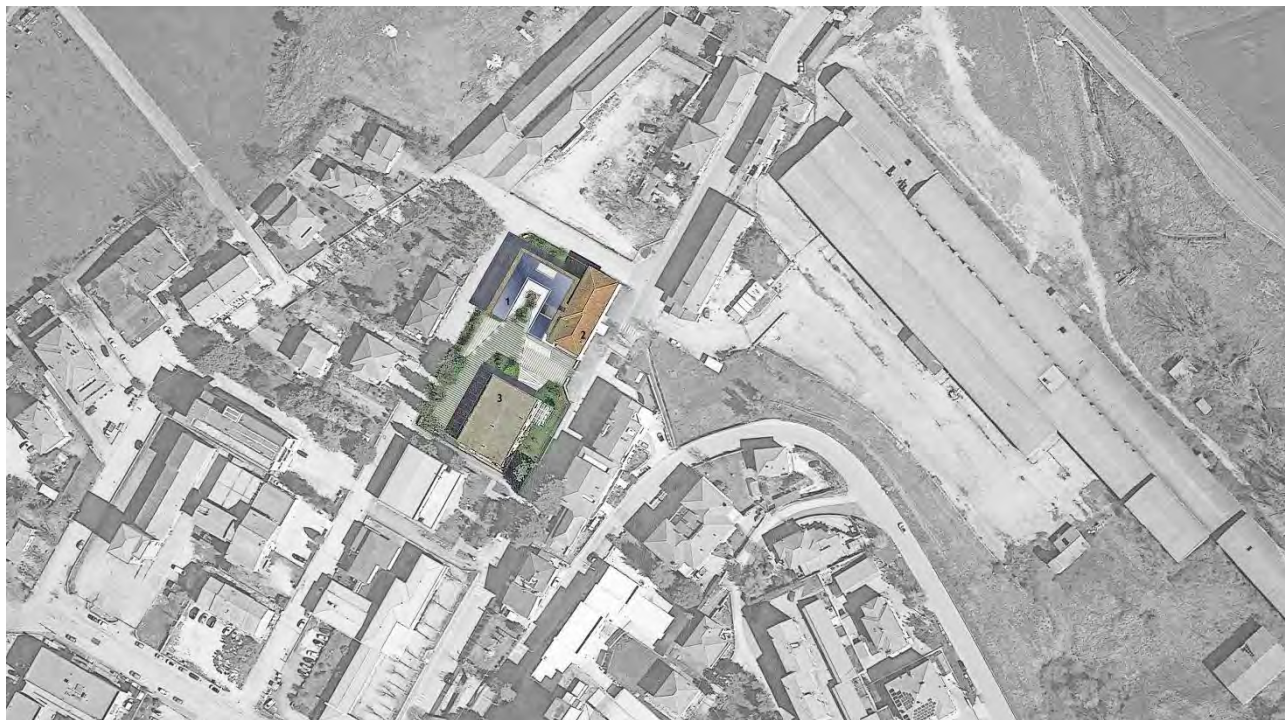
Nel PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza) è stata prevista una parte dei finanziamenti del fondo europeo per la realizzazione di nuove scuole, compresa la sostituzione di edifici esistenti. Il Ministero dell'Istruzione ha così pubblicato un avviso nel dicembre 2021, inerente alla Missione 2 del PNRR "Rivoluzione verde e transizione ecologica", in particolare la componente 3 "Efficienza energetica e riqualificazione degli edifici".

Tra i principali riferimenti normativi alla base del bando si ricordano: direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia; regolamento (UE) 2020/852 del Parlamento europeo e del Consiglio del 18 giugno 2020, relativo all'istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili e recante modifica del 5 regolamento (UE) 2019/2088 e, in particolare, l'articolo 17 che definisce gli obiettivi ambientali, tra cui il principio di non arrecare un danno significativo (DNSH, "Do no significant harm").

La normativa più recente in merito all'Edilizia scolastica è il Decreto Interministeriale dell'11 aprile 2013 che adotta le Linee Guida contenenti indirizzi progettuali di riferimento per la costruzione di nuove scuole. La struttura con la quale sono organizzate le raccomandazioni si basano sulle tematiche individuate dalla norma che possiamo definire "madre" delle successive: il DM 18.12.1975 - Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica. Il DM 18.12.1975 nasce da un'impostazione di tutela della salute umana dell'utente e di mantenimento di un equilibrio con l'ambiente prossimo circostante, sia esso naturale che urbano. Il campo di applicazione comprendono non solo le scuole di nuova costruzione, ma anche edifici esistenti, suddivisi tra quanti sono stati realizzati prima e dopo l'entrata in vigore del DM 18.12.1975. In tutti gli edifici scolastici, entro settembre 1997, dovrebbero essere state attuate le prescrizioni contenute nel decreto. Il DPR n. 151/2011 e il DM 7.8.2012 hanno introdotto nuove disposizioni riguardo alla classificazione degli edifici scolastici, introducendo quattro classi: la classe 1 per edifici fino a 150 persone; la classe 2 da 150 a 300; la classe 3 per gli asili nido; la classe 4 per edifici oltre 300 persone. In merito agli ultimi eventi sismici che hanno interessato il nostro Paese, è stato attivato dal primo dicembre 2014, il Sistema Nazionale delle Anagrafi dell'Edilizia Scolastica (SNAES) che ha come obiettivo quello di censire e acquisire informazioni relative alla situazione e alla funzionalità degli edifici scolastici di competenza dei Comuni e delle Province. Ad oggi però l'Anagrafe risulta ancora incompleta. Dalla situazione anagrafica si osserva che oltre il 50% degli edifici scolastici italiani si trova in zone a rischio sismico; quasi il 30% insiste nelle zone a rischio 1 e 2, ossia quelle a rischio più elevato. Nel 15% delle scuole sono state riscontrate lesioni strutturali e una scuola quattro ha chiesto interventi di tipo strutturale che, quasi un caso su tre (29%), non sono stati mai effettuati. Solo il 35% delle scuole campione possiede il certificato di agibilità, il 32% quello di agibilità igienico-sanitaria, mentre il certificato di prevenzione incendi è presente appena nel 10% delle scuole.

3. Strategie e sperimentazioni progettuali_ Il caso studio della nuova scuola di Bastardo a Giano dell'Umbria

Figura 1. Foto inserimento planimetrico della scuola nel contesto

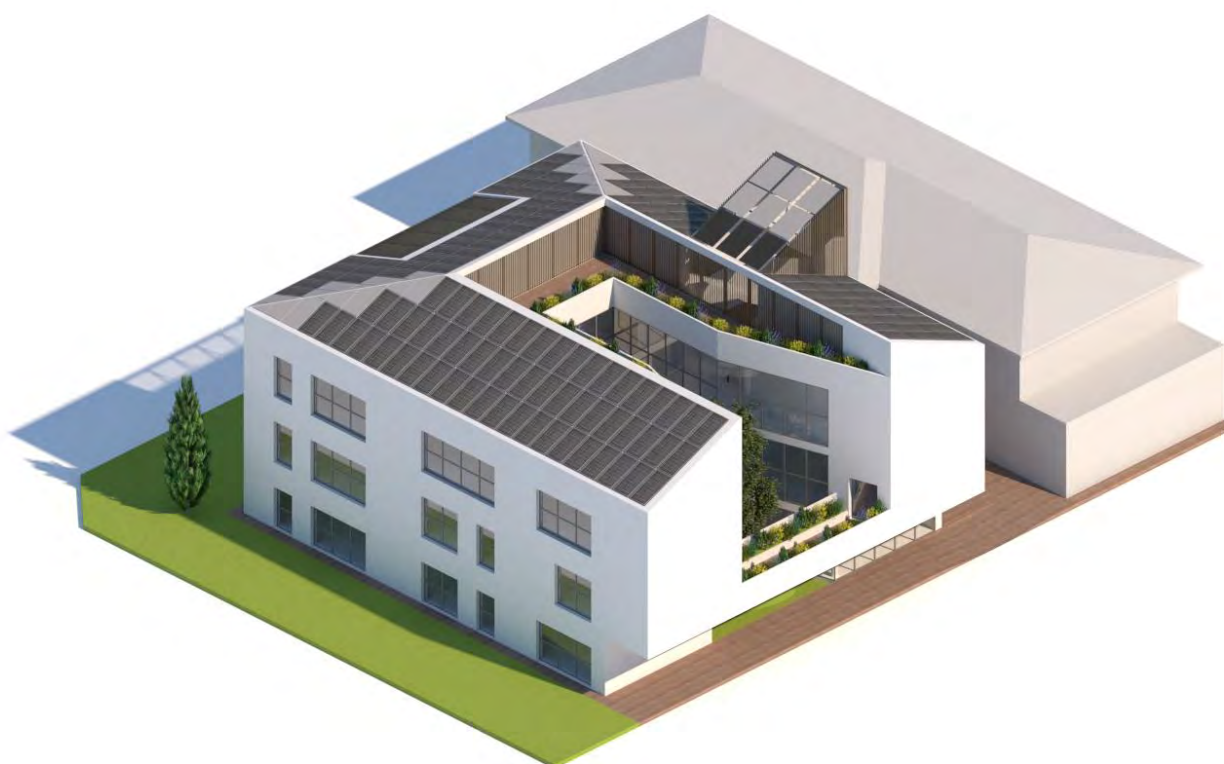


La riqualificazione dell'edilizia scolastica rappresenta una grande occasione per l'architettura italiana, soprattutto per garantire i massimi livelli di sicurezza ed efficienza energetica con la possibilità di migliorare la qualità architettonica degli spazi interno e il rapporto con il contesto paesaggistico. Ad esempio il tema dell'accessibilità, il disegno degli spazi aperti possono diventare i cardini di una ricerca condotta tra 'teoria e pratica' nel tentativo di valorizzare l'impostazione tipo-morfologica non solo sotto il profilo della riduzione dell'impatto ambientale e della difesa dai terremoti, ma organica al processo di formazione attiva degli studenti in una logica di edutainment e di crescita nel rispetto degli altri e dell'ambiente in cui viviamo. La maggior parte degli edifici scolastici infatti presentano dei costi di gestione elevati che ne rendono oneroso l'utilizzo o difficile il raggiungimento delle condizioni di confort per gli utenti.

La proposta progettuale presentata come caso studio, sviluppata nell'ambito dell'iniziativa finanziata con i fondi del PNNR, tiene conto delle indicazioni contenute nel documento redatto dal gruppo di lavoro nominato dal Ministro Bianchi con decreto 25 gennaio 2022. Un documento da cui emerge la necessità di vedere la scuola come uno spazio unico integrato in cui tutti gli ambienti hanno pari dignità e presentano caratteri di adattabilità e flessibilità in grado di accogliere in ogni momento persone e attività, offrendo caratteristiche di funzionalità, comfort e benessere. Da questo punto di vista il progetto per la nuova scuola di Bastardo ha l'ambizione di realizzare non solo una struttura spaziale come matrice pedagogica (con alcuni punti di maggiore specializzazione), ma anche utilizzare

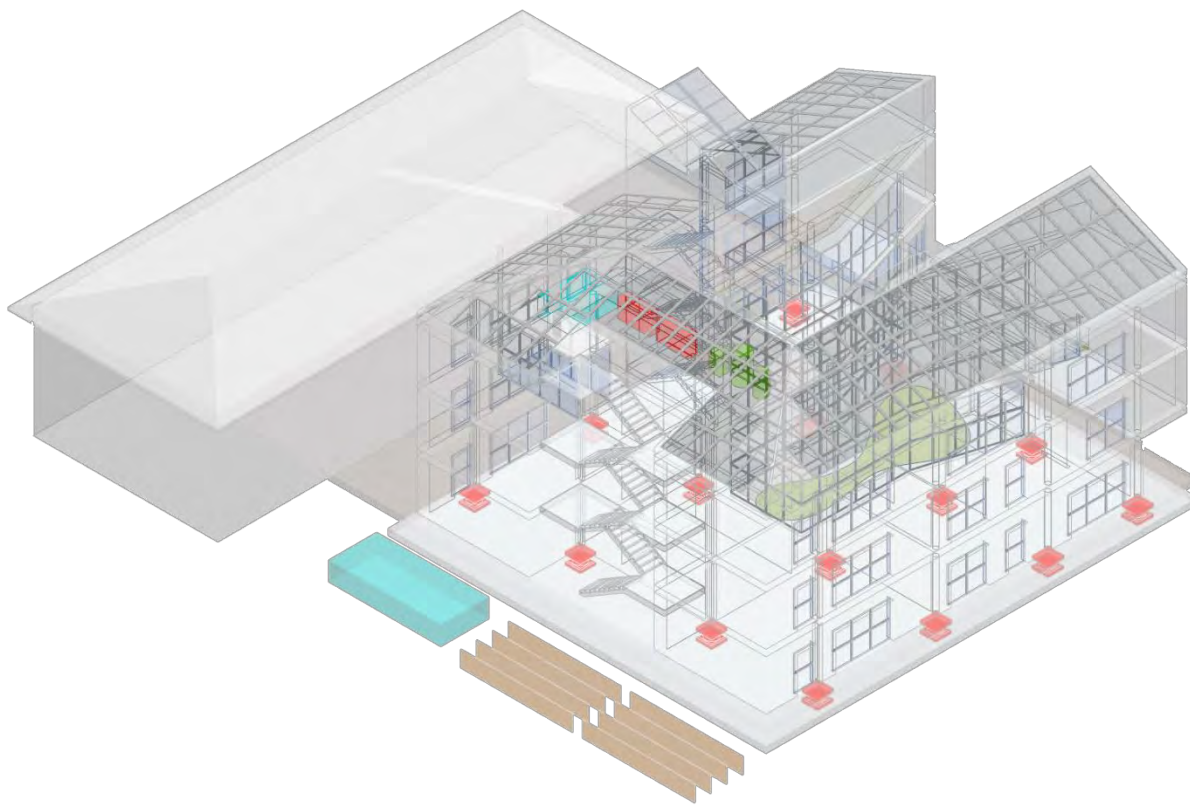
gli spazi come strumento di conoscenza per integrare i saperi e rafforzare gli aspetti relazionali. L'idea di progetto nasce proprio da questa necessità di legare, di tenere insieme le cose, due volumi simili uniti dal verde e dalla trasparenza della corte interna: cuore pulsante delle attività didattiche e laboratoriali.

Figura 2. Immagine di sintesi



Qualità dell'inserimento della proposta ideativa nel contesto urbano e ambientale.

Lo schema planimetrico ed il disegno degli spazi aperti costituisce uno strumento fondamentale di inserimento ambientale. Come si può notare dalla pianta e dalle immagini in 3D, l'articolazione volumetrica, la scelta dei materiali consentono alla scuola di inserirsi bene nel tessuto urbano, rispettando le indicazioni del bando e le linee guida di cui sopra. L'idea si fonda sulla necessità di dotare il complesso scolastico di una migliore qualità architettonica, di aumentare le performance di sostenibilità, gli spazi di socializzazione e ricreativi, le aree verdi esterne e quelle da destinare a parcheggio. Ad esempio, gli spazi distributivi (corridoi, atri, scale) assumono un ruolo centrale, non solo nei momenti di pausa, ma per lo stesso apprendimento, spazi dove svolgere attività in autonomia o semplicemente discutere, aspettare, incontrarsi, grazie ai quali promuovere un processo di apprendimento che - come indicato nelle linee guida e in coerenza ai traguardi metacognitivi suggeriti dalle indicazioni nazionali - dia rilevanza al ruolo attivo dello studente nell'impiego delle diverse strategie di lavoro scolastico.

Figura 3. Schema strutturale e sistemi per l'isolamento sismico

Come si può notare dallo schema sopra riportato, la struttura portante sarà realizzata con elementi in acciaio (strutture verticali e orizzontamenti), modulari, prefabbricati e facilmente assemblabili. Gli schemi strutturali che si sono scelti permettono di avere luci adeguate senza la presenza di colonne centrali, garantendo flessibilità e libertà di gestione. Sono previsti sistemi tecnologici da integrare nella struttura per assicurare le opportune prestazioni dinamiche nei confronti sia delle azioni eccezionali, quali i terremoti, sia delle azioni di servizio. Tutta la struttura sarà isolata alla base tramite l'inserimento di dispositivi con funzione di isolatori dissipativi antisismici a scorrimento che si attiveranno in occasione di azioni sismiche estreme.

La sostenibilità economica dell'intervento è garantita dalla tecnica edilizia a secco (struttura in acciaio, solai semi prefabbricati, involucro in pannelli stratificati, pannelli esterni termoisolanti in fibra di legno e intonaco e finiture interne ad alte prestazioni). Tale scelta costruttiva risulta la più adatta per conseguire la massima rapidità nei tempi di costruzione, per minimizzare l'impatto del cantiere (costruzione a secco), conseguire la massima efficienza energetica - con il raggiungimento del carbon neutral - e la massima sicurezza in zona sismica (struttura isolata alla base).

Figura 4. Sezione della scuola con indicazione degli isolatori sismici

La scuola, come si può notare dalla sezione (cfr. fig. 4), è organizzata su tre livelli, più un piano sottotetto ad altezza variabile da destinare agli impianti. Nel piano terra troviamo i tre laboratori richiesti, uno spazio per attività specialistiche, oltre alla reception, ai servizi, comprensivi di bagno per disabili con antibagno, e alla corte-giardino; al primo livello troviamo l'Aula magna, due laboratori, la presidenza, servizi per il corpo insegnante più uno spogliatoio, un secondo spazio per attività specialistiche, infine l'aula insegnanti, collegata tramite una passerella-terrazza all'aula magna. Questo livello, unitamente al secondo è dotato di scala di emergenza. Il secondo livello è totalmente destinato alle aule, infatti sono previste 5 aule attrezzate nel rispetto della normativa vigente, più un'aula polifunzionale. Il terzo livello è un piano tecnico ricavato nel sottotetto destinato agli impianti, oltre a contenere il locale tecnico e il ripostiglio, ospiterà i moduli inverter per la gestione dell'impianto fotovoltaico, la pompa di calore, i moduli per la gestione del solare termico e una delle due vasche di recupero dell'acqua piovana. I servizi igienici, distribuiti ai vari livelli, unitamente agli spazi per connettivo, rispondono positivamente alla normativa vigente. La nuova scuola, come dimostrato nello schema planimetrico, rispetta l'incremento del consumo di suolo contenuto in un massimo del 5% rispetto alla superficie coperta ante operam. Grazie a una superficie attuale coperta pari a 472 mq e una superficie integrativa max. del 5% (23,6 mq) si può ottenere una superficie massima ammissibile pari a 495,60 mq. L'impronta di superficie di progetto risulta essere 494 mq, quindi inferiore a quella ammissibile. Anche le superfici ricoperte a verde sono state aumentate, il verde esistente pari a 540 mq potrà diventare 618 mq, circa 78 mq in più.

Il progetto è pensato anche per incidere positivamente sulla mitigazione del rischio climatico, sulla prevenzione e riduzione dell'inquinamento, coerentemente ai dettami della Commissione europea

2021/C 58/01, contenuti negli "Orientamenti tecnici sull'applicazione del principio «non arrecare un danno significativo» a norma del regolamento sul dispositivo per la ripresa e la resilienza".

Figura 5. Pianta piano terra e primo

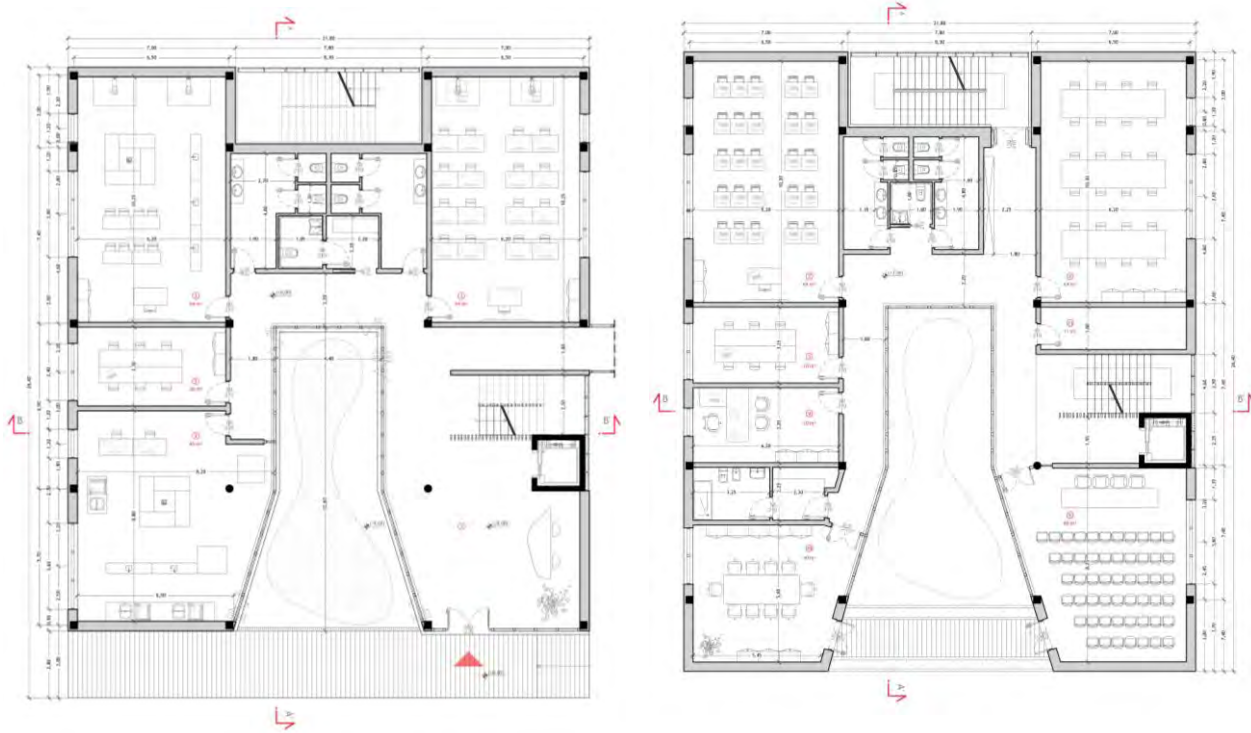


Figura 6. Pianta piano secondo e sottotetto

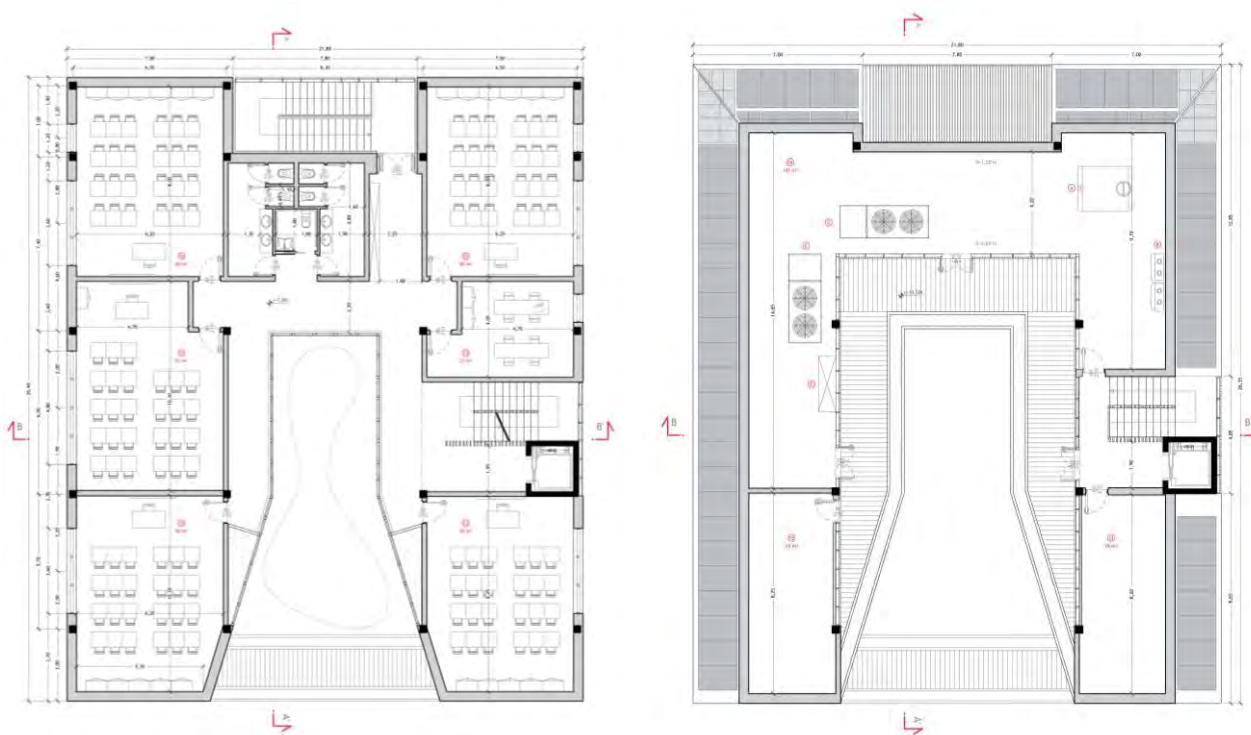


Figura 7. Vista dell'ingresso

La proposta progettuale prevederà soluzioni ad alto profilo energetico-ambientale che garantiranno la copertura da fonti rinnovabili di una parte consistente del fabbisogno energetico globale per il riscaldamento, il raffrescamento e la produzione di ACS. A tal fine saranno installati moduli fotovoltaici integrati sulle coperture del complesso e pannelli solari per la produzione di aria calda. Particolare attenzione sarà rivolta all'uso di una quadristica elettrica intelligente che permetterà il controllo e la gestione dell'energia da remoto.

Figura 8. Vista dell'ingresso al tramonto

Il sistema che si implementerà permetterà di migliorare l'affidabilità e la continuità di servizio dell'impianto, la regolazione, la gestione automatica, oltre che l'efficientamento energetico basato sulla misura e sul monitoraggio delle potenze e l'ottimizzazione del servizio manutentivo con notevole riduzione dei possibili fuori servizio dell'impianto ed i relativi costi.

Inoltre, saranno adottati interventi finalizzati al risparmio delle risorse idriche, mediante la realizzazione di un sistema di raccolta delle acque piovane per l'irrigazione delle aree a verde e per gli scarichi sanitari. I componenti degli impianti idrico sanitari saranno dotati inoltre di sistemi per la riduzione del flusso e il controllo della portata (rubinetti con temporizzatore, frangiflutto, impiego di cassette a doppio scarico).

