

Luciano Piovan

# **PROGETTARE IMPIANTI A VAPORE**

Disegni – Diagrammi – Tabelle – Esempi di calcolo



Dario Flaccovio Editore

Luciano Piovan  
PROGETTARE IMPIANTI A VAPORE  
ISBN 978-88-579-0056-8

© 2010 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. – tel. 0916700686 – fax 091525738  
[www.darioflaccovio.it](http://www.darioflaccovio.it) [info@darioflaccovio.it](mailto:info@darioflaccovio.it)

Prima edizione: ottobre 2010

Piovan, Luciano <1939->

Progettare impianti a vapore : disegni, diagrammi, tabelle, esempi di calcolo  
/ Luciano Piovan. - Palermo : D. Flaccovio, 2010.  
ISBN 978-88-579-0056-8  
1. Impianti a vapore.  
621.1 CDD-22 SBN Pal0230551

*CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"*

Finito di stampare: Tipografia Priulla, Palermo

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.



### SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- files di aggiornamento al testo
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: [www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF0056](http://www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF0056)

## INDICE

Premessa .....	pag.	XI
1. ALCUNE UNITÀ DI MISURA USATE IN TERMOTECNICA		
1.1. Note sul sistema internazionale SI delle unità di misura .....	»	1
1.2. Attribuzione delle unità di misura .....	»	2
1.3. Suddivisione delle unità di misura .....	»	4
1.3.1. Grandezze estensive .....	»	4
1.3.2. Grandezze intensive .....	»	5
1.3.3. Grandezze e unità di misura usate nei calcoli .....	»	8
1.3.4. Grandezze e unità di misura concernenti il vapore .....	»	10
1.4. Punto triplo dell'acqua .....	»	12
2. VAPORE		
2.1. Generalità .....	»	21
2.2. Sostanza pura .....	»	21
2.3. Fasi di una sostanza pura .....	»	21
2.4. Stato termodinamico di equilibrio .....	»	24
2.5. Processo di compressione .....	»	27
2.6. Curve caratteristiche delle fasi .....	»	28
2.7. Vapore .....	»	39
2.7.1. Calore sensibile $h_f$ .....	»	46
2.7.2. Calore latente $h_{fg}$ .....	»	46
2.7.3. Calore totale $h_g$ .....	»	46
2.8. Commento sul diagramma del volume specifico .....	»	46
2.9. Commento sul diagramma di Mollier .....	»	49
2.10. Cenni sulle turbine vapore .....	»	50
2.11. Valvole di laminazione .....	»	52
2.12. Vapore surriscaldato .....	»	55
2.13. Altre considerazioni sul vapore surriscaldato .....	»	70
3. GENERATORI DI VAPORE		
3.1. Generalità .....	»	73
3.2. Generatori a tubi di fiamma o di fumi .....	»	75

3.3. Caldaie pressurizzate .....	pag.	79
3.4. Caldaie a tubi d'acqua .....	»	83
3.5. Produttività di un generatore .....	»	87
3.6. Rendimento di un generatore e indice di vaporizzazione .....	»	91
3.7. Accessori più importanti installati sui generatori di vapore .....	»	92
3.8. Combustione .....	»	96
3.8.1. Teoria della combustione .....	»	97
3.9. Potere calorifico .....	»	97
3.9.1. Perdite di calore .....	»	98
3.10. Bruciatori a olio pesante .....	»	99
3.11. Bruciatori a coppa rotante (a forza centrifuga, rotativi) .....	»	101
3.12. Bruciatori a gas .....	»	102
3.13. Bruciatori misti .....	»	103
3.14. Esempio di ubicazione di un generatore di vapore .....	»	105
3.15. Installazione delle valvole di sicurezza .....	»	106
3.16. Impianti a vapore nel cambiamento europeo .....	»	107
4. TUBAZIONI PER IL VAPORE E LA CONDENZA		
4.1. Dimensionamento tubazioni vapore .....	»	111
4.2. Moto dei fluidi .....	»	115
4.3. Equazioni per il dimensionamento delle tubazioni .....	»	116
4.4. Velocità e perdite di carico consigliate nei tubi .....	»	118
4.5. Perdite di carico accidentali .....	»	123
4.6. Calcolo per caduta di pressione con fattori perdita di carico .....	»	130
4.7. Dimensionamento tubazioni con l'uso dei diagrammi .....	»	134
4.8. Tubazioni per il trasporto della condensa .....	»	137
4.8.1. Tronchetto di scarico .....	»	139
4.8.2. Tubo di collegamento tronchetto-scaricatore .....	»	139
4.8.3. Tratto di tubo che collega lo scaricatore al collettore raccolta condense .....	»	143
5. ARIA NEGLI IMPIANTI VAPORE, COLPO D'ARIE E INVASO DI VAPORE		
5.1. Aria negli impianti vapore .....	»	155
5.1.1. Riduzione di temperatura .....	»	155
5.2. Riduzione del coefficiente di trasmissione .....	»	157
5.3. Disuniformità della trasmissione termica .....	»	162
5.4. Riscaldamento di pentole .....	»	162
5.5. Colpo d'ariete negli impianti vapore .....	»	165
5.6. Invaso di vapore .....	»	173
6. ELIMINATORI D'ARIA E SCARICATORI DI CONDENZA		
6.1. Generalità .....	»	183

6.2. Scaricatori di condensa .....	pag.	183
6.2.1. Scaricatori termostatici .....	»	183
6.2.2. Scaricatori meccanici .....	»	187
6.2.3. Scaricatori termodinamici.....	»	191
6.2.4. Scaricatori vari .....	»	194
7. SCELTA DEGLI SCARICATORI DI CONDENZA		
7.1. Scaricatori di condensa .....	»	199
7.2. Più servizi, a pressioni diverse, collegati a un unico scaricatore .....	»	200
7.3. Come scegliere e installare uno scaricatore .....	»	204
7.4. Costruzione e drenaggio di un fine linea .....	»	207
7.5. Drenaggio di linee di lunghezza superiore ai 100 m .....	»	208
7.6. Rapporto della massa specifica vapore saturo-aria .....	»	209
7.7. Eliminatori d'aria usati come scaricatori di condensa (termostatici: a tensione di vapore, a dilatazione di liquido e bimetallici) .....	»	211
7.8. Tubazioni, collettori e fine linea .....	»	216
7.9. Drenaggio degli scambiatori di calore e condizioni di stallo.....	»	238
8. SCAMBIATORI DI CALORE		
8.1. Scambio termico e scambiatori di calore .....	»	245
8.2. Classificazione degli scambiatori di calore .....	»	246
8.3. Scambiatori a contatto indiretto .....	»	246
8.4. Scambiatori a contatto diretto.....	»	246
8.4.1. Scambiatore di calore con fascio tubiero a U .....	»	247
8.4.1.1. Applicazioni .....	»	247
8.4.1.2. Costruzione e vantaggi .....	»	248
8.4.1.3. Limitazioni .....	»	248
8.4.2. Scambiatore di calore a piastre fisse .....	»	248
8.4.2.1. Applicazioni .....	»	248
8.4.2.2. Costruzione.....	»	249
8.4.2.3. Vantaggi .....	»	249
8.4.2.4. Limitazioni .....	»	250
8.4.3. Scambiatore di calore a premitreccia .....	»	250
8.4.3.1. Applicazioni .....	»	250
8.4.3.2. Costruzione.....	»	251
8.4.3.3. Vantaggi .....	»	251
8.4.3.4. Limitazioni .....	»	251
8.4.4. Scambiatore di calore a testa flottante .....	»	251
8.4.4.1. Applicazioni .....	»	251

8.4.4.2. Costruzione.....	pag.	251
8.4.4.3. Vantaggi .....	»	252
8.4.5. Scambiatore di calore a tubi corrugati .....	»	254
8.4.5.1. Applicazioni .....	»	254
8.4.5.2. Costruzione.....	»	254
8.4.5.3. Vantaggi .....	»	254
8.4.6. Scambiatore di calore per serbatoio (becco di flauto) .....	»	254
8.4.6.1. Applicazioni .....	»	254
8.4.7. Scambiatore di calore a fascio tubiero con accumulo .....	»	257
8.4.7.1. Applicazioni .....	»	257
8.4.7.2. Costruzione.....	»	258
8.4.8. Generatori indiretti di vapore .....	»	258
8.4.8.1. Applicazioni .....	»	258
8.4.8.2. Costruzione.....	»	258
8.5. Scambiatore di calore a piastre.....	»	258
8.5.1. Applicazioni .....	»	260
8.5.2. Costruzione .....	»	261
8.6. Alcune osservazioni sulla trasmissione del calore .....	»	262
8.6.1. Conduzione .....	»	262
8.6.2. Irraggiamento .....	»	267
8.6.3. Convezione .....	»	273
8.7. Regime di moto Reynolds .....	»	275
8.8. Flusso esterno .....	»	276
8.9. Flusso interno .....	»	276
8.10. Convezione e irraggiamento agenti in parallelo.....	»	277
8.11. Lastre in serie .....	»	281
8.12. Lastre poste in parallelo .....	»	282
8.13. Calcolo della potenza trasferita .....	»	283
8.14. Calcolo della conduttanza in un sistema cilindrico .....	»	285
8.15. Calcolo della convezione: valutazione di $\bar{h}_c$ .....	»	290
8.16. Convezione forzata nel caso di flusso ortogonale a un cilindro .....	»	298
8.17. Numero di Grashof (Gr) .....	»	304
8.18. Numero di Rayleigh (Ra) .....	»	304
8.19. Scambiatori di calore .....	»	305
8.20. Diagrammi per lo studio della distribuzione dei fluidi sugli scambiatori di calore.....	»	309
8.20.1. Media logaritmica delle differenze di temperatura .....	»	311
8.21. Resistenza termica globale .....	»	313
8.22. Sporcamiento superfici di scambio .....	»	315
8.23. Determinazione della resistenza di sporcamiento .....	»	317
8.24. Resistenza di sporcamiento .....	»	319

8.25. Estensione della superficie di scambio.....pag.	326
8.25.1. Efficienza di un'alettatura .....	» 329
8.26. Batterie alettate .....	» 332
9. SERBATOI PER LA RACCOLTA DELLA CONDENZA, DEGASATORI E ACQUA DI ALIMENTO CALDAIA	
9.1. Serbatoio per la raccolta delle condense .....	» 337
9.2. Degasatori termici.....	» 342
9.3. Costruzione di un serbatoio raccolta condensa .....	» 345
9.4. Testata di miscelazione .....	» 347
9.4.1. Sistema di raccolta condense su vasca ausiliaria .....	» 353
9.5. Acque di alimento caldaie .....	» 353
9.6. Acqua .....	» 354
9.7. Metodi di prelievo dei campioni per l'esame.....	» 359
10. DIMENSIONAMENTO DEI COLLETTORI E DEI SEPARATORI DI CONDENZA	
10.1. Collettore per la distribuzione del vapore .....	» 363
10.2. Separatore di condensa .....	» 370
11. UMDIFICAZIONE DELL'ARIA	
11.1. Generalità .....	» 377
11.2. Legionella (morbo del legionario) .....	» 377
11.3. Come prevenire i rischi della legionella.....	» 379
11.4. Quando intervenire .....	» 381
11.5. Punti di prelievo per l'identificazione .....	» 382
11.6. Scelta del metodo di bonifica .....	» 383
11.7. Shock termico .....	» 383
11.7.1. Descrizione del circuito .....	» 388
11.8. Trattamenti di disinfezione .....	» 388
11.9. Disinfezione degli impianti di condizionamento .....	» 390
11.10. Torri evaporative .....	» 391
11.11. Vapore pulito .....	» 391
11.12. Sterilizzazione a vapore .....	» 392
11.13. Calore secco .....	» 393
11.14. Calore umido.....	» 393
11.15. Vapore filtrato, vapore pulito e vapore puro.....	» 394
11.16. Componenti necessari nel trattamento dell'acqua per la produzione del vapore pulito .....	» 398
11.16.1. Filtrazione .....	» 398
11.16.2. Purificazione .....	» 402
11.16.3. Degasazione .....	» 406
11.17. Climatizzazione.....	» 422

11.18. Benessere umano .....	pag.	422
11.19. Bilancio energetico del corpo umano .....	»	424
11.19.1. Energia termica prodotta dal corpo umano: metabolismo .....	»	426
11.20. Ventilazione e rumorosità degli ambienti .....	»	427
11.21. Suddivisione degli impianti di condizionamento dell'aria .....	»	428
11.22. Umidificazione .....	»	430
11.23. Legge di Boyle e Charles .....	»	431
11.24. Leggi dei vapori .....	»	434
11.25. Legge di Dalton .....	»	437
11.26. Psicrometria e trasformazioni psicrometriche .....	»	444
11.27. Saturazione adiabatica .....	»	447
11.28. Temperatura del bulbo umido .....	»	448
11.29. Umidificazione con vapore .....	»	452
12. REGOLAZIONE		
12.1. Generalità .....	»	461
12.2. Controllo automatico .....	»	462
12.3. Nomenclatura della regolazione .....	»	462
12.4. Fasi di una regolazione .....	»	463
12.5. Teoria di base .....	»	465
12.5.1. Controllo <i>on-off</i> .....	»	466
12.5.2. Controllo continuo .....	»	469
12.5.2.1. Regolazione proporzionale .....	»	470
12.5.2.1.1. Azioni dello strumento (diretta, inversa) .....	»	476
12.5.2.1.2. Reset manuale .....	»	478
12.5.2.2. Regolazione proporzionale + integrale .....	»	479
12.5.2.3. Azione derivativa .....	»	481
12.6. Scelta degli strumenti .....	»	481
12.7. Ritardo .....	»	484
12.8. Controllo dinamico di un circuito .....	»	485
12.9. Sistema a circuito aperto .....	»	486
12.10. Sistema a circuito chiuso .....	»	488
12.11. Controllo di un singolo circuito .....	»	488
12.12. Controllo <i>multiloop</i> .....	»	491
12.13. Controllo a cascata .....	»	492
12.14. Principali sistemi di regolazione in relazione all'energia impiegata per il loro funzionamento ..	»	496
12.15. Regolazione autoazionata (alcuni modelli) .....	»	497
12.16. Valvole di regolazione per i regolatori autoazionati .....	»	505
12.16.1. Valvole a due vie normalmente aperte .....	»	505
12.16.2. Valvole a due vie normalmente chiuse .....	»	505
12.16.3. Valvole a tre vie miscelatrici o deviatrici .....	»	509



