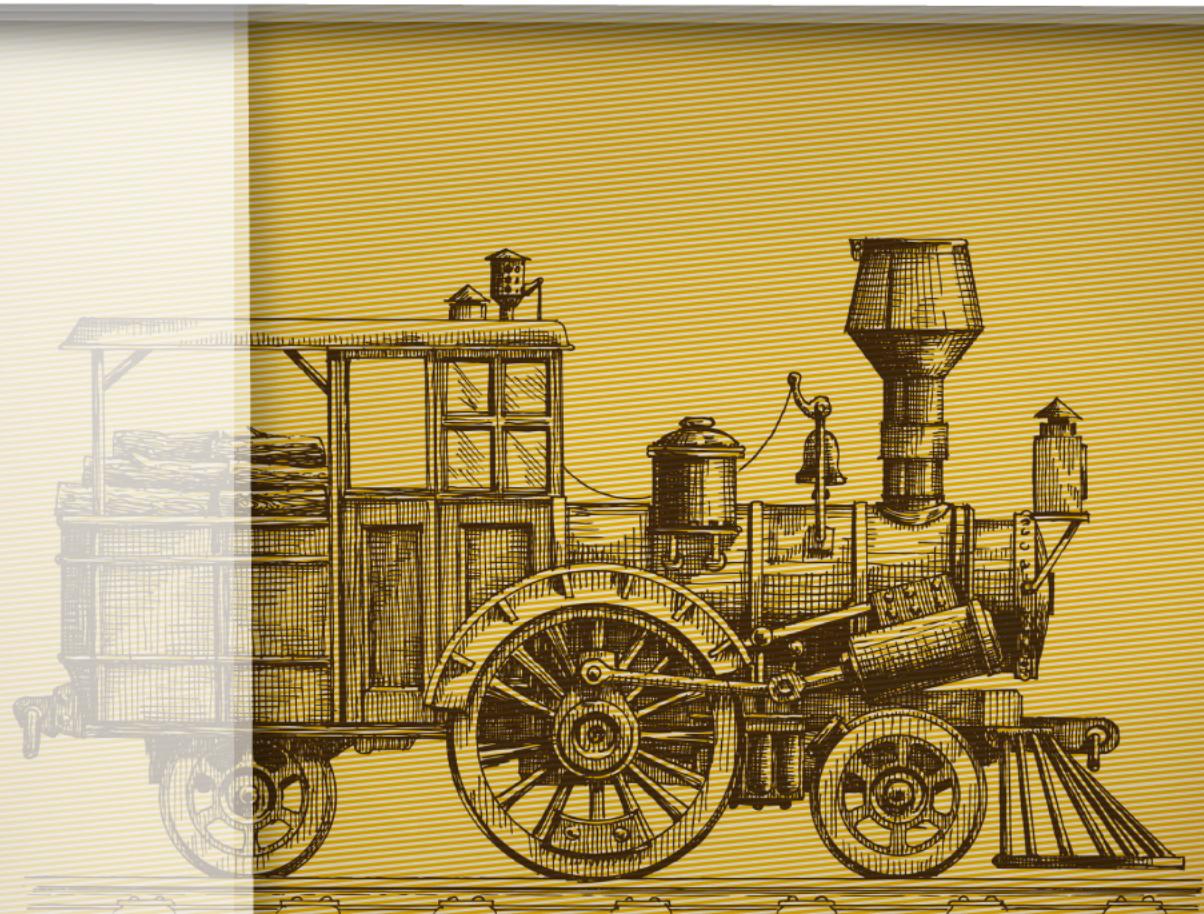


Comprende versione
ebook



Pierfrancesco Brunello

Lezioni di Fisica Tecnica



LEZIONI DI FISICA TECNICA

Pierfrancesco Brunello



LEZIONI DI FISICA TECNICA

Pierfrancesco Brunello

Copyright © 2017, EdiSES S.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
2021 2020 2019 2018 2017

Le cifre sulla destra indicano il numero e l'anno dell'ultima ristampa effettuata

*A norma di legge è vietata la riproduzione, anche parziale,
del presente volume o di parte di esso con qualsiasi mezzo.*

L'Editore

*L'Editore ha effettuato quanto in suo potere per richiedere
il permesso di riproduzione del materiale di cui non è titolare
del copyright e resta comunque a disposizione di tutti
gli eventuali aventi diritto.*

PIERFRANCESCO BRUNELLO - Professore ordinario – Università degli Studi di Padova –
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Progetto grafico e Fotocomposizione: Compomat s.r.l. – Configni (RI)

Stampato presso la
Print Sprint – Napoli

Per conto della
EdiSES S.r.l. – Piazza Dante, 89 – Napoli
Tel. 081/7441706-07 Fax 081/7441705

www.edises.it info@edises.it

ISBN 978 88 7959 943 6

A Patrizia, mia moglie

Questo testo si propone di offrire agli allievi ingegneri alcune conoscenze nel campo della *Fisica tecnica*, che consentiranno loro di affrontare, nel corso della futura attività professionale, numerosi problemi applicativi, in particolare nei settori dell'ingegneria industriale e civile.