4. Conclusioni

Come sappiamo, la maggior parte degli edifici scolastici presentano costi di gestione elevati che ne rendono oneroso l'utilizzo o difficile il raggiungimento delle condizioni di confort per gli utenti. In questo caso il progetto tiene conto di tre principali questioni: 1) l'integrazione, la complementarietà e l'interoperabilità degli spazi come principio compositivo di fondo per garantire la sequenzialità di momenti didattici diversi che richiedono setting e configurazioni diverse; 2) il rapporto con il contesto e l'adattabilità degli spazi che si estende anche all'esterno, offrendosi alla comunità locale ed al territorio; la scuola si configura come civic center in grado di valorizzare istanze sociali, formative e culturali; 3) la progettazione ambientale e l'applicazione di soluzioni tecnologiche di involucro e di impianto innovative, antisismiche ed efficienti.

Figura 9. Vista interna



Note

1. Morin E., *Conoscenza, ignoranza, mistero*, Raffaello Cortina Editore, Gravelona Toce (VB) 2018, p. 16. Morin nel libro si pone la questione della conoscenza ignorante. “Siamo in una società segnata dall’espansione delle conoscenze”, afferma Edgar Morin, “ma anche dalla regressione della conoscenza. L’espansione delle conoscenze è irresistibile quanto l’espansione dell’universo. La mente umana non ha la capacità di captare, abbracciare, organizzare la loro crescente immensità. Se può accumularle con dizionari, enciclopedie, Internet, Big Data, e se può o potrebbe “algoritmizzarne” alcune, non potrebbe però abbracciarne il tutto in espansione”.

References

- Capanna A., 2013, Edifici per la scuola. Quaderni di architettura dell’Ance, EdilStampa.
- Carlson, T.N., & Ripley, D.A., 1997.
- On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and left area index. Remote sensing of Environment.
- Cittadinanzattiva, 2016. Sicurezza, qualità accessibilità a scuola, XIV Rapporto Nazionale di Cittadinanzattiva.
- D.M. 18 dicembre 1975, norme per l’edilizia scolastica.
- Legambiente, 2017. Ecosistema Scuola, XVIII Rapporto di Legambiente sulla qualità dell’edilizia scolastica, delle strutture e dei servizi.
- Linee guida Miur per le architetture interne degli edifici scolastici. Pubblicate dal Miur, 11/04/2013.
- Oke, T., 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale models and field observations, Journal of Climatology.
- Ortese AM., Il corpo celeste, Adelphi Editore, Milano 1997, Pavesi, A.s., Zanata, G., 2014.
- Edilizia scolastica pubblica - Strumenti per la rigenerazione del patrimonio scolastico in Italia. Maggioli Editore.
- Pepe D., Rossetti, M., 2014. Progetti di scuole innovative. Maggioli editore.
- Rapporto nazionale anagrafe edilizia scolastica. Pubblicato dal Miur, 2012.
- Soe M., Crespi, M., 2014. Edilizia scolastica. Dei.
- Carbonara P., Architettura Pratica, 1958, volume III, tomo II
- Vindum K., A misura di bambino. Due scuole di A. Jacobsen, in “Casabella” n.750-751, 2006-2007, p.44
- Baglione C., Pedagogia dello spazio, in “Casabella”, n.750-751, 2006-2007, p.56
- Baglione C., Learning landscape, Intervista a H. Hertzberger, in “Casabella” n.750-751, 2006-2007, p.61
- Hertzberger H, Lezioni di Architettura, Laterza Editore, Bari 1996
- Lefaivre J., de Roode I., a cura di, Aldo Van Eyck, The Playgrounds and the city, catalogo della mostra, Rotterdam 2002

- A.A., Manuale di edilizia Scolastica, 1982, Urbino
- AA.VV, Progettare e riqualificare per l'efficienza energetica, San Marino, Maggioli Editore, 2013

Siti MIUR e dati scuole nazionali

<https://www.miur.gov.it/web/guest/>

Edilizia scolastica

https://www.istruzione.it/edilizia_scolastica/index.shtml

Opendata:

https://dati.istruzione.it/opendata/opendata/catalogo/elements1/?area=Edilizia%20Scolastica&&pk_vid=ef43723bf5ddaebb15822310573992e1

Anagrafe Nazionale dell'Edilizia Scolastica

<https://granalytics.pubblica.istruzione.it/hadoop/extensions/EdiliziaScolastica/EdiliziaScolastica.html?USER=286973>

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Monitoraggio sistematico dei consumi e del microclima interno per l'ottimizzazione della risorsa energetica e il mantenimento del comfort indoor: strategie per una Pubblica Amministrazione più sostenibile

Maria Giulia Proietti ^{1,*}, Ettore Stamponi ¹, Marco Elefante ¹, Giacomo Romagnolo ², Francesco Longhi ³, Emanuele Montenovo ³, Luca Proietti ³ and Elisa Moretti ¹

¹ CIRIAF - Università di Perugia, Via G. Duranti 63 (Perugia, Italia)

² Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Perugia, Via G. Duranti 93 (Perugia, Italia)

³ ARPA UMBRIA - Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale dell'Umbria, Via Pievaiola 207/B-3 (Perugia, Italia)

* E-Mail: maria.proietti@studenti.unipg.it

Abstract: Il lavoro si propone di investigare strategie per la riduzione dei consumi energetici legati agli impianti di riscaldamento, con particolare riferimento agli edifici della pubblica amministrazione, grazie al caso di studio della sede di Arpa UMBRIA a Perugia. Lo studio si basa sui risultati della diagnosi energetica dello stato attuale e un'analisi del benessere degli occupanti, dalle quali sono emerse le principali criticità che caratterizzano il sistema edificio-impianto. Alla luce del contesto storico, l'utenza ha deciso quindi di apportare delle modifiche nella gestione degli impianti di riscaldamento, con orari di funzionamento diversificati in base alle modalità di occupazione dell'edificio e alle condizioni climatiche. Lo scopo del presente elaborato è quello di valutarne l'efficacia in termini di riduzione dei consumi di gas metano e l'impatto che si ripercuote in termini di comfort termico indoor. La metodologia di lavoro si avvale quindi, oltre che del monitoraggio termoigrometrico in specifici locali dell'edificio, anche di letture del contatore, per analizzare i consumi dell'utenza su scala sia giornaliera che settimanale, e della modellazione energetica in regime dinamico dell'edificio. Da tali analisi risulta quindi possibile promuovere sistemi di gestione che possano ancora di più ottimizzare i consumi, garantendo allo stesso tempo le condizioni di benessere richieste, sviluppando algoritmi predittivi per programmare le accensioni degli impianti in funzione delle condizioni interne ed esterne.

Keywords: risparmio energetico; efficienza energetica; impianti di riscaldamento; modellazione dinamica.

1. Introduzione

L'efficienza energetica e il risparmio energetico sono due aspetti quasi consequenziali tra loro e fondamentali nell'ottica di aumentare la sostenibilità degli edifici. Sono tematiche estremamente attuali e che stanno coinvolgendo diversi settori della società. Il momento storico che stiamo attraversando, con la pandemia prima e la guerra in Ucraina poi, ha reso necessarie importanti misure per contrastare da un lato la crisi energetica, indotta dalla dipendenza di molti paesi alle importazioni di energia e, dall'altro, la crisi climatica a cui il nostro pianeta sta andando incontro, con effetti oramai quasi irreversibili. A livello normativo, in Italia, con il Piano Nazionale di contenimento dei consumi di gas naturale (D.M. n. 383 del 6 ottobre 2022) il Ministero della Transizione Ecologica ha reso infatti note le linee guida per l'autunno e l'inverno, a fronte della crisi energetica. Tra le misure previste dal provvedimento vi è quella di limitare la durata del periodo di accensione degli impianti di riscaldamento e di ridurre di 1°C la temperatura dell'aria interna, quindi $19\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, al fine di diminuire i consumi energetici.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di indagare le strategie per la riduzione dei consumi energetici legati agli impianti di riscaldamento negli edifici della pubblica amministrazione, con riferimento alla sede Arpa Umbria di Perugia e valutare l'impatto delle misure adottate nella stagione di riscaldamento 2022/23, proprio alla luce del contesto storico e delle modifiche in ambito normativo a livello nazionale. L'approccio metodologico impiegato è di tipo multidisciplinare, infatti le fasi di lavoro sono caratterizzate non soltanto dall'analisi dei consumi energetici nelle due stagioni di riscaldamento, quella passata e l'attuale, ma anche dallo studio del microclima interno e dalle simulazioni energetiche in regime dinamico dell'edificio, impiegate come strumento di previsione e di valutazione delle prestazioni della struttura per una programmazione degli impianti sempre più efficaci.

2. Descrizione del caso di studio

2.1. Involucro edilizio e impianti termici

L'edificio è situato in località San Sisto, a Perugia ed è la sede di Arpa Umbria (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale), al suo interno ospita uffici e laboratori della stessa, fatta eccezione per parte del piano terra che è invece a servizio del Nucleo Operativo Ecologico dei Carabinieri di Perugia. La struttura è ripartita su cinque livelli, di cui uno seminterrato, e si compone di due parti costruite in anni diversi: la parte originaria (parte vecchia - pv), risalente agli anni '70 e l'ampliamento (parte nuova - pn), realizzato nel 2015, di dimensioni più piccole. L'impianto di riscaldamento della parte vecchia è costituito da n. 2 generatori di calore tradizionali alimentati a gas metano, ubicati in apposita centrale termica al piano seminterrato, originariamente adibiti al riscaldamento e alla produzione di acqua calda, sia per uso igienico-sanitario e sia per il lavaggio della strumentazione in vetro nel laboratorio Vetreria, che è stoccata in un bollitore avente capacità di 500 litri. Da Novembre 2022 il servizio di acqua calda ad uso igienico sanitario è stato temporaneamente interrotto, lasciandolo soltanto per il laboratorio Vetreria, in attesa di trovare una soluzione più efficace per ripristinare il servizio, che

tenga conto anche del rischio di Legionella a cui l'impianto è sottoposto. La rete di distribuzione interna della parte vecchia è costituita da ventilconvettori di diverse taglie di potenza. Per quanto riguarda la climatizzazione della parte nuova della struttura, è previsto un impianto ad espansione diretta di tipo VRF (a volume di refrigerante variabile); tale impianto è costituito da un'unità esterna di tipo modulare in pompa di calore condensata ad aria e da unità interne canalizzabili installate nei controsoffitti, che immettono aria nei singoli locali mediante diffusori circolari. Il ricambio dell'aria è garantito da un sistema di ventilatori a recupero di calore entalpici installati a servizio di ogni piano; i terminali di immissione per la ventilazione sono dislocati nei corridoi e nei vari locali.

Nella seguente tabella sono riportate le caratteristiche degli elementi di distribuzione dell'impianto dislocati nell'edificio e della relativa modalità di regolazione.

Tabella 1. Elementi terminali e relativa regolazione nelle due parti dell'edificio.

PARTE VECCHIA DELL'EDIFICIO		
DISTRIBUZIONE IMPIANTO TERMICO		
	Tipologia	Ventilconvettore (VC)
	PH [kW]	8,4
	Q aria [mc/h]	450
REGOLAZIONE		
	La regolazione è di tipo manuale ed avviene tramite termostato alloggiato sul VC; il pannello di controllo si compone di un selettore di temperatura, un selettore di ventilazione e i led che indicano il tipo di funzionamento (caldo/freddo). Il selettore di ventilazione permette di impostare la velocità dei ventilatori su 3 livelli (minima, media e massima), oltre alle funzioni AUTO e OFF. Con la funzione AUTO la temperatura impostata viene mantenuta cambiando la velocità del ventilatore in modo automatico, in funzione del DT fra quella impostata e quella dell'ambiente, rilevata tramite sonda interna al VC; in modalità OFF il VC è spento ma può ripartire in modalità "Caldo" se la temperatura ambiente scende sotto un valore limite (funzione Antigelo). Il selettore di temperatura permette invece di impostare la temperatura in ambiente regolandola tra un valore minimo e massimo diversi a seconda della modalità di funzionamento (caldo/freddo).	
PARTE NUOVA DELL'EDIFICIO		
DISTRIBUZIONE IMPIANTO TERMICO		
	Tipologia	Diffusore per immissione aria
	Q aria [mc/h]	450
REGOLAZIONE		
	La regolazione dell'impianto nei locali avviene tramite pannelli a muro attraverso i quali gli utenti possono controllare l'accensione e lo spegnimento delle termoventilanti, scegliere il tipo di funzionamento (modalità climatizzazione invernale o estiva, deumidificatore) e quindi la temperatura nel locale e la velocità di immissione dell'aria in ambiente.	

2.2. Modalità di gestione del regime impianti e strategie attuate dall'utenza

Per contrastare la crisi energetica e ambientale l'utenza, a partire dalla stagione di riscaldamento 2022/2023, ha attuato delle semplici strategie che hanno già portato dei significativi risultati:

- in linea con le indicazioni ministeriali, l'accensione degli impianti di riscaldamento è stata ritardata ad inizio Novembre 2022, viste anche le condizioni esterne particolarmente favorevoli (le linee guida ministeriali prevedono, in base alla zona climatica di appartenenza del Comune di Perugia, il funzionamento degli impianti dal 15 Ottobre al 15 Aprile; tali date sono state modificate con il D.M. n. 383, dal 22 Ottobre al 7 Aprile salvo proroghe comunali sulla data di spegnimento);
- è stato introdotto un nuovo interruttore digitale a tempo per la programmazione dell'impianto di riscaldamento della parte vecchia;
- quest'ultimo semplice ed economico intervento ha quindi permesso di variare la gestione del suddetto impianto su scala giornaliera, in base all'occupazione dell'edificio, tenendo conto che da fine Ottobre 2022 l'utenza usufruisce dello smart working per due giorni a settimana, e delle condizioni esterne;
- inoltre, l'utenza ha previsto lo spegnimento totale dei generatori di calore nei fine settimana e delle pompe di circolazione nelle ore notturne, tenendo conto della momentanea sospensione del servizio di acqua calda ad uso igienico sanitario.

La programmazione degli impianti termici avviene in maniera distinta tra le due parti dell'edificio; nello specifico, per la parte vecchia è infatti presente il nuovo interruttore digitale a tempo, sopra descritto, modello *Finder serie 12*, programmabile tramite apposita applicazione per smartphone (*Toolbox NFC*), attraverso il quale è possibile impostare le schede di programmazione giornaliere e settimanali (accensione e spegnimento) e gli spegnimenti giornalieri in caso di festività.

Per quanto concerne la parte nuova dell'edificio, la programmazione generale dell'impianto è impostata mediante tablet, ubicato nella centrale termica in copertura, e prevede due livelli di spegnimento generale di tutto l'impianto: oltre l'ultimo orario di spegnimento gli occupanti dei locali non possono più accendere o regolare l'impianto di zona tramite termostato. Ciascun locale può inoltre impostare la temperatura interna variandola entro un range impostato che va da 16°C a 22°C.

Figura 1. Interruttore programmabile e sistema di gestione della parte vecchia (sinistra) e pannello touch-screen per sistema domotico degli impianti della parte nuova (destra).



La nuova strategia di gestione degli impianti nel corso della corrente stagione di riscaldamento è riportata nella seguente tabella, distinguendo la parte vecchia dell'edificio (PV) da quella nuova (PN). Ai fini dell'analisi sui consumi di gas metano, per la parte vecchia sono stati riportati anche i periodi di funzionamento giornalieri e settimanali, essendo l'impianto alimentato dal suddetto combustibile. Alla luce dell'analisi e del confronto con la passata stagione, è importante precisare che le modifiche rispetto all'anno passato non riguardano soltanto il regime di funzionamento (nella stagione 2021/2022 la programmazione era la stessa per tutti i giorni della settimana, dalle ore 7:00 alle ore 18:00), ma anche e soprattutto la gestione totale dell'impianto in quanto sia i generatori di calore che le pompe di circolazione della rete, durante la passata stagione, non venivano spente il fine settimana e nelle ore notturne.

Tabella 2: Orari di funzionamento degli impianti termici delle due parti dell'edificio.

Dall'accensione (Novembre) a 20/12/2022				
PV	lun/merc/ven	h 7:00-15:00	h giornaliere: 8:00	h settimanali: 43:00
	mar/gio	h 7:00-13:00 e 14:00-17:30	h giornaliere: 9:30	
PN	Tutti i giorni	h 7:00-18:00 (2° OFF h 20:00)		
Da 21/12/2022 a 23/01/2023				
PV	lun/merc/ven	h 5:00-15:00	h giornaliere: 10:00	h settimanali: 53:00
	mar/gio	h 5:00-13:00 e 14:00-17:30	h giornaliere: 11:30	
PN	tutti i giorni	h 5:00-18:00 (2° OFF h 20:00)		
Da 24/01/2023 a 14/02/2023				
PV	lun/merc/ven	h 5:00-15:00 (invariato)	h giornaliere: 10:00	h settimanali: 58:00
	mar/gio	h 5:00-19:00	h giornaliere: 14:00	
PN	tutti i giorni	h 5:00-18:00 (2° OFF h 20:00)		
Da 15/02/2023 a 20/03/2023				
PV	lun/merc/ven	h 5:00-15:00 (invariato)	h giornaliere: 10:00	h settimanali: 57:00
	mar/gio	h 5:00-18:30	h giornaliere: 13:30	
PN	tutti i giorni	h 5:00-18:00 (2° OFF h 20:00)		
	lun/ven	OFF piano 2 parte nuova		
Da 21/03/2023 in corso				
PV	tutti i giorni	h 7:00-10:00	h giornaliere: 3:00	h settimanali: 15:00
PN	tutti i giorni	h 5:00-18:00 (2° OFF h 20:00)		
	lun/ven	OFF piano 2 parte nuova		

3. Monitoraggio termoigrometrico: analisi delle temperature interne




3.1. Strumentazione impiegata e scelta dei locali monitorati

Le grandezze misurate, sia nei locali che all'esterno sono la temperatura e l'umidità relativa dell'aria. La strumentazione impiegata consiste in n. 6 Tinytag, distribuiti nei vari locali dell'edificio:

- n. 4 modello TGU4500 per la misura di temperatura e umidità relativa dell'aria interna;
- n. 1 modello TGP4510 per la misura della sola temperatura interna;
- n. 1 modello TGP4500 per la misura di temperatura e umidità relativa dell'aria esterna.

L'intervallo di campionamento delle grandezze termoigrometriche è stato impostato, per tutti i sensori, pari a 10 minuti. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei principali dati tecnici degli strumenti.

Tabella 3: Caratteristiche tecniche della strumentazione impiegata.

STRUMENTO	GRANDEZZE MISURATE	CARATTERISTICHE
 Tinytag TGU4500	Temperatura aria interna (°C) Umidità relativa aria interna (%)	Range -40÷85°C; Precisione ±0,0005°C Range 0÷95%; Precisione ±0,05%
 Tinytag TGP4510	Temperatura aria interna (°C)	Range -40÷85°C; Precisione ±0,0005°C
 Tinytag TGP4500	Temperatura aria esterna (°C) Umidità relativa aria esterna (%)	Range -40÷85°C; Precisione ±0,0005°C Range 0÷100%; Precisione ±0,05%

I locali complessivamente monitorati sono n. 7; il criterio di scelta è definito in base all'orientamento dell'edificio e quindi alla loro esposizione geografica e al loro grado di occupazione. Le attività svolte nei locali selezionati sono tutte mansioni da ufficio, fatta eccezione per il laboratorio rifiuti, situato al piano primo della parte vecchia, dove anche il grado di occupazione è variabile. Proprio in relazione a quest'ultimo aspetto, è stato deciso di escludere dal monitoraggio il piano seminterrato, in quanto ospitante perlopiù magazzini e spogliatoi. I locali selezionati sono quindi rappresentativi di parti dell'edificio, sia in termini di destinazione d'uso e occupazione, che in termini di esposizione, e quindi, attraverso il loro monitoraggio, è stato possibile valutare contemporaneamente le grandezze misurate lungo la verticale della struttura e in più punti di uno stesso piano.

Il monitoraggio è iniziato in data 24 Gennaio 2023 ed è ancora in corso; non tutti i locali sono stati monitorati contemporaneamente, infatti, dato il numero di sensori disponibili, questi sono stati spostati nel corso delle campagne tra i vari locali descritti. Per semplicità di trattazione verranno riportati soltanto i risultati delle analisi di alcune settimane rappresentative della campagna di monitoraggio, scelte in base alle condizioni esterne.

Tabella 4: Locali monitorati.

Locali	Monitoraggio	Posizione
1 ufficio 1	08/02 - in corso	PT_PV Ovest
2 lab. rifiuti	24/01 - in corso	P1_PV Ovest
3 ufficio 2	24/01 - 08/02	P2_PV Ovest
4 ufficio 10	08/02 - in corso	P3_PV Est
5 ufficio 6	24/01 - in corso	P3_PV Ovest
6 ufficio 8	24/01 - 08/02	P1_PN Ovest
7 ufficio 8B	08/02 - in corso	P2_PN Sud/Est

3.2. Risultati del monitoraggio termoigrometrico

Sulla base di quanto descritto sopra, visto il lungo periodo di monitoraggio e considerando che nel corso del tempo alcuni sensori sono stati spostati e altri aggiunti, l'analisi dei risultati si è concentrata su due settimane rappresentative dei mesi di Febbraio e Marzo, caratterizzate da stessi regimi di funzionamento degli impianti ma condizioni esterne sensibilmente diverse:

1. settimana 10/02 - 20/02

2. settimana 12/03 - 19/03

Per semplicità di trattazione verranno presentate le elaborazioni e le analisi effettuate per la sola temperatura interna, tralasciando l'umidità relativa; è infatti la temperatura interna la grandezza di maggior interesse sia per quanto riguarda il benessere delle persone e sia per quanto concerne l'analisi dei consumi energetici, essendo direttamente correlata al funzionamento degli impianti. L'obiettivo di tale monitoraggio infatti, non è solo quello di verificare che le condizioni di benessere per gli occupanti siano rispettati e che le temperature medie rispettino le prescrizioni della normativa (D.M. n. 383), ma è anche quello di studiare la risposta dell'edificio in termini di microclima interno alle variazioni di funzionamento degli impianti, in modo da fornire all'utenza indicazioni sempre più precise per la programmazione degli stessi.

Per ciascun locale e per ogni giorno di monitoraggio sono state quindi analizzati e valutati i seguenti aspetti:

- **h setpoint 19°C**, ovvero l'intervallo di tempo impiegato per raggiungere le condizioni di comfort (temperatura interna pari a 19°C) dall'accensione dell'impianto. Tale parametro espresso in ore fornisce un'indicazione anche sul transitorio di accensione dell'impianto stesso, che ovviamente è influenzato dal funzionamento degli elementi terminali e quindi dalla presenza o meno degli occupanti che li regolano a seconda delle proprie esigenze;
- **h comfort**, ovvero l'intervallo di tempo espresso in ore in cui la temperatura si mantiene al di sopra di 19°C (condizioni di comfort). Come si vedrà le condizioni di comfort possono essere raggiunte anche senza il funzionamento dell'impianto e in assenza di occupazione, grazie al contributo della luce solare diretta e agli ambienti confinanti riscaldati; inoltre, in molti casi, temperature superiori a 19°C perdurano anche oltre l'orario di funzionamento degli impianti;
- **T_{media}**, ovvero la temperatura interna dei locali valutata come valore medio nel periodo di occupazione, differente a seconda dei giorni.

3.2.1. Risultati della campagna di monitoraggio - settimana n.1

Il seguente grafico riporta l'andamento orario in ciascun giorno del periodo analizzato della temperatura interna dei locali monitorati e di quella esterna. La linea tratteggiata rossa indica il setpoint di 19°C, assunto come condizione di benessere in base alle indicazioni del D. M. n. 383. Il primo aspetto che emerge è che in tutti gli ambienti tale valore viene superato nell'arco della giornata. Si evidenzia anche che il laboratorio rifiuti è quello in cui si verificano marcate oscillazioni di temperatura tra giorno e notte: il picco si raggiunge infatti tra le ore 13:00 e le ore 14:00, mentre la notte la

temperatura scende anche al di sotto dei 14°C. Nei giorni di lunedì e venerdì gli occupanti dei locali adibiti ad ufficio sono soliti lavorare in smart working e, infatti, i ventilconvettori risultano spenti. In generale, nei locali adibiti ad ufficio ed in particolari in quelli della parte vecchia, risulta più complesso analizzare il microclima interno e l’impatto dell’impianto di riscaldamento, in quanto l’occupante è solito regolare e gestire il ventilconvettore il cui effetto in molti casi continua anche dopo lo spegnimento seppur in modo attenuato. È da segnalare che le condizioni di comfort, ovvero temperature maggiori di 19°C, molto spesso perdurano nell’arco della giornata, anche oltre l’orario di occupazione.

Figura 2: Andamenti orari delle temperature (periodo settimana n. 1).