12.17. Regolazione autoazionata (applicazioni) .....	pag.	518
12.17.1. Vasca di un fluido con serpentino immerso (primario vapore saturo) .....	»	518
12.17.2. Vasca di un fluido con serpentino immerso (primario acqua surriscaldata) .....	»	522
12.17.3. Scambiatore di calore istantaneo con regolazione semplificata .....	»	523
12.17.4. Scambiatore di calore istantaneo con regolazione a norma di legge .....	»	524
12.17.5. Scambiatore di calore ad accumulo con regolatore termostatico (valvola miscelatrice)....	»	528
12.17.6. Scambiatore di calore ad accumulo con regolatore termostatico (valvola deviatrice) .....	»	529
12.17.7. Scambiatore di calore ad accumulo con regolatore termostatico (valvola deviatrice) per docce .....	»	530
12.17.8. Valvola a tre vie termostatica con sensore incorporato usata come equilibratrice .....	»	532
12.17.9. Valvola a tre vie termostatica con sensore incorporato usata in un compressore .....	»	533
12.17.10. Applicazione di un economizzatore d'acqua in un sistema di saldatura .....	»	534
12.18. Miscelatori termostatici .....	»	535
12.18.1. Sistema di regolazione e alimentazione docce .....	»	536
12.19. Riduttori di pressione autoazionati .....	»	538
12.20. Scelta del modello di riduttore pressione .....	»	544
12.21. Dimensionamento delle valvole di riduzione .....	»	545
12.22. Dimensionamento analitico di una valvola riduttrice .....	»	547
12.23. Vantaggi dell'uso di valvole riduttrici in parallelo .....	»	558
12.24. Regolazioni con controllo elettrico o pneumatico .....	»	562
12.24.1. Valvole di controllo .....	»	563
12.24.2. Valvole a due vie .....	»	564
12.24.3. Valvole con movimento rotatorio .....	»	568
12.24.4. Valvole a tre vie .....	»	571
12.24.5. Otturatori .....	»	578
12.24.6. Pompe .....	»	584
12.24.7. Corpi valvola .....	»	589
12.24.8. Attuatori elettrici, elettronici o pneumatici .....	»	592
12.24.9. Posizionatore .....	»	596
12.24.10. Trasduttori di segnale .....	»	598
12.24.11. Strumenti pneumatici .....	»	598
12.25. Fieldbus: la nuova frontiera della regolazione .....	»	604
13. GIUNTI DI DILATAZIONE, GUIDE E ANCORAGGI .....		
13.1. Compensatori di dilatazione .....	»	607
13.2. Evoluzione dei dilatatori .....	»	607
13.3. Modelli usati in termotecnica .....	»	613
13.3.1. Compensatori angolari e angolari sferici .....	»	615
13.3.2. Compensatori assiali .....	»	615
13.3.3. Compensatori assiali a spinta eliminata .....	»	616

13.4. Installazione di dilatatori e guide .....	pag.	622
13.4.1. Posizionare i compensatori e le guide .....	»	622
13.4.1.1. Guide .....	»	626
13.4.2. Calcolare con l'ausilio di formule e diagrammi le dilatazioni dei singoli tratti .....	»	629
13.4.3. Tabelle tecniche del costruttore per la scelta dei compensatori .....	»	633
13.4.4. Calcolo delle forze esercitate sui punti fissi e della pretensione .....	»	635
13.5. Indicazioni per la costruzione di alcuni tipi di punti fissi (ancoraggi) .....	»	640
14. RISPARMIO ENERGETICO E RECUPERO DI VAPORE DI FLASH		
14.1. Generalità .....	»	645
14.2. Ciclo economico di un impianto vapore .....	»	646
14.3. Risparmio di piccole aziende .....	»	647
14.4. Calcolo dispersioni dalle tubazioni rete vapore .....	»	651
14.5. Scambiatori istantanei.....	»	656
14.6. Batterie per il riscaldamento dell'aria .....	»	659
14.7. Cilindri .....	»	663
14.8. Presse .....	»	665
14.9. Linee di tracciamento .....	»	667
14.10. Pentole a doppio fondo.....	»	668
14.11. Vasche di trattamento superficiale .....	»	669
14.12. Controllo dei sali in caldaia .....	»	672
14.13. Funzionamento di un sistema di misura del TDS .....	»	673
Bibliografia .....	»	683

## PREMESSA

Il vapore è tradizionalmente associato alla prima rivoluzione industriale e alle locomotive, tuttavia anche ai nostri giorni questo fluido è una parte essenziale delle moderne tecnologie. Senza il vapore molte industrie, nonché la produzione di energia elettrica, il riscaldamento e alcuni tipi di trasporti avrebbero difficoltà a portare a termine il loro lavoro. Esso è infatti un formidabile mezzo per trasportare energia e calore, è economico, è sterile (quindi è preferito per processi alimentari, farmaceutici e ampiamente usato per la sterilizzazione negli ospedali, che usano il cosiddetto *vapore pulito*), non è dannoso per la salute e per l'ambiente e inoltre permette di ridurre gli spazi: uno scambiatore che utilizza come fluido primario il vapore, rispetto a uno che utilizza ad esempio l'acqua o l'olio diatermico, può ridurre la superficie di scambio fino a tre volte.

Oggi un obiettivo fondamentale non solo dell'industria è quello di avere la massima resa riducendo i consumi, le spese e l'inquinamento e rispettando in questo modo il protocollo di Kyoto<sup>1</sup>. È necessario quindi investire nelle nuove tecnologie messe a disposizione per un più razionale uso delle risorse. Uno degli scopi del presente lavoro è proprio quello di spiegare come il vapore possa rendere ciò possibile.

Va comunque precisato che anche le forme di distribuzione dell'energia alternative al vapore hanno dei vantaggi. La scelta di una forma piuttosto che di un'altra va sempre fatta in funzione delle applicazioni e del campo delle temperature richieste dalla produzione e deve essere confortata da una comparazione tra i vari fluidi e dall'esatta conoscenza del processo.

Il presente lavoro si articola in quattordici capitoli, i cui contenuti si possono sintetizzare nel seguente modo:

- capitolo 1: si tratta di un capitolo propedeutico al testo che offre un quadro generale delle unità di misura utilizzate in termodinamica;
- capitolo 2: è un'introduzione generale sul concetto di vapore e sulla sua struttura;
- capitolo 3: si analizzano i vari tipi di generatori di vapore e le loro strutture e composizioni;

<sup>1</sup> La legge 1 giugno 2002 n. 120, *Ratifica ed esecuzione del Protocollo di Kyoto alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici fatto a Kyoto l'11 dicembre 1997*, è pubblicata nella Gazzetta Ufficiale 19 giugno 2002, n. 142.

- capitolo 4: comprende un catalogo sintetico sulle tubazioni e le spiegazioni relative al loro dimensionamento;
- capitolo 5: spiega i pericoli legati alla presenza di aria negli impianti;
- capitolo 6: elenca i vari tipi di eliminatori d'aria e scaricatori di condensa, analizzando la loro capacità di risolvere i problemi di scambio termico;
- capitolo 7: dimostra il modo migliore per effettuare la scelta degli scaricatori;
- capitolo 8: chiarisce il concetto di scambio termico e dimostra l'importanza degli scambiatori di calore;
- capitolo 9: si occupa di serbatoi per la raccolta della condensa, di degasatori e dell'acqua di alimento della caldaia;
- capitolo 10: spiega come dimensionare i collettori e i separatori di condensa;
- capitolo 11: è dedicato all'umidificazione dell'aria e ai pericoli di diffusione della legionella;
- capitolo 12: tratta tutti gli aspetti legati alla regolazione e quindi al controllo della portata, della temperatura, della pressione, della velocità e del livello;
- capitolo 13: sintetizza alcuni tra i più diffusi giunti di dilatazione, le più importanti guide e diversi tipi di ancoraggi;
- capitolo 14: riassume tutto il contenuto del testo puntando l'attenzione in particolare sul risparmio energetico e sul recupero di vapore di *flash*.

Parte del materiale trae spunto da articoli pubblicati a firma dell'autore (talvolta congiunta con quella dell'ingegnere Alessandro Motti, recentemente scomparso) nelle riviste *TIS*, *L'installatore italiano*, *Domus Aurea – Bimestrale di informazione e cultura* – ANTA Associazione Nazionale Termotecnici e Aerotecnici, *Refrigeration World*, negli anni dal 2005 al 2008.

# 1. ALCUNE UNITÀ DI MISURA USATE IN TERMOTECNICA

## 1.1. NOTE SUL SISTEMA INTERNAZIONALE SI DELLE UNITÀ DI MISURA

Questo capitolo è una sintesi delle unità di misura utilizzate in termotecnica, nel quale sono inoltre riportate le principali formule impiegate nel testo. Una grandezza in fisica ha significato se per essa è stato definito un metodo di misura e se le è stata assegnata un'unità di misura chiamata *definizione operativa delle grandezze fisiche*<sup>1</sup>.

Il sistema internazionale delle unità di misura si compone di sette grandezze fondamentali e due supplementari:

- grandezze fondamentali:
  - unità di lunghezza: metro (m) = la distanza percorsa nel vuoto dalla luce nell'intervallo di tempo pari a 1/299 792 458 secondi;
  - unità di massa: kilogrammo (kg) = la massa del prototipo di platino (iridio depositato presso il Bureau International des Poids et Mesures di Sèvres);
  - unità di intervalli di tempo: secondo (s) = la durata di 9 192 631 770 oscillazioni della radiazione emessa dall'atomo di cesio 133 (<sup>133</sup>Cs);
  - unità di intensità di corrente elettrica: ampere (A) = la corrente elettrica costante che, fluendo in due conduttori rettilinei, paralleli, indefinitamente lunghi, di sezione circolare trascurabile, posti a distanza di un metro nel vuoto, determina tra essi una forza di  $2 \cdot 10^{-7}$  N per metro di conduttore;
  - unità di temperatura – kelvin (K)<sup>2</sup> = la frazione di 1/273,16 della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua;
  - unità di intensità luminosa: candela (cd) = l'intensità luminosa in una data direzione, di una sorgente

<sup>1</sup> Data una grandezza fisica si sceglie un campione per stabilire i criteri di confronto con la grandezza che si vuole misurare. Non è sempre necessario un campione per ogni grandezza, essendo tutte legate da relazioni che possono essere usate per definire i campioni delle grandezze derivate. Supponendo di avere il campione della lunghezza e del tempo immediatamente si definisce il campione della velocità. Le due grandezze campione si chiamano fondamentali, la terza è detta derivata.

<sup>2</sup> Il punto triplo d'acqua pura rappresenta una particolare combinazione di temperatura e pressione in cui ghiaccio, acqua e vapore possono, teoricamente, coesistere in equilibrio termodinamico.

te che emette una radiazione monocromatica di frequenza pari a  $540 \cdot 10^{12}$  Hz, la cui intensità energetica in quella direzione è di  $1/683$  W/sr;

- unità di quantità di sostanza: mole (mol)<sup>3</sup> = la quantità di sostanza di un sistema contenente tante unità elementari quanti sono gli atomi in 0,012 kg di carbonio 12 (<sup>12</sup>C).
- grandezze supplementari:
  - unità di angolo piano: radiante (rad) = l'angolo piano con vertice al centro della circonferenza che sottende un arco di lunghezza uguale al raggio;
  - unità di angolo solido: steradiano (sr) = l'angolo solido con il vertice al centro della sfera che sottende una calotta la cui area è uguale a quella di un quadrato con lati uguali al raggio della sfera.

I nomi di tutte le unità di misura SI sono comuni e devono essere scritti con iniziali minuscole e privi d'accenti, ma i simboli devono essere scritti con l'iniziale maiuscola se derivati da nomi propri (per esempio, ampere = A, volt = V, watt = W, joule = J, ma kilogrammo = kg). I simboli devono seguire i valori numerici e non devono essere seguiti dal punto fermo. È necessario interporre un punto a mezza altezza o uno spazio tra i simboli delle unità componenti (per esempio,  $1\text{J} = 1\text{N} \cdot 1\text{m}$  oppure  $1\text{J} = 1\text{N } 1\text{m}$ ) e il segno di frazione o una barra obliqua tra i simboli. È consigliabile suddividere le terne di cifre partendo dalla virgola (il punto nei testi di lingua inglese) con mezzo spazio.

## 1.2. ATTRIBUZIONE DELLE UNITÀ DI MISURA

Attribuire un'unità di misura alle varie grandezze ed esprimere queste unità di misura in termini di grandezze fondamentali porta ad associare alle equazioni che si definiscono per descrivere i vari fenomeni fisici, quindi alle equazioni che esprimono le leggi naturali, un'equazione parallela fra le unità di misura. Quando si inseriscono in una formula dei simboli che rappresentano grandezze fisiche, questi simboli descrivono grandezze che non sono commensurabili, in quanto vengono misurate con criteri di misura diversi: non ha senso equiparare una massa, che si misura in chilogrammi, e una lunghezza, che si misura in metri.

Quindi in un'equazione che descrive una legge fisica le unità di misura dei due termini che stanno ai lati opposti di un segno di uguale devono sempre essere identiche. Usare grandezze fondamentali, come massa lunghezza e tempo, e cercare di esprimere le unità di misura di tutte le altre grandezze in funzione di quelle serve a mantenere il controllo dimensionale delle equazioni, cioè a verificare se le grandezze si confrontano con grandezze che siano commensurabili dimensionalmente.