Al tempo stesso, il lettore potrà anche rendersi conto del fatto che la conoscenza di questa disciplina risulta essenziale per comprendere ed interpretare correttamente vari fenomeni legati alla vita di tutti i giorni, dalla meteorologia alla cucina, dalla fotografia alla fisiologia.

Il nome *Fisica tecnica* non risulta di per sé esplicativo dei suoi contenuti ed induce ad una certa confusione con gli insegnamenti di *Fisica generale*, che gli studenti incontrano all'inizio del loro curriculum universitario nel campo dell'ingegneria.

In effetti, il termine *Fisica tecnica* trova pochi riscontri al di fuori del nostro paese e solo in alcune università di lingua tedesca si ritrova l'omologo *Technische Physik*. Altrove, gli insegnamenti fanno esplicito riferimento ai due principali ambiti che concorrono a formare la *Fisica tecnica*, cioè la *Termodinamica applicata* e la *Trasmissione del calore*, per cui è molto frequente incontrare i nomi *Thermodynamics* e *Heat Transfer* in inglese, *Thermodynamik* e *Wärme Übertragung* in tedesco, *Thermodynamique* e *Transfert de chaleur* in francese.

Da quanto appena detto, e soprattutto da quanto sarà esposto nei Capitoli che seguono, si evince quindi chiaramente che la disciplina si colloca a pieno titolo nel più ampio campo dell'*Energetica* civile e industriale, di cui costituisce la base e il fondamento.

Il nome *Fisica tecnica* presenta comunque dei vantaggi ed offre alcuni interessanti spunti di riflessione che consentono allo studente di affrontarne lo studio con maggiore consapevolezza e nella giusta prospettiva.

Per prima cosa, risulta evidente che si tratta di una disciplina che, pur affondando le sue radici nel campo della fisica, si differenzia dagli insegnamenti di *Fisica generale* perché si pone obiettivi di tipo tecnico e quindi prettamente ingegneristico.

Il riferimento all'ambito della fisica rende altresì evidente il fatto che anche nella *Fisica tecnica* gioca un ruolo centrale l'esperimento: tuttavia, pur con le dovute cautele, si può affermare che, mentre il fisico lo impiega per comprendere la natura dei fenomeni, l'obiettivo di fondo dell'ingegnere è quello di "progettare".

Senza dubbio, nell'immaginario collettivo la progettazione è l'attività che viene più spesso associata alla figura dell'ingegnere e sono molti gli studenti che, al termine delle scuole superiori, si iscrivono ad un corso di laurea in ingegneria con l'obiettivo di diventare dei progettisti, cioè delle figure professionali in grado di concepire, dimensionare e realizzare nuovi prodotti o nuovi processi produttivi.

A ben pensare, tuttavia, il concetto di "progettazione" è connaturato all'attività dell'ingegnere in una accezione anche più estesa e profonda di quella sopra esposta.

Infatti, dal punto di vista etimologico il termine progettare (dal latino *pro-iacere*, gettarsi in avanti) porta con sé il significato di proiettarsi verso il futuro, il che, in questo contesto, assume il duplice significato di prefigurare ciò che ancora non esiste, oppure di prevedere il comportamento di qualcosa che esiste già.

È quindi un progettista non solo chi disegna una nuova auto da competizione, ma anche chi ne prevede i consumi di carburante per ottimizzare i "pit-stop". Allo stesso modo, è un progettista sia chi dimensiona una turbina, un ponte strallato o un telefono cellulare, sia chi gestisce la manutenzione di un impianto, prevenendone i guasti.

Si tratta pertanto di acquisire la capacità di fare previsioni attendibili e non è un caso che un bravo ingegnere sia comunemente considerato una persona affidabile, perché "sa di cosa parla" (o almeno si spera...).