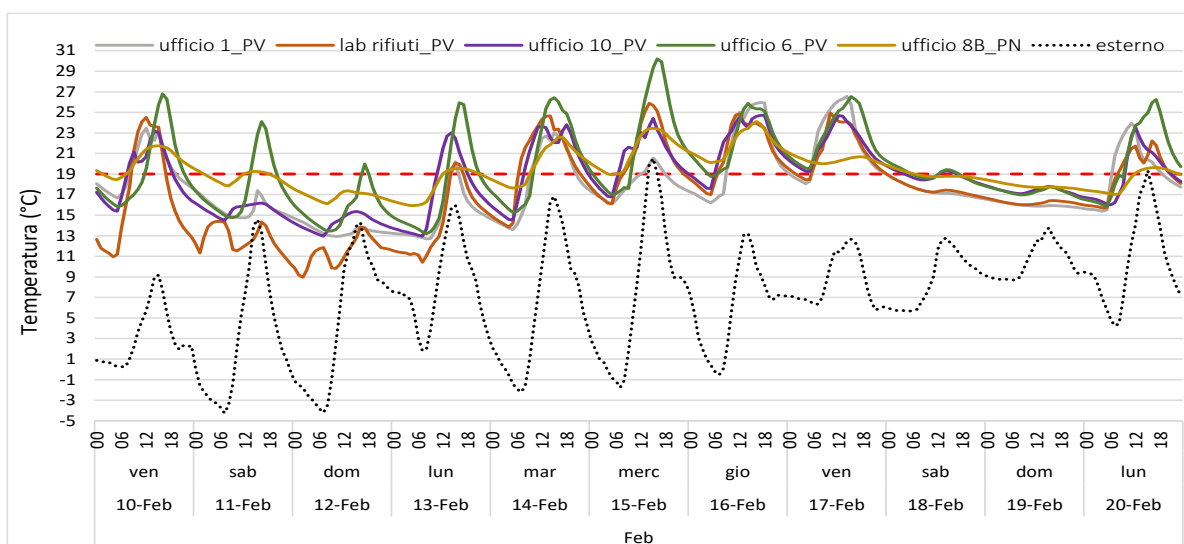


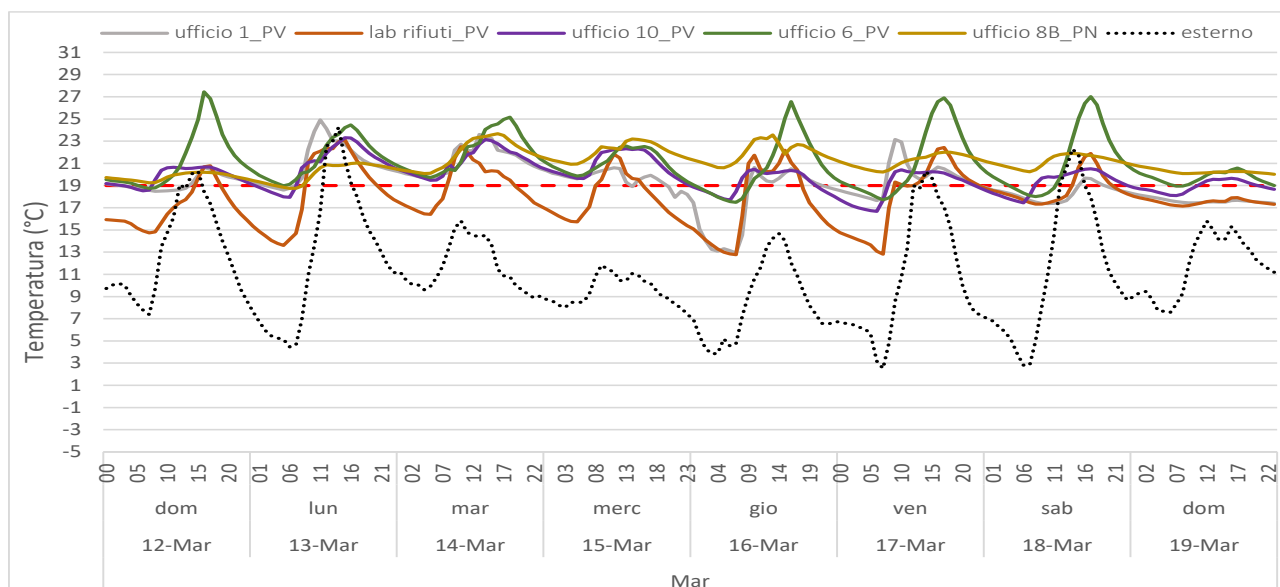
Tabella 5: Analisi del monitoraggio nei locali esaminati (periodo settimana n.1).

	Venerdì 10/02/2023					Lunedì 13/02/2023				
	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B
h setpoint 19°C	3	4	3	off	2	off	off	off	off	off
h comfort	12	8	11	10	19	2	3	8	8	10
T media [°C]	21,7	22,6	21,1	19,2	20,8	15,3	14,1	19,2	16,1	18,2
	Martedì 14/02/2023					Mercoledì 15/02/2023				
	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B
h setpoint 19°C	5	2	3	5	5	7	3	2	5	>19
h comfort	11	15	16	14	14	6	15	17	15	24
T media [°C]	23,2	23,2	22,5	22,9	20,9	18,6	22,3	22,2	22,3	21,7
	Giovedì 16/02/2023					Venerdì 17/02/2023				
	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B
h setpoint 19°C	4	2	1	2	>19	1	1	>19	>19	off
h comfort	15	17	18	22	24	19	20	24	24	24
T media [°C]	23,7	23,5	23,8	23,6	22,8	25,6	23,8	23,6	24,2	20,2
	Lunedì 20/02/2023									
	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B					
h setpoint 19°C	2	3	5	5	off					
h comfort	12	13	11	14	11					
T media [°C]	22,5	20,6	20,9	21,9	18,5					

3.2.2. Risultati della campagna di monitoraggio - settimana n.2

Il secondo periodo di monitoraggio analizzato è stato interessato da temperature esterne più alte, soprattutto per quanto riguarda il valore minimo registrato nelle prime ore del mattino, che in questo caso non è mai sceso sotto lo zero.

Figura 3: Andamenti orari delle temperature (periodo settimana n. 2).



Osservando gli andamenti orari riportati nel grafico, questi si mantengono al di sopra dei 19°C previsti anche oltre il periodo di occupazione; inoltre nei locali della parte vecchia esposti ad Ovest è rilevante il contributo della radiazione solare nelle ore pomeridiane. Alla luce di questi risultati è quindi auspicabile una programmazione differente degli impianti nei diversi mesi, che tenga quindi conto delle condizioni esterne variabili di mese in mese.

Tabella 6: Analisi del monitoraggio nei locali esaminati (periodo settimana n.2).

	Lunedì 13/03/2023					Martedì 14/03/2023				
	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B
h setpoint 19°C	2	4	3	>19	off	>19	3	>19	>19	>19
h comfort	19	12	17	24	20	24	11	24	24	24
T media [°C]	23	21,4	21,6	21,8	20,2	22,4	20,7	22	23	22,9
	Mercoledì 15/03/2023					Giovedì 16/03/2023				
	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B
h setpoint 19°C	>19	3	>19	>19	>19	4	4	3	5	>19
h comfort	20	8	24	24	24	13	9	13	15	24
T media [°C]	20	20,3	22,1	21,7	22,5	19,4	20,3	20,2	22	22,7
	Venerdì 17/03/2023									
	U 1	LR	U 10	U 6	U 8B					
h setpoint 19°C	3	4	3	5	off					
h comfort	15	14	15	16	24					
T media [°C]	21,1	18,9	20,1	21,1	21,1					

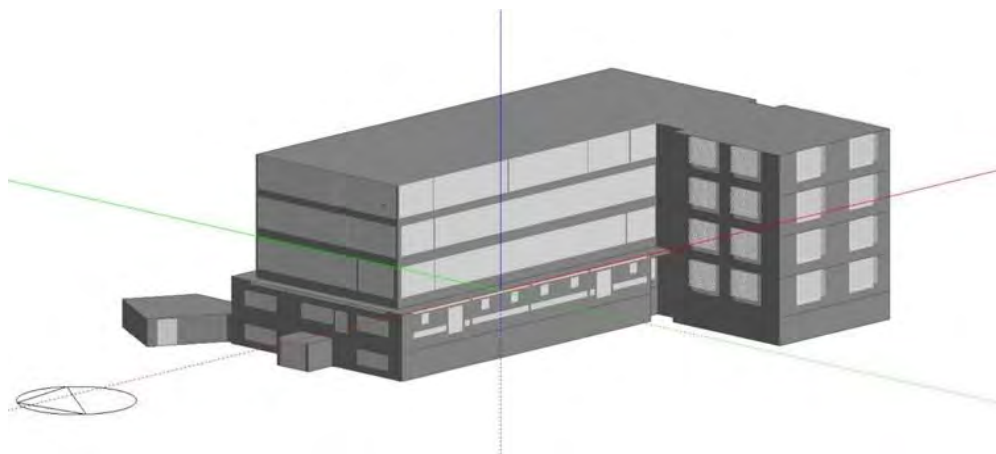
4. Simulazioni energetiche dell'edificio in regime dinamico: risultati preliminari

Il monitoraggio delle temperature interne è stato utile nella fase di simulazione energetica dell'edificio in regime dinamico. Attraverso l'impiego dei software quali Design Builder, per la costruzione del modello, ed EnergyPlus (versione 8.9), è stato possibile simulare proprio l'andamento delle temperature interne di alcuni locali selezionati tra quelli monitorati.

Per quanto concerne i passaggi che hanno portato alla costruzione del modello in Design Builder:

- è stata ricostruita la geometria dell'edificio e delle partizioni interne, tenendo conto dei diversi materiali delle strutture opache e trasparenti;
- sono stati definiti gli impianti termici e di illuminazione presenti, impostando i dati di ventilazione naturale e meccanica, laddove presente, il fabbisogno di acqua calda sanitaria, i setpoint di temperatura e le schede di programmazione per la climatizzazione, le potenze e la tipologia delle lampade presenti nei locali;
- sono stati definiti i carichi interni in termini di densità di potenza (macchinari da ufficio) e il grado di occupazione (densità di occupazione e tipo di attività). Per ciascuno degli aspetti definiti sono state programmate delle specifiche schede che regolano appunto l'occupazione giornaliera, l'uso dei macchinari e la gestione delle schermature solari.

Figura 4: Modello tridimensionale dell'edificio realizzato in Design Builder.



Per la fase di taratura e validazione del modello è stato costruito un file climatico in formato “.epw”, ottenuto a partire dai dati meteorologici esterni rilevati dalla centralina meteo installata sul tetto dell'edificio del Ciriaf (Polo di Ingegneria) relativi ai mesi di Gennaio e Febbraio 2023. Una validazione preliminare è stata effettuata a livello settimanale nel periodo indicato per alcuni locali della parte vecchia (laboratorio rifiuti e ufficio 10) e della parte nuova (ufficio 8), facendo riferimento alle linee guida definite dall'ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) nel documento “Guidelines 14” in cui sono indicate le metodologie di validazione. Ponendo l'attenzione sui locali della parte vecchia, di seguito si riportano i risultati di due diverse settimane in cui il modello risulta validato.

Figura 5: Validazione del modello, Laboratorio rifiuti (parte vecchia).

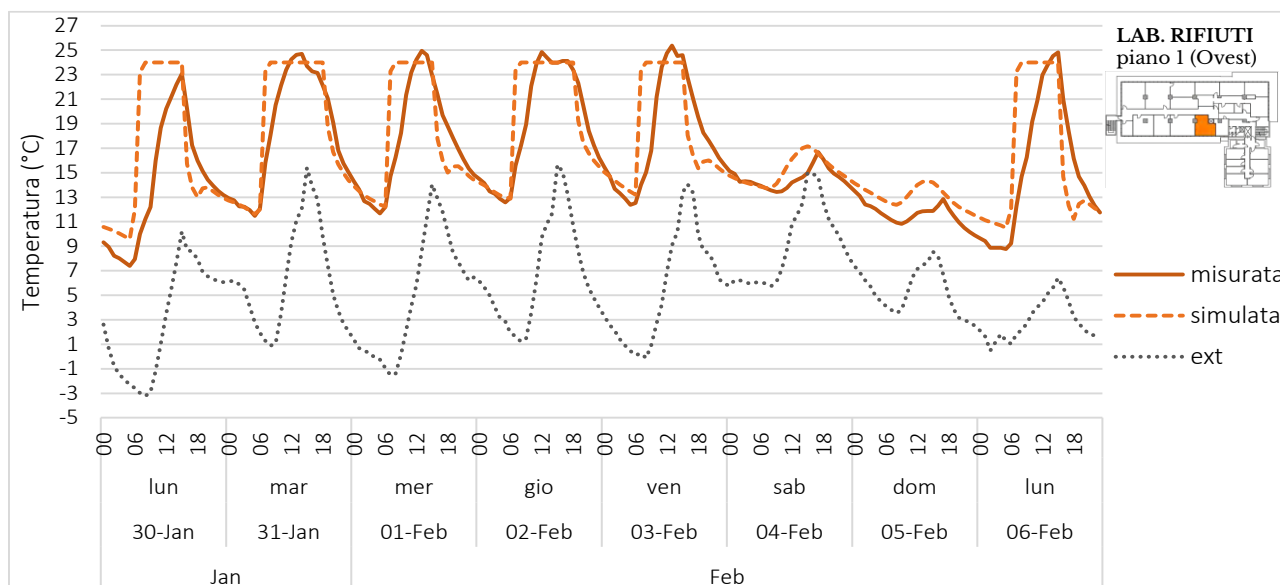
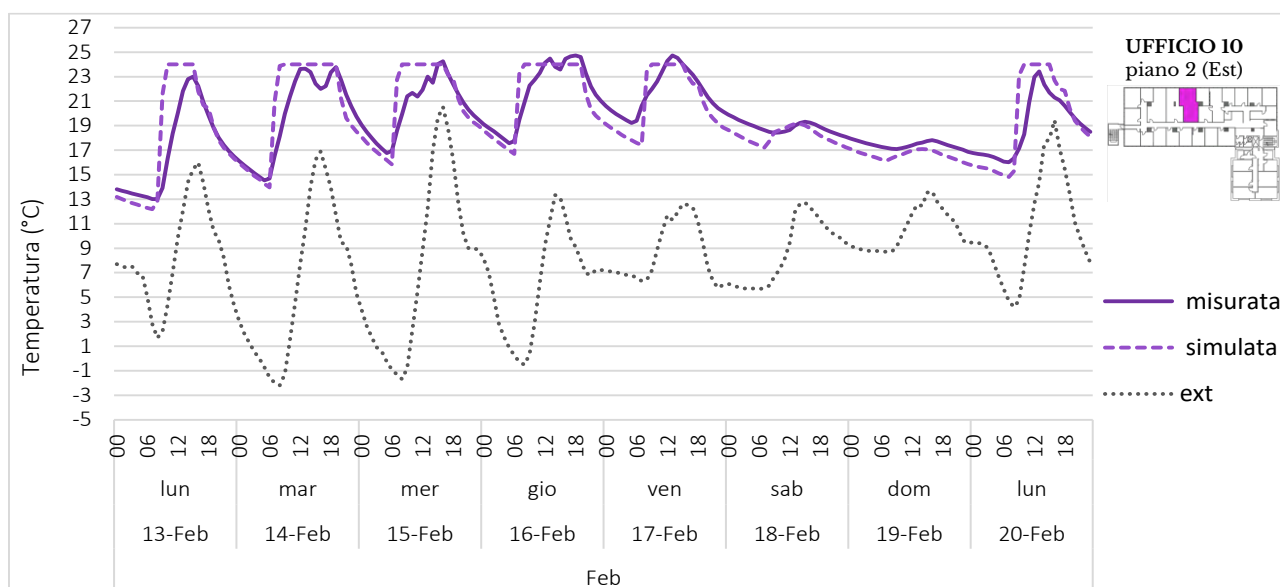


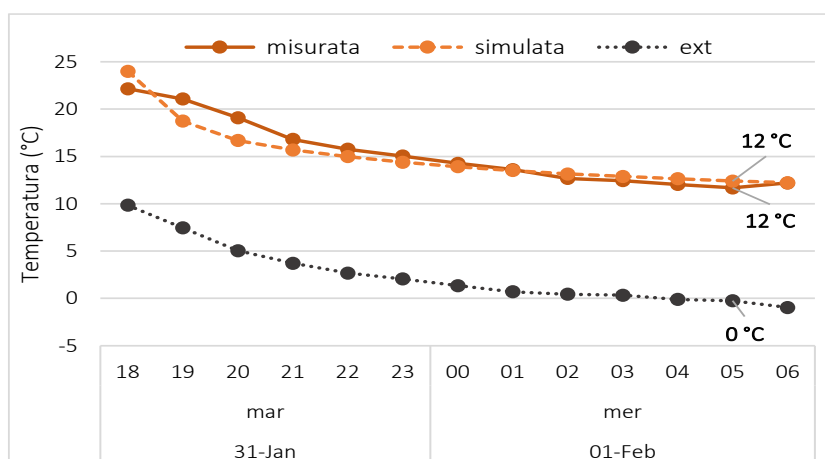
Figura 6: Validazione del modello, Ufficio 10 (parte vecchia).



Appare chiaro che si tratta di una fase del lavoro che è oggetto ancora di studio: l’obiettivo è quello di far sì che il modello possa diventare uno strumento utile alla programmazione degli impianti, sia di riscaldamento che di raffrescamento, soprattutto per quanto concerne la stima e la previsione delle temperature interne attese per l’accensione degli impianti, in base al transitorio di spegnimento degli stessi. È infatti evidente, osservando i grafici sopra, che il modello non simuli in maniera realistica la curva di crescita della temperatura in fase di accensione, a causa della modellazione semplificata degli impianti, come invece accade nella fase di spegnimento in cui le curve di temperature sono molto simili (andamento reale e andamento simulato). Ponendo l’attenzione su alcuni giorni delle settimane validate, si possono già trarre delle interessanti considerazioni sul transitorio di spegnimento

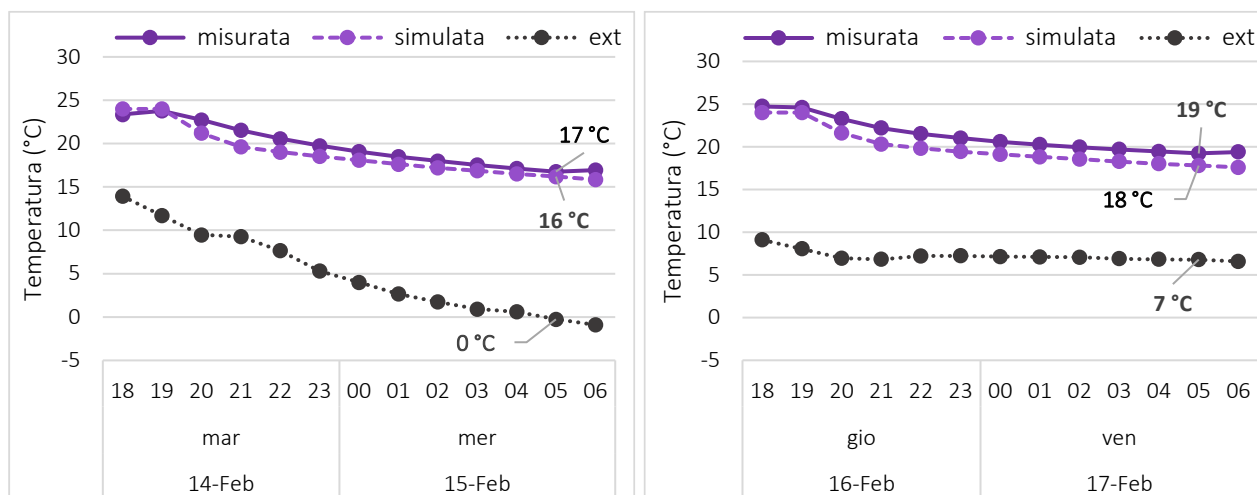
dell'impianto della parte vecchia. Sono stati considerati, per i due locali modellati, i giorni della settimana in cui l'impianto si arresta alle ore 19:00, momento in cui risulta assente il contributo della radiazione solare; l'attenzione è stata posta sull'andamento della temperatura interna ed esterna durante le ore notturne fino al momento dell'accensione dell'impianto (ore 5:00). Come si può osservare dal primo grafico relativo agli andamenti della temperatura, simulata e misurata, nel laboratorio rifiuti durante la notte tra il 31 Gennaio e il 1 Febbraio, si evince che il decremento più marcato si ha nelle tre ore successive allo spegnimento dell'impianto, con una velocità di decrescita di 2°C/ora, dopodiché la temperatura continua a diminuire più lentamente e a partire dalle ore 3:00 si attesta sui 12°C con una diminuzione inferiore a 0,5°C/ora, con temperature esterne intorno a 0°C ancora in diminuzione (il punto minimo si raggiunge alle ore 7:00).

Figura 7: Analisi del transitorio di spegnimento dell'impianto (Laboratorio rifiuti).



Per l'ufficio 10, questa stessa analisi è stata fatta per due giorni diversi caratterizzati da differenti condizioni esterne: la notte tra il 14 e il 15 Febbraio e la notte tra il 16 e il 17 Febbraio. Nel primo caso le temperature esterne erano ancora particolarmente rigide e a partire dalle ore 2:00 si assiste ad una più lenta diminuzione della temperatura interna che si assesta sui 17°C. La decrescita è simile a quella registrata nel laboratorio rifiuti ed infatti la differenza di temperatura registrata dallo spegnimento all'accensione mattutina per i due locali esaminati nei differenti giorni è tra 8-10°C e le condizioni esterne notturne sono anch'esse molto simili (come trend e come valori misurati). Nel secondo giorno analizzato (notte tra 16 e 17 Febbraio) si assiste invece ad una diminuzione di temperatura che rallenta già a partire dalle ore 23:00, assestandosi intorno ai 18°C. Le condizioni di partenza interne erano le stesse nei due giorni di analisi, infatti la temperatura interna al momento dello spegnimento dell'impianto era di circa 24°C, tuttavia all'esterno la temperatura notturna era molto più alta la notte tra giovedì e venerdì (al momento dell'accensione sono stati registrati 7°C all'esterno).

Figura 8: Analisi del transitorio di spegnimento dell'impianto (Ufficio 10).



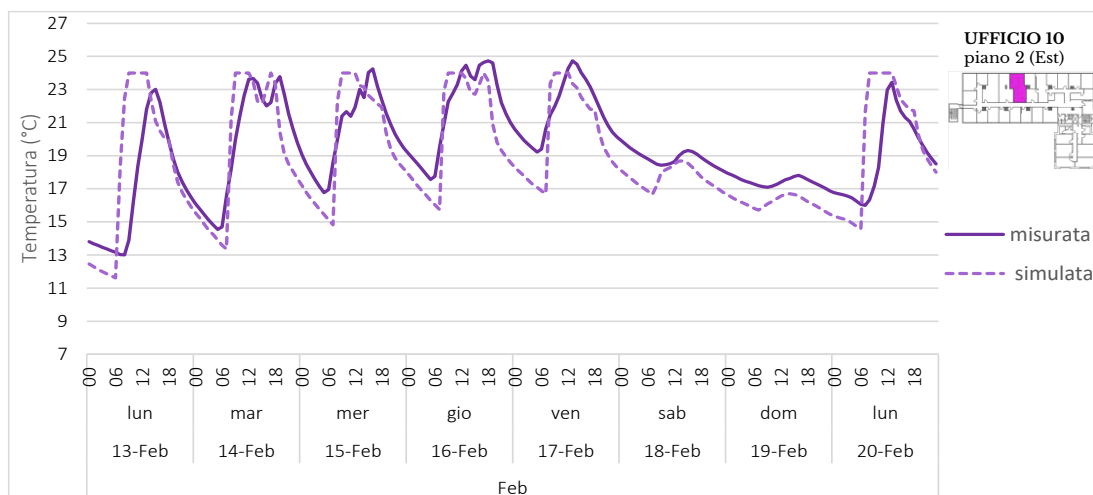
Dall’analisi degli andamenti di temperature, reale e del modello, al fine di valutare le potenzialità del modello validato, è stata ipotizzata una programmazione dell’impianto della parte vecchia diversa da quella adottata dall’utenza, che prevede un’accensione posticipata e diversa per il lunedì rispetto agli altri giorni e lo spegnimento anticipato e diverso in base alle modalità di occupazione (con uno spegnimento nelle ore centrali della giornata per le giornate con orario di occupazione più lungo).

Tabella 7: Nuova programmazione settimanale proposta per l’impianto della parte vecchia.

NUOVA PROGRAMMAZIONE IMPIANTI PROPOSTA			
lun	h 6:00- 13:00	h giornaliere: 7:00	h settimanali: 32:00
mar/gio	h 7:00- 12:30 e 15:30-17:30	h giornaliere: 7:30	
merc/ven	h 7:00- 12:00	h giornaliere: 5:00	

La programmazione ipotizzata è stata simulata nel modello i cui risultati preliminari sono riportati nel seguente grafico relativo ad una settimana di Febbraio per il solo ufficio 10. Come si può osservare dal confronto con la temperatura reale, che segue la programmazione dell’impianto impostata dall’utenza, si può osservare che nei giorni di martedì e giovedì l’occupante stesso è solito spegnere il ventilconvettore, in linea con quanto proposto; pertanto è lecito prevedere uno spegnimento in pausa pranzo in tali giorni. Inoltre lo spegnimento anticipato non crea problemi in quanto la lenta decrescita permette il mantenimento delle condizioni di comfort fino alla fine dell’intervallo di occupazione giornaliero. Ovviamente una gestione di questo tipo comporta una ulteriore riduzione del consumo di gas metano; tale riduzione è stata stimata a partire dal consumo medio orario ricavato dalle letture al contatore effettuate nel periodo simulato (che verranno descritte nel prossimo paragrafo), ottenendo una riduzione del consumo medio settimanale di circa il 40%.

Figura 9: Simulazione della nuova programmazione degli impianti proposta per la parte vecchia.



5. Analisi dei consumi energetici dell’edificio: confronto tra le stagioni di riscaldamento

5.1. Consumi di gas metano

Il consumo di gas metano imputabile all’utenza, come detto, è legato ai servizi di riscaldamento e produzione di acqua calda per uso igienico sanitario e per il lavaggio strumenti nell’apposito laboratorio relativamente alla sola parte vecchia dell’edificio. Fino al 2020 il gas metano era impiegato anche nella fase di post-riscaldamento dell’UTA a servizio dei laboratori; tuttavia a seguito di un guasto alla batteria fredda della macchina tale servizio è cessato. L’analisi è stata effettuata confrontando i consumi dell’utenza nelle due stagioni di riscaldamento (2021/2022 e 2022/2023), prendendo come riferimento temporale i mesi da Ottobre a Marzo (escludendo il mese di Aprile per mancanza di dati relativi all’anno in corso). Come descritto nei paragrafi precedenti, l’utenza ha apportato significative modifiche nell’uso del combustibile, riscontrabili nei diversi orari di funzionamento dell’impianto di riscaldamento e nei diversi servizi energetici soddisfatti. Lo studio ha riguardato il confronto tra le due stagioni in termini di consumi mensili, ricostruiti a partire dalle bollette fornite dall’utenza, e, per un’analisi ancor più dettagliata, sono state programmate anche delle letture al contatore del gas su base giornaliera e settimanale. Le letture sono state effettuate in due periodi specifici, uno a Febbraio (prima settimana del mese) e l’altro a Marzo (ultima settimana del mese), caratterizzati da diverse condizioni esterne e da differenti regimi di funzionamento degli impianti. Da tali letture è stato possibile stimare il consumo medio settimanale nei due periodi, come differenza tra una lettura e la precedente, e confrontarli con le stime effettuate per gli stessi mesi del 2022. In riferimento al 2022, va precisato che i consumi medi settimanali sono stati calcolati a partire dal consumo medio mensile che è stato poi diviso per il numero di settimane.