La tabella 1.1 rappresenta una lista dei sistemi fisici e ha lo scopo di dimostrare che la fisica si interessa di fenomeni che occupano un intervallo di dimensione di numerosi ordini di grandezza. Osservando la tabella si nota che i sistemi fisici rappresentati vanno dall'universo, che ha un diametro espresso in metri di  $10^{27}$ , alla terra il cui diametro nella stessa unità di misura è semplicemente di  $10^7$ . Il tempo di vita caratteristico è dell'ordine di  $10^{18}$  secondi e la massa rispettivamente di  $10^{53}$  per l'universo e di  $10^{25}$  per la terra.

La massa dell'universo è sterminata se confrontata con la massa delle piramidi che è  $10^{10}$  kg o con quella dell'elettrone che è di  $10^{-30}$  kg. I laser a raggi X, usati per la fusione nucleare, hanno lunghezze d'onda dell'ordine di  $10^{-8}$  m, scendendo fino alla fine della scala, dove si trova l'elettrone che ha una massa di  $10^{-30}$

<sup>3</sup> Quando si usa la mole, le entità elementari (atomo, molecole, ioni ecc.) devono essere specificate.

kg. Come è possibile osservare, le grandezze sono rappresentate da numeri potenze di dieci. Ciò è molto utile per avere immediatamente l'ordine di grandezza di una certa variabile fisica. Pensare in termini di ordine di grandezza è molto importante, perché è più facile valutare le intensità effettive e relative di varie parti del discorso.

Tabella 1.1. Ordine di grandezza di alcuni sistemi fisici

Sistema Fisico	Lunghezza (m)	Tempo (s)	Massa (kg)
Universo	$10^{27}$	$10^{18}$	$10^{53}$
Terra	$10^7$		$10^{25}$
Piramidi	$10^2$	$10^{12}$	$10^{10}$
Vita degli esseri umani	1	$10^9$	$10^2$
Battito del cuore umano	$10^{-1}$	1	$10^{-1}$
Laser (Fusione)	$10^{-8}$	$10^{-5}$	$10^{-14}$
Virus	$10^{-9}$	-	$10^{-20}$
Atomi	$10^{-12}$	$10^{-15}$	$10^{-25}$
Nuclei	$10^{-15}$	$10^{-21}$	
Elettroni	-	-	$10^{-30}$

Naturalmente, come è stato già detto, non ci sono solo grandezze fondamentali con dimensioni di tempo, lunghezza e massa. Nella tabella 1.2 sono elencate altre grandezze con i loro nomi, simboli, unità di misura e dimensioni.

Tabella 1.2. Nome e simbolo di alcune unità di misura

Nome	Simbolo	Nome unità	Simbolo unità	Dimensioni
Tempo (fondamentale)	$t$	secondo	s	T
Lunghezza (fondamentale)	$l$	metro	m	L
Massa (fondamentale)	$m$	chilogrammo	kg	M
Energia	$E$	joule	J	$ML^2T^{-2}$
Mole	$mol$	mole	-	n
Temperatura	$\vartheta$	grado Kelvin	K	$\vartheta$
Volume	$V$	metro cubo	$m^3$	$L^3$
Corrente elettrica	$I$	ampere	A	$CT^{-1}$
Forza	$F$	newton	N	$MLT^{-2}$
Velocità	$v$	-	m/s	$LT^{-1}$
Pressione	$\pi$	pascal	$N/m^2$	$ML^{-1}T^{-2}$
Carica elettrica	$q$	coulomb	C	C
Entropia	$S$	-	J/K	$ML^2T^{-2}$

### 1.3. SUDDIVISIONE DELLE UNITÀ DI MISURA

#### 1.3.1. Grandezze estensive

Per inserire le grandezze estensive a pieno diritto come variabili dinamiche nell'ambito di leggi che descrivono le proprietà di un processo fisico – e ne descrivono in particolare la dinamica – questa caratterizzazione non è sufficiente. Bisogna classificarle in una maniera più concettuale, che meglio ne descriva il ruolo che assumono nei processi fisici. In questo senso è molto importante suddividere le grandezze fisiche in due grandi blocchi, il primo di questi blocchi descrive grandezze che nel linguaggio fisico vanno sotto il nome di *quantità di*: quantità di moto, quantità di materia ecc. C'è un'intera classe di grandezze fisiche che si possono caratterizzare in questo modo. Questa classe di grandezze fisiche è caratterizzata sostanzialmente da due proprietà importanti. La prima proprietà è quella additiva: se la grandezza fisica che si sta considerando rappresenta globalmente un certo sistema fisico, la si può immaginare come suddivisibile o suddivisa effettivamente in parti. La grandezza complessiva è la somma di queste parti. Il volume, ad esempio, è una grandezza additiva estensiva: il volume complessivo si può immaginare come costituito da varie parti, di conseguenza il volume totale è la somma dei volumi di queste parti:

$$V = \sum_i v_i$$

e dividendo entrambi i membri per il volume totale  $V$  in un membro si ha:

$$\sum_i p_i = 1$$

dove le  $p_i$  descrivono il rapporto di due grandezze che si misurano con la stessa unità di misura.

Questo rapporto allora rappresenta una frazione e in quanto tale la frazione è un puro numero e non ha alcun bisogno di unità di misura. Se, infatti, la frazione di un volume complessivo può essere espressa con una percentuale, cioè con una frazione nel senso aritmetico del termine, non vi è alcun bisogno di dire con quale unità di misura si misura il volume complessivo o la grandezza complessiva. Grandezze di questo tipo, descritte in formula dal rapporto di due grandezze che hanno la stessa unità di misura, si chiamano *grandezze adimensionali*, proprio perché a esse non compete nessuna unità di misura.

Le grandezze adimensionali hanno un ruolo importantissimo nelle formule. Il fatto che esse siano estensive è importante, perché la suddivisione in parti può essere spinta finché si desidera, scomponendo il volume in parti sempre più piccole. Per questa ragione le grandezze di questo tipo contenute in un volume si possono rappresentare mediante una densità  $\delta$ , poiché si tratta di grandezze estensive, è possibile definire il rapporto fra la grandezza in questione e il volume che le contiene come densità:

$$\delta = Q/V$$

Ciò è molto utile nelle applicazioni, perché, se la grandezza  $Q$  (grandezza di quantità *di*) è uniformemente distribuita all'interno di questo volume, allora la densità è semplicemente una quantità costante che descri-



ve il rapporto  $Q$  su  $V$ , ma proprio l'estensività del volume della grandezza  $Q$  è quella che permette di definire una densità locale. Immaginando di spingere questa suddivisione delle parti del volume a porzioni piccolissime, addirittura infinitesime, è  $dQ$  che sta nel volume  $dV$  e nel punto in cui sta ha una densità definita da:

$$\delta = dQ/dV$$

Questa formulazione dà anche una definizione di densità come grandezza non uniforme.

La seconda proprietà importante di queste grandezze fisiche è il fatto di essere caratterizzate dall'aver associata una corrente. Esse quindi si portano dietro il concetto di corrente, corrente della stessa quantità: per esempio, la carica elettrica è una quantità di tipo estensivo e rappresenta la quantità di carica di un corpo associata alla corrente elettrica, che è la corrente della quantità di carica.

Questa nozione è generale e vale per tutte le grandezze di questo tipo. La corrente associata a una grandezza di questa natura è una quantità additiva che si differenzia dalla grandezza fisica originaria per un motivo fondamentale: mentre la grandezza fisica originaria è contenuta in un volume, la corrente descrive qualcosa che fluisce attraverso quel volume. La corrente associata a una certa grandezza è la quantità di quella grandezza che fluisce attraverso la superficie che racchiude il volume in cui quella grandezza sta nell'unità di tempo. Allora associando la quantità  $Q$  con la corrente si ha:

$$dQ/dt + S_Q = I_Q$$

Si ha così un volume che contiene la quantità  $Q$  e se all'interno di questo volume la grandezza fisica  $Q$  non rimane costante nel tempo significa che ne uscirà o entrerà – attraverso la superficie che delimita il volume – una certa quantità per unità di tempo  $I_Q$ . Questo ammontare per unità di tempo è la corrente. Esaminando la formula senza il termine  $S_Q$ , la corrente non è altro che il tasso per unità di tempo nel quale la grandezza  $Q$  fluisce attraverso la superficie di contorno del volume che contiene la quantità stessa. Il termine  $S_Q$  è una quantità che può essere creata o distrutta:

- $S_Q$  positivo = creazione;
- $S_Q$  negativo = distruzione;
- $S_Q$  nullo = conservazione.

Quanto detto definisce le grandezze estensive (quantità di) che hanno associata, oltre alla corrente, anche una grandezza di tipo intensivo.

### 1.3.2. Grandezze intensive

Le grandezze di tipo intensivo sono concettualmente diverse da quelle estensive, poiché sono grandezze locali e non definiscono una quantità che occupa spazialmente una regione estesa e finita. Si tratta di quantità la cui definizione è puntuale nello spazio, per cui anziché essere globali, com'è caratteristico delle grandezze del tipo *quantità di*, sono locali.

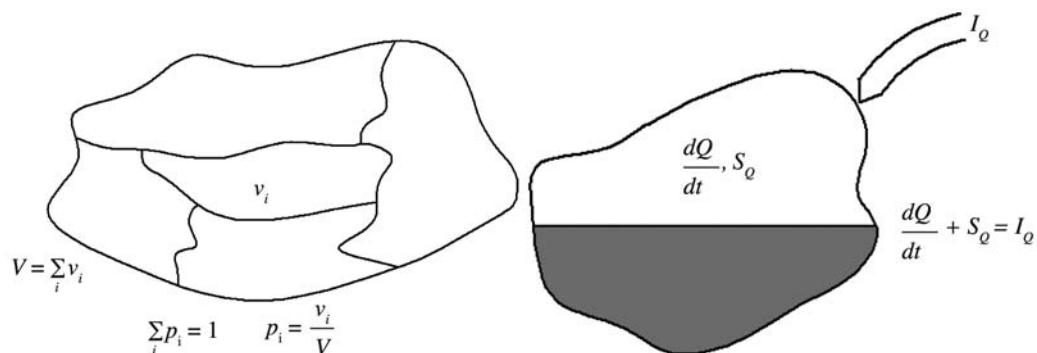


Figura 1.1  
Grandezze estensive  
e grandezze intensive

Tabella 1.3. Distinzione di alcune unità di misura in estensive e intensive

Unità estensive	Unità intensive
kg – chilogrammo	K – grado Kelvin
J – joule	A – ampere
mole	m/s (velocità)
m <sup>3</sup> – metro cubo	N/m <sup>2</sup> pascal
C – coulomb	-

Tabella 1.4. Prefissi per le unità di misura nel si

Nome	Simbolo <sup>1</sup>	Moltiplicare per
exa-	E-	1 000 000 000 000 000 000 = 10 <sup>18</sup>
peta-	P-	1 000 000 000 000 000 = 10 <sup>15</sup>
tera-	T-	1 000 000 000 000 = 10 <sup>12</sup>
giga-	G-	1 000 000 000 = 10 <sup>9</sup>
mega-	M-	1 000 000 = 10 <sup>6</sup>
kilo-	k-	1 000 = 10 <sup>3</sup>
etto-	h	1 00 = 10 <sup>2</sup>
deca-	da	10 = 10 <sup>1</sup>
deci-	d-	0,1 = 10 <sup>-1</sup>
centi-	c-	0,01 = 10 <sup>-2</sup>
milli-	m-	0,001 = 10 <sup>-3</sup>
micro-	μ-	0,000 001 = 10 <sup>-6</sup>
nano-	n-	0,000 000 001 = 10 <sup>9</sup>
pico-	p-	0,000 000 000 001 = 10 <sup>12</sup>
femto-	f-	0,000 000 000 000 001 = 10 <sup>15</sup>
atto-	a-	0,000 000 000 000 000 001 = 10 <sup>18</sup>

(1) Per evitare confusioni è consigliabile scrivere il prefisso per intero: m- potrebbe per esempio essere inteso come metro oppure a- come anno.

Anziché essere additive, quindi rappresentabili come somma delle diverse parti del volume che le contiene, sono tali che le loro differenze fungono da spinta: le grandezze intensive sono associate alle grandezze estensive nel senso che sono le grandezze che descrivono il modo con cui le suddette *quantità di* vengono trasferite da un punto all'altro dello spazio. Inoltre le grandezze intensive di tipo *spinta* sono abbinate fra loro: a ciascuna grandezza di tipo estensivo (*quantità di*) corrisponde una grandezza di tipo intensivo (*spinta*). Si tratta di un processo di corrispondenza uno a uno che in termini rigorosi si chiama *coniugazione*. Le grandezze cioè sono coniugate le une alle altre.

