

## **Nota alla Nuova Edizione**

L'introduzione della riforma didattica delle Facoltà di Ingegneria, ed in particolare l'istituzione delle lauree triennali e delle lauree specialistiche (il cosiddetto 3+2), ha comportato una significativa revisione dei corsi, in termini di denominazioni, programmi, crediti formativi. In alcuni casi ciò è avvenuto a scapito di corsi fondamentali quali la Fisica Tecnica, disciplina di grande importanza per tutti gli allievi delle scuole di Ingegneria. Come scriveva il Prof. Mauro Felli nell'introduzione alla precedente edizione del testo "la Fisica tecnica è indispensabile per i contenuti degli argomenti affrontati, molti dei quali non sono più ripresi, successivamente, nei differenti corsi di laurea; ma, soprattutto, è indispensabile per il metodo, attraverso il quale gli allievi vengono guidati nel passaggio, non facile, che porta dal mondo rigoroso e positivo delle Scienze verso la realtà assai più incerta delle applicazioni professionali".

Il libro trae origine dagli appunti delle lezioni del corso di Fisica Tecnica, tenuto dal Prof. Felli nelle Università di Roma "La Sapienza" prima e di Perugia poi. La prima edizione risale al 1989; la seconda, profondamente aggiornata e rivista, ed alla quale ho avuto il privilegio di contribuire, al 1998.

Il testo è stato ora rivisto alla luce delle nuove esigenze didattiche, ed in particolare è stato adeguato al programma del corso di Fisica Tecnica 1, per gli allievi della Laurea triennale in Ingegneria meccanica della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia.

In particolare, rispetto all'edizione precedente, il capitolo sulla combustione è stato eliminato; i Capitoli 2, 4, 5, 6, 7 e 8 sono stati rivisti e semplificati; si sono infine parzialmente rielaborati nei contenuti tutti i capitoli, per adeguarli, oltre che al nuovo programma, all'evoluzione tecnica degli ultimi anni e si è aggiornata la bibliografia.

Le modifiche sono state effettuate cercando di mantenere il rigore scientifico e la chiarezza di esposizione che caratterizzavano le edizioni precedenti; voglio credere che il risultato sarebbe piaciuto anche al Prof. Felli, a cui vanno la mia stima immutata e il mio ricordo affettuoso.

Francesco Asdrubali

Perugia, maggio 2004



**LEZIONI DI FISICA TECNICA I**  
*Termodinamica, Macchine, Impianti*

**INDICE DEI CONTENUTI**

**Capitolo Primo: Fondamenti di Termodinamica**

1.1	I Principi della Termodinamica.....	pag.	1
1.2	Sistemi e Grandezze Termodinamiche.....	pag.	2
1.3	Equilibrio, trasformazioni.....	pag.	3
1.4	Sistemi omogenei ed eterogenei. Regola delle fasi.....	pag.	5
1.5	Piano di Clapeyron: isoterme di un gas perfetto.....	pag.	6
1.6	Piano di Clapeyron: lavoro di un sistema chiuso.....	pag.	7
1.7	L'equilibrio termico. Principio Zero della Termodinamica.....	pag.	9
1.8	La misura della temperatura.....	pag.	10
1.9	Primo Principio della Termodinamica.....	pag.	13
1.10	Infiniti valori del calore specifico.....	pag.	17
1.11	Macchine: generalità, classificazione.....	pag.	20
1.12	Secondo Principio della Termodinamica.....	pag.	22
1.13	Scala assoluta delle temperature.....	pag.	25
1.14	Equazione di Clausius. Entropia.....	pag.	27
1.15	Piano entropico.....	pag.	29
1.16	Reversibilità.....	pag.	31
1.17	Irreversibilità ed Entropia. Inequazione di Clausius.....	pag.	35
1.18	Relazioni Matematiche fra le Grandezze di Stato.....	pag.	39
1.19	Elenco dei simboli.....	pag.	42
1.20	Bibliografia.....	pag.	43

**Capitolo Secondo: Proprietà della Materia**

2.1	Stati di aggregazione.....	pag.	45
2.2	Diagramma di stato di una sostanza pura.....	pag.	48
2.3	Diagramma P-T; superficie P-T-v.....	pag.	52
2.4	Proprietà dei miscugli liquido-vapore.....	pag.	54
2.5	I gas perfetti.....	pag.	57