Tabella 8: Stima dei consumi medi settimanali dei mesi di Febbraio e Marzo.

	FEBBRAIO			MARZO		
	2022	2023	Variazione	2022	2023	Variazione
Consumo medio settimanale [Smc]	2.330	1.520	-35%	2.190	350	-84%



Come si può osservare, la nuova gestione degli impianti e in generale dell'uso del combustibile, ha portato una sostanziale diminuzione in termini di consumo medio settimanale per i due mesi analizzati -35% per Febbraio e -84% per Marzo. Confrontando poi i consumi settimanali tra Febbraio e Marzo 2023, i benefici riscontrabili dalla sola variazione degli orari di funzionamento dell'impianto sono quantificabili in una riduzione di circa il 77%. Dalle letture programmate nei suddetti periodi è stato possibile stimare anche il consumo medio orario dell'utenza in diversi momenti della giornata:

Tabella 9: Stima dei consumi medi orari nei periodi di Febbraio e Marzo 2023.

	Febbraio 2023	Marzo 2023
consumo impianto a regime - mattina [Smc]	28	16
consumo medio orario - pausa pranzo [Smc]	25	/
consumo medio orario transitorio accensione [Smc]	30	27
consumo medio giornaliero - giorno in Smart working [Smc]	300	70
consumo medio giornaliero - giorno «lungo» [Smc]	400	

L'analisi dei consumi di gas metano stagionali è stata approfondita valutando le variazioni mensili in termini di KPI e in termini di emissioni di anidride carbonica associate all'uso del combustibile. Per il calcolo dei KPI (kWh/mq) è stato considerato il potere calorifico inferiore del gas pari a 9,45 kWh/Smc (conversione degli standard metri cubi di gas in kWh) e una superficie dei locali riscaldati a gas metano pari a 2.740 mq (corrispondenti ai locali riscaldati dei piani della parte vecchia). Per quanto concerne la stima delle emissioni di CO₂, è stato considerato un fattore di conversione pari a 0,202 kgCO₂/Smc (fonte: Intergovernmental Panel for Climate Change). Nella seguente tabella è riportata anche una stima della ripartizione dell'uso di combustibile tra i diversi servizi energetici nei periodi considerati: riscaldamento (colore nero), acqua calda ad uso igienico sanitario (colore arancione) e acqua calda per Vetreria (colore azzurro).

Tabella 10: Analisi dei consumi mensili e relative emissioni di CO₂ nelle due stagioni confrontate.

STAGIONE 2021/2022*	Consumo [Smc]	KPI [kWh/mq]	CO ₂ [t]	STAGIONE 2022/2023**	Consumo [Smc]	KPI [kWh/mq]	CO ₂ [t]
Ottobre	5.699	20	11	Ottobre	880	3	2
Novembre	7.870	27	15	Novembre	4.996	17	10
Dicembre	11.135	38	21	Dicembre	3.651	13	7
Gennaio	11.325	39	22	Gennaio	5.546	19	11
Febbraio	9.304	32	18	Febbraio	5.173	18	10
Marzo	9.834	34	19	Marzo	3.182 lettura × C=1,01	11	6
Totale	55.167	190	105	Totale	23.428	81	45
							
Variazione [%]				-58			

*RISCALDAMENTO ATTIVO: da Ottobre ad Aprile (linee guida D.P.R. n. 74/2013), tutti i giorni h 7:00-18:00

**RISCALDAMENTO ATTIVO: da Novembre ad Aprile (linee guida D.M. n. 383/2022), diversi funzionamenti giornalieri

Come si può osservare, la diminuzione complessiva dei consumi di gas metano che si ha nella

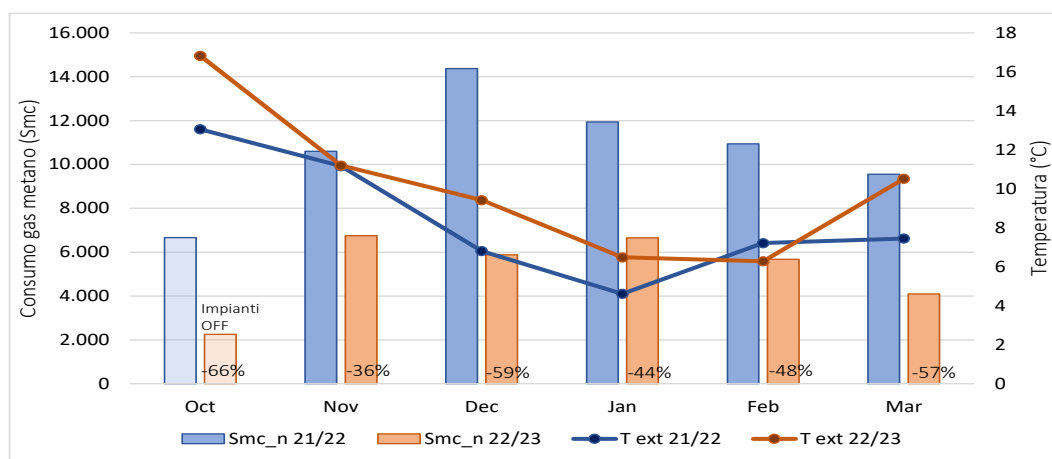
stagione di riscaldamento in corso rispetto alla passata è di circa il 58%. Per approfondire analogie e differenze dell'uso del combustibile da parte dell'utenza nell'intervallo temporale considerato, si è proceduto alla normalizzazione dei consumi rispetto ai gradi giorno (GG). Tale approccio tiene conto delle condizioni climatiche esterne (in termini di temperature medie) che certamente influenzano il fabbisogno termico. La normalizzazione dei consumi è stata effettuata su scala mensile secondo la seguente formula:

$$\text{Consumi}_{\text{normalizzati}} = \frac{\text{Consumi}_{\text{misurati}} \times \text{GG}_{\text{convenzionali}}}{\text{GG}_{\text{reali}}} \quad (1)$$

Nella formula i gradi giorno convenzionali sono quelli previsti dalla normativa, reperiti dal software *Masterclima 11300* per la zona climatica di Perugia (zona climatica E), mentre quelli reali sono stati calcolati secondo la formula prevista per ciascun mese considerato (sommatoria delle sole differenze giornaliere positive tra la temperatura interna di progetto di 20°C e la temperatura media esterna).

Il seguente grafico riporta il confronto in termini di consumi mensili normalizzati (grafico a istogrammi) e in termini di temperature medie mensili esterne (grafico a linee) nelle due stagioni di riscaldamento. Considerando la normalizzazione dei consumi, la variazione tra le due stagioni è leggermente inferiore rispetto al 58%, infatti il consumo nell'attuale stagione di riscaldamento è diminuito complessivamente del 51% rispetto all'anno passato.

Figura 10: Consumi di gas metano mensili normalizzati rispetto ai GG.



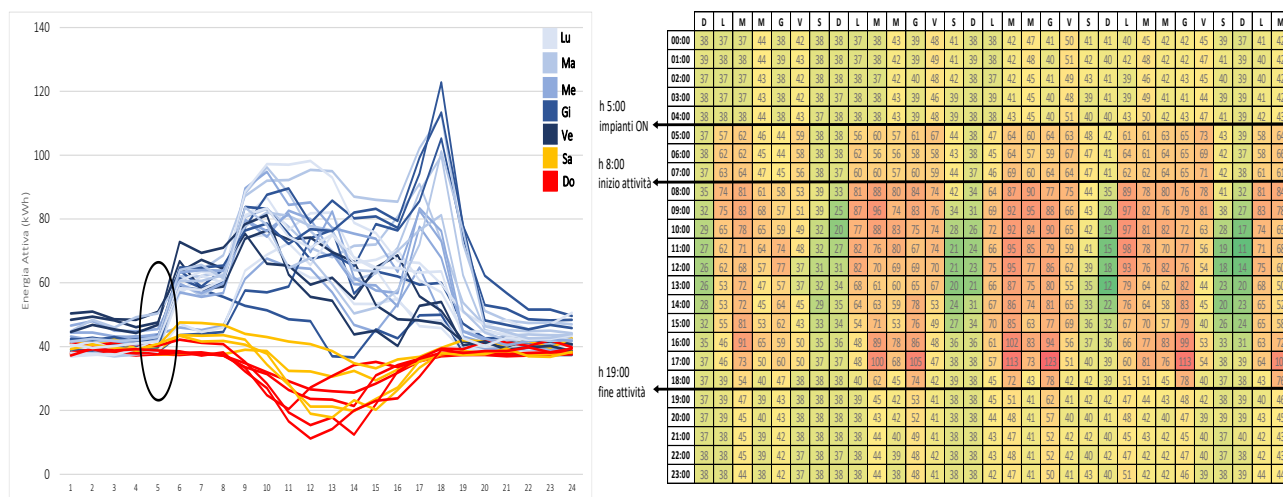
5.2. Consumi di energia elettrica da rete

In ultimo sono stati analizzati anche i consumi di energia elettrica da rete dell'utenza, confrontando anche in questo caso l'attuale stagione di riscaldamento con quella passata. L'analisi ha riguardato sia i consumi mensili che quelli giornalieri attraverso l'analisi degli assorbimenti da rete quartiorari. Le strategie attuate dall'utenza hanno infatti un impatto anche sui consumi elettrici, nello specifico lo spegnimento totale dell'impianto nei fine settimana e durante la notte delle pompe di circolazione. Per tale ragione lo studio è stato limitato soltanto ai consumi da rete, tralasciando il contributo dell'impianto fotovoltaico (impianto su pensiline caratterizzato da una potenza di picco pari a 65,5 kW);

l'apporto del fotovoltaico, pur trattandosi di mesi invernali, non è trascurabile in quanto nel periodo di analisi (da Ottobre a Marzo) copre mediamente tra l'8% e il 10% dei consumi elettrici totali. Tuttavia, come detto, l'attenzione in questo lavoro è stata posta sull'impatto degli impianti che è ben visibile nelle ore in cui l'impianto fotovoltaico non è ancora in funzione. Le seguenti figure riguardano delle elaborazioni eseguite a partire dagli assorbimenti quartiorari dell'utenza relativi al mese di Gennaio 2023: nello specifico la prima figura riporta gli andamenti medi orari di energia attiva assorbita dalla rete in ciascun giorno del mese. I giorni infrasettimanali sono colorati con le diverse gradazioni dell'azzurro, mentre i fine settimana di arancione (sabato) e rosso (domenica). La seconda figura riporta invece gli stessi assorbimenti orari in forma tabellare evidenziati secondo una scala di colori che va dal verde (assorbimento elettrico basso) al rosso (alto assorbimento elettrico).

In entrambi i casi è ben visibile l'accensione degli impianti alle ore 5:00, in cui si passa da un consumo medio orario prima dell'accensione di circa 40 kWh a 60 kWh dopo (incremento di 20 kWh). Lo stesso contributo si rileva anche nei giorni caratterizzati da un orario di accensione degli impianti "lungo", ovvero il martedì e il giovedì; infatti dalla seconda figura tale decremento è ben visibile alle ore 19:00 quando in generale oltre agli impianti si interrompono anche le attività lavorative nell'edificio. Un altro dato rilevante, visibile sempre dalla seconda figura, è il contributo degli occupanti: infatti un ulteriore incremento energetico si ha intorno alle ore 8:00 quando l'utenza dà avvio alle attività.

Figura 11: Andamenti medi giornalieri dell'energia attiva assorbita da rete (Gennaio 2023).



La diminuzione del consumo notturno è ben visibile dai seguenti grafici, in cui si riportano i consumi giornalieri della settimana media di Gennaio 2022 e Gennaio 2023 (media oraria dei giorni delle settimane dei mesi considerati): come si può osservare il consumo medio notturno relativo a Gennaio 2022 era di circa 60 kWh, nello stesso mese del 2023 tale consumo è sceso a circa 40 kWh. Nel complesso, considerando il consumo totale delle due settimane rappresentative dei mesi di Gennaio 2022 e 2023, è stata stimata una riduzione del 21% nel 2023, frutto di tutte le misure e gli accorgimenti che l'utenza ha avuto nell'ultimo periodo.

Così come è stato fatto per i consumi mensili di gas metano, anche i consumi elettrici sono stati

analizzati valutandone i KPI (kWh/mq) e le relative emissioni di anidride carbonica. Per quanto concerne i KPI, questi sono stati calcolati normalizzando i consumi mensili rispetto alla superficie utile dell'edificio (in questo caso è stata considerata l'intera superficie pari a 3.772 mq, comprensiva anche del piano terra della parte nuova occupato dal nucleo dei Carabinieri). Le emissioni di CO₂ sono state invece stimate considerando un fattore di conversione pari a 0,255 kgCO₂/kWh (fonte: ISPRA 2020).

Figura 12: Andamento dei giorni della settimana media.

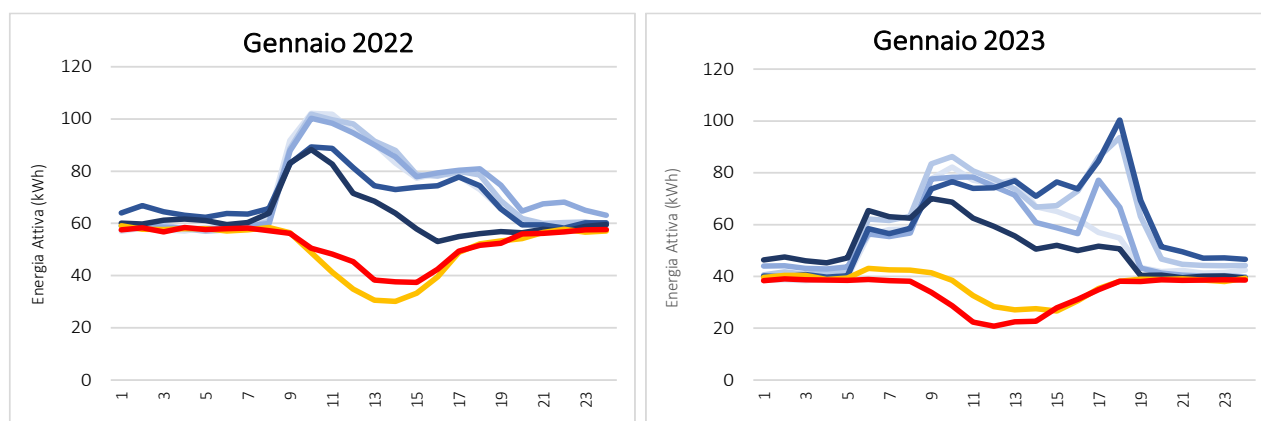


Tabella 11: Analisi degli assorbimenti da rete mensili e relative emissioni di CO₂ nelle due stagioni confrontate.

STAGIONE 2021/2022	Ass. rete [kWh]	KPI [kWh/mq]	CO ₂ [t]	STAGIONE 2022/2023	Ass. rete [kWh]	KPI [kWh/mq]	CO ₂ [t]
Ottobre	39.303	10	10	Ottobre	33.064	9	8
Novembre	40.888	11	10	Novembre	32.484	9	8
Dicembre	47.162	13	12	Dicembre	36.367	10	9
Gennaio	47.463	13	12	Gennaio	37.719	10	10
Febbraio	40.608	11	10	Febbraio	33.235	9	8
Marzo	40.921	11	10	Marzo	32.539	9	8
Totale	256.345	68	65	Totale	205.408	54	52
Variazione [%]	-20						

Come si può osservare, la riduzione dei consumi da rete tra la stagione corrente e quella passata è pari al 20%, ciò è dovuto sicuramente ad una nuova gestione degli impianti e dei servizi energetici, più attenta all'uso dei combustibili, e anche ad una sensibilizzazione degli utenti alle tematiche di risparmio ed ottimizzazione della risorsa stessa. Oltre a questi è stato valutato anche l'impatto dello smart working, modalità di lavoro sicuramente utile nel periodo pandemico ma che, dal punto di vista della riduzione dei consumi energetici nella corrente stagione di riscaldamento, non ha apportato significativi risultati. Tale modalità di lavoro è stata adottata con continuità a partire da fine Ottobre 2022 per due giorni a settimana per quasi tutte le mansioni lavorative. Sono stati quindi valutati i consumi elettrici medi giornalieri per i mesi da Novembre 2022 a Marzo 2023 a partire dalle curve di carico degli assorbimenti elettrici da rete (risulta mancante il mese di Ottobre 2022 per un disservizio del portale delle curve di carico quartiorarie), tenendo conto delle diverse modalità di lavoro e dei

diversi orari di occupazione che caratterizzano le settimane della corrente stagione di riscaldamento. Accanto al consumo medio è riportato anche il rispettivo valore di deviazione standard che permette di quantificare la dispersione di ciascun dato rispetto alla media calcolata. Dal confronto tra le giornate in smart working (lunedì e venerdì) e la giornata lavorativa “lunga” (martedì e giovedì), si evince che la differenza in termini di consumo elettrico da rete è inferiore al 10%.

Tabella 12: Stima dei consumi medi nelle diverse tipologie di giorno per i mesi analizzati.

Tipo di giornata	NOV 2022	DIC 2022	GEN 2023	FEB 2023	MAR 2023
Giornata in smart working - Lun [kWh]	1.031 ± 67	1.166 ± 104	1.315 ± 116	1.212 ± 127	1.100 ± 29
Giornata in smart working - Ven [kWh]	1.068 ± 34	1.172 ± 113	1.235 ± 112	1.262 ± 66	1.027 ± 96
Giornata “corta” - Mer [kWh]	1.211 ± 110	1.367 ± 150	1.332 ± 121	1.311 ± 111	1.223 ± 128
Giornata “lunga” - Mar/Gio [kWh]	1.341 ± 122	1.455 ± 161	1.469 ± 133	1.395 ± 89	1.209 ± 119
Fine settimana e festivi [kWh]	812 ± 55	888 ± 85	873 ± 87	866 ± 167	750 ± 108

6. Conclusioni e sviluppi futuri

L’obiettivo del presente lavoro è stato quello di analizzare l’impatto delle strategie di riduzione dei consumi energetici che Arpa Umbria ha attivato per la sede di Perugia e porre le basi per un nuovo sistema dinamico di gestione degli impianti in funzione delle condizioni climatiche esterne e della reale occupazione degli ambienti. L’attenzione è stata maggiormente posta sui consumi di gas metano, considerando che la parte più grande dell’edificio, ovvero la parte originaria della struttura, è servita da tale combustibile che alimenta un impianto di riscaldamento di tipo tradizionale. La parte nuova, cioè l’ampliamento di più recente costruzione, è invece servita da un impianto di condizionamento di tipo VRF, molto più performante anche sotto il punto di vista della regolazione e più adatto agli ambienti adibiti ad ufficio. Data l’obsolescenza di tutto l’impianto di riscaldamento della parte vecchia dell’edificio, compresi anche il circuito di distribuzione e gli elementi terminali (ventilconvettori), caratterizzati da una limitata regolazione da parte degli occupanti, l’utenza ha attuato delle semplici strategie per ridurre il consumo di combustibile: la più importante è l’aver introdotto un interruttore digitale a tempo per la programmazione dell’impianto di riscaldamento. Si tratta di un semplice ed economico intervento che ha permesso una gestione dell’impianto più efficace basata su una programmazione diversa per giorni in base all’occupazione dell’edificio e alle condizioni esterne. Unitamente a ciò è stato previsto anche lo spegnimento totale dell’impianto nei fine settimana e delle pompe di circolazione durante la notte, in base ai servizi energetici soddisfatti nell’attuale stagione di riscaldamento. L’insieme di queste misure ha portato l’utenza a ridurre i propri consumi energetici di gas metano ed energia elettrica da rete rispettivamente di oltre il 50% e di circa il 20% nella stagione di riscaldamento in corso rispetto alla passata (periodo da Ottobre a Marzo). Alla riduzione dei consumi è ovviamente associata anche quella delle emissioni di anidride carbonica, che rappresenta il beneficio ambientale: le misure intraprese hanno infatti ridotto complessivamente di circa il 43% tali emissioni rispetto alla stagione di riscaldamento 2021/2022.

Parallelamente allo studio dei consumi energetici è stato effettuato anche un monitoraggio del microclima interno: l’analisi delle temperature in alcuni locali significativi dell’edificio ha evidenziato

aspetti importanti legati soprattutto alla risposta della struttura alle variazioni di gestione degli impianti, che sono sicuramente influenzati dalle condizioni esterne, dall'inerzia termica dell'involucro stesso oltretutto dalla gestione dei terminali da parte degli occupanti. Ciò ha fornito delle indicazioni utili per ipotizzare una nuova gestione degli impianti, soprattutto della parte vecchia, che è stata anche simulata preliminarmente nel modello termoenergetico in regime dinamico. Gli sviluppi futuri del lavoro riguardano infatti lo studio del transitorio di accensione e spegnimento dell'impianto, con l'ausilio di tale modello, per poter pianificare la programmazione degli impianti su scala mensile, non soltanto per quanto riguarda la stagione di riscaldamento ma anche quella di raffrescamento. Lo studio dei consumi energetici, infatti, continuerà anche nella stagione estiva con lo stesso approccio metodologico adottato.

Riferimenti bibliografici

1. Chen, S.; Zhang, G.; Xia, X.; Chen, Y.; Setunge, S.; Shi, L. The impacts of occupant behaviour on building energy consumption: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **2021**, 45.
2. Liu, B.; Pouramini, S. Multi-objective optimization for thermal comfort enhancement and greenhouse gas emission reduction in residential buildings applying retrofitting measures by an Enhanced Water Strider Optimization Algorithm: A case study. *Energy Reports* **2021**, 7, 1915-1929.
3. Chen, X.; Cao, B.; Pouramini, S. Energy cost and consumption reduction of an office building by Chaotic Satin Bowerbird Optimization Algorithm with model predictive control and artificial neural network: A case study. *Energy* **2023**, 270.
4. Peñasco, C.; Diaz Anadòn, L. Assessing the effectiveness of energy efficiency measures in the residential sector gas consumption through dynamic treatment effects: Evidence from England and Wales. *Energy Economics* **2023**, 117.
5. Favero, F.; Grossi, L. Analysis of individual natural gas consumption and price elasticity: Evidence from billing data in Italy. *Energy Economics* **2023**, 118.
6. Pasqualetto, M. Sistema di monitoraggio energetico di edifici. Tesi di Dottorato, Università degli studi di Padova, Dottorato di ricerca in Ingegneria Industriale, XXV Ciclo.
7. Proietti, M. G.; Moretti, E.; Pisello, A. L.; Nicolini, A.; Corneli, A.; Proietti, L. La consapevolezza e la sensibilizzazione degli occupanti come strumento per l'efficienza energetica, la sostenibilità ambientale e il comfort: il caso di studio ARPA UMBRIA. In *Atti del XXI Congresso Nazionale CIRIAF - Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana, 8 - 9 aprile 2021, Perugia*; Morlacchi Editore University Press ISBN 978-88-9392-279-1 (online), Perugia, Italia, 2021.
8. Proietti, M. G.; Nicolini, A.; Montenovo, E.; Simoncini, C.; Longhi, F.; Moretti, E. Indagine sull'impatto delle persone nella valutazione del microclima interno, del comfort e dei consumi energetici degli edifici: il caso di studio delle sedi ARPA UMBRIA, in: *Atti del 38° CONVEGNO NAZIONALE AiCARR "Edifici e impianti per il clima futuro", 29 giugno 2022, Aicarr 2022*. ISBN 978-88-95620-77-0.
9. Proietti, M. G.; Stamponi, E.; Nicolini, A.; Montenovo, E.; Simoncini, C.; Longhi, F.; Moretti, E. La

diagnosi energetica della sede di Arpa UMBRIA a Perugia: analisi dei consumi energetici e delle prestazioni dell'edificio e valutazione di interventi di ottimizzazione dell'uso dell'energia. In: *Atti del XXII Congresso Nazionale CIRIAF "Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana"*, Perugia, 6-7 aprile 2022. Morlacchi Editore University Press. ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0. pp. 412-413.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

I distretti agroalimentari di qualità in Umbria. Un modello di governance territoriale strategica per l'economia circolare.

Luca Fondacci^{1,2*}, Francesca Caproni³, Rosaria Pignataro⁴, Francesco Giorgianni⁵

¹ Ciriaf, via G. Duranti 67, 06125, Perugia

² Dipartimento di Architettura Ferrara, Via della Ghiara 36, 44121, Ferrara

³ GAL Trasimeno Orvietano, Piazza Antonio Gramsci, 1, 06062, Città della Pieve, PG

⁴ Scuola Superiore Territorio Ambiente Management-Ciriaf, via G. Duranti 67, 06125, Perugia

⁵ Libero Professionista

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: luca.fondacci@unipg.it

Abstract: I Distretti del Cibo sono sistemi produttivi locali caratterizzati da una significativa presenza economica e da una interrelazione e interdipendenza produttiva delle imprese agricole e agroalimentari, nonché da una o più produzioni certificate e tutelate ai sensi della vigente normativa comunitaria o nazionale, oppure da produzioni tradizionali o tipiche. Oltre che garantire la sicurezza alimentare e ridurre lo spreco alimentare, i distretti del cibo perseguono importanti finalità in ottica di gestione sostenibile del territorio ed economia circolare. L'articolo illustra le strategie di *governance* territoriale poste in essere dal GAL Trasimeno Orvietano per la costituzione dei primi 2 distretti umbri del cibo agroalimentare dell'area Trasimeno Corcianese e dell'area Sud-Ovest dell'Orvietano, riconosciuti dalla Regione Umbria nel giugno 2022. In particolare, verranno illustrate e discusse le specificità, le leve e le azioni previste per il raggiungimento delle finalità e obiettivi dei due distretti. L'articolo si inserisce nel filone di studi di politiche di sviluppo territoriale strategico e partecipativo, perché considera i distretti del cibo come leve di concreti processi di governance sostenibile e partecipativa di scala locale.

Keywords: distretti agroalimentari di qualità 1; governance territoriale strategica 2; economia circolare 3; Gruppi di Azione Locale-GAL 4; ottica spazialista 5;

1. Introduzione

In Italia i distretti sono 141 e rappresentano circa il 25% del sistema produttivo italiano in quanto ad addetti ed unità produttive, mentre i circa 2 milioni di occupati nel settore manifatturiero distrettuale, con oltre rappresenta oltre un terzo di quella complessiva italiana [1,2].