Le grandezze di tipo corrente sono anch'esse di tipo locale  $I_Q$  e fluiscono attraverso la superficie con densità di corrente  $J_Q$ . Per le grandezze di tipo corrente è allora conveniente definire una densità di corrente dato dal rapporto fra la corrente stessa  $I$  e l'area  $A$  attraverso cui fluisce:  $J_Q = I/A$ . Naturalmente, dato che la corrente è additiva come la quantità  $Q$  a cui essa si riferisce, anche per la corrente si può immaginare un processo per il quale si può suddividere l'area che racchiude il volume in tanti elementi e si può dunque attribuire a ciascuna di queste parti la corrente che fluisce attraverso quella parte stessa. Si può in questo modo dare alla densità di corrente una definizione di tipo differenziale:

Riesaminando la tabella 1.2 si può ipotizzare la tabella 1.3 che evidenzia quali grandezze sono intensive e quali sono estensive. La massa è estensiva perché un oggetto dotato di massa può essere suddiviso in tanti pezzi e la

Tabella 1.5. Grandezze utilizzate nella trasmissione del calore

Grandezza	Sistema SI		Sistema ST				Sistema I-P			
	Simbolo	Unità di misura	Simbolo	Unità di misura	Fattori di conversione		Simbolo	Unità di misura	Fattori di conversione	
					K <sup>(1)</sup>	1/K			K	1/K
Quantità di calore	Q	joule (J)	Q	kilocaloria (kcal)	0,2388 · 10 <sup>-3</sup>	4186,8	Q	BTU british thermal	0,9478 · 10 <sup>-3</sup>	1055,06
Spessore	s	metro (m)	s	metro (m)	1	1	s	pollice (in)	39,37	0,0254
Superficie	S	metro quadrato (m <sup>2</sup> )	S	metro quadrato (m <sup>2</sup> )			A	piede quadrato (ft <sup>2</sup> )	10,764	0,0929
Differenza di temperatura	Δt	kelvin (K)	Δt	grado centigrado (°C)			Δt	grado Fahrenheit (°F)	(2)	
Calore specifico	c	J/kg · K	c	kcal/kg · °C	0,2388 · 10 <sup>-3</sup>	4186,8	c	BTU/lbf · °F	0,2388 · 10 <sup>-3</sup>	4186,8
Conducibilità termica	L	W/m · K	L	kcal/m · h · °C	0,8605	1,1628	K	BTU/ft · h · °F	0,578	1,730
Coefficiente di trasmissione di una parete	K	W/m <sup>2</sup> · K	K	kcal/m <sup>2</sup> · h · °C			U	BTU/ft <sup>2</sup> · h · °F	0,176	5,677
Coefficiente parziale di trasmissione	α		α				h			
Coefficiente parziale di trasmissione interno	α <sub>i</sub>		α <sub>i</sub>				h <sub>i</sub>			
Coefficiente parziale di trasmissione esterno	α <sub>e</sub>		α <sub>e</sub>		h <sub>e</sub>					
Fattore di sporcameto	f	m <sup>2</sup> · K/W	f	m <sup>2</sup> · h · °C/kcal	1,1628	0,8605	f	ft <sup>2</sup> · h · °F/BTU	5,677	0,176

<sup>(1)</sup> Per passare dalle unità SI a quelle di altri sistemi, moltiplicare per K; inversamente moltiplicare per 1/K.

<sup>(2)</sup> °F = °C · 9/5 + 32; °C = °F · 5/9 - 32.

massa complessiva è la somma di queste parti. Estensive sono pure l'energia, la mole, il volume, la carica elettrica e l'entropia. Sono invece intensive la temperatura, la corrente elettrica, la velocità e la pressione. Queste sono accoppiate l'una all'altra per coniugazione: per esempio la temperatura è coniugata dell'entropia. Non c'è l'attribuzione di estensivo o intensivo alla lunghezza perché essa ha un doppio ruolo: può essere intesa, infatti, come volume di un oggetto unidimensionale o come quota.

### 1.3.3. Grandezze e unità di misura usate nei calcoli

È fondamentale a questo punto definire alcune grandezze e unità di misura usate nei calcoli:

- lavoro, energia, quantità di calore;
- quantità di energia trasferita nell'unità di tempo;
- massa;
- massa volumica;
- potenza;
- pressione;
- superficie;
- velocità;
- viscosità cinematica;
- viscosità dinamica.

#### LAVORO, ENERGIA, QUANTITÀ DI CALORE

---

L'unità di misura del lavoro, dell'energia e della quantità di calore nel SI è il joule (J). Un joule (1 J) è il lavoro compiuto dalla forza di 1 N quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 m nella direzione della forza:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$$

#### QUANTITÀ DI ENERGIA TRASFERITA NELL'UNITÀ DI TEMPO

---

La quantità di energia trasferita nell'unità di tempo si misura in kilojoule su secondo (kJ/s):

$$1 \text{ kJ} = 0,239 \text{ kcal} = 0,9478 \text{ BTU (energia calorifica)}$$

$$1 \text{ kJ/kg} = 0,239 \text{ kcal/kg} = 0,43 \text{ BTU/lb (misura dell'entalpia)}$$

#### MASSA

---

L'unità di misura della massa è il chilogrammo (kg). Un chilogrammo (1 kg) è la massa di 1 dm<sup>3</sup> di acqua distillata alla temperatura della sua massima densità (3,98 °C).

#### MASSA VOLUMICA

---

L'unità di misura della massa volumica nel SI è il chilogrammo su metro cubo (kg/m<sup>3</sup>). Essa rappresenta la grandezza definita dalla massa specifica riferita all'unità di volume di una sostanza.

POTENZA

L'unità di misura della potenza è il watt (W). Un watt (1 W) rappresenta la dissipazione di energia di un joule (1 J) in un secondo (1 s):

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} \qquad 1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} \qquad 1 \text{ Wh} = 3600 \cdot \text{J}$$

PRESSIONE

L'unità di misura della pressione nel SI è il pascal (Pa), ma esiste anche il bar. Un pascal (1 Pa) è la pressione esercitata dalla forza di un newton (1 N) applicata perpendicolarmente a una superficie di un metro quadrato (1 m<sup>2</sup>):

$$1 \text{ Pa} = \text{N/m}^2 = 10^{-5} \text{ bar} = 9,869 \cdot 10^{-6} \text{ atm (atmosfera fisica)} = 1,011978 \text{ at (atmosfera tecnica)}$$

$$1 \text{ bar} = 100.000 \text{ Pa}$$

SUPERFICIE

La superficie, più propriamente area di una superficie ( $A$ ), esprime il prodotto di due dimensioni: larghezza e lunghezza. La superficie, derivata dalla lunghezza, ha come unità di misura il metro quadrato (m<sup>2</sup>). È consigliabile non usare il simbolo  $a$  che potrebbe essere confuso con il simbolo dell'anno.

VELOCITÀ

La velocità rappresenta la lunghezza definita dal rapporto fra lo spazio (nel senso di distanza, lunghezza) e il tempo impiegato a percorrerlo ( $\text{m s}^{-1} = \text{m/s}$ ). Se  $s$  è lo spazio percorso nel tempo  $t$  la velocità è data da:

$$v = s/t \qquad (\text{m/s})$$

VISCOSITÀ DINAMICA

La viscosità dinamica  $\mu$  è la resistenza al flusso di massa dei fluidi (attrito) ed è misurabile in funzione della forza che è necessario applicare per conservare la differenza di velocità tra i due fluidi paralleli. L'unità di misura nel SI è  $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$  ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ) oppure  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ . È tollerato, in via transitoria, il centipoise (cP):

$$1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

VISCOSITÀ CINEMATICA

La viscosità cinematica  $\nu$  è data dal rapporto fra la viscosità dinamica e la massa specifica del fluido. Nel SI l'unità di misura corrispondente è il metro quadrato su secondo. È tollerato, in via transitoria, il centistokes (cSt):

$$1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

### 1.3.4. Grandezze e unità di misura concernenti il vapore

È necessario inoltre definire alcune grandezze e unità di misura concernenti il vapore:

- entalpia del liquido (calore sensibile);
- entalpia di evaporazione (calore latente);
- entalpia specifica del vapore saturo;
- entropia specifica del vapore saturo;
- pressione assoluta;
- pressione relativa;
- temperatura;
- titolo del vapore;
- volume specifico.

#### ENTALPIA DEL LIQUIDO (CALORE SENSIBILE)

---

Il calore sensibile è il calore necessario ad aumentare la temperatura dell'acqua fino a quella di ebollizione. Il termine *calore sensibile* è stato sostituito da *entalpia del liquido*, che indica la quantità di calore necessaria a fare aumentare la temperatura di 1 kg di acqua da 0 °C a quella di ebollizione (100 °C alla pressione atmosferica di 0 bar g).

Per fare ciò sono necessarie 100,1 kcal/kg (419,1 kJ/kg). Il simbolo che contraddistingue l'entalpia del liquido è  $h_f$ .

#### ENTALPIA DI EVAPORAZIONE (CALORE LATENTE)

---

Il calore latente è il calore necessario per trasformare l'acqua al suo punto di ebollizione in vapore. Il termine *calore latente* è stato sostituito con *entalpia di evaporazione*, cioè la quantità di calore necessaria per passare dallo stato liquido (acqua) a quello di gas (vapore). In questa trasformazione la temperatura non cambia. Per trasformare 1 kg di acqua a 100° C in 1 kg di vapore alla pressione atmosferica di 0 bar g occorrono 539,4 kcal/kg (2258,4 kJ/kg). Il simbolo che contraddistingue l'entalpia di evaporazione è  $h_{fg}$ .

#### ENTALPIA SPECIFICA DEL VAPORE SATURO

---

L'entalpia specifica del vapore saturo è l'energia totale del vapore ed è ottenuta sommando l'entalpia del liquido e quella dell'evaporazione. L'acqua alla pressione atmosferica di 0 bar g bolle a 100 °C e per fare ciò sono necessarie 100,1 kcal/kg (419,1 kJ/kg). Altre 539,4 kcal/kg (2258,4 kJ/kg) sono richieste per evaporare 1 kg di acqua a 100 °C. Quindi l'energia totale è  $100,1 + 539,4 = 639,5$  kcal/kg (2677,5 kJ/kg). Il simbolo utilizzato per indicare l'entalpia specifica del vapore saturo è  $h_g$ .

#### ENTROPIA SPECIFICA DEL VAPORE SATURO

---

L'entropia specifica del vapore saturo misura il grado di disponibilità di energia di un sistema. Definita in termini matematici *funzione di stato termodinamica*, il suo aumento fornisce una misura della quantità di energia di un sistema che ha cessato di essere disponibile per eseguire un lavoro in un determinato proces-

so. In un processo adiabatico l'entropia aumenta se esso è irreversibile, rimane invece costante se è reversibile. Quindi, poiché tutti i processi naturali sono irreversibili, in un sistema isolato l'entropia è sempre in aumento quando il sistema tende verso l'equilibrio.

È possibile anche definirla la grandezza termodinamica che misura il grado di disordine di un sistema fisico. Per un sistema chiuso e in condizioni di isolamento termico l'entropia descrive la naturale tendenza a evolvere verso uno stato di equilibrio termodinamico.

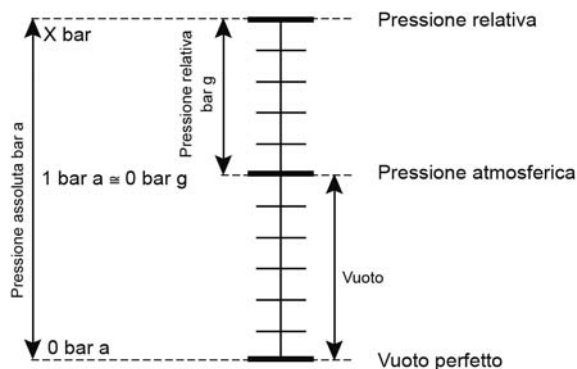
Pur avendo interesse scientifico, nella presente trattazione non è di pratico utilizzo. Il simbolo utilizzato per indicare l'entropia specifica del vapore saturo è  $s_g$ .

#### PRESSIONE ASSOLUTA

La pressione assoluta è la pressione del vapore misurata in un punto di vuoto assoluto. Il punto di riferimento è lo zero bar a. Come unità di misura si possono utilizzare: Pa, bar, kg/cm<sup>2</sup>. Il simbolo per indicare la pressione assoluta è  $P_a$ .

#### PRESSIONE RELATIVA

La pressione relativa è la pressione del vapore misurata nel punto dell'atmosfera prevalente ed è quindi data dalla pressione assoluta meno la pressione atmosferica. Come unità di misura si possono utilizzare: Pa, bar, kg/cm<sup>2</sup>. Il simbolo per indicare la pressione relativa è  $P$ .



La pressione relativa equivale a:  
pressione assoluta meno pressione atmosferica.

Figura 1.2  
Pressione assoluta  
e pressione relativa bar

#### TEMPERATURA

Nel sistema internazionale si la temperatura è accettata sia in °C che in K (il simbolo deve essere scritto senza °). Nelle equazioni termodinamiche è normalmente usato il K. Le due scale di temperatura hanno lo stesso incremento, ma nella scala assoluta (o Kelvin) 0 K corrispondono a - 273 °C, cioè la minima temperatura possibile di una sostanza quando tutti i movimenti molecolari e atomici sono cessati (figura 1.3). L'acqua quindi si trasforma in ghiaccio a 273 K = 0 °C e bolle alla pressione di 0 bar a 373 K = 100 °C. Il simbolo usato per indicare la temperatura è  $T$ .

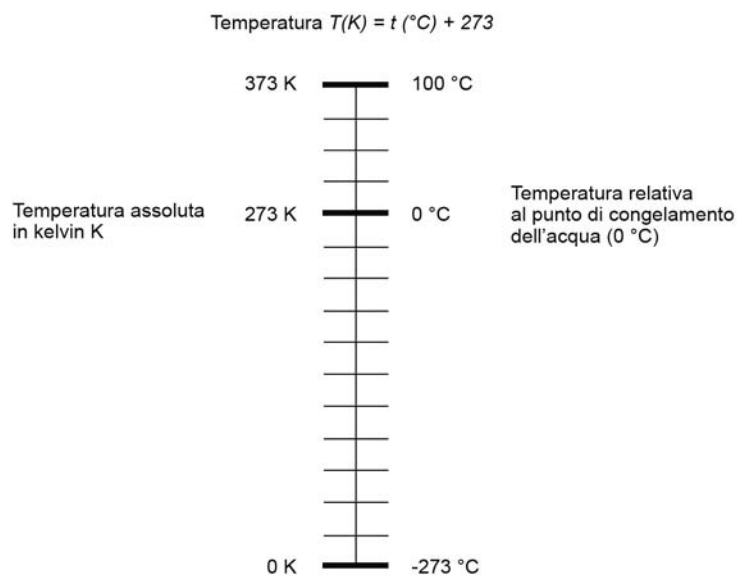


Figura 1.3  
Scale delle temperature

#### TITOLO DEL VAPORE

Nella realtà da un impianto a caldaie è impossibile ottenere vapore completamente secco, poiché il vapore generato contiene goccioline di acqua.