2.6	Il fluido di Van der Waals e la Legge degli Stati	
	Corrispondenti .....	pag. 61
2.7	I Diagrammi di Stato .....	pag. 65
2.8	Diagramma Entropico .....	pag. 66
2.9	Diagramma Entalpico .....	pag. 69
2.10	Diagramma Frigorifero .....	pag. 71
2.11	Sistemi a due componenti .....	pag. 72
2.12	Elenco dei simboli .....	pag. 78
2.13	Bibliografia .....	pag. 79

**Capitolo Terzo: Sistemi termodinamici aperti**

3.1	Definizioni .....	pag. 85
3.2	Energia totale di una massa fluida .....	pag. 85
3.3	Bilancio energetico di un sistema aperto .....	pag. 86
3.4	Deflusso unidimensionale .....	pag. 89
3.5	Equazione di conservazione dell'energia in regime stazionario e deflusso unidimensionale .....	pag. 90
3.6	Deduzione diretta dell'equazione dell'energia in regime stazionario .....	pag. 92
3.7	Applicazioni dell'equazione dell'energia .....	pag. 95
3.8	Lavoro reversibile di un sistema aperto .....	pag. 97
3.9	Equazione di continuità .....	pag. 100
3.10	Equazione di Bernoulli .....	pag. 102
3.11	Pompe: prevalenza, altezza di aspirazione .....	pag. 104
3.12	Pompe: elementi descrittivi, curva caratteristica .....	pag. 106
3.13	Ventilatori .....	pag. 110
3.14	Compressori .....	pag. 113
3.15	Sistemi aperti motori .....	pag. 114
3.16	Elenco dei simboli .....	pag. 116
3.17	Bibliografia .....	pag. 117

**Capitolo Quarto: Moto dei fluidi**

4.1	Lo studio del moto dei fluidi .....	pag. 119
4.2	Proprietà dei fluidi in movimento .....	pag. 120
4.3	Condizioni di moto di un fluido viscoso .....	pag. 123
4.4	Moto relativo fra un fluido viscoso ed un solido in esso immerso: descrizione qualitativa .....	pag. 125

4.5	Moto di un fluido all'interno di tubazioni .....	pag. 129
4.6	Valutazione delle perdite di carico ripartite .....	pag. 131
4.7	Valutazione delle perdite di carico concentrate .....	pag. 138
4.8	Circuiti idraulici aperti: impianto di sollevamento.....	pag. 140
4.9	Circuiti idraulici chiusi.....	pag. 144
4.10	Elenco dei simboli.....	pag. 146
4.11	Bibliografia .....	pag. 148

**Capitolo Quinto: *Complementi di Termodinamica***

5.1	Reversibilità interna ed esterna .....	pag. 149
5.2	Rendimento del ciclo di Carnot motore .....	pag. 152
5.3	Effetto utile del ciclo di Carnot frigorifero .....	pag. 156
5.4	Ciclo di Carnot funzionante come pompa di calore .....	pag. 157
5.5	Il Primo e il Secondo Principio: Energia ed Exergia.....	pag. 158
5.6	L'exergia e gli scambi di calore .....	pag. 160
5.7	Exergia di un sistema chiuso .....	pag. 162
5.8	Exergia di un sistema aperto .....	pag. 166
5.9	Rendimenti exergetici .....	pag. 167
5.10	I modi di operare dei sistemi termodinamici .....	pag. 169
5.11	Rendimento exergetico di un ciclo di Carnot motore.....	pag. 171
5.12	Rendimento exergetico di un ciclo di Carnot frigorifero .....	pag. 173
5.13	Cicli termodinamicamente equivalenti al ciclo di Carnot .....	pag. 174
5.14	Classificazione delle macchine termiche.....	pag. 177
5.15	Elenco dei simboli.....	pag. 180
5.16	Bibliografia .....	pag. 181

**Capitolo Sesto: *Motori a combustione interna***

6.1	Notizie Generali .....	pag. 183
6.2	Motori a benzina .....	pag. 185
6.3	Ciclo di Otto teorico .....	pag. 186
6.4	Il funzionamento dei motori a benzina.....	pag. 191
6.5	Motori Diesel .....	pag. 194
6.6	Il ciclo Diesel teorico .....	pag. 195
6.7	Confronto fra i cicli teorici Otto e Diesel.....	pag. 199
6.8	Il funzionamento dei motori Diesel.....	pag. 201
6.9	Turbine a gas .....	pag. 202
6.10	Il ciclo di Brayton teorico .....	pag. 204