Figura 1. Distribuzione geografica distretti industriali (%) – Dati Istat 2011

In Italia, i distretti industriali sono conosciuti e studiati dalla fine degli anni '60, grazie a Giacomo Beccattini e all'Istituto regionale programmazione economica Toscana-IRPET che si sono occupati della industrializzazione leggera della Toscana [3,4]. In questi primi lavori si comincia a utilizzare il concetto di distretto industriale, elaborato da Alfred Marshall mentre studiava le zone tessili del Lancashire e dello Sheffield alla fine del Ottocento [5,6]. Tale concetto verrà apertamente recuperato nel celebre articolo del 1979, "Dal settore industriale al distretto industriale. Alcune considerazioni sull'unità d'indagine dell'economia industriale" [7], alla base degli studi sulla distrettualistica contemporanea [8,9,10]. I lavori di Beccattini sulle produzioni tipiche della Toscana, incontrano e si incrociano con le indagini e gli studi sulle piccole imprese delle regioni della Terza Italia di Arnaldo Bagnasco [11,12], le analisi di Giorgio Fuà sulle regioni del modello NEC [13] e di Sebastiano Brusco sul nascente distretto dell'economia agraria in Emilia Romagna [14,15], andando a costituire il nucleo centrale di quella idea di *Made in Italy*, oggi divenuto *brand* rappresentativo dell'altissima qualità dei nostri prodotti nei mercati di tutto il mondo.

I distretti sono un modello di organizzazione industriale tra un insieme di piccole e medie imprese che condividono un territorio, generando un'alta specializzazione produttiva, una forte azione economica e una efficiente divisione del lavoro nella rete di imprese tra loro interconnesse e complementari, caratterizzate da grandissime competenze e specializzate in una o più fasi di un ben

individuato processo produttivo [16,17]. Questa particolare organizzazione produce all'interno di un determinato territorio, accordi tecnici, economici e organizzativi che determinano la costituzione di una filiera produttiva in grado di promuovere elevati livelli di efficienza e una redistribuzione dei profitti. Il legame culturale e sociale tra industria e territorio e la presenza di questi caratteri rende possibile per le imprese del distretto di trarre beneficio da un insieme di economie esterne che includono specializzazione, apprendimento, creatività e innovazione da cui deriva loro un vantaggio competitivo [18]. La specializzazione e la capacità di apprendimento sono legate al mercato del lavoro locale e alle capacità professionali acquisite nel corso del tempo, mentre la creatività e l'innovazione derivano dalla prossimità degli operatori, dalla formazione avanzata degli attori e dalla loro capacità di collaborare e condividere competenze ed esperienze [19, 20, 21,22].

2. Dai distretti industriali ai distretti del cibo

All'inizio degli anni Novanta, la Legge 5 Ottobre 1991, n. 317 *Interventi per l'innovazione e lo sviluppo delle piccole imprese* e il Decreto Ministeriale 21 Aprile 1993 *Determinazione degli indirizzi e dei parametri di riferimento per l'individuazione, da parte delle regioni, dei distretti industriali*, riconoscono e disciplinano i distretti industriali come aree territoriali caratterizzate da una elevata concentrazione di piccole imprese specializzate in una determinata filiera produttiva e dove esiste un particolare rapporto tra presenza di imprese e popolazione residente. Da questo momento in poi i distretti industriali diventano strumenti di politica economica a sostegno dello sviluppo delle PMI che si possono costituire rispettando una serie parametri quantitativi di riferimento. In questa sede, non è opportuno ricostruire le diverse difficoltà interpretative innescate da tali parametri, solo in parte risolte dalle successive modifiche e integrazioni intervenute tra la fine degli anni Novanta e l'inizio del 2000. Ci interessa invece evidenziare che il periodo in cui per mezzo della Legge 317/1991 vengono definiti gli interventi per l'innovazione e lo sviluppo delle piccole imprese attive nel settore industriale è anche quello in cui avviene un importante salto qualitativo nel settore agricolo.

Le riforme dei fondi strutturali (i pacchetti Delors) che l'Unione Europea si è data a partire dalla fine degli anni Ottanta hanno determinato l'implementazione di politiche regionali basate su processi di *governance* multilivello [23], realizzati e gestiti sulla base di politiche mirate ai luoghi (*place-based*) [24,25]. Una delle caratteristiche del pacchetto Delors I è infatti l'introduzione del criterio secondo cui gli interventi della Comunità europea devono essere sempre più integrati e concertati con i partner designati dallo Stato membro a livello nazionale, regionale, locale o altro, in modo di favorire la continuazione delle attività esistenti e l'introduzione di nuove, nel rispetto sia della specificità dei contesti che delle potenzialità evolutive [26,27]. L'approccio delle politiche territoriali *place-based* è anche alla base della Comunicazione della Commissione n. 501 *Il futuro del mondo rurale* [28] in cui per la prima volta si afferma l'idea di uno sviluppo rurale sostenibile, partecipato e solidale poi ribadito nella dichiarazione finale della *Conferenza Europea per lo Sviluppo Rurale di Cork* [29].

Si tratta di un passaggio cruciale poiché nelle fasi di ricostruzione, crescita e sviluppo post-bellico, le aree rurali erano considerate un settore a parte rispetto alle altre attività economiche, non in grado di generare sviluppo e crescita, in quanto a servizio esclusivo della produzione di risorse alimentari da

destinare alla sussistenza dei poli urbani e industriali. In questo modo, rurale e agricoltura sono divenuti sinonimi di marginalità, arretratezza, povertà. Al contrario, l'urbanizzato richiamava le idee di centralità, progresso, ricchezza, occupazione (30, 31). La ruralità che si afferma dagli anni '90 fa saltare le false similitudini tra ruralità e sottosviluppo, e impone alle aree rurali di svolgere un ruolo del tutto diverso da quello svolto in passato, perché basata su sistemi decisionali e di conoscenza che gestiscono enormi masse di dati e informazioni [32], sistemi di trasporto e di comunicazione fisici e virtuali che riducono distanze e isolamenti [33, 34] e su sistemi di gestione del territorio reticolari e sinergici [35,36,37], che richiedono partenariati non solo tra attori pubblici e privati, ma anche tra questi e gli ecosistemi naturali.

Tabella 1. L'evoluzione del concetto di ruralità 1950-2020

	Ruralità agraria 1950-1970	Ruralità industriale 1970-1990	Ruralità digitale 1990-2020
Principali caratteristiche	Territori rurali come contenitori di risorse per aree urbane e industriali	Sfruttamento intensivo di terra, capitale e lavoro agricolo	Territori rurali come leve per lo sviluppo sostenibile del territorio, la biodiversità e la integrazione fra Ict e IoT
Politiche di sviluppo U.E.	Politiche settoriali	Politiche strutturali	POLITICHE DI COESIONE (NASCITA <i>LEADER E GAL</i>)
Pianificazione territoriale	Sistemica Comprensiva	Strategica Partenariale	Reticolare Sinergica
Sistema decisionale	Accentrato Dirigistico	Disperso Contrattualistico	Datocratico Connettivo

La diversità diviene la chiave di volta della ruralità del XXI secolo, in quanto si comprende che i territori rurali sono una enorme riserva di biodiversità, paesaggio, tradizioni e che sono dotati di un'ampia varietà di risorse da utilizzare in funzione delle varie tipologie di turismo, della produzione di energie rinnovabili, dello svolgimento di attività didattiche, della protezione dell'ambiente, solo per fare alcuni esempi.

La sperimentazione di nuovo tipo di sviluppo rurale è avviata nel 1991 nell'ambito della nuova politica di coesione 1991-1994, per mezzo della iniziativa comunitaria *Liaison entre actions de développement de l'economie rurale-Leader* [38, 39] Leader è anzitutto un metodo basato sulla prossimità ai territori, ai cittadini, alle attività e sulla creazione di legami tra i territori ed i cittadini. Le strutture organizzative che hanno il compito di realizzare lo sviluppo locale partecipativo, integrato e multisetoriale previsto dal metodo Leader per le aree rurali, semirurali e montane, sono i Gruppi di Azione Locale-GAL, partenariati pubblico (Comuni, Province, Comunità Montane, ecc.), privati (rappresentati di organizzazioni produttive, operatori economici presenti nel territorio, ecc.), cofinanziati dai fondi Sie, che con i loro Piani di Azione Locale partecipano anche all'attuazione dei Programmi di Sviluppo Rurale regionale (PSR) .

Tabella 2. Il ruolo dei GAL in Europa ed in Italia 1991-2023

30 Anni di attività	Problematiche territoriali cruciali	Ruolo Gal nei territori rurali	Ruolo Gal nello sviluppo rurale
- Circa 200 GAL in tutta Italia (6.000 in Europa) - 2 miliardi di euro di risorse economiche gestite in Italia (fondi SIE) - 45.000 progetti realizzati in circa 6.000 comuni (20 milioni di abitanti)	Riduzione della disparità socio-economica tra le aree marginali e tra queste ed poli centrali	Aumento delle capacità gestionali nelle comunità rurali attraverso Piani di Azione Locale	Politiche attive all'interno dei programmi di sviluppo rurale regionali

Come anche indicato dalla Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico, Leader ed i GAL hanno di fatto qualificato il modo di intendere l'agricoltura, che diventa multifunzionale e integrata ad altri settori, e fondamentale per la tutela e la valorizzazione dell'ambiente e dei sistemi socio economici [40].

Tabella 3. Il contributo del metodo Leader e dei GAL allo sviluppo rurale

	Vecchio approccio 1950-1990	Nuovo paradigma rurale (2000-2023)
Principi	Agricoltura intensiva Sfruttamento suolo	Cooperazione per l'utilizzo sostenibile delle risorse naturali Economia circolare
Obiettivi	Profitto Competitività azienda agricola	Sviluppo Economia Rurale Valorizzazione dei beni e delle risorse sottoutilizzate Sviluppo endogeno
Settori chiave	Focus su agricoltura	Economia rurale : filiera lunga turismo, artigianato, ICT, industria, cultura, agricoltura
Strumenti principali	Sussidi	Investimenti mirati ai luoghi Governance territoriale
Attori chiave	Governi nazionali Agricoltori	Tutti i livelli di governo attori pubblici e privati, terzo settore

Questo nuovo tipo di agricoltura definito dai Leader ed i GAL si basa su 3 principi:

- il principio della territorialità o dello sviluppo endogeno o *place-based*,
- il principio della cooperazione o della *governance multilivello*,
- il principio della determinazione dell'interesse generale o della qualità delle produzioni e della eco-compatibilità dei prodotti sulla base delle risorse locali (economia circolare) [41].

Si tratta di principi sussunti dal legislatore nazionale per definire e disciplinare i distretti del cibo attraverso l'art. 13 del Decreto Legislativo 18 maggio 2001, n. 228, *Orientamento e modernizzazione del settore agricolo, a norma dell'articolo 7 della Legge 5 marzo 2001, n. 57*, che innova il concetto di distretto industriale definito nella la Legge 5 Ottobre 1991, n. 317, in modo da renderlo applicabile alla

ruralità. Come nel caso dei distretti industriali, i fondamenti della competitività delle filiere innovative integrate e sostenibili alla base di ogni distretto del cibo, non vanno ricercati nella singola impresa, ma nell'insieme degli attori, delle relazioni e della condivisione delle competenze che caratterizzano quello specifico territorio. Questo insieme di risorse che i GAL contribuiscono a valorizzare e diffondere assume la natura di bene pubblico locale specifico. Va precisato che l'art. 13 del D.Lgs. 228/2001 regola due tipologie di distretti: i distretti rurali e i distretti agroalimentari di qualità, entrambi caratterizzati da un'omogenea identità storica e territoriale e dall'integrazione fra le attività produttive e le altre attività economiche, nel rispetto della tradizione e la vocazione naturale e territoriale.

Rispetto ai distretti rurali, i distretti agroalimentari di qualità possono estendersi a livello interregionale e realizzare una o più produzioni certificate e tutelate, oppure tradizionali o tipiche. In questo modo la dimensione territoriale serve a rafforzare l'integrazione fra filiere e le specializzazioni e le produzioni certificate, tipiche o tradizionali [42]. Con la Legge 23 dicembre 2005, n. 266 (Finanziaria 2006) il legislatore nazionale introduce anche la definizione di distretti di filiera e di distretti produttivi quali libere aggregazioni d'impresе che hanno l'obiettivo di accrescere lo sviluppo delle aree e dei settori di riferimento, di migliorare l'efficienza della produzione, secondo principi di sussidiarietà verticale e orizzontale, lasciando comunque alle Regioni la competenza di individuare i propri distretti e definirne le regole organizzative.

Un ulteriore passaggio avviene con la Legge 27 Dicembre 2017 n. 205, *Bilancio di previsione dello Stato per l'anno finanziario 2018 e bilancio pluriennale per il triennio 2018-2020*, la quale al comma 499, introduce i distretti del cibo quale nuovo modello di sviluppo per l'agroalimentare italiano. I distretti del cibo rappresentano uno strumento programmazione e progettazione territoriale, per garantire ulteriori risorse e opportunità per la crescita e il rilancio a livello nazionale di filiere e territori. L'intento è di offrire un nuovo modello di sviluppo per il sistema agroalimentare italiano, attraverso il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- la promozione di nuove forme di aggregazione territoriale tra imprese;
- lo sviluppo territoriale, la coesione e l'inclusione sociale, favorendo l'integrazione di attività caratterizzate da prossimità territoriale;
- il rafforzamento della sicurezza alimentare, la diminuzione dell'impatto ambientale delle produzioni e la riduzione dello spreco alimentare;
- la salvaguardia del territorio e del paesaggio rurale attraverso le attività agricole e agroalimentari.

Con i distretti del cibo diviene inoltre possibile pianificare, su base pluriennale, un sistema integrato di azioni che, grazie alla partecipazione operativa delle imprese, del mondo della ricerca ed altri attori dello sviluppo, è in grado di fornire a tutto il sistema di imprese coinvolto, una serie di vantaggi competitivi sostenibili basati su modalità organizzative fondate su fattori critici di successo strettamente connessi con le vocazioni del territorio. Queste nuove politiche di distretto si propongono di ridare slancio alle esperienze dei distretti rurali già presenti sul territorio nazionale, così come di incentivare la nascita di nuove realtà attraverso la possibilità di accedere a finanziamenti dedicati. Come previsto a livello normativo, infatti, è possibile ottenere il riconoscimento di Distretti del cibo per

i distretti rurali e agroalimentari di qualità, i distretti localizzati in aree urbane o periurbane caratterizzati da una significativa presenza di attività agricole volte alla riqualificazione ambientale e sociale delle aree, i distretti caratterizzati dall'integrazione fra attività agricole e attività di prossimità, i distretti biologici. Il riconoscimento dei Distretti del Cibo avviene attraverso le Regioni e le Province autonome di appartenenza che provvedono alla comunicazione al Mipaaf, che ha istituito il Registro nazionale dei Distretti del Cibo. Ad oggi, la normativa nazionale definisce 4 tipologie di Distretto:

a) i distretti rurali quali sistemi produttivi locali di cui all'articolo 36, comma 1, della legge 5 ottobre 1991, n. 317, caratterizzati da un'identità storica e territoriale omogenea derivante dall'integrazione fra attività agricole e altre attività locali, nonché dalla produzione di beni o servizi di particolare specificità, coerenti con le tradizioni e le vocazioni naturali e territoriali, riconosciuti alla data di entrata in vigore della predetta disposizione nazionale;

b) i distretti agroalimentari di qualità quali sistemi produttivi locali, anche a carattere interregionale, caratterizzati da significativa presenza economica e da interrelazione e interdipendenza produttiva delle imprese agricole e agroalimentari, nonché da una o più produzioni certificate e tutelate ai sensi della vigente normativa europea o nazionale, oppure da produzioni tradizionali o tipiche, riconosciuti alla data di entrata in vigore della disposizione nazionale;

c) i sistemi produttivi locali caratterizzati da una elevata concentrazione di piccole e medie imprese agricole e agroalimentari, di cui all'articolo 36, comma 1, della legge 5 ottobre 1991, n. 317;

d) i biodistretti e i distretti biologici, intesi come territori per i quali agricoltori biologici, trasformatori, associazioni di consumatori o enti locali abbiano stipulato e sottoscritto protocolli per la diffusione del metodo biologico di coltivazione, per la sua divulgazione nonché per il sostegno e la valorizzazione della gestione sostenibile anche di attività diverse dall'agricoltura.

3. I distretti del cibo agroalimentare delle produzioni certificate e tutelate dell'Umbria: Trasimeno-Corcianese e Sud Ovest dell'Orvietano.

Con D.G.R. n. 199/2020 la Regione Umbria ha approvato la Disposizioni attuative regionali per il riconoscimento dei Distretti del cibo ai sensi dell'art. 13 del D.Lgs. n. 228/2001 e s.m.i., avviando il processo di animazione che ha sollecitato molti soggetti istituzionali ed economici del territorio ad intraprendere un percorso di riflessione sull'opportunità di costituire un Distretto in aree circoscritte e caratterizzate da produzioni agricole di qualità o da sistemi produttivi tipici. Le tipologie di Distretto realizzabile sono le quattro normate a livello nazionale e il distretto deve avere sede legale e operativa nel territorio regionale.

La domanda per il riconoscimento deve essere presentata da un soggetto proponente tra quelli previsti all'art. 5 dell'Allegato A alla Delibera regionale, con sede legale e operativa nel territorio regionale, quali: organizzazioni di rappresentanza agricole ed agroindustriali; organizzazioni di produttori e loro associazioni riconosciute ai sensi della regolamentazione comunitaria con sede legale in Umbria; consorzi di tutela per le produzioni DOCG, DOC e IGT di cui al Reg. (UE) n. 1308/2013 o per le produzioni DOP e IGP di cui al Reg. (UE) n. 1151/2012; organizzazioni Interprofessionali di cui al Reg. (UE) n. 1308/2013, già in possesso di riconoscimenti da parte di Enti pubblici ai sensi delle specifiche

normative nazionali e loro associazioni; Enti locali, Gruppi di Azione Locale (GAL) che non possono costituire singolarmente un Distretto ma devono avere nel loro interno più soggetti partner. I soggetti partner dei GAL, devono avere sede legale od operativa nel territorio del distretto ad eccezione degli enti di ricerca e delle Università, e oltre alle categorie già menzionate in qualità di proponenti, sono: imprese agricole singole e associate, iscritte alla C.C.I.A.A.; imprese di trasformazione, commercializzazione e distribuzione dei prodotti agricoli ed agroalimentari; reti di impresa costituite; Enti di ricerca e Università; Enti e associazioni pubblici e privati, consorzi, fondazioni, aziende speciali, società a partecipazione pubblica, enti economici regionali che svolgono attività nell'ambito della promozione, della ricerca e dell'innovazione finalizzate allo sviluppo del sistema produttivo primario; imprese dell'indotto correlate alle finalità del distretto ed al Piano di attività.

Nel Marzo 2021, il GAL Trasmeno Orvietano (GAL-TO) ha avviato un lungo processo di partecipazione e condivisione dell'idea di realizzare 2 distretti del cibo agroalimentare con alcuni dei principali operatori pubblici e privati delle aree oggetto della sua attività, l'Orvietano ed il Trasimeno. Questa prima fase del processo si è conclusa nel settembre 2022, allorquando è iniziata la concreta raccolta di manifestazioni di interesse al distretto.

Nel novembre 2021 si è invece tenuto l'incontro preparatorio per la costituzione dell'Associazione Distretto del Cibo di Qualità Area Trasimeno Corcianese e dell'Associazione Distretto del Cibo di Qualità Area Sud Ovest Orvietano, quale migliore forma organizzativa e gestionale dei Distretti del cibo finalizzati a creare un modello di sviluppo per il sistema agroalimentare del territorio di riferimento, in grado di promuovere azioni di valorizzazione delle eccellenze agroalimentari nell'ottica della coesione e dell'inclusione sociale, del rispetto per l'ambiente e della salvaguardia del paesaggio rurale nonché della sicurezza alimentare, mettendo insieme l'aspetto agricolo con quello ambientale, le ricchezze storiche e artistiche con la vocazione turistica del territorio. A gennaio 2022 è stato costituito il gruppo di lavoro tecnico, coordinato per la parte amministrativa dalla Direttrice del GAL-TO, Francesca Caproni, e per la parte tecnico scientifica da Luca Fondacci in qualità di esperto di pianificazione strategica dello sviluppo territoriale integrato, che fino a maggio 2022 ha lavorato d'intesa con i portatori d'interesse locali al fine di definire le migliori soluzioni e strategie per realizzare i 2 documenti ciascuno di circa 60 pagine che definiscono le strategie integrate per la realizzazione dei distretti del cibo agroalimentare delle produzioni certificate e tutelate del Trasimeno Corcianese e del Sud Ovest dell'Orvietano [43, 44].

Questo processo ha raggiunto un primo importante risultato nel Giugno del 2022, allorquando la Regione dell'Umbria con determinazioni dirigenziali n. 6056 e n. 6057 del 16/06/2022, ha provveduto al riconoscimento dei primi 2 distretti del cibo agroalimentare delle produzioni certificate e tutelate della regione: il Distretto del cibo agroalimentare delle produzioni certificate quello dell'area Trasimeno Corcianese e il Distretto del cibo agroalimentare delle produzioni certificate e tutelate dell'area Sud Ovest dell'Orvietano.

Tabella 4. Il Distretto del cibo agroalimentare delle produzioni certificate e tutelate del Trasimeno Corcianese

TITOLO	L'area del Trasimeno Corcianese 2022-2029. Un sistema agricolo e alimentare diversificato, inclusivo ed eco-sostenibile
Comuni coinvolti	9 Umbria: Castiglione del Lago, Città della Pieve, Corciano, Magione, Paciano, Panicale, Passignano sul Trasimeno, Piegaro e Tuoro sul Trasimeno
Soci fondatori	10 incluso il GAL-TO: Consorzio Urat - Soc. Coop. Stella Del Lago - Soc. Agr. Bittarelli & Figli, Az. Agr. Poggio Santa Maria - Az. Agricola Tiezzi Letizia, Az. Agr. Gori Maria Paola - Berilioli Agricola Soc. Semplice - Az. Agr. Gatti 23 Operatori Partner
Distretto riconosciuto dalla regione Umbria con determinazione dirigenziale n. 6056 del 16/06/2022	

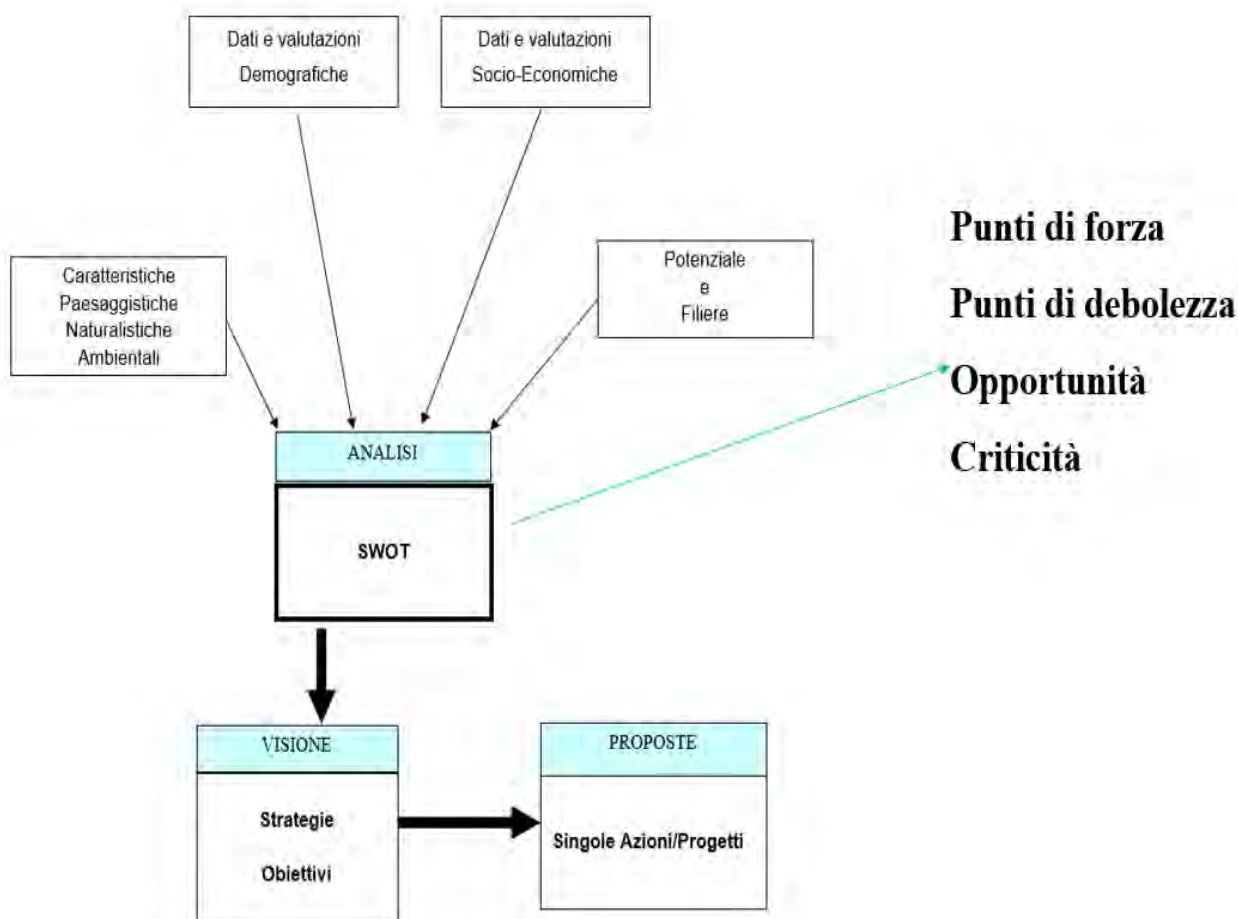
Tabella 5. Il Distretto del cibo agroalimentare delle produzioni certificate e tutelate del Sud Ovest dell'Orvietano

TITOLO	L'area del Sud Ovest Orvietano 2023-2029. Produzioni tipiche tra tradizione, innovazione e resilienza
Comuni coinvolti	14 Umbria: Allerona, Castel Giorgio, Castel Viscardo, Fabro, Ficulle, Monteleone di Orvieto, Orvieto, Parrano, Porano, San Venanzo, Baschi, Montegabbione, Montecchio, Todi. 1 Lazio: Castiglione in Teverina
Soci fondatori	10 incluso il GAL -TO: Agricola il Pogliano - Podere Acquaccina - Famiglia Cotarella srl - Fondazione Cotarella - La Sapienza Soc. Agr. Sempl.- Consorzio Tutela Vini di Orvieto - Soc. Sempl. Agr. Il Fossile - Norcineria Oreto snc - Prudenzi Riccardo 24 Operatori Partner
Distretto interregionale riconosciuto dalla regione Umbria con determinazione dirigenziale n. 6056 del 16/06/2022	

Le strategie integrate dei distretti sono state definite sulla base dei punti di forza, debolezza, opportunità e minacce già da tempo identificate nei loro contorni e per le quali, in alcuni casi, vi erano già delle elaborazioni condivise tra i soggetti pubblici ed i partner dei 2 distretti, e che sono state portate ad un livello più avanzato (più operativo) di elaborazione in modo da aprire il passo alla loro realizzazione. Le strategie distrettuali non si occupano di tutti i numerosi problemi (demografici, economici, sociali, ambientali e culturali) che in una ottica settoriale sono ritenuti importanti, ma solo dei problemi che hanno una valenza strategica per la realizzazione dei 2 distretti del cibo

agroalimentare del Trasimeno Corcianese e del Sud Ovest dell’Orvietano. Per queste ragioni, l’analisi SWOT alla base delle strategie distrettuali si è concentrata su tematiche generali, connesse con le finalità del D.G.R. n. 199/2020, con cui la Regione Umbria ha disciplinato il riconoscimento dei Distretti del Cibo, in modo da pervenire ad una visione comune dello stato di fatto, volta a definire le strategie e le iniziative da intraprendere. Questo aspetto metodologico è di notevole importanza, perché evidenzia come il gruppo tecnico di lavoro abbia fin dall’inizio coinvolto imprese, operatori e partner coinvolti in modo da far camminare le strategie distrettuali con le proprie gambe. Le tematiche su cui è stata costruita l’analisi SWOT, sono le seguenti: demografia, economia, società, paesaggio-natura, ambiente-energia, filiere agro-alimentari, sistema artigianato, turismo e competitività, grandi eventi e manifestazioni culturali e turistiche. La elaborazione della SWOT ha tenuto conto delle analisi e delle proposte già esistenti nel territorio, facendo riferimento soprattutto ai progetti più formalizzati e condivisi. Di seguito si presenta lo schema di preparazione delle strategie distrettuali a partire dall’analisi SWOT (punti di forza, debolezza, opportunità e pericoli) dei territori coinvolti.