Ad esempio, se il vapore ha un contenuto d'acqua del 10% in peso, si dice che è secco al 90% e ha una frazione secca di 0,9. Quindi la vera entalpia di evaporazione (energia termica) del vapore non è il valore  $h_{fg}$  risultante dalle tavole, ma il prodotto della frazione secca  $x$  per  $h_{fg}$ .

#### VOLUME SPECIFICO

Il peso specifico (massa volumica) di una sostanza è dato dalla massa  $m$  per unità di volume  $V$  della sostanza. Il volume specifico  $v$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) è perciò l'inverso del peso specifico:

$$v = 1/\rho$$

#### 1.4. PUNTO TRIPLO DELL'ACQUA

Il punto triplo, d'acqua pura, rappresenta una particolare combinazione di temperatura e pressione in cui ghiaccio, acqua e vapore possono teoricamente coesistere in equilibrio termodinamico. La temperatura, in campo internazionale, è stata stabilita al punto fissato per la scala della temperatura assoluta di 273,16 K a una pressione di 0,006112 bar. Questa pressione è molto vicina al vuoto. Solamente alla temperatura e alla pressione su indicate questi tre stati dell'acqua possono esistere nella medesima fase. Qualora la pressione sia ulteriormente ridotta da questa temperatura, il ghiaccio anziché fondersi sublima direttamente in vapore.



Tabella 1.6. Unità del sistema internazionale SI e principali fattori di conversione (I)

Grandezza	Unità SI	Unità ST	Fattori di conversione <sup>(1)</sup>		Unità I-P	Fattori di conversione <sup>(1)</sup>	
			K	1/K		K	1/K
Lunghezza	m	m	1	1	in (inch)	39,37	0,0254
					ft (foot)	3,281	0,3048
Area	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	1	1	in <sup>2</sup> (square inch)	1550	0,000645
					ft <sup>2</sup> (square foot)	10,764	0,0929
Volume	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	1	1	ft <sup>3</sup> (cubic foot)	35,315	0,02832
Tempo	s	s	1	1	s (second)	1	1
		h	0,0002788	3600	hr (hour)	0,000277	3600
Velocità di rotazione	giro/s	giro minuto	60	0,01667	rpm (rev/min)	60	0,01667
Velocità	m/s	m/s	1	1	fpm (ft/min)	196,85	0,00508
Frequenza	Hz (hertz)	Hz (periodi/s)	1	1	Hz (cycle/sec)	1	1
Massa	kg	kg	-	-	lp (pound)	2,2046	0,4536
	g	g	-	-	gr (grain)	15,4324	0,0648
Massa volumica <sup>(3)</sup>	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	lb/ft <sup>3</sup>	0,06243	16,0167
Portata in massa <sup>(3)</sup>	kg/s	-	-	-	-	-	-
Forza peso <sup>(2)</sup>	N (newton)	kgf = kp (kg forza)	0,102	9,807	lbf (pound force)	0,2248	4,4482
Peso specifico <sup>(3)</sup>	-	kgf/m <sup>3</sup>	-	-	lbf/ft <sup>3</sup>	-	-
Portata in peso <sup>(3)</sup>	-	kgf/s	-	-	lbf/sec	-	-
Portata in volume	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /h	3600	0,000278	cfm (cubic ft/min)	2118,88	0,000472
	L/h	L/h	1	1	gpm (gallon/min)	0,0044	227,12
Momento di una forza <sup>(2)</sup>	N · m	kgf · m	0,102	9,807	kgf · ft	0,7375	1,356
Momento d'inerzia <sup>(2)</sup>	kg · m <sup>2</sup>	kgf · s <sup>2</sup> · m <sup>(4)</sup>	0,102	9,807	kgf · ft <sup>2</sup>	23,73	0,421

<sup>(1)</sup> Per passare dal sistema SI agli altri sistemi moltiplicare per K, viceversa moltiplicare per 1/K.<sup>(2)</sup> I fattori di conversione valgono solo dove l'accelerazione di gravità vale:  $g = 9,807 \text{ m}^2/\text{s}^2$  equivalenti a  $32,17 \text{ ft}/\text{sec}^2$ .<sup>(3)</sup> Il peso specifico e la portata in peso non sono contemplati nel SI; i loro valori numerici nel sistema tecnico corrispondono rispettivamente a quelli della massa volumetrica e a quelli della portata in massa del sistema SI.<sup>(4)</sup> Nel sistema tecnico è usato di preferenza il momento dinamico  $PD^2$  (kgf · m<sup>2</sup>). Il momento d'inerzia nel sistema SI risulta  $MR^2$  (kgf · m<sup>2</sup>) =  $PD^2/4$ . Nel sistema I-P (inch pound) è usato il fly wheel effect  $WR^2$  (lbf · ft<sup>2</sup>) =  $23,73 MR^2$ .

**Tabella 1.7. Unità del sistema internazionale si e principali fattori di conversione (II)**

Grandezza	Unità si	Unità st	Fattori di conversione <sup>(1)</sup>		Unità I-P	Fattori di conversione <sup>(1)</sup>	
			K	1/K		K	1/K
Pressione <sup>(2)</sup> (10 <sup>5</sup> Pa = 1 bar)	Pa = N/m <sup>2</sup>	kgf/m <sup>2</sup> = mmH <sub>2</sub> O	0,102	9,807	in · wg ( <i>inch of water</i> )	0,00401	249,09
		kgf/cm <sup>2</sup> = at	0,000102	98070	psi (lbf/in <sup>2</sup> )	0,000145	6895
		torr = mm Hg	0,0075	133,322	lbf/ft <sup>2</sup>	0,02088	47,886
Sollecitazione dei materiali	N/mm <sup>2</sup> = MPa	kgf/mm <sup>2</sup>	0,102	9,807	psi (lbf/in <sup>2</sup> )	145,05	0,00689
Lavoro, energia, calore, entalpia <sup>(2)</sup>	J	kgf · m	0,102	9,807	lbf · ft	0,7375	1,356
		Wh (wattora)	0,000278	3600			
		Cal (kilocaloria)	0,000239	4186,8	BTU ( <i>british thermal unit</i> )	0,0009478	1055,06
Potenza meccanica	W	CV (cavallo vapore)	0,00136	735,5	BHP ( <i>brake horse power</i> )	0,00134	745,7
Potenza elettrica	W	W	1	1	W	1	1
Potenza termica	W	Cal/h	0,8605	1,1628	BTU/hr	3,413	0,2930
Temperatura	K	K <sup>(3)</sup>	1	1	°R (Rankine)	1,8	0,5551
	°C	°C	1	1	°F (Fahrenheit) <sup>(3)</sup>	-	-
Entalpia massica (potere calorifero) <sup>(2)</sup>	J/kg	Cal/kgf	0,000239	4186,7	BTU/lbf	0,00043	2326
Trasmissione termica	W/(m <sup>2</sup> · K)	Cal/(m <sup>2</sup> · h · °C)	0,8605	1,1628	BTU/ft <sup>2</sup> · hr · °F	0,176	5,677
Calore specifico	J/(kg · K)	Cal/(kgf · °C)	0,000239	4186,8	BTU/(lbf · °F)	0,000239	4186,8
Viscosità dinamica <sup>(2)</sup>	Pa · s = N · s/m <sup>2</sup>	kgf · s/m <sup>2</sup>	0,102	9,807	lbf · sec/ft <sup>2</sup>	0,02088	47,876
		cP (centipoise)	1000	0,001			
Viscosità cinematica	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /s	1	1	ft <sup>2</sup> /sec	10,764	0,0929
		cSt (centistokes)	10 <sup>6</sup>	10 <sup>-6</sup>			

<sup>(1)</sup> Per passare dal sistema si agli altri sistemi moltiplicare per K, viceversa moltiplicare per 1/K.  
<sup>(2)</sup> I fattori di conversione valgono solo dove l'accelerazione di gravità vale: g = 9,807 m<sup>2</sup>/s equivalenti a 32,17 ft/sec<sup>2</sup>.  
<sup>(3)</sup> t (°C) = T (K) - 273,15; t (°C) = 5/9 [ t (°C) - 32 ]; t (°F) = 9/5 [ t (°C) + 32 ].

**Tabella 1.8. Unità di misura della pressione (I)**

Simboli	atm	at	bar	kgf/m <sup>2</sup>	baria	psi = lb/sq in
atm	1	1,03	1,01	1,03 · 10 <sup>4</sup>	1,01 · 10 <sup>6</sup>	14,70
at	0,968	1	0,981	10 <sup>4</sup>	9,81 · 10 <sup>5</sup>	14,22
bar	0,987	1,02	1	1,02 · 10 <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup>	14,504
baria	9,87 · 10 <sup>-7</sup>	1,02 · 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	1,02 · 10 <sup>-2</sup>	1	1,45 · 10 <sup>-5</sup>
kgf/m <sup>2</sup>	9,68 · 10 <sup>-5</sup>	0,0001	9,81 · 10 <sup>-5</sup>	1	98,07	1,42 · 10 <sup>-3</sup>
psi = lb/sq in	0,068	0,0703	0,0689	703	6,89 · 10 <sup>4</sup>	1
mH <sub>2</sub> O	0,0968	0,1	0,0981	9,81 · 10 <sup>4</sup>	9,81 · 10 <sup>4</sup>	1,422
mmHg	0,00132	0,00136	0,00133	13,59	1333,22	0,01934
mmH <sub>2</sub> O	0,000097	0,0001	0,000098	0,999592	98,06	0,001422
Pa = N/m <sup>2</sup>	9,87 · 10 <sup>-6</sup>	1,02 · 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	0,101937	10	1,45 · 10 <sup>-4</sup>
in H <sub>2</sub> O	0,002458	0,00254	0,002491	30,5 · 10 <sup>3</sup>	2490,9	0,036127
in Hg	0,033417	0,034529	0,03386	345,158	33860	0,491

1. Alcune unità di misura usate in termotecnica

Tabella 1.9. Unità di misura della pressione (II)

Simboli <sup>(1)</sup>	mH <sub>2</sub> O	mmH <sub>2</sub> O	mmHg	Pa = N/m <sup>2</sup>	in H <sub>2</sub> O	in Hg
atm	10,3	10333	760	101325	406,781	29,92
at	0,968	1	736	98062	393,681	28,97
bar	0,987	1,02 · 10 <sup>4</sup>	750	10 <sup>5</sup>	401,463	29,52
baria	1,02 · 10 <sup>-5</sup>	1,0102	7,50 · 10 <sup>-4</sup>	0,1	0,000401	2,95 · 10 <sup>-5</sup>
kgf/m <sup>2</sup>	0,001	1	0,0736	9,81	0,0394	28,98 · 10 <sup>-4</sup>
psi <sup>(2)</sup> = lb/sq in	0,703	703	51,68	6,89 · 10 <sup>3</sup>	27,7	2,038
mH <sub>2</sub> O	1	1000	73,6	9806	39,37	2,898
mmHg	0,01359	13,5959	1	133,322	0,535	0,03937
mmH <sub>2</sub> O	0,001	1	0,0736	9,806	0,039367	0,002896
Pa = N/m <sup>2</sup>	0,000102	0,101978	0,007501	1	0,004016	0,000295
in H <sub>2</sub> O	0,0254	25,4	1,868334	249	1	0,6736
in Hg	0,34529	345,2987	25,397	3386	13,5934	1

<sup>(1)</sup> atm = atmosfera fisica, at = atmosfera tecnica, bar = bar, baria = baria, kgf/m<sup>2</sup> = chilogrammo forza metro quadrato, psi = libra forza pollice al quadrato, mH<sub>2</sub>O = metro d'acqua, mm Hg = millimetro di mercurio, mm H<sub>2</sub>O = millimetro d'acqua, Pa = pascal, N/m<sup>2</sup> = newton metro quadrato, in H<sub>2</sub>O = pollice d'acqua, in Hg = pollice di mercurio.  
<sup>(2)</sup> 1 psi = 6,89476 kPa; 1 kPa = 0,145038 psi; 1MPa = 10 bar.

Tabella 1.10. Unità di misura della lunghezza

Simboli <sup>(1)</sup>	a.l.	Yd	m	mi	n mi <sub>UK</sub>	pc	ft	in
a.l.	1	1,03 · 10 <sup>16</sup>	9,46 · 10 <sup>15</sup>	5,88 · 10 <sup>12</sup>	5,11 · 10 <sup>12</sup>	3,06 · 10 <sup>-1</sup>	3,10 · 10 <sup>16</sup>	3,72 · 10 <sup>17</sup>
Yd	9,67 · 10 <sup>-17</sup>	1	0,91	5,68 · 10 <sup>-4</sup>	4,94 · 10 <sup>-4</sup>	2,96 · 10 <sup>-17</sup>	3	36
m	1,06 · 10 <sup>-16</sup>	1,09	1	6,21 · 10 <sup>-4</sup>	5,40 · 10 <sup>-4</sup>	3,24 · 10 <sup>-17</sup>	3,28	39,37
mi	1,70 · 10 <sup>-13</sup>	1,76 · 10 <sup>3</sup>	1609,342	1	8,69 · 10 <sup>-1</sup>	5,21 · 10 <sup>-14</sup>	5280	6,34 · 10 <sup>4</sup>
n mi <sub>UK</sub>	1,96 · 10 <sup>-13</sup>	2,03 · 10 <sup>3</sup>	1853	1,15	1	5,99 · 10 <sup>-14</sup>	6,08 · 10 <sup>3</sup>	7,29 · 10 <sup>4</sup>
pc	3,27	3,38 · 10 <sup>16</sup>	3,09 · 10 <sup>16</sup>	1,92 · 10 <sup>13</sup>	1,67 · 10 <sup>13</sup>	1	1,01 · 10 <sup>17</sup>	1,22 · 10 <sup>18</sup>
ft	3,22 · 10 <sup>-17</sup>	0,3333	0,3048	1,89 · 10 <sup>-4</sup>	1,65 · 10 <sup>-4</sup>	9,86 · 10 <sup>-18</sup>	1	12
in	2,68 · 10 <sup>-18</sup>	0,02778	0,0254	1,58 · 10 <sup>-5</sup>	1,37 · 10 <sup>-5</sup>	8,22 · 10 <sup>-19</sup>	0,0833	1

<sup>(1)</sup> Anno luce (a.l.), iarda (yd), metro (m), miglio (m), miglio marino (n mi<sub>UK</sub>), parsec (pc), piede (ft), pollice (in).