6.11 Bilanci meccanici nelle turbine a gas .....	pag. 207
6.12 Recupero del calore nelle turbine a gas .....	pag. 209
6.13 Turbine a gas: schema a doppio bi-stadio con recupero .....	pag. 212
6.14 Applicazioni delle turbine a gas: propulsione aeronautica .....	pag. 213
6.15 Applicazioni delle turbine a gas: propulsione terrestre .....	pag. 215
6.16 Impianti di cogenerazione .....	pag. 216
6.17 Elenco dei simboli .....	pag. 220
6.18 Bibliografia.....	pag. 221

**Capitolo Settimo: Macchine a vapore**

7.1 Le origini delle macchine a vapore.....	pag. 223
7.2 Privilegi delle macchine a vapore.....	pag. 225
7.3 Il vapor d'acqua.....	pag. 233
7.4 Il ciclo Rankine teorico.....	pag. 233
7.5 Macchine a vapore alternative.....	pag. 239
7.6 Ciclo di Rankine - Hirn .....	pag. 244
7.7 Proprietà dei fluidi di lavoro per macchine a vapore.....	pag. 247
7.8 Impianti con espansori a turbina.....	pag. 248
7.9 Impianto a turbina con due surriscaldamenti.....	pag. 250
7.10 Gli spillamenti di vapore .....	pag. 254
7.11 Elenco dei simboli .....	pag. 256
7.12 Bibliografia.....	pag. 258

**Capitolo Ottavo: Macchine frigorifere**

8.1 Collocazione storica .....	pag. 259
8.2 Macchine a compressione: elementi termodinamici.....	pag. 263
8.3 Ciclo di Rankine inverso e schema di funzionamento.....	pag. 265
8.4 Confronto con il ciclo di Carnot frigorifero .....	pag. 270
8.5 Parametri di lavoro della macchina a compressione.....	pag. 272
8.6 Conseguenze dell'irreversibilità .....	pag. 280
8.7 Requisiti per i fluidi refrigeranti.....	pag. 281
8.8 Le pompe di calore a compressione di vapore saturo.....	pag. 284
8.9 Le macchine ad assorbimento.....	pag. 289
8.10 Principio di funzionamento .....	pag. 292
8.11 I diagrammi P-T-X delle soluzioni .....	pag. 298
8.12 Schema reale, punti di funzionamento.....	pag. 301
8.13 Bilancio di massa.....	pag. 305

8.14	Le macchine ad assorbimento commerciali .....	pag. 306
8.15	Elenco dei simboli .....	pag. 310
8.16	Bibliografia .....	pag. 311

**Capitolo Nono: Condizionamento dell'aria**

9.1	L'aria atmosferica .....	pag. 313
9.2	Definizione delle grandezze psicrometriche .....	pag. 315
9.3	Il Diagramma Psicrometrico .....	pag. 323
9.4	Il processo di saturazione adiabatica .....	pag. 334
9.5	Lo psicrometro .....	pag. 336
9.6	Il benessere termoigrometrico e le condizioni di progetto interne degli impianti di condizionamento.....	pag. 339
9.7	Processi psicrometrici .....	pag. 340
9.8	Trattamenti dell'aria.....	pag. 351
9.9	Descrizione di un condizionatore.....	pag. 354
9.10	La regolazione a punto fisso.....	pag. 357
9.11	Impianti a tutt'aria.....	pag. 361
9.12	Elenco dei simboli.....	pag. 371
9.13	Bibliografia .....	pag. 372





## Capitolo 1

# FONDAMENTI DI TERMODINAMICA

### 1.1 I Principi della Termodinamica.

La Termodinamica è una parte della Fisica che si occupa dello studio delle proprietà dei corpi e dei fenomeni che implicano uno scambio di calore, di lavoro o di altre forme di energia; esamina le possibilità di trasformazione dell'energia da una specie ad un'altra (termica, meccanica, chimica, elettrica) ed è basata su quattro Principi fondamentali:

- *Principio Zero*, che riguarda il concetto di equilibrio termico.
- *Primo Principio*, che riguarda il carattere conservativo dell'energia.
- *Secondo Principio*, che riguarda la differenza qualitativa fra le varie forme di energia e lo studio dei fenomeni reali.
- *Terzo Principio*, che riguarda le proprietà della materia nelle vicinanze dello zero assoluto.