Figura 2. Schema di preparazione delle strategie per i Distretti agroalimentari delle produzioni certificate e tutelate



Le strategie integrate dei distretti del cibo agroalimentare del Trasimeno Corcianese e del Sud Ovest dell'Orvietano non sono piani di sviluppo costituiti da progetti finanziabili solo o prevalentemente con risorse pubbliche.

Queste strategie distrettuali sono un processo per la regolazione consensuale degli interessi e di partecipazione integrata che coinvolge verso una finalità comune i principali decisori pubblici e privati delle due aree verso la finalità comune di realizzare i Distretti del cibo agroalimentare delle produzioni certificate e tutelate. Per perseguire questa finalità, le strategie definiscono una visione condivisa, vale a dire l'idea di sviluppo futuro dell'area verso il distretto agroalimentare di qualità da realizzare sostanzialmente nel corso del settennio 2023-2029 attraverso una serie di azioni puntuali. Si deve precisare che la definizione delle visioni di sviluppo futuro delle 2 aree distrettuali non è stato un processo a cascata dal generale al particolare. Al contrario, le 2 visioni di sviluppo sono composte dalla raccolta e selezione delle principali proposte da parte dei partner coinvolti.

Tabella 6. La composizione delle strategie integrate per la realizzazione dei Distretti del cibo agroalimentare delle produzioni certificate e tutelate

SUD OVEST ORVIETANO 2023-2029	
Visione strategica del Sud Ovest Orvietano	<i>Cibo sicuro, sano e nutriente prodotto con risorse gestite in modo equo, razionale ed efficiente.</i>
3 linee strategiche	1) Migliorare le integrazioni tra le filiere agricole e alimentari 2) Rafforzare l'integrazione tra la filiera agroalimentare e le aree artistiche e culturali di eccellenza 3) Accrescere le iniziative strategiche per incentivare l'uso efficiente delle risorse
6 OBIETTIVI	6 AZIONI
TRASIMENO CORCIANESE 2022-2029	
Visione strategica del Trasimeno Corcianese	<i>Uno straordinario palcoscenico delle bellezze agro-alimentari prodotte in modo eco-sostenibile, in un continuo alternarsi di paesaggi naturali e culturali diversi, racchiusi in un fazzoletto di terra unico.</i>
3 linee strategiche	1) Sviluppare le sinergie tra la filiera agricola e la filiera alimentare 2) Consolidare i legami tra le filiere agroalimentari e le filiere culturali 3) Favorire la gestione eco-sostenibile dei patrimoni agro-alimentari
6 OBIETTIVI	6 AZIONI

Le visioni non sono immutabili, si possono evolvere nel corso del processo attuativo delle strategie, a seconda della capacità dei soggetti proponenti e coinvolti di attuare quanto inizialmente previsto.

Le linee strategiche servono a rendere concreta la visione. Per ogni distretto si sono individuate 3 linee strategiche ciascuna delle quali articolata in obiettivi cui corrispondono specifiche azioni materiali

e immateriali definite per rispondere alle esigenze dirette dei territori e alle esigenze più generali di sviluppo della regione Umbria.

Gli obiettivi da perseguire e le azioni da eseguire per realizzare quegli obiettivi e giungere all'ordinamento strategico, sono parti costituenti della strategia integrata per la realizzazione dei distretti. In assenza di questa articolazione in una visione, linee strategiche, obiettivi e singole azioni, c'è il rischio di presentare un indirizzo generico di sviluppo, che rimanda le decisioni concrete di trasformazione a un tempo futuro non definito. Le specificità e le leve delle strategie distrettuali sono costituite pertanto dall'insieme delle sue componenti definite in maniera integrata, partecipata e condivisa.

3. Due esempi di azioni di economia circolare previste nelle strategie dei distretti del cibo agroalimentare delle produzioni certificate e tutelate del Trasimeno-Corcianese e del Sud Ovest dell'Orvietano

La scelta di includere nel piano alcune azioni, tra le tante possibili, è stata motivata essenzialmente da tre fattori:

- 1) i benefici attesi da quella specifica azione;
- 2) il valore strategico di ciascuna azione in termini di ricadute e vantaggi territoriali e di comparto;
- 3) il contributo che le azioni raggruppate in insiemi omogenei possono fornire al raggiungimento degli obiettivi in cui sono articolate le linee strategiche e delle finalità della strategia integrata.

Le singole azioni sono descritte in apposite schede contenenti una serie di elementi quantitativi e qualitativi che, tra le altre cose indicano: le finalità del progetto proposto, i risultati attesi, le ricadute ed i vantaggi territoriali e di comparto, gli svantaggi derivanti dalla non attuazione del progetto, le risorse finanziarie che si prevedono attivare per la realizzazione delle azioni con specificata la quota delle risorse che si intende mettere a disposizione, i tempi di realizzazione: medio periodo (entro il primo biennio) di lungo periodo (oltre il primo biennio), il livello di governance, gli indicatori ed i target che si prevedono attivare per la realizzazione delle azioni.

In questa sede si presentano 2 esempi di azione che seguono riguardano la strategia distrettuale di sviluppare buone pratiche di economia circolare all'interno dei Distretti del Cibo. L'azione 3.2.1 dell'obiettivo 3.2, *Attivare forme di efficienza energetica*, della linea strategica 3, *Favorire la gestione eco-sostenibile dei patrimoni agro-alimentari*, del Distretto del cibo agroalimentare del Trasimeno Corcianese riguarda la *Realizzazione di uno studio di fattibilità per favorire l'approvvigionamento e l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile, sottoprodotti, materiali di scarto e residui e altre materie grezze non alimentari ai fini della bioeconomia*.

Tabella 7. Azione 3.2.1 del Distretto del cibo agroalimentare delle produzioni certificate e tutelate del Trasimeno Corciano

TRASIMENO CORCIANESE 2022-29	
Linea 3	Favorire la gestione eco-sostenibile dei patrimoni agro-alimentari
Obiettivo n. 3.2	<i>Attivare forme di efficienza energetica</i>
Azione n. 3.2.1	Realizzare uno studio di fattibilità per favorire l'approvvigionamento e l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile, sottoprodotti, materiali di scarto e residui e altre materie grezze non alimentari ai fini della bioeconomia.
Descrizione sintetica delle finalità dell'intervento: L'azione serve ad incentivare l'uso efficiente delle risorse energetiche rinnovabili ottenute dal recupero delle potature dei vigneti e degli oliveti (biomasse legnose residuali) che costituiscono le principali coltivazioni del Trasimeno Corciano	
Collegamenti con l'obiettivo: L'azione è collegata direttamente all'obiettivo poiché si tratta di un modello che in un'ottica spazialista e di governance multilivello tiene in considerazione contemporaneamente energia rinnovabile, efficienza energetica e sviluppo locale sostenibile.	
Risultati attesi, le ricadute ed i vantaggi territoriali e di comparto e pericoli derivanti dalla non attuazione L'azione è volta ad implementare l'uso efficiente delle risorse rinnovabili per la transizione ad una economia a basse emissioni di carbonio sostenibile e resiliente al clima. La non realizzazione di questa azione comprometterebbe le finalità del DAQ perché non sarebbe possibile chiudere il ciclo agroalimentare attorno alle 2 principali filiere della vite e dell'olivo	
Costi e finanziamenti per la realizzazione e la gestione (stima), con quota di risorse che si intendono mettere a disposizione Il costo della realizzazione dell'azione è legato alla realizzazione dello studio di fattibilità.	
Quota di risorse che si intendono mettere a disposizione: l'Associazione Distretto del Cibo di Qualità, area Sud Ovest Orvieto si farebbe carico della quota di risorse necessarie alla realizzazione dell'analisi diagnostica dello studio di fattibilità avvalendosi del proprio personale tecnico e scientifico, coprendo così circa la metà del costo dello studio di fattibilità.	
Tempi di attuazione Tempi medi: primo biennio 2023-2024	
Livello di governance integrata: partnership fra GAL e altri operatori	
Indicatore di performance L'azione richiede l'utilizzo dei seguenti indicatori: Stato di avanzamento bimestrale della progettazione dello studio di fattibilità nel corso del periodo 2023-2024	
Target Studio di fattibilità per favorire l'approvvigionamento e l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile, sottoprodotti, materiali di scarto e residui e altre materie grezze non alimentari ai fini della bioeconomia.	

In particolare l'azione serve ad incentivare l'uso efficiente delle risorse energetiche rinnovabili ottenute dal recupero delle potature dei vigneti e degli oliveti (biomasse legnose residuali) che costituiscono le principali coltivazioni del Trasimeno Corciano, ma anche di altre realtà dell'Umbria.

Nel caso del Sud Ovest dell'Orvietano L'azione 3.1.1 dell'obiettivo 3.1, *Migliorare la produzione di alimenti e materie prime equa, rinnovabile e a impatto zero*, della linea strategica 3, Accrescere le iniziative strategiche per incentivare l'uso efficiente delle risorse, del Distretto del cibo agroalimentare del Sud Ovest dell'Orvietano riguarda la Costruzione di una rete di operatori del settore delle *eco-innovations* per promuovere lo sviluppo sostenibile e valorizzare le risorse ambientali.

Tabella 8. Azione 3.1.1 del Distretto del cibo agroalimentare delle produzioni certificate e tutelate del Sud Ovest dell'Orvietano

SUD OVEST ORVIETANO 2023-29	
Linea 3	Accrescere le iniziative strategiche per incentivare l'uso efficiente delle risorse
Obiettivo n. 3.1	<i>Migliorare la produzione di alimenti e materie prime equa, rinnovabile e a impatto zero</i>
Azione n: 3.1.1	Costruire una rete di operatori del settore delle "eco-innovations" per promuovere lo sviluppo sostenibile e valorizzare le risorse ambientali
Descrizione sintetica delle finalità dell'intervento: Realizzare un percorso di transizione ad un'economia circolare che utilizzando l'approccio del Life Cycle Thinking, che si concentra sulla progettazione e/o riprogettazione di processi e prodotti limitando l'uso di risorse non rinnovabili, aumentando la durata del prodotto, oltre a massimizzare il potenziale di riutilizzo di prodotti e materiali di recupero	
Collegamenti con l'obiettivo Il progetto presuppone una organizzazione a rete tra numerosi soggetti coinvolti a vario titolo nell'operazione (imprese di produzione, università, aziende private, istituzioni pubbliche) e può contribuire alla formazione di un orientamento cooperativo efficace e moderno tra i principali attori dello sviluppo economico locale nel rispetto dell'ambiente.	
Risultati attesi, le ricadute ed i vantaggi territoriali e di comparto e pericoli derivanti dalla non attuazione Il progetto si inserisce in un filone di ricerca e di applicazioni che suscitano interessi e speranze in tutto il mondo in quanto l'economia circolare permette la creazione di infrastrutture territoriali dotate di autonomia e caratterizzate da autosufficienza e ampi margini di decentramento e facilità di distribuzione che possono essere alla portata delle comunità	
Costi e finanziamenti per la realizzazione e la gestione (stima), con quota di risorse che si intendono mettere a disposizione Il costo della realizzazione dell'azione è inizialmente nullo perché si tratta di verificare la disponibilità dei vari soggetti di realizzare una rete di operatori del settore delle "eco-innovations" legato di cui potrebbe farsi interamente carico l'Associazione Distretto del Cibo di Qualità, area Sud Ovest Orvietano	
Quota di risorse che si intendono mettere a disposizione: l'Associazione Distretto del Cibo di Qualità, area Sud Ovest Orvietano, si farebbe carico della intera quota di risorse necessarie alla progettazione dell'iniziativa avvalendosi del proprio personale tecnico e scientifico.	
Tempi di attuazione Tempi Brevi per quanto attiene la verifica della disponibilità degli operatori: 2023-2024 Tempi lunghi per quanto attiene la presentazione di buone pratiche di eco-innovations 2025-2029	
Livello di governance integrata: partnership fra GAL e altri operatori	
Indicatore di performance L'azione è multidimensionale e richiede l'utilizzo dei seguenti indicatori: N° di operatori coinvolti nel periodo 2023-2024 - N° di buone pratiche concretamente realizzabili nel periodo 2025-2029	
Target Realizzazione della rete di operatori del settore delle "eco-innovations" per promuovere lo sviluppo sostenibile e valorizzare le risorse ambientali.	

In questo caso, l'azione è volta a creare una rete di operatori del settore delle *eco-innovations* per promuovere lo sviluppo sostenibile e valorizzare le risorse ambientali anche al di fuori dell'area del distretto.

In entrambi i casi l'intento delle azioni è e di conseguenza del GAL del Trasimeno corcianese è quello di riuscire a creare delle buone pratiche di economia circolare all'interno dei distretti del cibo che possano poi essere replicati da altri importanti operatori del territorio umbro e non, così da contribuire attraverso filiere innovative ed ecosostenibile a sviluppare processi di economia circolare e perseguire gli importanti obiettivi della transizione energetica.

Riferimenti

- 1 Istat, *9° Censimento Generale Industria e Servizi*, Istat, Roma, 2015, on line [https://www.istat.it/it/archivio/150320#:~:text=I%20distretti%20del%20Made%20in,calzature%20\(12%2C1%25\).](https://www.istat.it/it/archivio/150320#:~:text=I%20distretti%20del%20Made%20in,calzature%20(12%2C1%25).)
- 2 Intesa Sanpaolo-Direzione Studi e Ricerche, *Economia e finanza dei distretti industriali. Rapporto annuale n.13, 2021, on line* [https://group.intesasanpaolo.com/content/dam/portalgroupp/repository-documenti/research/it/economia-e-finanza-dei-distretti/Economia%20e%20finanza%20distretti%20industriali_Marzo%202021.pdf].
- 3 Irpet, Beccattini G. (a cura di), *Lo sviluppo economico della Toscana : con particolare riguardo all'industrializzazione leggera*, Documenti per il Piano Regionale 1, IRPET, Firenze, 1975.
- 4 Beccattini G., *L'industrializzazione leggera della Toscana. Ricerca sul campo e confronto delle idee*, Franco Angeli, Milano, 1999.
- 5 Marshall A., *Principles of economics*, Macmillan and Co., London-New York, 1895.
- 6 Becattini, G., Il sistema marshalliano, in G. Becattini, *Il concetto di industria e la teoria del valore*, Boringhieri, Torino, 1962, 88-125.
- 7 Becattini G., Dal settore industriale al distretto industriale. Alcune considerazioni sull'unità d'indagine dell'economia industriale, *Rivista di Economia e Politica Industriale*, **1979**, 1, 7-21.
- 8 Fortis M., Quadrio Curzio A., a cura di, *Industria e Distretti. Un Paradigma di Perdurante Competitività*, Il Mulino, Bologna, 2006.
- 9 Bursi T., Nardin G., (a cura di), *Il distretto delle piastrelle di ceramica di Sassuolo tra identità e cambiamento*, Franco Angeli, Milano, 2008.
- 10 Ricciardi A., I distretti industriali italiani: recenti tendenze evolutive, *Sinergie, rivista di studi e ricerche*, **2013**, 91, 21-58.
- 11 Bagnasco A., Messori M., *Tendenze dell'economia periferica*, Editoriale Valentino, Torino, 1975.
- 12 Bagnasco A., *Tre Italie. La problematica territoriale dello sviluppo italiano*, Bologna, Il Mulino, 1977.
- 13 Fuà G. e Zacchia C., (a cura di), *Industrializzazione senza fratture*, Il Mulino, Bologna, 1983.
- 14 Brusco S., *Struttura e sviluppo in un distretto industriale: la meccanica agricola a Reggio Emilia*, Centro Servizi P.M.I., Reggio Emilia, 1983
- 15 Brusco S., *Piccole imprese e distretti industriali, una raccolta di saggi*, Rosenberg & Sellier, Torino, 1989
- 16 Becattini G., Riflessioni sul distretto industriale marshalliano come concetto socio-economico,

- Stato e Mercato*, **1989**, 25, 111-128.
- 17 Becattini G., *Distretti industriali e made in Italy. Le basi socioculturali del nostro sviluppo economico*, Torino, Bollati Boringhieri, 1998.
 - 18 Becattini G., *Mercato e forze locali: il distretto industriale*, Il Mulino, Bologna, 1987.
 - 19 Bellandi, M., Sforzi, F., La molteplicità dei sentieri di sviluppo locale, in G. Becattini, M. Bellandi, G. Dei Ottati e F. Sforzi, (a cura di), *Il caleidoscopio dello sviluppo locale. Trasformazioni economiche nell'Italia contemporanea*, Rosenberg & Sellier, Torino, 2001, 41-63
 - 20 Bellandi, M., Dal distretto industriale allo sviluppo locale, in M. Bellandi (a cura di), *Mercati, industrie e luoghi di piccola e grande impresa*, Il Mulino, Bologna, 2003, 207-242.
 - 21 Fondacci L., Le ragioni della rigenerazione industriale, in Fondacci L., a cura di, *Gli eco-distretti industriali tra economia e politiche pubbliche*, Alinea, Firenze, 2013, 17-26.
 - 22 Bonomi A., *Distretti e reti d'impresa: fattori competitivi del nostro sistema produttivo*, Osservatorio nazionale dei distretti Italiani I Rapporto, Roma, 2010.
 - 23 Hooge L. Marks G., A postfunctionalist theory of multilevel governance, *The British Journal of Politics and International Relations*, **2020**, 22 (4), 82
 - 24 Barca F., *An agenda for a reformed cohesion policy: a place-based approach to meeting European Union challenges and expectations. Independent report prepared at the request of Danuta Hübner, Commissioner for Regional Policy, 2009*, [https://ec.europa.eu/regional_policy/archive/policy/future/pdf/report_barca_v0306.pdf].
 - 25 Celata F., Coletti R., Place-based strategies or territorial cooperation? Regional development in transnational perspective in Italy, *Local Economy*, **2017**, 29 (4-5), 394-411.
 - 26 CE, *The Single act: a new frontier for Europe. Programme of the Commission for 1987. Address by Jacques Delors, President of the Commission, to the European Parliament*, Communication from the Commission (COM (87) 100), Strasbourg, 18 February 1987, Bulletin of the European Communities. Supplement 1/1987
 - 27 CE, *Regolamento (CEE), N. 2052/88 del Consiglio del 24 giugno 1988 relativo alle missioni dei Fondi a finalità strutturali, alla loro efficacia e al coordinamento dei loro interventi e di quelli della Banca Europea per gli investimenti degli altri strumenti finanziari esistenti*, Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, N. L 185 del 15/07/88, on line [<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:31988R2052&from=IT>]
 - 28 CE, *The future of rural society*, Commission communication transmitted to the Council and to the European Parliament. COM (88) 501 final, 28 July 1988. Bulletin of the European Communities, Supplement 4/88
 - 29 CE (1996), Dichiarazione di Cork, Un Europa rurale viva, La Conferenza Europea sullo sviluppo rurale, Riunitasi a Cork, in Irlanda, dal 7 al 9 novembre 1996
 - 30 Sotte F., Sviluppo rurale e implicazioni di politica settoriale e territoriale. Un approccio evoluzionistico, in A. Cavazzani, G. Gaudio, S. Sivini, (a cura di), *Politiche governance e innovazione per le aree rurali*, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli, 2006, 61-80
 - 31 Sotte F., Scenari evolutivi del concetto di ruralità, *Proposte e Ricerche*, 2013, 71, 122-144

- 32 Batty M., Big Data and the city, *Built Environment*, **2016**, 42, 3, 321-337
- 33 Fondacci L., Minimetrorò in Perugia as leverage for urban regeneration, *Territorio*, **2019**, 91, 128-143
- 34 Nguyen M. H. et al., Changes in Digital Communication During the COVID-19 Global Pandemic: Implications for Digital Inequality and Future Research, *Social Media + Society* July-September **2020**, 1-6,
- 35 Curti F., Gibelli M.C., (a cura di), *Pianificazione strategica e gestione dello sviluppo urbano*, Alinea, Firenze, 1996
- 36 Castells M., *The power of identity*, Blackwell, Oxford, 1996
- 37 Albrecht L., Balducci A. (2013), "Practicing Strategic Planning: in search of critical features to explain the strategic character of plans", *The Planning Review*, 49(3), p. 16-27
- 38 CE, *Orientamenti per la concessione di sovvenzioni globali integrate sulle base di proposte che gli Stati membri sono invitati a presentare nel quadro di una iniziativa comunitaria in materia di sviluppo rurale (LEADER)*, Comunicazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento europeo (91/C 73/14), Gazzetta Ufficiale delle Comunità europee N. C 73/33 del 19.3.91
- 39 CE, *Orientamenti per la concessione di sovvenzioni globali o per programmi operativi integrati sulle base di richieste di contributo che gli Stati membri sono invitati a presentare nell'ambito di una iniziativa comunitaria in materia di sviluppo rurale LEADER II*, Comunicazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento europeo (94/C 180/12), Gazzetta Ufficiale delle Comunità europee N. C 180 del 01.01.94
- 40 Oecd, *The New Rural Paradigm. Policies and Governance*, OECD, Paris, 2006
- 41 Fondacci L. L'evoluzione del programma Leader e dei gruppi di azione locale italiani (Gal). 30 anni di politiche di sviluppo territoriale partecipativo e place-based, *Urbanistica*, **2022**, 194, 135-142
- 42 Toccaceli D., *Dai distretti alle reti? I distretti in agricoltura nell'interpretazione delle Regioni e le prospettive verso il 2020*. Rete rurale nazionale, 2012, on line [<https://www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/10221>]
- 43 Strategia integrata per il riconoscimento del Distretto Agroalimentare di qualità Area trasimeno-corcianese (distretto del cibo) Sidaq, *L'area del Trasimeno Corcianese 2022-2029. Un sistema agricolo e alimentare Diversificato, inclusivo ed eco-sostenibile*, 2023.
- 44 Strategia integrata per il riconoscimento del Distretto Agroalimentare di qualità Area Sud Ovest Orvietano (distretto del cibo) Sidaq, *L'area del Sud Ovest Orvietano 2023-2029. Produzioni tipiche tra tradizione, innovazione e resilienza*, 2023.

XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Vantaggi energetici ed economici delle comunità energetiche: un caso studio riferito ad una città del sud Italia

Concettina Marino¹, Antonino Nucara¹, Maria Francesca Panzera¹, Matilde Pietrafesa^{1,*}

¹ Università Mediterranea, Dipartimento DICEAM, Via Zehender, 89122, Reggio Calabria

* Autore di riferimento. E-Mail: Matilde.pietrafesa@unirc.it

Abstract: La transizione energetica, ovvero l'attuazione di un modello di produzione, distribuzione e consumo di energia basato sull'energia rinnovabile distribuita, non può essere ulteriormente rinviata. Una società ad alto contenuto di carbonio ha generato riscaldamento globale, cambiamenti climatici, disuguaglianze ambientali e sociali, richiedendo un profondo ripensamento dell'interazione dei governi e degli individui con il pianeta. La transizione diventa anche occasione per l'adozione di nuovi modelli economici e sociali e comportamenti ecosostenibili. In questo quadro, nuove azioni collettive e collaborative, come i distretti e le comunità energetiche, combinate con nuovi sistemi di condivisione di produzione/consumo da rinnovabile e tecnologie digitali sono al centro dei programmi dell'UE sulla *green economy*. In questo scenario si pone il lavoro, volto ad analizzare il soddisfacimento del fabbisogno elettrico da fotovoltaico di un condominio sito in Reggio Calabria (Italia), confrontando in termini di benefici energetici ed economici la configurazione di singoli utenti connessi alla rete con quella di membri di una comunità energetica. Tra i vantaggi di quest'ultima si osservano un aumento dell'autoconsumo collettivo ed una riduzione dell'energia prelevata ed immessa, oltre ad un incremento del VAN.

Keywords: Transizione energetica; riduzione delle emissioni; fonti energetiche rinnovabili; generazione distribuita; distretto energetico; comunità energetica.