Tabella 1.11. Unità di misura della superficie

Simboli <sup>(1)</sup>	ac	a	b	ha	yd <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	in <sup>2</sup>
ac	1	40,47	4,047 · 10 <sup>31</sup>	0,4047	4840,33	4047	4,36 · 10 <sup>4</sup>	6,27 · 10 <sup>6</sup>
a	2,47 · 10 <sup>-2</sup>	1	10 <sup>30</sup>	10 <sup>-2</sup>	1,20 · 10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>	1,08 · 10 <sup>3</sup>	1,55 · 10 <sup>5</sup>
b	2,47 · 10 <sup>-32</sup>	10 <sup>-30</sup>	1	10 <sup>-32</sup>	1,20 · 10 <sup>-28</sup>	10 <sup>-28</sup>	1,08 · 10 <sup>-27</sup>	1,55 · 10 <sup>-25</sup>
ha	2,47	10 <sup>2</sup>	10 <sup>32</sup>	1	1,20 · 10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	1,08 · 10 <sup>5</sup>	1,55 · 10 <sup>7</sup>
yd <sup>2</sup>	2,07 · 10 <sup>-4</sup>	8,36 · 10 <sup>-3</sup>	8,36 · 10 <sup>27</sup>	8,36 · 10 <sup>-5</sup>	1	8,36 · 10 <sup>-1</sup>	9	1295,957
m <sup>2</sup>	2,47 · 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>28</sup>	10 <sup>-4</sup>	1,20	1	10,76	1,55 · 10 <sup>3</sup>
ft <sup>2</sup>	2,30 · 10 <sup>-5</sup>	9,29 · 10 <sup>-4</sup>	9,29 · 10 <sup>26</sup>	9,29 · 10 <sup>-6</sup>	0,1111	0,0929	1	143,9953
in <sup>2</sup>	1,594 · 10 <sup>-7</sup>	6,45 · 10 <sup>-6</sup>	6,45 · 10 <sup>24</sup>	6,45 · 10 <sup>-8</sup>	7,72 · 10 <sup>-4</sup>	6,45 · 10 <sup>-4</sup>	6,94 · 10 <sup>-3</sup>	1

<sup>(1)</sup> Acro (ac), ara (a), barn (b), ettaro (ha), iarda quadrata (yd<sup>2</sup>), metro quadrato (m<sup>2</sup>), piede quadrato (ft<sup>2</sup>), pollice quadrato (in<sup>2</sup>).

Tabella 1.12. Unità di misura della forza

Simboli <sup>(1)</sup>	dyn	kgf	lbf	N	ozf	pdl	tonf
dyn	1	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$2,25 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$	$3,60 \cdot 10^{-5}$	$7,23 \cdot 10^{-5}$	$10^{-9}$
kgf	$9,81 \cdot 10^5$	1	2,20	9,8062	35,2741	71,0594	$9,84 \cdot 10^{-4}$
lbf	$4,45 \cdot 10^5$	0,453592	1	4,45	16,0072	32,2464	$4,46 \cdot 10^{-4}$
N	$10^5$	0,102	0,2247	1	3,5971	7,2464	$10^{-4}$
ozf	$2,78 \cdot 10^4$	$2,84 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-2}$	0,278	1	2,0145	$2,79 \cdot 10^{-5}$
pdl	$1,38 \cdot 10^4$	$1,41 \cdot 10^{-2}$	$3,11 \cdot 10^{-2}$	0,138	0,4964	1	$1,39 \cdot 10^{-5}$
tonf	$9,96 \cdot 10^8$	$1,02 \cdot 10^3$	2238,2022	$9,96 \cdot 10^3$	35840	$7,21 \cdot 10^4$	1

<sup>(1)</sup> Dina (dyn), chilogrammo forza (kgf), libra forza (lbf), newton (N), oncia forza (ozf), poundal (pdl), tonnellata forza (tonf).

Tabella 1.13. Unità di misura della massa lineare

Simboli <sup>(1)</sup>	denier	drex	g/cm	kg/m	tex
denier	1	1,11	$1,11 \cdot 10^6$	$1,11 \cdot 10^{-7}$	0,111
drex	0,901	1	$10^{-6}$	$10^{-7}$	0,1
g/cm	$9,01 \cdot 10^5$	$10^6$	1	0,1	$10^5$
kg/m	$9,01 \cdot 10^6$	$10^7$	10	1	$10^6$
tex	9,01	10	$10^{-5}$	$10^{-6}$	1

<sup>(1)</sup> Denier (denier), drex (drex), grammi al centimetro (g/cm) chilogrammi al metro (kg/m), tex (tex).

Tabella 1.14. Unità di misura della massa volumica

Simboli	g/cm <sup>3</sup>	g/l	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>	ml/l
g/cm <sup>3</sup>	1	1.000	1	1.000	62,43	$10^6$
g/l	0,001	1	0,001	1	0,0624	1.000
kg/dm <sup>3</sup>	1	1.000	1	1.000	62,4	$10^6$
kg/m <sup>3</sup>	0,001	1	0,001	1	0,0624	1.000
lb/ft <sup>3</sup>	0,016	16,02	0,016	16,02	1	$1,60 \cdot 10^4$
ml/l	$10^{-6}$	0,001	$10^{-6}$	0,001	$6,24 \cdot 10^5$	1

<sup>(1)</sup> Grammi al centimetro cubo (g/cm<sup>3</sup>), grammi al litro (g/l), chilogrammi al decimetro cubo (kg/dm<sup>3</sup>), chilogrammi al metro cubo (kg/m<sup>3</sup>), grammi al litro (lb/ft<sup>3</sup>), milligrammi al litro (mg/l).

Tabella 1.15. Unità di misura del calore specifico

Simboli <sup>(1)</sup>	kJ/kg °C	kcal/kg K	BTU/lb °F
kJ/kg °C	1	0,239	0,239
kcal/kg °C	4,184	1	1
BTU/lb °F	4,184	1	1

<sup>(1)</sup> Altre unità: 1 BTU/lb °F = 4886,8 J/kg K; 1 J/kg K = 0,000239 BTU/lb °F

Tabella 1.16. Unità di misura della temperatura

Simboli	Celsius (°C)	Kelvin (K)	Fahrenheit (°F)	Reamur (°r)	Rankine (°R)
Celsius (°C)	1	$t^{\circ}\text{C} + 273,15$	$9/5 \cdot t^{\circ}\text{C} + 32$	$4,5 \cdot t^{\circ}\text{C}$	$9/5 \cdot t^{\circ}\text{C} + 491,67$
Kelvin (K)	$t\text{K} - 273,15$	1	$9/5 \cdot t\text{K} - 459,67$	$4/5 \cdot t\text{K} - 218,52$	$9/5 \cdot t\text{K}$
Fahrenheit (°F)	$5/9 \cdot (t^{\circ}\text{F} - 32)$	$5/9 \cdot t^{\circ}\text{F} + 255,37$	1	$4/9 \cdot (t^{\circ}\text{F} - 32)$	$t^{\circ}\text{F} + 459,67$
Reamur (°r)	$5/4 \cdot t^{\circ}\text{r}$	$5/4 \cdot t^{\circ}\text{r} + 273,15$	$9/4 \cdot t^{\circ}\text{r} + 32$	1	$9/4 \cdot t^{\circ}\text{r} + 491,67$
Rankine (°R)	$5/9 \cdot t^{\circ}\text{R} - 273,15$	$5/9 \cdot t^{\circ}\text{R}$	$t^{\circ}\text{R} - 459,67$	$4/9 \cdot t^{\circ}\text{R} - 218,52$	1

$t^{\circ}\text{C}$  = temperatura gradi Celsius,  $t\text{K}$  = temperatura gradi Kelvin,  $t^{\circ}\text{F}$  = temperatura gradi Fahrenheit,  $t^{\circ}\text{r}$  = temperatura gradi Reamur,  $t^{\circ}\text{R}$  = temperatura gradi Rankine.

Tabella 1.17. Unità di misura del coefficiente di trasmissione del calore

Simboli <sup>(1)</sup>	W/m <sup>2</sup> K	Kcal/m <sup>2</sup> h °C	BTU/ft <sup>2</sup> h °F
W/m <sup>2</sup> °C	1	0,86	0,17611
Kcal/m <sup>2</sup> h °C	1,163	1	0,204816
BTU/ft <sup>2</sup> h °F	5,678	4,882	1

<sup>(1)</sup> Conduttanza termica secondo il sistema SI (W/m<sup>2</sup> °C), conduttanza termica secondo il sistema SI Kcal/m<sup>2</sup> h °C, conduttanza termica secondo il sistema I-P (BTU/ft<sup>2</sup> h °F)

Tabella 1.18. Unità di misura della velocità

Simboli <sup>(1)</sup>	km/h	m/s	mi/h	kn	kn UK	ft/min	ft/s
km/h	1	0,278	0,621	0,54	0,54	54,7	0,911
m/s	3,6	1	2,24	1,94	1,94	197	3,28
mi/h	1,61	0,447	1	0,869	0,869	88	1,47
kn	1,85	0,514	1,15	1	1	101	1,69
kn UK	1,85	0,515	1,15	1	1	101	1,69
ft/min	0,0183	0,00508	0,0114	0,00987	0,00987	1	0,0167
ft/s	1,1	0,305	0,682	0,592	0,592	60	1

<sup>(1)</sup> Chilometri all'ora (km/h), metri secondo (m/s), miglia all'ora (mi/h), nodo internazionale (kn), nodo internazionale (kn UK), piedi al minuto (ft/min), piedi al secondo (ft/s).

Tabella 1.19. Unità di misura del flusso di calore

Simboli <sup>(1)</sup>	W/m <sup>2</sup>	Kcal/m <sup>2</sup> h	BTU/ft <sup>2</sup> h
W/m <sup>2</sup>	1	0,86	0,3175
Kcal/m <sup>2</sup> h	1,163	1	2,71
BTU/ft <sup>2</sup> h	3,154	3,69	1

<sup>(1)</sup> Giro al minuto (giro/min), giro al secondo (giro/s), radiante al secondo (rad/s).

Tabella 1.20. Unità di misura della viscosità cinematica

Simboli <sup>(1)</sup>	cSt	maSt	St	ft <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /s
cSt	1	0,000001	0,01	0,00001076	0,000001
maSt	100.000	1	10.000	10,7639	1
St	100	0,0001	1	0,00107639	0,0001
ft <sup>2</sup> /s	92.903	0,0929	929,03	1	0,092903
m <sup>2</sup> /s	1.000.000	1	10.000	10,76	1

<sup>(1)</sup> Centistokes (cSt), miriastokes (maSt), Stokes (St), viscosità cinematica secondo il sistema I-P (ft<sup>2</sup>/s), viscosità cinematica secondo il sistema SI (m<sup>2</sup>/s)

Tabella 1.21. Unità di misura della viscosità dinamica

Simboli <sup>(1)</sup>	cP	kg/m s	P	lb/ft s	kg/m <sup>2</sup> s
cP	1	0,001	0,01	0,000672	1,02 · 10 <sup>4</sup>
kg/m s	1.000	1	10	0,67199	0,102
P	100	0,1	1	0,0672	0,0208
lb/ft · s	1488,1	1,4881	14,881	1	0,151
kg/m <sup>2</sup> · s	9803	9,8	98,03	6,58	1

<sup>(1)</sup> Centipoise (cP), kilogrammi metri secondo kg/m s, poise (P), viscosità dinamica secondo il sistema I-P (lb/ft · s), viscosità dinamica secondo il SI (kg/m<sup>2</sup> · s).