In questo corso di Fisica Tecnica sono esaminate principalmente questioni riguardanti l'energia meccanica e l'energia termica; è illustrato il Principio Zero e sono discussi il Primo e il Secondo Principio, con particolare attenzione ad aspetti applicativi concernenti lo studio di macchine termiche e frigorifere e di impianti di condizionamento dell'aria.

Lo studio della Termodinamica può essere affrontato facendo ricorso a due differenti metodologie; la prima, che prende il nome di Termodinamica Statistica, esamina i corpi dal punto di vista microscopico, formula ipotesi sulla struttura intima della materia e cerca di risalire allo studio delle proprietà macroscopiche dei corpi per mezzo di strumenti matematici basati soprattutto sul calcolo delle probabilità; la seconda, che prende il nome di Termodinamica Classica, osserva i fenomeni naturali da un punto di vista macroscopico, basato su alcune leggi generali che derivano da osservazioni sperimentali. Questa seconda metodologia è particolarmente adatta alla analisi delle applicazioni ingegneristiche ed è pertanto seguita nel presente testo.

## 1.2 Sistemi e Grandezze Termodinamiche.

Nella Termodinamica Classica l'intero Universo è convenzionalmente suddiviso in due parti, *sistema* e *mezzo*: la parte di Universo oggetto dello studio è chiamata *sistema*; tutto il resto prende il nome di *mezzo* o *ambiente*. La Termodinamica si occupa delle interazioni tra sistema e mezzo e dell'evoluzione subita dal sistema a seguito di queste interazioni. Il sistema ha dimensioni finite; la sua forma, dimensioni e volume possono mutare nel tempo, pur mantenendo il sistema la propria identità.

Ai fenomeni d'interazione fra sistema e mezzo prendono parte, in linea di principio, tutti gli elementi, sia del sistema che del mezzo; è evidente, tuttavia, che gli elementi più vicini al confine partecipano in modo più attivo. Si definisce *superficie limite* la superficie di separazione fra sistema e mezzo; attraverso la superficie limite si può avere scambio di calore  $Q$ , di lavoro  $L$  e di massa  $M$ .

Se un sistema scambia massa con l'esterno si dice *aperto*; se non scambia massa si dice *chiuso*. Se non avviene scambio di calore, il sistema è *adiabatico*, mentre se non ci sono scambi di lavoro può chiamarsi *adinamico*. Se un sistema non scambia né calore, né lavoro, né massa, si dice *isolato*. Si tenga conto che l'essere un sistema chiuso o aperto non influenza la configurazione geometrica della superficie limite, che può essere fissa o mobile, sia nei sistemi chiusi che nei sistemi aperti. Ad esempio, nel sistema costituito dal cilindro di una macchina alternativa, quando il pistone si muove e le valvole sono chiuse, la superficie limite muta la propria configurazione, ma il sistema resta chiuso.

Si definisce *stato termodinamico* del sistema l'insieme delle proprietà che caratterizzano il sistema stesso. Per descrivere lo stato termodinamico è necessaria la conoscenza di grandezze dette appunto *di stato*. Queste possono essere *intensive* od *estensive*: una grandezza si dice *intensiva* se il suo valore è indipendente dalla massa considerata. La pressione  $P$ , la temperatura  $T$  ed il volume specifico  $v$  sono grandezze intensive. Una grandezza di stato si dice *estensiva* se il suo valore per l'intero sistema è uguale alla somma dei valori che competono alle singole parti componenti del sistema. Sono grandezze estensive la massa  $M$  ed il volume  $V$ . Se di una grandezza estensiva si considera il suo valore specifico, cioè riferito alla unità di massa, questa diventa di solito una grandezza intensiva: ad esempio il volume  $V$  è una grandezza estensiva, il volume specifico  $v = V/M$  è una grandezza intensiva; ciò tuttavia non è sempre vero: a tale proposito è opportuno tenere presenti le precisazioni effettuate nel paragrafo 2.3.

Si supponga che sia pari ad  $n$  il numero di grandezze di stato

caratteristiche di un sistema e siano denominate  $x_1, x_2 \dots x_n$ ; non essendo tali grandezze in generale indipendenti, sia possibile individuare un numero  $m$  di relazioni fra di esse:

$$\begin{aligned}
 F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\
 F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\
 \dots\dots\dots & \\
 \dots\dots\dots & \\
 F_m(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Queste relazioni prendono il nome di *equazioni di stato* del sistema; in base alle (1.1), il numero di grandezze indipendenti che si possono assegnare in modo arbitrario per individuare lo stato termodinamico del sistema è pari a:

$$g = (n - m) \tag{1.2}$$

Se, per individuare lo stato termodinamico di un sistema, è necessaria e sufficiente l'assegnazione di *due* grandezze di stato, si dice che il sistema è un *fluido*. Nel caso di un fluido, pertanto, se si considerano tre grandezze di stato, ad esempio pressione, temperatura e volume specifico, essendo solo due quelle assegnabili indipendentemente, esiste sicuramente fra di loro una relazione del tipo:

$$F(P, v, T) = 0 \tag{1.3}$$

La relazione (1.3) prende il nome di *equazione di stato del fluido*.