1. Cambiamento climatico e transizione energetica

La transizione verso economie basate su paradigmi di produzione e consumo sostenibili costituisce una delle sfide più urgenti dei giorni nostri. Una componente importante di tale transizione è quella energetica, volta ad eliminare la dipendenza dai fossili a favore di un uso diffuso delle fonti energetiche

rinnovabili [1,2]. Una società ad alto contenuto di carbonio ha generato riscaldamento globale, cambiamenti climatici, disuguaglianze ambientali e sociali, richiedendo un profondo ripensamento delle modalità di interazione con il pianeta da parte sia dei governi che dei singoli individui. Il lavoro trentennale dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ha evidenziato, al di là di ogni ragionevole dubbio, che la notevole concentrazione di gas serra nell'atmosfera costituisce la causa principale dell'aumento della temperatura media del pianeta e del conseguente verificarsi di condizioni meteorologiche estreme: uragani, tempeste e forti escursioni termiche, con temperature massime record, mai registrate negli ultimi centocinquanta anni. Il consumo globale annuo di combustibili fossili ha oggi superato i 14 miliardi di tonnellate di petrolio equivalente ed i gas serra hanno raggiunto i 37 miliardi di tonnellate di CO₂ equivalenti all'anno.

Ma la transizione dell'economia mondiale verso un sistema energetico a basse emissioni di carbonio è un obiettivo ambizioso da realizzare rapidamente, che richiede il dispiegamento di tutte le tecnologie verdi. Per la sua realizzazione occorre attuare politiche volte alla riduzione dei consumi, all'aumento dell'efficienza energetica, sia della produzione che dei consumi, della distribuzione e dell'accumulo [3], integrando gli impianti di autoproduzione rinnovabile nel sistema di generazione e trasformandolo da centralizzato a distribuito.

Il primo, affermatosi in virtù della sua elevata efficienza, è oggi in gran parte basato su grandi impianti termoelettrici, nucleari e idroelettrici, con trasporto di energia agli utenti finali attraverso estese linee di trasmissione e distribuzione e perdite significative. Tuttavia esso potrebbe efficacemente essere superato grazie al forte sviluppo degli impianti rinnovabili decentralizzati e delle tecnologie digitali, apportando ampi benefici (autonomia energetica, flessibilità e affidabilità della rete) e maggiore consapevolezza della gestione e dei consumi energetici alle piccole unità locali (condomini, aziende, ecc.), che diventando produttori/consumatori, favorirebbero un uso più efficiente dell'energia. Inoltre l'utilizzo delle nuove tecnologie digitali migliorerà l'efficienza energetica, consentendo di raccogliere informazioni a basso costo (IoT, contatori intelligenti), trasferire grandi flussi di dati con soluzioni di connettività affidabili (fibra ottica, 5G), archiviare e analizzare i dati in modo efficace. Questa trasformazione richiede tuttavia un adeguamento normativo volto a semplificare le procedure, in quanto le barriere burocratiche nelle fasi autorizzative costituiscono ad oggi un ostacolo non da poco che ne rallenta notevolmente l'iter [4].

2. Programmi di decarbonizzazione al 2050 ONU, UE e italiani

La Conferenza di Parigi del 2015 ha lanciato l'*Agenda 2030* dell'*Organizzazione delle Nazioni Unite* [5] con i suoi 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile. L'*Agenda* definisce una visione, dettagliata in azioni concrete, attraverso le quali le comunità dovrebbero modificare la loro organizzazione e le loro relazioni verso la sostenibilità [6]. Il 2015 può essere considerato l'anno di svolta in cui si sono iniziate a definire e avviare le strategie di abbandono dell'uso dei combustibili fossili per il lungo arco di 35 anni che dovrebbe condurre alla *carbon neutrality* nel 2050.

L'Europa, le cui emissioni si aggirano sui 4 miliardi di tonnellate di CO₂ equivalente all'anno, pari a circa l'11% del totale delle emissioni mondiali, è in prima linea nell'affrontare la sfida. Un terzo degli 1,8

triloni di euro di investimenti del piano di ripresa *Next Generation EU* [7] e del bilancio settennale dell'UE finanzia il *Green New Deal* [8], un'importante azione volta a intervenire su molti aspetti della vita economica e sociale, tra cui la lotta al cambiamento climatico, la transizione energetica, la trasformazione del tessuto produttivo nella direzione dell'economia circolare, la mobilità intelligente e sostenibile, l'agricoltura e la tutela della biodiversità. Il suo obiettivo è trasformare l'UE in un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva, senza emissioni nette di gas a effetto serra entro il 2050, con una tappa intermedia di riduzione del 40% al 2030. Gli investimenti di NGEU consentiranno di affrontare le sfide di una transizione basata sull'integrazione delle fonti rinnovabili, il rafforzamento della capacità di trasmissione, la resilienza delle infrastrutture, il cambiamento radicale del mix energetico a favore delle fonti *carbon free*, una significativa elettrificazione dei terminali di utilizzo ed un parco di generazione elettrica completamente decarbonizzato. Inoltre, grazie allo sviluppo di reti intelligenti che utilizzano sensori wireless, software e utility computing consentiranno di monitorare i consumi energetici, aumentare la capacità di generazione e stoccaggio di energia da FER, migliorare la qualità e la sicurezza di funzionamento dell'intero sistema di distribuzione elettrica per consentire la partecipazione attiva degli utenti al mercato attraverso l'integrazione di tutti gli attori connessi alla rete.

Di recente, la guerra in Ucraina ha evidenziato la fragilità del sistema di approvvigionamento energetico e ha costretto l'UE a rivedere ancora una volta il piano di decarbonizzazione con le Direttive *Repower UE* [9] e *Fit for 55* [10]. Quest'ultima prevede interventi massicci in almeno tre settori entro il 2040: efficienza energetica, rinnovabili e vettori energetici, che saranno l'elettricità e probabilmente l'idrogeno rinnovabile. Prevedendo che entro il 2030 il 65% dell'energia elettrica debba provenire da fonti rinnovabili, le reti elettriche dovranno essere potenziate e diventare sempre più intelligenti e flessibili per aumentare il fattore di penetrazione dell'energia elettrica. Essendo queste fonti in gran parte non programmabili (come eolico e fotovoltaico), il comportamento del sistema elettrico dovrà essere costantemente simulato: per questo motivo è stata proposta la creazione di un gemello digitale dell'intera rete elettrica europea. Ultima ma non meno importante, un'altra importante iniziativa per affrontare la sfida del cambiamento climatico nell'UE è il nuovo piano di ricerca e innovazione *Horizon Europe 2021-2027*.

A livello nazionale, in Italia il documento programmatico finalizzato al raggiungimento della neutralità climatica è il *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza* [11] con la sua importante mission Rivoluzione verde e transizione ecologica, dedicata principalmente alle energie rinnovabili, all'idrogeno, alla rete e alla transizione energetica e alla mobilità sostenibile, con una quota significativa rivolta all'efficienza energetica ed alla riqualificazione di edifici pubblici e privati. Per quanto riguarda l'attuale target italiano al 2030, il *Piano Nazionale Integrato Energia e Clima* [12] mira a raggiungere il 30% di energia prodotta da FER in consumi finali e il 35% di riduzione delle emissioni; il piano sostiene le comunità energetiche, basate sull'autoproduzione collettiva e sull'autoconsumo di energia rinnovabile, oggetto del presente lavoro.

L'ambizione di raggiungere la *carbon neutrality* entro il 2050 è tuttavia complicata dal fatto che il processo richiede tempo e visione, leadership e capacità di innovazione, grandi investimenti da parte

dei governi, trasformazione delle infrastrutture e delle reti elettriche, costi aggiuntivi di adeguamento del sistema, che rendono gli impianti obsoleti prima ancora di essere ammortizzati. Inoltre, la nostra società fatica ancora ad abbandonare il vecchio paradigma energetico, vivendo così una dipendenza dai combustibili fossili che rallenta il processo di transizione verso fonti energetiche pulite. Tuttavia, oggi sono riconosciuti i danni causati dai combustibili fossili e dal cambiamento climatico, con un costo umano ed economico che gli eventi meteorologici estremi sparsi per il pianeta hanno prodotto, e questo innesca la spinta al cambiamento per la salvaguardia della fragilità del pianeta e della vita degli ecosistemi. Va tuttavia sottolineato che, nonostante gli sforzi incessanti dei membri dell'UE, la lotta al cambiamento climatico intrapresa con la riduzione delle emissioni di CO₂, anche se si raggiungesse la neutralità carbonica al 2050, potrebbe risultare insufficiente a scongiurare il riscaldamento globale. I gas climalteranti presenti nell'atmosfera rimarranno infatti dispersi a lungo e riassorbiti solo gradualmente, nel corso di decine di anni, dal mare e dalle foreste ed il perdurare dell'effetto serra potrebbe creare un picco di temperature, con incrementi ben al di sopra del prefissato 1,5°C.

3. Consumi energetici

Il contributo maggiore al bilancio energetico in Italia è fornito dal settore civile (sia terziario che residenziale) (40%) ed è dovuto principalmente al riscaldamento e raffrescamento delle abitazioni, seguito da quello dei trasporti (30%), dell'industria (27%) e agricoltura (3%). In ambito civile il settore delle costruzioni è il maggiore responsabile, con una quota del 40% e del 36% delle emissioni di CO₂. L'Italia è tra i primi Paesi in Europa per consumo di energia primaria e per emissioni di CO₂ per usi energetici nel settore civile.

Un ruolo determinante è rivestito dagli edifici esistenti, considerato che il fabbisogno energetico medio di un edificio convenzionale è in Italia 100 kWh/m²anno e quello di uno antecedente il D.Lgs. 373/76 150 kWh/m²anno (ENEA) [13], valori molto superiori a quelli dell'edificio europeo a basso consumo (25-60 kWh/m²anno). Osservando che il 70% del patrimonio edilizio (13,7 milioni di edifici) è antecedente all'entrata in vigore della legislazione sull'efficienza energetica (1976) e che il 25% di esso non ha mai subito manutenzioni straordinarie, ne consegue che gli edifici italiani hanno consumi elevati, con uso eccessivo di combustibili fossili ed elevate emissioni. Inoltre, l'Italia possiede il più grande patrimonio di edifici storici al mondo ed è noto quanto sia difficile l'efficientamento di questi immobili. Per quanto riguarda il corpo legislativo in UE la *Renovation Wave* (2020) [14] mira a raddoppiare il tasso di riqualificazione energetica degli edifici rispetto ai livelli attuali mentre in Italia il *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima* (PNIEC) tende a migliorare le prestazioni energetiche degli edifici. Inoltre il Decreto Legislativo 48/2020 [15], in piena coerenza con la strategia del *New Green Deal UE*, allinea la legislazione alla Direttiva Europea 2018/844 [16], dando di fatto inizio anche in Italia all'era degli edifici intelligenti e degli edifici a energia quasi zero (*nZEB*). Il decreto si basa su alcuni concetti base delle strategie energetiche, quali: accelerare la riqualificazione energetica degli edifici esistenti, favorire la mobilitazione di risorse economiche per la realizzazione di edifici a emissioni zero entro il 2050, promuovere la domotica di ultima generazione per favorire una gestione intelligente degli edifici finalizzata alla riduzione dei consumi e favorire l'integrazione tra edifici e mobilità elettrica.

4. Distretti e comunità energetiche

Le città consumano i due terzi dell'approvvigionamento energetico e producono il 70% delle emissioni di CO₂. A tal fine la generazione distribuita, produzione decentralizzata di energia rinnovabile attraverso molte unità di piccole dimensioni che sfruttano le risorse locali [17,18] è posta come priorità dalla strategia politica ed economica dell'UE (Direttiva 2018/844). A differenza delle grandi centrali elettriche, la generazione distribuita distribuisce uniformemente la produzione sul territorio attraverso unità di piccola potenza [19], soprattutto impianti fotovoltaici, che richiedono poco spazio e pochi investimenti e come tali sono molto diffusi.

La nuova normativa favorisce e promuove la condivisione della produzione e del consumo di energia rinnovabile introducendo elementi innovativi, le **Comunità Energetiche** (CE) [20-22] ed i **Distretti Energetici** (DE). Le CE sono coalizioni di utenti appartenenti alla stessa cabina elettrica di media/bassa tensione, che condividono la produzione e i benefici economici dell'energia rinnovabile [23]; numerosi incentivi sono previsti per le comunità, principalmente rivolti all'energia condivisa con la rete, oltre alla consueta vendita degli esuberanti di produzione. Gli utenti collaborano condividendo un impianto di energia rinnovabile locale in grado di produrre, consumare e scambiare energia fornendola a prezzi accessibili ai propri membri piuttosto che dare priorità al profitto economico, come in una società energetica tradizionale.

Ogni utente possiede il suo impianto di produzione energetica, dal quale autoconsuma per il proprio fabbisogno, scambia l'eccedenza con le utenze vicine, la immagazzina [24] o la immette in rete solo al termine del processo di scambio. In tal modo assume il ruolo di *prosumer*, non avendo più il solo ruolo passivo (*consumer*), ma partecipando attivamente al processo produttivo con i propri impianti di produzione (*producer*). I membri di una comunità conservano i diritti dei clienti finali, compreso quello di scegliere il proprio fornitore, e di uscire dalla comunità; possono partecipare come utenti (non sostenendo l'investimento) o come utenti/investitori [25] (Figura 1).

Le CE rappresentano un'opportunità unica di sviluppo tecnologico: basti pensare al continuo equilibrio tra produzione e consumo, accumulo di energia termica con pompe di calore, accumulo elettrochimico con batterie e intelligenza artificiale per la gestione delle comunità energetiche per massimizzare l'energia condivisa. Vantaggi che esse apportano sono la riduzione degli scambi collettivi di rete [26], dell'energia persa per il trasporto, dei costi di trasporto e degli oneri di sistema [27-30]. Questo decentramento e localizzazione della produzione energetica cerca di rompere i vecchi schemi della filiera energetica con un nuovo approccio che favorisca il coinvolgimento dei cittadini, delle attività commerciali e delle imprese del territorio, volto a stabilire un nuovo rapporto di consapevolezza tra loro e le energie rinnovabili, i cui benefici ricadono direttamente sulla collettività.

La normativa sulle CE è contenuta in due Direttive UE del pacchetto *Clean Energy for all Europeans* [31], volte a promuovere la transizione energetica e a regolamentare il rendimento energetico degli edifici, l'efficienza energetica, le energie rinnovabili e il mercato elettrico: la Direttiva sulle Energie Rinnovabili (UE 2018/2001) [32], che definisce la Comunità delle Energie Rinnovabili (REC), recepita in Italia dal Decreto 199/2021 [33], e la Direttiva sul mercato interno dell'energia elettrica (UE 2019/944) [34], che definisce la Comunità Energetica dei Cittadini (ECC). Una REC gestisce l'energia in diverse

forme (elettrica, termica, gas) generata da fonte rinnovabile, mentre l'ECC gestisce solo l'energia elettrica, prodotta sia da fonti rinnovabili che fossili.

Figura 1. Esempio di comunità energetica



Elementi importanti coinvolti nella condivisione delle energie rinnovabili sono i Distretti Energetici [35], entità territoriali di estensione limitata (quartieri o anche villaggi), dove la presenza di edifici ad alta efficienza energetica (idealmente nZEB) e Comunità Energetiche consente di consumare solo localmente energia auto-prodotta da fonti rinnovabili. Ruoli importanti nel DE sono ricoperti anche dagli Smart Building, con componenti e sistemi *shell* gestiti in modo intelligente e automatizzato. In un DE gli edifici sono interconnessi attraverso una *Smart Micro Grid*, ottimizzando la distribuzione e minimizzando i sovraccarichi e le variazioni di tensione [36]; l'ottimizzazione della gestione dei flussi consente riduzioni dei consumi superiori al 50%.

I distretti spostano l'attenzione dai singoli edifici, creando interazione tra condomini, infrastrutture, mobilità e ICT e interessando molteplici tipologie di utenza: residenziale, terziario (ospedali, alberghi, scuole, centri commerciali), trasporti, industrie. Distretti e comunità sono parte integrante della smart city, il nuovo modello di urbanizzazione, efficiente e sostenibile dal punto di vista sociale, economico e ambientale. Il programma *Urban Europe* [37] contiene strategie di urbanizzazione sostenibile rivolte in particolare ai distretti energetici. L'area *Smart City & Communities* è stata prioritaria e strategica nel precedente programma europeo *Horizon 2014-2020*, ma è attualmente presente anche nei 17 obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite e nell'Agenda 2030.

4.1. Sistemi di accumulo energetico

Promuovere l'utilizzo delle fonti rinnovabili e favorire la diffusione della generazione distribuita richiede il superamento dei due problemi di cui soffrono: la difficile integrazione in rete e la discontinuità delle fonti disponibili.

I sistemi di accumulo svolgono un ruolo fondamentale, immagazzinando l'energia in eccesso per soddisfare la domanda in caso di interruzioni di produzione e fungendo da buffer per gli scambi di rete: consentono di ridurre i picchi dovuti alla natura rinnovabile casuale e di livellare i profili di potenza immessi in rete, spesso causa di squilibri.

Al momento le batterie sono le uniche tecnologie in grado di interfacciarsi con i piccoli impianti FER locali [38]; tecnologia emergente è quella dell'idrogeno prodotto per elettrolisi da energia rinnovabile e convertito in elettricità in celle a combustibile. Per la sua sostenibilità ambientale e versatilità [39,40] è considerato il vettore energetico del futuro e nei prossimi anni si prevede un aumento significativo della sua diffusione. Il 2020 è stato l'anno della svolta con il lancio delle strategie sull'idrogeno a livello europeo e anche in Italia è stata adottata la *Strategia italiana sulla ricerca sull'idrogeno*.

Tuttavia, la rapida accettazione del carburante da parte del mercato è ancora limitata dalla mancanza di un'adeguata rete di distributori e dai suoi costi non ancora competitivi. Ciononostante in Italia la situazione potrebbe cambiare rapidamente grazie al finanziamento delle Regioni e al cofinanziamento di 450 milioni del PNRR, con la creazione di una trentina di *Hydrogen Valley* e un centinaio di distributori, raggiungendo nel 2050 una produzione utile a soddisfare il 18% delle consumo nazionale.

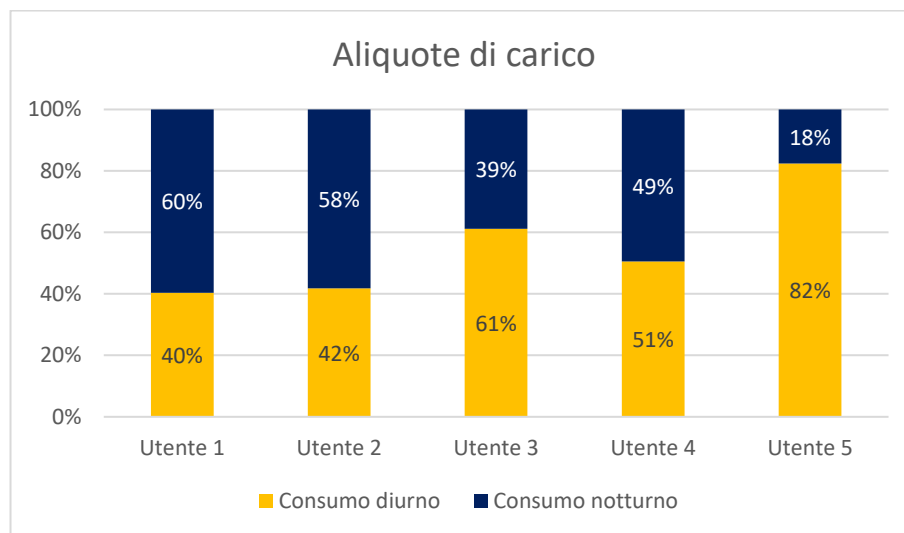
5. Caso studio

Il lavoro analizza i consumi di cinque utenze, appartenenti ad uno stesso condominio sito nel comune di Reggio Calabria (Italia), considerandole dapprima come singole utenze e poi come membri di una comunità energetica, al fine di evidenziare le potenzialità energetiche ed i benefici economici di quest'ultima. Il condominio analizzato, risalente agli anni '80, si trova in una zona prevalentemente residenziale, ad alto indice di urbanizzazione e alta densità abitativa. Ha struttura in cemento armato, a 5 piani e copertura piana; i suoi interni sono distribuiti uno per piano ed in uno di essi è presente un'attività ad uso ufficio.

Carico delle utenze. Per ogni utenza è stato determinato il consumo annuo con le rispettive aliquote diurne/notturne (Tabella 1, Figura 2) partendo dalla conoscenza degli assorbimenti dei dispositivi e delle loro ore di funzionamento giornaliere. I profili di carico degli utenti 1, 2, 3, 4 sono prevalentemente residenziali, distribuiti in modo abbastanza equilibrato tra giorno e notte, mentre l'utente 5 (ufficio) mostra un carico prevalente diurno.

Tabella 1. Tipologie di utenti, carico annuale ed aliquote diurna e notturna

Utente	Tipologia	Carico diurno (%)	Carico notturno (%)	Carico annuale (kWh)
1	Famiglia (2 persone)	40	60	3.297
2	Famiglia (4 persone)	42	58	4.109
3	Famiglia (1 persona)	61	39	2.912
4	Studenti (4 persone)	51	49	3.588
5	Ufficio (3 persone)	82	18	2.664

Figura 2. Aliquote di carico diurne e notturne per i vari utenti

4.1. Singoli utenti

5.1.1. Sistema fotovoltaico: dimensionamento del generatore e produzione energetica

Per soddisfare il carico delle utenze sono stati installati impianti fotovoltaici con pannelli aventi le caratteristiche tecniche riportate in Tabella 2.

Tabella 2. Caratteristiche tecniche dei pannelli fotovoltaici

Tipologia	Potenza (W _p)	Superficie (m ²)	η _r (%)	NOCT (°C)	β (%/°C)
Silicio monocristallino	405	1.96	20.7	38.0	0.39

La loro produttività E è calcolata come:

$$E = S \times \eta \times I \quad (1)$$

dove:

S superficie installata [m²]

η efficienza del pannello

I radiazione solare incidente [kWh/m²]

η è funzione della temperatura t:

$$\eta(t) = \eta_r [1 - \beta(t_c - t_r)] \quad (2)$$

con:

η_r efficienza del pannello alla temperatura di riferimento t_r

β coefficiente di temperatura del pannello [1/°C]

- t_c temperatura della cella [°C]
 t_r temperatura di riferimento [°C]

La temperatura della cella è espressa da:

$$t_c = t_a + \frac{NOCT-20}{800} I' \quad (3)$$

dove:

- t_a temperatura dell'aria [°C]
 NOCT temperatura nominale operative della cella [°C]
 I' radiazione solare incidente [W/m²].

La radiazione incidente I' dipende dall'esposizione e dall'orientamento dei pannelli: nello studio sono stati installati complanari alla falda del tetto, con pendenza di 30° ed orientamento a sud.

La potenza degli impianti, la loro produzione e le aliquote energetiche sono riportate in Tabella 3; la potenza totale installata è di 17,01 kWp.

Tabella 3. Potenze dei generatori FV ed aliquote energetiche per i vari utenti

Utente	Potenza (kW _p)	Produzione energetica (kWh/anno)	Carico (kWh/anno)	Autoconsumo (kWh/anno)	Energia immessa (kWh/anno)	Energia prelevata (kWh/anno)
1	3.24	5.404	3.296	1.309	4.095	1.987
2	4.86	8.106	4.109	1.690	6.416	2.419
3	2.43	4.053	2.912	1.753	2.299	1.158
4	4.05	6.755	3.588	1.786	4.968	1.801
5	2.43	4.053	2.664	2.060	1992	604
<i>Totale</i>	<i>17,01</i>	<i>28.374</i>	<i>16.571</i>	<i>8.601</i>	<i>19.773</i>	<i>7.971</i>

5.1.2 Confronto energetico

Le Figure 3-4 mostrano i carichi degli utenti e le aliquote delle rispettive produzioni energetiche.

Il carico è soddisfatto dall'energia autoconsumata e da quella prelevata dalla rete, mentre la produzione di energia è ripartita tra energia autoconsumata e immessa.

Confrontando le utenze in termini energetici, si osserva dalla Tabella 4 che l'utenza 2, per il suo carico maggiore, presenta sia la maggiore potenza di picco FV che la produzione di energia, unitamente ai maggiori scambi di rete, mentre l'utenza 5, con il carico minore ed il massimo autoconsumo, minimizza i prelievi dalla rete.