Tabella 1.22. Unità di misura del volume (l)

Simboli	barile	bbl	gal UK	gal USA	yd <sup>3</sup>	l	m <sup>3</sup>	fl oz UK
barile	1	1,37	34,97	42	0,208	159	0,159	5,59 · 10 <sup>3</sup>
bbl	0,727	1	25,43	30,54	0,151	116	0,116	4,07 · 10 <sup>3</sup>
gal UK	2,86 · 10 <sup>-2</sup>	3,93 · 10 <sup>-2</sup>	1	1,2	5,95 · 10 <sup>-3</sup>	4,55	4,55 · 10 <sup>-3</sup>	160
gal USA	2,38 · 10 <sup>-2</sup>	3,27 · 10 <sup>-2</sup>	0,833	1	4,95 · 10 <sup>-3</sup>	3,79	3,79 · 10 <sup>-3</sup>	133,21
yd <sup>3</sup>	4,81	6,61	168,06	202,11	1	764,56	0,765	2,69 · 10 <sup>4</sup>
l	6,29 · 10 <sup>-2</sup>	8,65 · 10 <sup>-3</sup>	0,220	0,264	1,31 · 10 <sup>-3</sup>	1	10 <sup>-3</sup>	35,2
m <sup>3</sup>	6,29	8,65	219,97	264,20	1,31	10 <sup>3</sup>	1	3,52 · 10 <sup>4</sup>
fl oz UK	1,79 · 10 <sup>-4</sup>	2,46 · 10 <sup>-4</sup>	6,25 · 10 <sup>-3</sup>	7,51 · 10 <sup>-3</sup>	3,71 · 10 <sup>-5</sup>	2,84 · 10 <sup>-2</sup>	2,84 · 10 <sup>-5</sup>	1
fl oz USA	1,86 · 10 <sup>-4</sup>	2,56 · 10 <sup>-4</sup>	6,50 · 10 <sup>-3</sup>	7,81 · 10 <sup>-2</sup>	3,87 · 10 <sup>-5</sup>	2,96 · 10 <sup>-2</sup>	2,96 · 10 <sup>-5</sup>	1,04
ft <sup>3</sup>	0,178	0,245	6,22	7,48	3,70 · 10 <sup>-2</sup>	28,32	2,83 · 10 <sup>-2</sup>	9,97 · 10 <sup>2</sup>
pt	3,57 · 10 <sup>-3</sup>	4,91 · 10 <sup>-3</sup>	0,125	0,150	7,43 · 10 <sup>-4</sup>	0,568	5,68 · 10 <sup>-4</sup>	20
dry pt	3,47 · 10 <sup>-3</sup>	4,77 · 10 <sup>-3</sup>	0,121	0,146	7,21 · 10 <sup>-4</sup>	0,551	5,51 · 10 <sup>-4</sup>	19,39
liq pt	2,98 · 10 <sup>-3</sup>	4,09 · 10 <sup>-3</sup>	0,104	0,125	6,19 · 10 <sup>-4</sup>	0,473	4,73 · 10 <sup>-4</sup>	16,64
in <sup>3</sup>	10,31 · 10 <sup>-5</sup>	14,17 · 10 <sup>-5</sup>	3,60 · 10 <sup>-3</sup>	4,33 · 10 <sup>-3</sup>	2,14 · 10 <sup>-5</sup>	1,64 · 10 <sup>-2</sup>	1,64 · 10 <sup>-5</sup>	0,577
bu UK	0,229	0,315	8	9,31	4,76 · 10 <sup>-2</sup>	36,4	3,63 · 10 <sup>-2</sup>	1280
bu USA	0,220	0,305	7,75	9,31	4,61 · 10 <sup>-2</sup>	35,3	3,53 · 10 <sup>-2</sup>	1,24 · 10 <sup>3</sup>

Tabella 1.23. Unità di misura del volume (II)

Simboli <sup>(1)</sup>	fl oz USA	ft <sup>3</sup>	pt	dry pt	liq pt	in <sup>3</sup>	bu UK	bu USA
barile	5376	5,61	279,88	288,51	336	$9,70 \cdot 10^3$	4,37	4,51
bbl	$3,91 \cdot 10^3$	4,08	203,57	209,85	244,46	7056	3,18	3,28
gal UK	153,74	0,161	8	8,25	9,61	277,42	0,125	0,129
gal USA	128	0,134	6,66	6,87	8	231	0,104	0,107
yd <sup>3</sup>	$2,59 \cdot 10^4$	27	$13,46 \cdot 10^2$	$13,88 \cdot 10^2$	$16,16 \cdot 10^2$	$4,67 \cdot 10^4$	21,02	21,70
l	33,82	$3,53 \cdot 10^{-2}$	1,76	1,81	2,11	61,02	$2,75 \cdot 10^{-2}$	$2,84 \cdot 10^{-2}$
m <sup>3</sup>	$3,38 \cdot 10^4$	35,31	$1,76 \cdot 10^3$	$1,81 \cdot 10^3$	$2,11 \cdot 10^3$	$6,10 \cdot 10^4$	27,50	28,36
fl oz UK	0,961	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5,16 \cdot 10^{-2}$	$6,00 \cdot 10^{-2}$	1,73	$7,81 \cdot 10^{-4}$	$8,06 \cdot 10^{-4}$
fl oz USA	1	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$5,21 \cdot 10^{-2}$	$5,37 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-2}$	1,80	$8,13 \cdot 10^{-4}$	$8,39 \cdot 10^{-4}$
ft <sup>3</sup>	957,63	1	49,85	51,39	59,87	1728	0,779	0,804
pt	19,21	0,0201	1	1,03	1,20	34,66	0,0156	0,0161
dry pt	18,63	0,0195	0,970	1	1,16	33,62	0,0152	0,0156
liq pt	16	0,0167	0,833	0,858	1	28,86	0,0130	0,0134
in <sup>3</sup>	0,554	$5,79 \cdot 10^{-4}$	0,0289	0,0297	0,0346	1	$4,51 \cdot 10^{-4}$	$4,65 \cdot 10^{-4}$
bu UK	$1,23 \cdot 10^3$	1,28	64	66,00	76,89	$2,22 \cdot 10^3$	1	1,03
bu USA	$1,19 \cdot 10^3$	1,24	62,04	64	74,50	$2,15 \cdot 10^3$	0,969	1

<sup>(1)</sup> Barile (barile), barile asciutto (bbl), gallone USA (gal USA), gallone UK (gal UK), iarda cubo (yd<sup>3</sup>), litro (l), metro cubo (m<sup>3</sup>), oncia fluida UK (fl oz UK), oncia fluida USA (fl oz USA), piede cubo (ft<sup>3</sup>), pinta asciutta USA (dry pt USA), pinta liquida USA (liq pt USA), bushel UK (bu UK); bushel USA (bu USA).

## 2. VAPORE

### 2.1. GENERALITÀ

È un'introduzione generale sul concetto di vapore e sulla sua struttura; per capire cos'è il vapore si deve fare un cenno sulla struttura della materia. Una molecola è il più piccolo insieme di atomi aggregati da legami chimici, tale da mantenere tutte le proprietà chimiche della sostanza considerata, elemento o composto. Un elemento chimico è una sostanza pura costituita da un unico tipo di atomi che si distinguono da quelli degli altri elementi per il numero atomico. Un composto chimico è una sostanza formata da due o più elementi con un rapporto fisso tra di loro che ne determinano la composizione. Per esempio l'acqua è un composto chimico formato da idrogeno e ossigeno in rapporto di due a uno.

### 2.2. SOSTANZA PURA

La sostanza pura è una sostanza la cui composizione chimica non varia spazialmente nel sistema. All'interno della superficie di controllo che delimita il sistema si trova sempre la stessa composizione chimica. Quindi la sostanza pura può essere un elemento chimico o anche un composto, a patto che la composizione chimica si ripeta identicamente all'interno del sistema. Acqua, azoto, ossigeno e anidride carbonica sono sostanze pure (elementi o composti chimici).

Anche miscele di elementi e/o composti sono sostanze pure se la miscela è omogenea. Si può dunque estendere la limitazione. L'aria, per esempio, è una miscela gassosa formata da due elementi principali, azoto ( $N_2$ ) e ossigeno ( $O_2$ ), e altri elementi in quantità minori, ma può essere considerata una sostanza pura, poiché è una miscela omogenea.

### 2.3. FASI DI UNA SOSTANZA PURA

Le sostanze pure possono esistere in differenti fasi. A temperatura e pressione ambiente l'acqua è liquida, l'aria è un gas, l'alluminio è un solido. Ogni fase è caratterizzata da una sua struttura molecolare omogenea. Se nel sistema sono presenti più fasi, queste sono separate da superfici di confine ben identificabili. Questo significa che se si hanno più fasi nel sistema, si dovrà trovare una struttura molecolare omogenea all'interno di ciascuna delle fasi. Acqua e ghiaccio insieme costituiscono una sostanza pura bifasica (fase liquida e solida). Anche se la pressione  $p$  e la temperatura  $T$  sono uniformi, nel passaggio da una fase all'al-



tra le proprietà specifiche variano con discontinuità. Si immagini di avere un bicchiere contenente acqua liquida e ghiaccio, si può ragionevolmente ritenere che la pressione e la temperatura siano uniformi, ma nel passaggio dallo stato liquido a quello solido il volume specifico, l'energia interna specifica, il calore specifico e quant'altro variano con discontinuità.

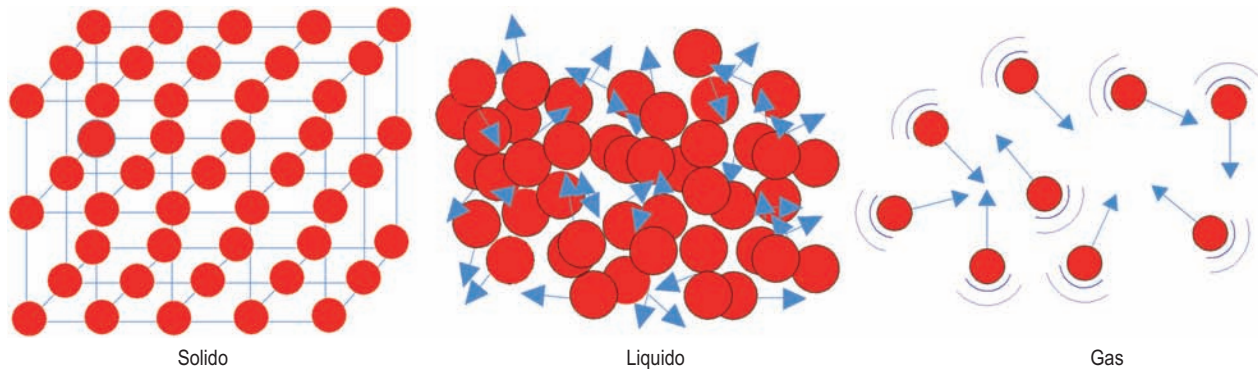


Figura 2.1  
Le tre fasi della materia

Lo stato liquido è uno stato d'aggregazione della materia avente caratteristiche intermedie tra quelle dello stato gassoso, caratterizzato da un grande disordine, e quelle dello stato solido, caratterizzato da un grande ordine. Infatti, le particelle che costituiscono lo stato liquido hanno un'energia cinetica minore di quella che è presente nelle molecole allo stato gassoso e forze intermolecolari maggiori.

Se si prende in considerazione ad esempio il volume specifico, è noto che il ghiaccio galleggia sull'acqua liquida, ciò significa che il suo volume specifico è diverso da quello dell'acqua liquida. Evidentemente nel passaggio da una fase all'altra il volume specifico cambia con discontinuità. Poiché cambia la struttura molecolare, cambia anche la proprietà specifica. Le proprietà intensive viceversa possono essere uniformi.

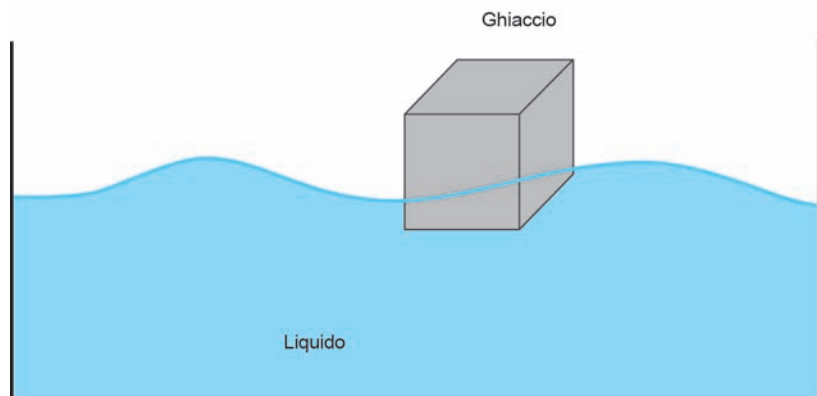


Figura 2.2  
Cubo di ghiaccio in una vasca d'acqua

La figura 2.3 è la rappresentazione spaziale della funzione che lega le due proprietà che si configurano come indipendenti: il volume specifico e la temperatura, riportate sugli assi  $v$  e  $T$ . Queste proprietà sono indipendenti rispetto alla pressione  $p$  che si configura invece come proprietà dipendente. Quindi è possibile, secondo un processo isobarico, immaginare la pressione, il volume specifico e la temperatura e riportarne i valori sulla superficie rappresentata. Che si tratta di una superficie è chiaro perché si è detto che il sistema semplice ha due gradi di libertà, nel senso che ha due proprietà che possono essere indipendenti (in questo caso  $v$  e  $T$ ) e in funzione dell'equazione di stato:

$$p = f(v, T)$$

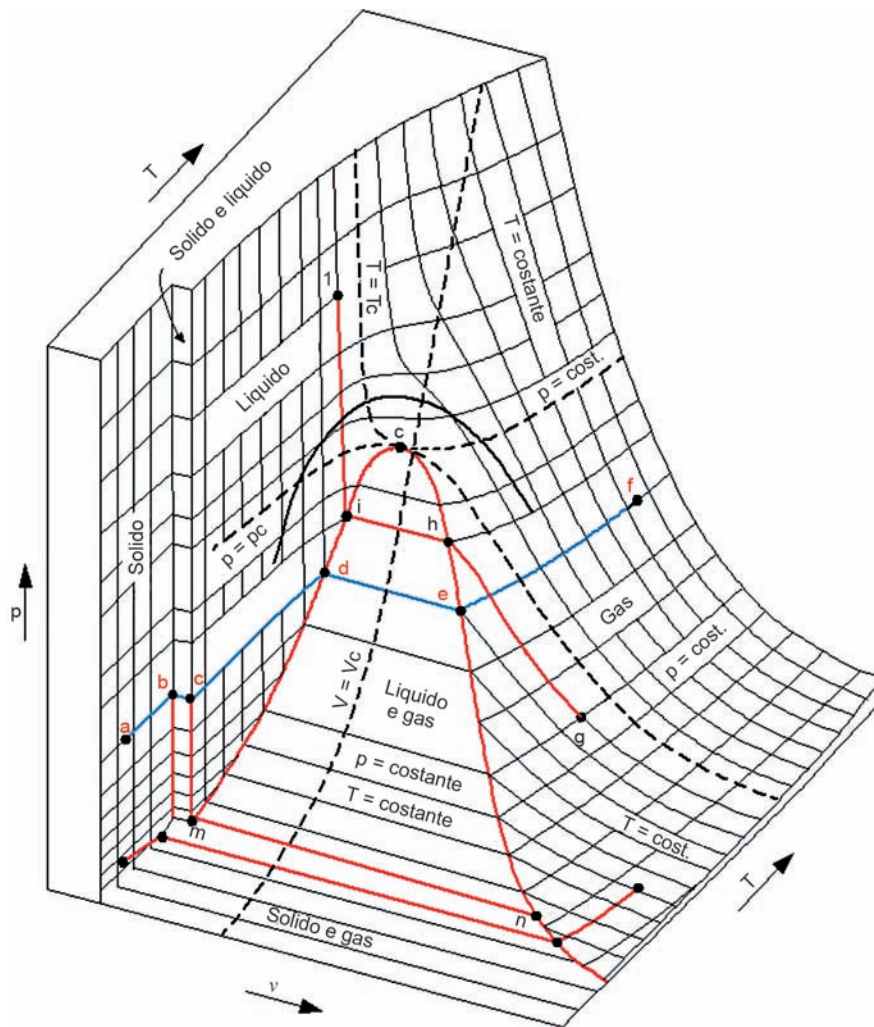


Figura 2.3  
Diagramma  $p, v, T$

## 2.4. STATO TERMODINAMICO DI EQUILIBRIO

Lo stato termodinamico di un sistema è costituito dall'insieme dei valori delle proprietà che lo caratterizzano. Ciò significa che, nel momento in cui si conoscono i valori delle proprietà, perché misurate direttamente o perché sono state calcolate, l'insieme dei valori delle proprietà del sistema danno la caratterizzazione del suo stato termodinamico.