### 1.3 Equilibrio, trasformazioni.

Se in un sistema tutte le grandezze di stato hanno valore costante nel tempo, si dice che il sistema è in *equilibrio termodinamico*; esistono peraltro diversi tipi di equilibrio, come appresso specificato.

*Equilibrio stabile.* Si supponga che al sistema sia applicata una perturbazione, anche di notevole entità, che lo sposti dalle condizioni di equilibrio. Se, alla scomparsa della perturbazione, il sistema ritorna nello stato di equilibrio originario, l'equilibrio si dice stabile.

*Equilibrio instabile.* Si supponga che al sistema sia applicata una perturbazione, anche di modesta entità, che lo sposti dalle condizioni di equilibrio. Se, alla scomparsa della perturbazione, il sistema non ritorna più nello stato di equilibrio

originario, l'equilibrio si dice instabile.

*Equilibrio metastabile.* Si supponga che al sistema siano applicate, in tempi diversi, due perturbazioni, la prima di modesta entità e la seconda di notevole entità. Se, alla scomparsa della perturbazione di modesta entità, il sistema ritorna nello stato di equilibrio originario ed, invece, alla scomparsa della perturbazione di notevole entità, non ritorna più nello stato di equilibrio originario, l'equilibrio si dice metastabile.

*Equilibrio indifferente.* Si supponga che al sistema sia applicata una perturbazione di qualsiasi entità che lo sposti dalle condizioni di equilibrio. Se, alla scomparsa della perturbazione, il sistema si trova automaticamente in un nuovo stato di equilibrio, di volta in volta diverso, a seconda della durata e dell'entità della perturbazione, l'equilibrio si dice indifferente.

Nel seguito, a meno di indicazioni contrarie, alla dizione *equilibrio termodinamico* si attribuirà senz'altro il significato di *equilibrio termodinamico stabile*; ad esso corrisponde il manifestarsi contemporaneo di diversi tipi di equilibrio: *termico*, il quale implica eguaglianza di *temperatura* fra sistema e mezzo; *meccanico*, il quale implica eguaglianza di *pressione*; *di fase e chimico*, il quale implica eguaglianza di *potenziale chimico*; *elettrico*, il quale implica eguaglianza di *potenziale elettrico*. Il contemporaneo verificarsi di tutti questi equilibri corrisponde alla condizione di equilibrio termodinamico del sistema.

Se il sistema non è in equilibrio termodinamico, le grandezze di stato che lo caratterizzano variano nel tempo e si dice che il sistema percorre una *trasformazione*. La natura della trasformazione è individuata da un particolare legame fra le grandezze di stato, che prende il nome di *equazione della trasformazione*; si ricordano alcune trasformazioni fondamentali e le relative equazioni:

- a pressione costante, *isobare*:  $dP = 0$ ;
- a volume specifico costante, *isometriche*:  $dv = 0$ ;
- a temperatura costante, *isoterme*:  $dT = 0$ ;
- senza scambio di calore con l'esterno, *adiabatiche*:  $dQ = 0$ ;
- senza scambio di lavoro con l'esterno, *adinamiche*:  $dL = 0$ .

In generale l'equazione della trasformazione è un legame del tipo:

$$G(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \tag{1.4}$$

Pertanto, se è assegnata la natura della trasformazione, la (1.4) va ad aggiungersi alle equazioni di stato (1.1) ed il numero di grandezze di stato assegnabili indipendentemente nel corso della trasformazione diventa, in base alla (1.2),  $g=(n - m - 1)$ ; nel caso particolare di un fluido si ha  $g = 1$ .