Figura 3. Aliquote di carico per i vari utenti: autoconsumo e prelievo dalla rete

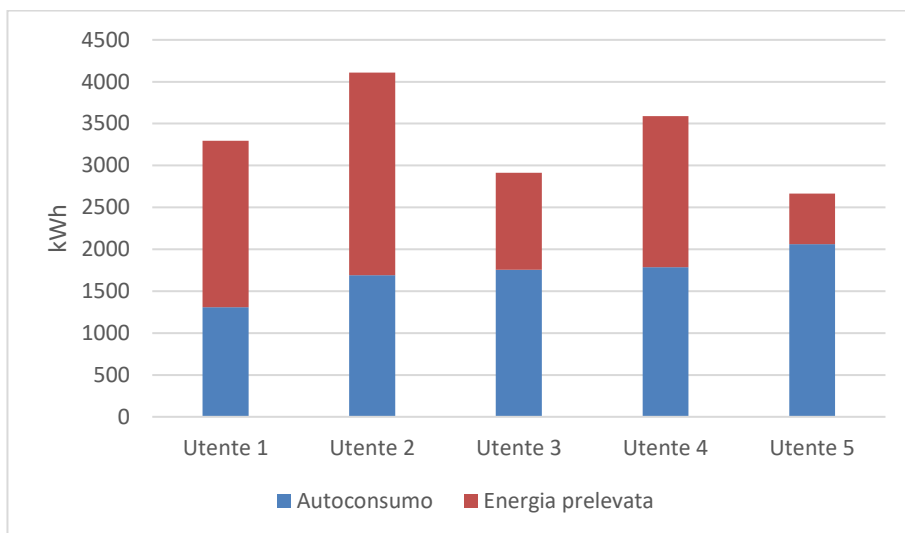
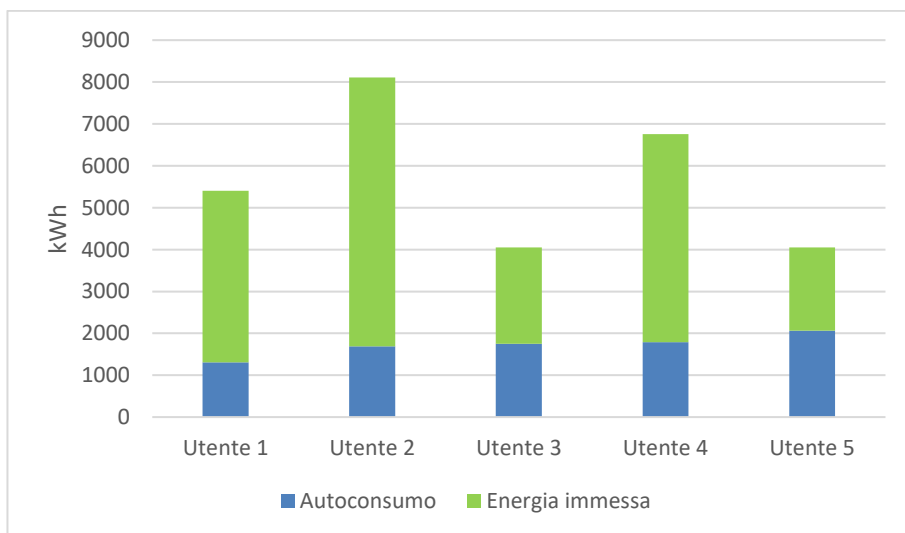


Figura 4. Aliquote di produzione per i vari utenti: autoconsumo ed immissione in rete



5.1.3 Confronto economico

L'analisi economica degli impianti fotovoltaici è stata effettuata attraverso la determinazione del *Valore attuale netto (VAN)*, ovvero il valore attualizzato dei benefici netti lungo la vita utile dell'impianto (20 anni):

$$VAN = \sum_{j=1}^n \frac{B_j - C_j}{(1 + r)^j} - I_0 \tag{2}$$

dove:

- j anno

- n anni di vita dell'impianto
- lo costo di investimento [€]
- B_j benefici [€/anno]
- C_j costi operativi [€/anno]
- r tasso di interesse [%]

Il costo dell'investimento è di € 1.800/kWp, compresa la manutenzione. Il costo di esercizio è stato calcolato utilizzando una tariffa onnicomprensiva (0,26 €/kWh), ovvero il costo medio dell'energia elettrica nell'ultimo trimestre [41]. Attualmente sono in vigore due tipologie di agevolazioni: le detrazioni fiscali (50% del costo dell'investimento) ripartite in 10 anni e lo scambio sul posto per la produzione di energia, che compensa il valore economico dell'energia elettrica immessa annualmente in rete con quello dell'energia prelevata, disciplinata dall'Autorità per l'energia elettrica e il gas [42].

Il prezzo unitario dell'energia acquistata è il *Prezzo Unico Nazionale*, PUN (0,138 €/kWh) sul Mercato Elettrico di Borsa Italiano, ovvero la media dei prezzi zionali del Mercato del Giorno Prima ponderati con il totale degli acquisti, al netto dei pompaggi, mentre quello di energia immessa è il *Prezzo Zonale dell'Energia sul Mercato del Giorno Prima*, P_z (0,101 €/kWh); vengono rimborsate anche le eccedenze. Con una tariffa flat (0,04182 €/kWh) vengono ripagati i servizi di rete sull'energia immessa. Il tasso di interesse fornito dal *Ministero dello Sviluppo Economico italiano* [43] è 0,51.

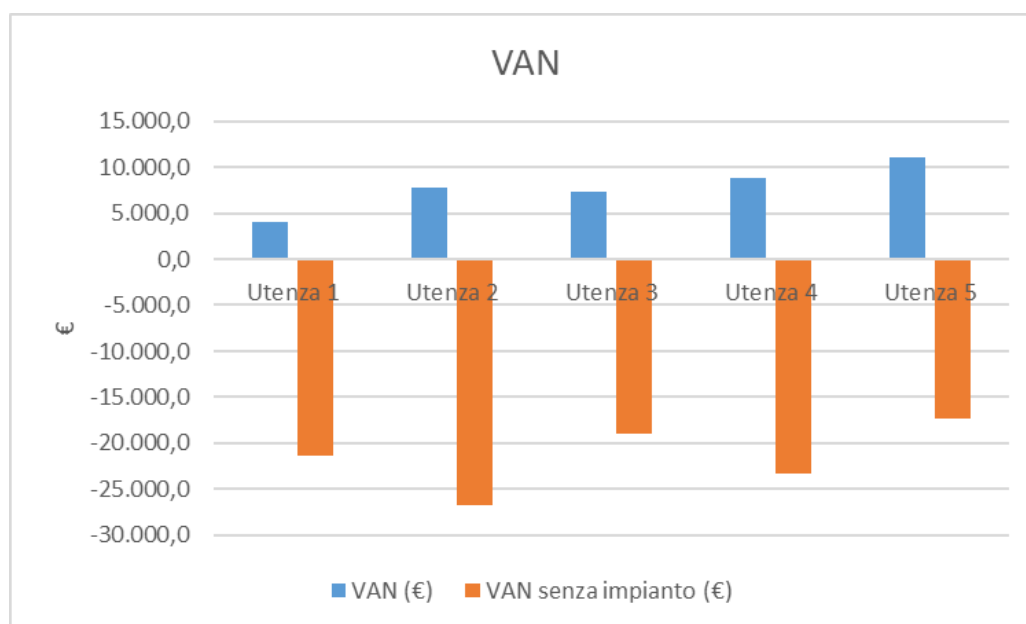
La Tabella 4 riporta le voci di costo e benefici per le cinque utenze, mentre la Tabella 5 e la Figura 5 mostrano i valori di NPV, con i relativi tempi di ritorno degli investimenti, raffrontati a quelli riferiti alla configurazione senza impianti fotovoltaici, nel qual caso l'energia è fornita solo dalla rete, con assenza di benefici e costi di investimento, ma solo operativi. Gli impianti fotovoltaici, grazie all'autoconsumo e ai meccanismi di incentivazione, consentono notevoli risparmi sul costo dell'energia, che nell'arco di vita dell'impianto vanno, in funzione dell'autoconsumo, dal 38% al 71%. I tempi di ritorno degli investimenti variano da 6 a 11 anni, in dipendenza del costo di investimento dell'impianto e dell'aliquota di energia autoconsumata.

Tabella 4. Costi e benefici per le single utenze

Utente	Costo di investimento (€)	Costo di funzionamento (€/anno)	Incentivo sul costo di investimento (€/anno)	Contributo autoconsumo (€/anno)	Scambio sul posto (€/anno)
1	5.832	517	292	340	497
2	8.748	629	437	439	749
3	4.374	301	219	456	281
4	7.290	468	365	465	577
5	4.374	157	219	536	227
<i>Totale</i>	<i>30.618</i>	<i>2.072</i>	<i>1.531</i>	<i>2.236</i>	<i>2.330</i>

Tabella 5. Confronto del VAN per i singoli utenti con e senza fotovoltaico

Utente	VAN (€)	Tempo di ritorno dell'investimento (anni)	VAN senza FV (€)	Risparmio (€)
1	3.988,8	11	-21.427,1	25.415,9
2	7.720,0	10	-26.711,0	34.431,0
3	7.287,4	7	-18.930,9	26.218,2
4	8.789,1	9	-23.325,1	32.114,2
5	11.026,2	6	-17.319,3	28.345,4

Figura 5. VAN con e senza fotovoltaico per i vari utenti

5.2 Comunità energetica

In una comunità energetica i flussi di energia vengono principalmente scambiati all'interno fra i suoi membri e solo alla fine accumulati o immessi in rete.

5.2.1 Analisi energetica

In Tabella 6 vengono riportate le aliquote energetiche.

Tabella 6. Aliquote energetiche per la comunità energetica

Autoconsumo (kWh/anno)	Energia immessa (kWh/anno)	Energia prelevata (kWh/anno)
8.958	19.415	7.613

5.2.2 Analisi economica

Per le comunità energetiche sono stati adottati gli stessi costi operativi e di investimento (incluso il beneficio fiscale) utilizzati per le singole utenze, ma con diverse aliquote incentivanti. Le CE beneficiano di tre tipi di agevolazioni [44]:

- una tariffa premium (€ 110/MWh) su tutta l'energia condivisa con la rete, definita come l'aliquota minima fra l'energia immessa e prelevata
- un corrispettivo unitario pari alla somma della tariffa di trasmissione (€ 7,61/MWh) per gli utenti in bassa tensione e del maggior valore della componente variabile di distribuzione per gli altri usi (€ 0,61/MWh), con un contributo aggiuntivo dovuto alle perdite di rete evitate (€ 1,3/MWh)
- l'incentivo corrispondente al Ritiro Dedicato (RID) su tutta l'energia immessa in rete (€ 0,05/kWh).

Il maggior tasso di beneficio è dovuto all'energia condivisa con la rete: ciò implica che la presenza di un sistema di accumulo aumenterebbe il costo di investimento per la presenza della batteria, generando un minor beneficio dovuto ai ridotti scambi esterni. I costi ed i benefici sono riportati in Tabella 7, unitamente al VAN (con relativo tempo di ritorno dell'investimento), confrontato con il valore riferito alla configurazione senza FV: si osserva come la presenza dell'impianto fotovoltaico consenta di ottenere un risparmio di € 150.392.

Tabella 7. Costi, benefici e VAN per la comunità energetica e la configurazione senza fotovoltaico

Costi operativi (€)	Incentivi (€)	Beneficio autoconsumo (€)	VAN (€)	Tempo di ritorno dell'investimento (anni)	VAN senza FV (€)	Risparmi (€)
1.979	1.970	2.329	42.679	8	-107.713	150.392

5.3 Confronto fra utenze singole e comunità energetica

La Tabella 8 mostra il confronto energetico ed economico tra i singoli utenti e la comunità energetica. In termini energetici, rispetto alle singole utenze, la comunità energetica, grazie agli scambi interni, evidenzia un maggior autoconsumo (+358 kWh) e prelievo ed immissione in rete ridotti di un'analoga quantità. Dal punto di vista economico il VAN è maggiore di € 3.446, circa l'8%. In entrambi i casi la presenza di un impianto fotovoltaico consente incrementi di VAN molto cospicui, pari rispettivamente a € 146.523 per le singole utenze e € 150.393 per la comunità energetica.

Tabella 8. Aliquote energetiche e VAN per single utenze e comunità energetica

Utente	Auto-consumo (kWh/anno)	Energia immessa (kWh/anno)	Energia prelevata (kWh/anno)	VAN (€)	Tempo di ritorno dell'investimento (anni)	VAN senza FV (€)
Singoli utenti	8.601	19.773	7.971	38.812	6-11	-107.713
Comun. ener.	8.958	19.077	7.613	42.257	8	-107.713
Differenza	+358	-358	-358	+3.446		-

5.4. Presenza di utenza commerciale (utenza 5) energivora

Poichè il beneficio derivante dalla costituzione di una comunità energetica è limitato nel caso di utenze residenziali, ma aumenta con la presenza di utenze più energivore, quali quelle commerciali, nello studio è stata condotta un'ulteriore simulazione, ipotizzando che il fabbisogno dell'utenza 5, a consumo prevalentemente diurno, passi da 2.664 a 36.500 kWh/anno. In Tabella 9 vengono riportati il dimensionamento della potenza del generatore dell'utenza e le aliquote energetiche, nella Tabella 10 i costi ed i benefici, mentre la Tabella 11 riporta il VAN con il relativo tempo di ritorno dell'investimento, confrontato al valore corrispondente all'assenza di impianto fotovoltaico.

Tabella 9. Potenza del generatore FV ed aliquote energetiche per l'utenza 5 a carico maggiorato

Potenza (kW _p)	Produzione energetica (kWh/anno)	Carico (kWh/anno)	Autoconsumo (kWh/anno)	Energia immessa (kWh/anno)	Energia prelevata (kWh/anno)
32.4	53.032	36.500	28.226	24.806	8.274

Tabella 10. Costi e benefici per l'utenza 5 a carico maggiorato

Costo di investimento (€)	Costo di funzionamento (€/anno)	Incentivo sul costo di investimento (€/anno)	Contributo autoconsumo (€/anno)	Scambio sul posto (€/anno)
58.320	2.151	2.916	7.339	2.851

Tabella 11. Confronto dell'VAN per l'utenza 5 a carico maggiorato con e senza fotovoltaico

VAN (€)	Tempo di ritorno dell'investimento (anni)	VAN senza FV (€)	Risparmio (€)
146.339	6	-237.250	383.587

Nel caso di comunità energetica la potenza del generatore passa da 17 a 47 kW_p, con una produzione di 77.352 kWh/anno, a fronte di un carico di 50.405 kWh/anno. Nella Tabella 12 è riportato il confronto con il caso delle 5 utenze isolate: si osserva come la presenza dell'utenza più energivora faccia registrare nella comunità energetica incrementi cospicui sul VAN, pari a € 40.717, passando dall'8% del caso precedente al 19%; in conseguenza il tempo di ritorno dell'investimento si abbassa da 8 a 6 anni.

Tabella 12. Aliquote energetiche e VAN per single utenze e comunità energetica

Utente	Auto-consumo (kWh/anno)	Energia immessa (kWh/anno)	Energia prelevata (kWh/anno)	VAN (€)	Tempo di ritorno dell'investimento (anni)	VAN senza FV (€)
Singoli utenti	34.766	42.586	15.641	174.122	6-11	-327.644
Comunità energetica	38.103	39.248	12.303	214.839	6	-327.644
Differenza	+3.337	-3.337	-3.337	40.717		-

5.5. Realizzazione di una comunità fra utenze non dotate preventivamente di impianto fotovoltaico

Poiché nell'analisi riportata nei paragrafi 5.2 e 5.3 si è ipotizzato che le utenze costituiscano la comunità energetica utilizzando gli impianti fotovoltaici di cui sono dotate, quindi a potenza invariata, nello studio è stata condotta un'ulteriore simulazione, nella quale si ipotizza che il dimensionamento del generatore venga effettuato direttamente per il soddisfacimento dei carichi collettivi: in tal caso la potenza del generatore risulta minore (12.15 kW), come pure la sua produzione annua (19.930 kWh).

Nella Tabella 13 viene riportato il nuovo confronto con il caso di utenze singole.

Dal punto di vista energetico, la diminuzione della potenza comporta una notevole riduzione dell'energia immessa (-8.802 kWh), a fronte di analoghi autoconsumo ed energia prelevata; dal punto di vista economico si osservano costi di investimenti ridotti (€ 21.870 contro € 30.618), VAN minore (€ 36.495 contro € 38.812) e tempo di ritorno superiore (da 6 a 8), questi ultimi per i ridotti benefici sull'energia condivisa con la rete, conseguenti alla riduzione dell'energia immessa: tuttavia la riduzione del costo di investimento iniziale apporta un notevole beneficio alle utenze, che possono affrontare minori spese di primo impianto.

Tabella 13. Aliquote energetiche e VAN per single utenze e comunità energetica

Utente	Auto-consumo (kWh/anno)	Energia immessa (kWh/anno)	Energia prelevata (kWh/anno)	VAN (€)	Tempo di ritorno dell'investimento (anni)	VAN senza FV (€)
Singoli utenti	8.601	19.773	7.971	38.812	6-11	-107.713
Comunità energetica	8.958	10.971	7.613	36.495	8	-107.713
Differenza	+357	-8.802	-358			-

6. Conclusioni

Lo scopo del lavoro è quello di evidenziare i benefici energetici ed economici derivanti dalla costituzione di comunità energetiche con riferimento ad un caso studio residenziale. L'autoconsumo collettivo, consentendo di mettere in comune l'energia elettrica all'interno della comunità stessa, viene incrementato, riducendo gli scambi di rete e beneficiando di incentivi per l'energia condivisa.

Nel lavoro è stato analizzato un condominio composto da cinque utenti singoli, confrontando la loro fornitura elettrica ottenuta attraverso un impianto fotovoltaico come utenti separati o come membri di una comunità energetica. Grazie agli scambi interni la comunità energetica evidenzia un maggior autoconsumo (+358 kWh), prelievi ed immissioni ridotte di un'analogia quantità. Dal punto di vista economico, grazie agli incentivi sull'energia condivisa con la rete, il VAN è maggiore di € 3.446. Risparmi più cospicui si osservano rispetto al caso di assenza di impianto fotovoltaico, sia per le singole utenze (€ 146.523) che per la comunità energetica (€ 150.393).

Poiché il beneficio derivante dalla costituzione di una comunità energetica è limitato nel caso di utenze residenziali, ma aumenta con la presenza di utenze più energivore (es. quelle commerciali), nello studio è stata condotta una seconda simulazione, ipotizzando che il fabbisogno dell'utenza 5, a consumo prevalentemente diurno, passi da 2.664 a 36.500 kWh/anno. Si osserva in tal caso come la

presenza dell'utenza più energivora faccia registrare nella comunità energetica incrementi cospicui sul VAN, pari a € 40.717, passando dall'8% del caso precedente al 19% ed in conseguenza il tempo di ritorno dell'investimento si abbassa da 8 a 6 anni.

Poiché nell'analisi effettuata è stata ipotizzata la costituzione della comunità da parte delle utenze utilizzando gli impianti fotovoltaici di cui sono dotate, quindi con potenza invariata, è stata condotta infine un'ulteriore simulazione, dimensionando il generatore per il soddisfacimento dei carichi collettivi: in tal caso la potenza risulta minore (12.15 kW), come pure la produzione annua (12.929 kWh).

Dal punto di vista energetico, la diminuzione della potenza comporta una notevole riduzione dell'energia immessa (-8.802 kWh), a fronte di analoghi autoconsumo ed energia prelevata, mentre dal punto di vista economico si osservano costi di investimenti ridotti (€ 21.870 contro € 30.618), VAN minore (€ 36.495 contro € 38.812) e tempo di ritorno superiore (da 6 a 8), questi ultimi per i ridotti benefici sull'energia condivisa, conseguenti alla riduzione dell'energia immessa: la riduzione del costo di investimento iniziale apporta tuttavia un forte beneficio alle utenze, che possono affrontare minori spese di primo impianto.

Bibliografia

1. Barbaro, G., Foti, G., Labarbera, F., Pietrafesa, M. Energetic and economic comparison between systems for the production of electricity from renewable energy sources (hydroelectric, wind generator, photovoltaic), *Atti Accademia Peloritana dei Pericolanti, Classe di Scienze Fis., Mat. e Nat.*, Vol. 97, N. S2, A31, Edizioni Scientifiche Italiane, ISSN 1825-1242, **2019**, doi: <https://doi.org/10.1478/AA>.
2. Gattuso, D., Greco, A., Marino, C., Nucara, A., Pietrafesa, M., Scopelliti, F., Sustainable mobility: environmental and economic analysis of a cable railway, powered by photovoltaic system, *International Journal of Heat and Technology*, 34 (1), pp. 7-141, **2016**, doi: 10.18280/ijht.340102
3. Ma, C., Park, N.G., A Realistic Methodology for 30% Efficient Perovskite Solar Cells, *Chem*, vol. 6, Issue 6 pp. 1254-1264, **2020**, doi: 10.1016/j.chempr.2020.04.013.
4. Heaslip, E., Costello, G.J, Lohan, J., Assessing Good-practice Frameworks for the development of Sustainable Energy Communities in Europe: Lessons from Denmark and Ireland, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems*, Vol. 4, n.3, **2016**, doi: 10.13044/j.sdewes.2016.04.0024
5. UN General Assembly, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, October 2015, A/RES/70/1, <https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html>
6. Nastasi, B., Markovska, N., Puksec, T., Duić, N., Foley, A., Renewable and sustainable energy challenges to face for the achievement of Sustainable Development Goals, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 157, 112071, **2022**, doi: 10.1016/j.rser.2022.112071.
7. European Commission 2020. Comm. to the European Parliament. Europe's moment: Repair and Prepare for the Next Generation, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?>

8. H.Res.109 - Recognizing the duty of the Federal Government to create a Green New Deal. 116th Congress (2019-2020)
9. European Commission, Repower EU: A Plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition, Brussels, 18.5.2022 COM (2022) 230 final
10. European Parliament, Fit for 55 Package, 2022
11. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, 5 maggio 2021, <https://www.governo.it/it/articolo/piano-nazionale-di-ripresa-e-resilienza/16782>
12. MISE, MATTM, MIT, Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima 2030, <https://www.mise.gov.it/index.php/it/energia/energia-e-clima-2030>
13. Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) e Comitato Termotecnico Italiano (CTI) – Rapporto annuale 2020. Certificazione Energetica degli Edifici. ISBN 978-88-8286-399-9
14. European Commission "A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives", Communication COM/2020/662 final
15. DL 10/6/2020, n. 48, Attuazione della Direttiva UE 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30/5/2018, che modifica le direttive 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e 2012/27/UE sull'efficienza energetica. GU Serie Generale n.146 del 10/6/2020
16. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>
17. Marino, C., Nucara, A., Panzera, M.F., Pietrafesa, M., Towards the nearly zero and the plus energy building: Primary energy balances and economic evaluations, *Thermal Science and Engineering Progress*, 13, art. n. 100400, **2019**, doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100400.
18. Bevilacqua, P., Morabito, A., Bruno, R., Ferraro, V., Arcuri, N., Seasonal performances of photovoltaic cooling systems in different weather conditions, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 2721 Art. N. 122459, **2020**, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122459>.
19. Malara, A., Marino, C., Nucara, A., Pietrafesa, M., Scopelliti, F., Strega, G., Energetic and economic analysis of shading effects on PV panels energy production, *International Journal of Heat and Technology*, Vol. 34, No. 3, pp. 465-472, **2016**. doi: 10.18280/ijht.340316
20. Gjorgievski, V.Z., Cundeva, S., Georghiou, G.E., Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: A review, *Renewable Energy*, Vol. 169, pp. 1138-1156, **2021**, doi: 10.1016/j.renene.2021.01.078.
21. Lowitzsch, J., Hoicka, C.E., van Tulder, F.J., Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package – Governance model for the energy clusters of the future?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 122, **2020**, 109489, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109489>.
22. Heaslip, E., Costello, G.J., Lohan, J., Assessing Good-Practice Frameworks for the Development of Sustainable Energy Communities in Europe: Lessons from Denmark and Ireland, *Journal of*

- Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Vol. 4, pp. 307-319, **2016**, <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2016.04.0024>.
23. Reis, I.F.G., Gonçalves, I., Lopes, M.A.R., Antunes, C.H., Business models for energy communities: A review of key issues and trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 144, **2021**, 111013, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111013>.
 24. Kapila, S., Oni, A.O., Kumar, A., The development of techno-economic models for large-scale energy storage systems, *Energy*, Vol. 140, Part 1, **2017**, pp. 656-672, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.117>.
 25. Piselli, C., Salvadori, G., Diciotti, L., Fantozzi, F., Pisello, A.L., Assessing users' willingness-to-engagement towards Net Zero Energy communities in Italy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 152, **2021**, 111627, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111627>
 26. Lin C.C., Wu Y.F., Liu W.Y., Optimal sharing energy of a complex of houses through energy trading in the Internet of energy, *Energy*, 220, **2021**, Article 119613
 27. Volpato G., Carraro G., Cont M., Danieli P., Rech S., Lazzaretto A., General guidelines for the optimal economic aggregation of prosumers in energy communities, *Energy*, Vol. 258, **2022**, 124800, ISSN 0360-5442, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124800>.
 28. Fleischhacker, A., Lettner, G., Schwabeneder, D., Auer, H., Portfolio optimization of energy communities to meet reductions in costs and emissions, *Energy* 173, pp. 1092-1105, **2019**, 10.1016/j.energy.2019.02.104
 29. Cosic, A., Stadler, M., Mansoor, M., Zellinger, M., Mixed-integer linear programming based optimization strategies for renewable energy communities, *Energy*, Vol. 237, 121559, **2021**, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121559>.
 30. Jiang, A., Yuan, H., Li, D., Energy management for a community-level integrated energy system with photovoltaic prosumers based on bargaining theory, *Energy*, Vol. 225, **2021**, 120272, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120272>.
 31. European Commission, Clean Energy for all Europeans Package, 2019, https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en
 32. EU Directive 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?>
 33. Legislative Decree 8 november 2021, n. 199, Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili. (21G00214), Official Journal of Italian Republic, n. 285, 30 november 2021, ordinary supplement ordinario n. 42
 34. EU Directive 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU, <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj>
 35. Hachem-Vermette, C., Singh, K., Optimization of energy resources in various building cluster archetypes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 157, 112050, **2022**, doi:10.1016/j.rser.2021.112050.

36. Monfared H.J., Ghasemi A., Loni A., Marzband M., A hybrid price-based demand response program for the residential micro-grid, *Energy*, Vol. 185, **2019**, pp. 274-285, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.045>.
37. JPI Urban Europe 2021, <http://www.jpi-urbaneurope.eu/>
38. Ndiaye, A., Locment, F., De Bernardinis, A., Sechilariu, M. and Redondo-Iglesias, E., A Techno-Economic Analysis of Energy Storage Components of Microgrids for Improving Energy Management Strategies, *Energies*, 15, 1556, **2022**, doi: 10.3390/en15041556
39. Carbone, R., Marino, C., Nucara, A., Panzera, M.F., Pietrafesa, M., A case-study plant for a sustainable redevelopment of buildings based on storage and reconversion of hydrogen generated by using solar energy, *ArchHistoR*, Vol. 6, **2019**, pp. 596-615, doi: 14633/AHR184,
40. Marino, C, Nucara, A., Pietrafesa, M., Electrolytic hydrogen production from renewable source, storage and reconversion in fuel cells: the system of the Mediterranea University of Reggio Calabria, *Energy Procedia*, Vol. 78, pp. 818-823. Elsevier Science, **2015** doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.001
41. ARERA – Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente: Andamento del prezzo dell’energia elettrica per il consumatore domestico tipo in maggior tutela, Il semestre 2021
42. Deliberazione dell’Autorità per l’energia elettrica e il gas ARG/elt 74/08, Testo Integrato per lo Scambio sul Posto, 26/07/2012.
43. MISE, DM 27/12/2021, Tasso da applicare per le operazioni di attualizzazione e rivalutazione ai fini della concessione ed erogazione delle agevolazioni in favore delle imprese, GU n. 309, 30-12-2021, <https://www.mise.gov.it/index.php/it/incentivi/impresa/strumenti-e-programmi/tasso-di-attualizzazione-e-rivalutazione>
44. MISE, Decreto 16/9/2020, Individuazione della tariffa incentivante per la remunerazione degli impianti a fonti rinnovabili inseriti nelle configurazioni sperimentali di autoconsumo collettivo e comunità energetiche rinnovabili, GU Serie Generale n. 285 del 16-11-2020, <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/11/16/20A06224/sg>