Si parla di stato intensivo se le proprietà che descrivono il sistema sono intensive e/o specifiche e/o perché, come si è detto, le proprietà specifiche sono di fatto intensive. Si parla di stato estensivo se le proprietà che descrivono il sistema sono proprietà estensive. Un sistema chiuso è in equilibrio se non è soggetto a mutamenti in assenza d'interazione con l'ambiente (se per esempio è isolato da questo). In altre parole un sistema chiuso è in equilibrio se, una volta isolato, non intervengono mutamenti al suo interno e i valori delle sue proprietà rimangono identici nel tempo (il risultato delle misure macroscopiche delle proprietà non muta nel tempo se il sistema è in equilibrio).

Se in uno schizzo s'incontra la sigla MC, vuol dire che si sta studiando un sistema chiuso con l'approccio della massa di controllo: l'oggetto controllato è la massa che è all'interno del sistema e che, non potendo

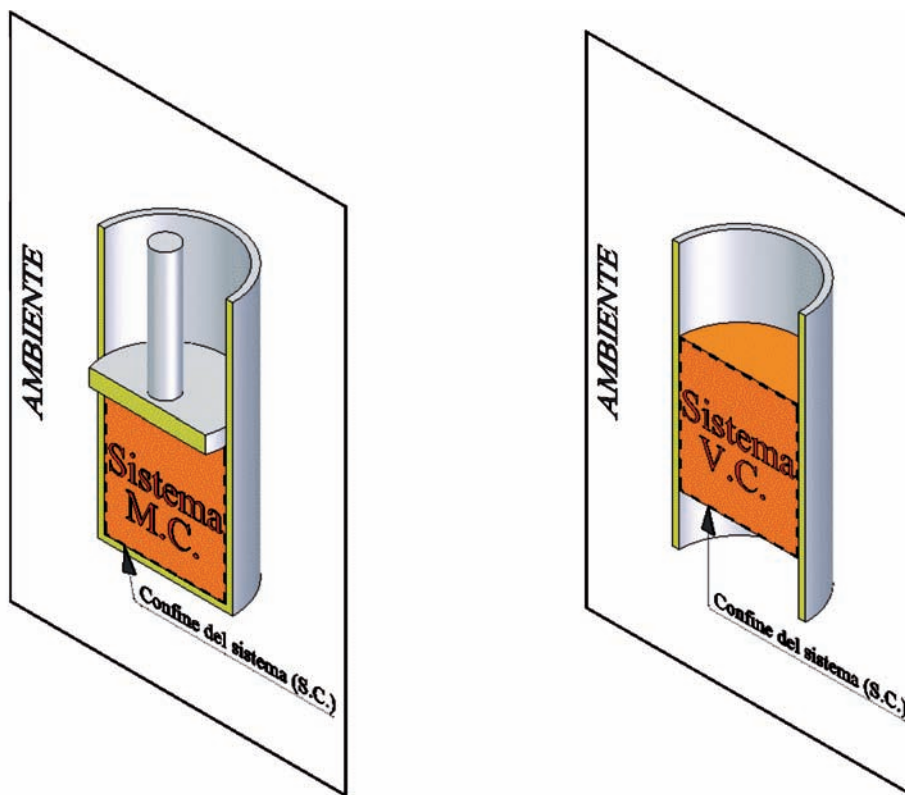


Figura 2.4  
Sistema chiuso (a sinistra) e sistema aperto (a destra)

uscire dai confini dello stesso, resta intrappolata e quindi controllata. I confini della MC possono essere mobili, consentendo così variazioni di volume. I confini della massa di controllo possono essere in parte o totalmente mobili e questo permette di avere variazioni di volume del sistema stesso. Un fluido contenuto in un cilindro-pistone è un sistema chiuso: il confine è individuato nella figura 2.4 con linee tratteggiate. La linea tratteggiata è la linea che definisce il sistema, cioè la superficie di controllo all'interno della quale c'è il sistema termodinamico chiamato MC. Questo sistema è chiuso perché le pareti del sistema si ritiene siano impermeabili ai flussi di materia. Si rileva inoltre che è possibile variare il volume del sistema spostando verso l'alto o verso il basso il pistone.

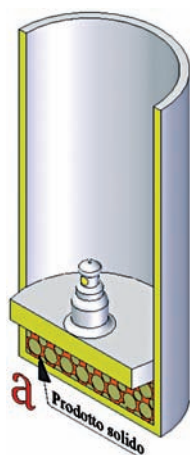


Figura 2.5  
Fase a

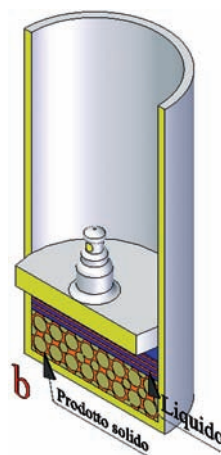


Figura 2.6  
Fase b

Considerando un sistema pistone-cilindro con della sostanza solida al suo interno, questo è lo stato termodinamico *a* (figura 2.5), segnato in rosso nel diagramma della figura 2.3. Il punto si ottiene misurando la temperatura e l'altezza del pistone rispetto al fondo del cilindro, che consente di misurare il volume specifico. Si immagina di avere inserito all'interno del sistema un chilogrammo di materia: la massa è nota e, misurato il volume, si conosce anche il volume specifico, mentre l'altezza è data dalla distanza che separa il pistone dal fondo del cilindro. Quindi le misure dirette di  $T$  e  $v$  consentono di creare un punto nel sistema di coordinate cartesiane nel piano  $(v, T)$  e, misurando la pressione, si può identificare lo stato *a*.

Nel punto *a* si deve produrre un riscaldamento isobarico mettendo sotto il cilindro una sorgente di energia termica che riscaldi il sistema in modo lento e graduale. Ciò consente di rappresentare i punti di equilibrio o quasi equilibrio nella superficie spaziale. Se si scalda un solido a pressione costante, la pressione costante è garantita, perché sopra il pistone vi è un peso costante e quindi la pressione esercitata dal sistema è costante nel tempo. Scaldando, il punto *a* si sposterà su un piano ortogonale all'asse delle  $p$  e la temperatura aumenterà. La variazione del volume specifico del solido è pressoché nulla, perché il solido ha una struttura molecolare tale che il riscaldamento isobarico lo fa variare poco. A questo punto accade un fatto importante: aumentando la temperatura nel punto *b* del diagramma inizia ad apparire la fase liquida, quin-

di in quel momento il sistema è bifasico (figura 2.6). Il punto *b* è quindi un punto limite tra la fase solida e la fase liquida. Nel diagramma è rappresentato da un rettangolo stretto, zona *b-c*. Continuando a fornire energia termica al sistema la parte solida sparirà e nel punto *c* ci sarà solamente liquido (figura 2.7).

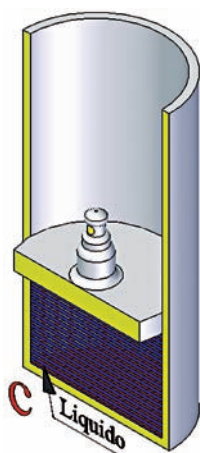


Figura 2.7  
Fase c

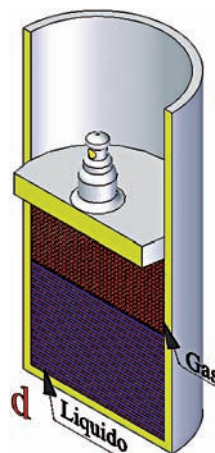


Figura 2.8  
Fase d

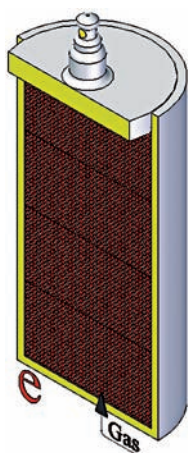


Figura 2.9  
Fase e

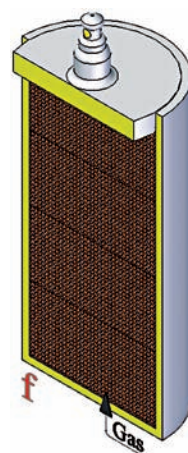


Figura 2.10  
Fase f

Il passaggio da fase solida in *b* a fase liquida in *c* è avvenuto gradatamente e a temperatura costante. Quando si ha la pressione costante e il processo è bifasico, la temperatura non può variare (in queste condizioni pressione e temperatura sono tra loro correlate).

Continuando a riscaldare, la temperatura riprende ad aumentare. Naturalmente il riscaldamento muoverà con valori crescenti della temperatura e per valori pressoché immutati del volume specifico (o di poco crescenti), perché anche il liquido è poco dilatabile per il riscaldamento isobarico. Si arriva quindi al punto *d*, nel quale inizia il passaggio dalla fase liquida a quella gassosa (figura 2.8).



Questo passaggio di fase è particolarmente importante, perché i sistemi termodinamici operano proprio in questa zona. Come è stato già osservato, quando il sistema è bifasico, pressione e temperatura sono tra loro correlate, quindi tutti gli stati bifasici si muoveranno parallelamente all'asse delle  $v$ , vale a dire a temperatura costante, e il punto  $d$  migrerà verso destra fino ad arrivare al punto in cui si sarà esaurito tutto il liquido e si troverà all'interno del sistema solo aeriforme. Il processo è rappresentato nella figura 2.9: nel cilindro ormai c'è solo gas, quindi si è vaporizzato tutto il liquido. Giunti a questo punto, continuando a riscaldare, il gas aumenta la propria temperatura, la linea si muove ancora verso temperature crescenti e il volume specifico comincia a variare con una certa consistenza, poiché l'aeriforme è tale che, se si riscalda a pressione costante, tende ad aumentare il volume specifico del sistema stesso raggiungendo il punto  $f$ . Il processo che va dalla fase  $a$  alla fase  $f$  è un processo di riscaldamento isobarico che può essere ottenuto nel modo appena descritto. Variando la pressione si potranno descrivere isobare come quella che va da  $a$  a  $f$  e l'insieme di tutte le isobare del diagramma, chiamato *superficie caratteristica della sostanza*, è rappresentato dalle coordinate  $v$ ,  $p$  e  $T$ .

## 2.5. PROCESSO DI COMPRESIONE

Si esamini brevemente il processo di compressione di un chilogrammo di materia partendo dalla zona gassosa (punto  $g$  del diagramma della figura 2.3). Il sistema pistone-cilindro è contenuto al di sopra di un termostato. Si tratta di una sorgente con capacità termica infinita, con un ottimo contatto tra il sistema e il termostato, e questo fa sì che la trasformazione avvenga a temperatura costante, cioè alla temperatura del termostato (figura 2.11).

Un gas, quando viene compresso, tende ad aumentare la sua temperatura. Non appena la temperatura inizia ad aumentare l'energia termica è trasferita verso il serbatoio, per cui la temperatura viene bloccata al valore stabilito. Ci si trova quindi nella zona gassosa e per compressione ci si muove lungo l'isoterma, pertanto il luogo dei punti si trova su un piano verticale, cioè su un piano che interseca normalmente l'asse delle  $T$ . Con la compressione la distanza intermolecolare del gas tende a diminuire, fino a quando si raggiunge il punto  $h$ , dove ha inizio il passaggio di fase (figura 2.12).

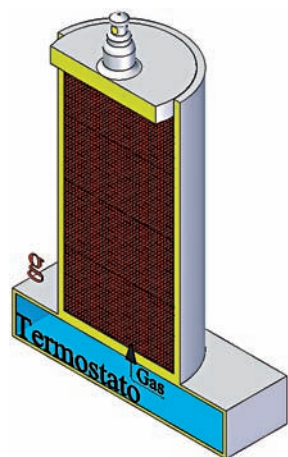


Figura 2.11  
Fase  $g$

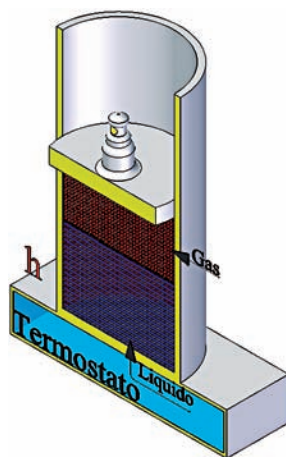


Figura 2.12  
Fase  $h$

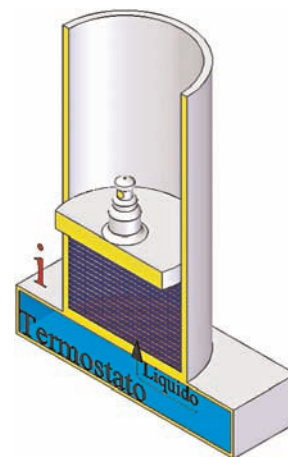


Figura 2.13  
Fase  $i$