Se, attraverso una successione di trasformazioni, un sistema termodinamico perviene di nuovo nello stato iniziale, si dice che il sistema ha percorso un *ciclo chiuso di trasformazioni*, o semplicemente un *ciclo*. I cicli chiusi sono estremamente importanti, come si vedrà, in gran parte dei processi associati a trasformazioni energetiche. Si sottolinea infine il fatto che la Termodinamica teorica, nella maggioranza dei casi, prescinde dal tempo: si preoccupa cioè di analizzare la natura delle trasformazioni sotto diversi aspetti, ma non di stabilire con quale velocità queste trasformazioni vengano percorse. Nella Termodinamica applicata all'ingegneria, invece, la menzionata velocità assume un rilievo significativo.

#### 1.4 Sistemi omogenei ed eterogenei. Regola delle fasi.

I sistemi termodinamici possono essere omogenei oppure eterogenei. In un sistema omogeneo, se in equilibrio termodinamico, tutte le grandezze di stato hanno il medesimo valore in ogni punto. In un sistema eterogeneo, al contrario, anche se in condizioni di equilibrio termodinamico, le funzioni di stato intensive esprimono una proprietà locale.

Un sistema omogeneo è caratterizzato dalla presenza di una sola fase, intendendo con *fase* qualsiasi porzione di materia dotata di proprietà chimico-fisiche costanti. A sua volta, una fase può essere semplice o complessa, a seconda che sia costituita da una sola o da più specie chimiche. L'aria atmosferica ed i gas di combustione sono esempi tipici di fasi complesse.

Un sistema eterogeneo è costituito da più fasi; lo stato termodinamico di un sistema eterogeneo è caratterizzato dall'insieme degli stati termodinamici delle singole fasi. E' opportuno ricordare, a tale proposito, una legge generale della Chimica - Fisica, denominata *regola delle fasi*, dovuta a Gibbs, che si enuncia:

- il numero di variabili intensive assegnabili indipendentemente ad un sistema termodinamico in equilibrio è dato dal numero dei componenti che lo costituiscono, meno il numero delle fasi presenti, più due:

$$i = n - f + 2 \quad (1.5)$$

Il numero  $i$  viene anche denominato *varianza* del sistema.

### 1.5 Piano di Clapeyron: isoterme di un gas perfetto.

Una rappresentazione grafica efficace degli stati termodinamici di un sistema è costituita dal *Piano di Clapeyron*, avente la pressione in ordinate e il volume specifico in ascisse. Il piano di Clapeyron può pensarsi come uno dei piani coordinati dello spazio a tre dimensioni P-v-T, nel quale un fluido è rappresentato dalla superficie di equazione  $F(P, v, T)=0$ . Se si assegnano valori prefissati  $T_1, T_2 \dots T_i \dots T_n$  alla temperatura, a questi valori corrispondono, sulla superficie del fluido, le linee rappresentative delle isoterme, proiettabili sul piano coordinato P-v. L'insieme di queste operazioni equivale a disegnare sul piano P-v un certo numero di linee aventi equazione:

$$F(P, v, T_i) = 0 \quad (1.6)$$

Nel caso di un gas perfetto è possibile attribuire a queste funzioni una forma analitica molto semplice: essendo infatti l'equazione di stato dei gas perfetti, come noto, la seguente:

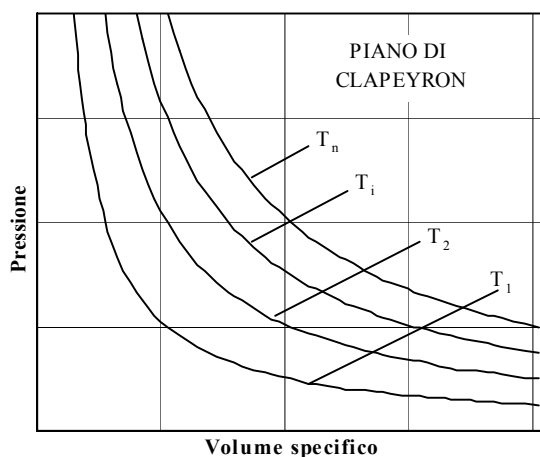
$$Pv = RT \quad (1.7)$$

ciascuna isoterma avrà equazione:

$$Pv = RT_i \quad (1.8)$$

Dalla (1.8) risulta che, nel piano di Clapeyron, le isoterme di un gas perfetto sono rappresentate da un fascio di iperboli equilateri (vedi fig. 1.1).

Nel caso di un fluido reale la rappresentazione delle isoterme è notevolmente più complessa, come sarà discusso successivamente.



**Fig. 1.1:** isoterme di un gas perfetto sul piano di Clapeyron.

$$(T_1 < T_2 < T_i < T_n)$$