In mancanza di una sfera di cristallo, questa capacità previsionale non può che provenire dall'esperienza, ma purtroppo acquisire un congruo bagaglio di esperienza richiede due cose: da un lato il tempo di fare diverse prove e dall'altro la possibilità di commettere anche degli errori, inevitabili per distinguere le soluzioni idonee da quelle non idonee, con un approccio che gli anglosassoni chiamano “trial and error”.

Per quanto riguarda in particolare il fattore tempo, per fortuna non è necessario partire sempre da zero, perché l'esperienza può essere accumulata e tramandata tra successive generazioni di progettisti, utilizzando due tecniche diverse.

Un primo modo è quello di condensare l'esperienza pregressa in modelli canonici a cui attenersi per essere ragionevolmente sicuri di ottenere un risultato positivo: è un approccio molto cautelativo e conservativo che evita brutte sorprese, ma lascia poco spazio all'innovazione, a meno di non ammettere una nuova fase di sperimentazione con tutti i costi ad essa connessi. Ad esempio, per secoli generazioni di architetti e capomastri hanno costruito gli edifici nello stile romanico che garantiva risultati giudicati soddisfacenti; allorquando però si è voluto innovare introducendo lo stile gotico, prima di definire i nuovi canoni si è dovuto mettere assieme un nuovo bagaglio di esperienze e selezionare le soluzioni positive.

È evidente che oggi, in un mondo fortemente orientato all'innovazione, ma al tempo stesso giustamente rispettoso della vita umana e dell'ambiente, (oltre che attento al contenimento dei costi), un approccio progettuale di questo tipo risulta difficilmente proponibile.

Per fortuna, però, esiste anche un'altra strada che si è soliti far risalire a Galileo Galilei, anche se già nel V secolo a.C. il filosofo Anassagora parlava di “*ὄψις τῶν ἀδήλων τά φαντόμενα*”, cioè di “visione delle cose nascoste a partire da ciò che si vede”. È una strada basata anch'essa sull'esperienza, che però viene utilizzata in un modo diverso e più articolato di quello finalizzato alla creazione di modelli: si tratta infatti di individuare delle leggi di comportamento dei sistemi fisici, in base alle quali fare una previsione, cioè un “progetto”.

Con questo tipo di approccio si distinguono due ruoli diversi: da un lato si colloca chi osserva i sistemi fisici e ne estrapola le leggi di comportamento, dall'altro chi utilizzerà queste leggi per espletare la propria azione progettuale.

È importante osservare che l'esistenza di queste regole di comportamento risulta preziosa per consentire una previsione attendibile, poiché ciascuna di esse costituisce una sorta di “binario” che vincola l'evoluzione di un sistema e in tal modo contribuisce a renderlo prevedibile.

Per la formulazione di queste leggi risulta particolarmente agevole utilizzare il linguaggio matematico e non è un caso che proprio nei decenni successivi all'opera di Galileo la matematica abbia compiuto un grande balzo in avanti rendendo disponibili strumenti prima sconosciuti, ma molto adatti per perseguire i fini sopra esposti (in primis, il calcolo differenziale).

L'insegnamento della *Fisica tecnica*, così come di molte altre discipline ingegneristiche, risponde pienamente a questo tipo di impostazione: dapprima infatti vengono ricavate ed espresse in forma matematica alcune leggi che presiedono al comportamento dei sistemi fisici e poi si applicano questi strumenti previsionali per interpretare il comportamento di particolari sistemi di interesse tecnico.

Come si vedrà, tuttavia, in misura più accentuata che in altri campi, la *Fisica tecnica* mantiene ancor oggi un'impostazione fortemente legata all'esperimento e la formulazione matematica del risultato non richiede strumenti particolarmente raffinati, anche se è indispensabile avere ben chiaro il significato fisico associato ad alcuni concetti del calcolo differenziale.

Si tratta comunque di un approccio che risulta particolarmente formativo per l'allievo ingegnere, il quale ha la possibilità di mettere a frutto quanto appreso nelle materie di base,

ed al tempo stesso consente di esplicare un'attività progettuale rilevante e con immediati risvolti applicativi nel campo dell'energetica civile e industriale: infatti, non sono pochi infatti gli ingegneri che, in particolare nel campo termotecnico, hanno basato la loro attività professionale proprio sulla preparazione che hanno acquisito sui banchi dei corsi di *Fisica tecnica*.

Di qui l'auspicio che questo testo possa contribuire non solo a facilitare il superamento di un esame, ma soprattutto a consentire lo sviluppo della corretta “forma mentis” degli allievi ingegneri in un settore particolarmente delicato ed importante come quello energetico.

PRESENTAZIONE DEI CONTENUTI

Per agevolare lo studente nell'approccio alla *Fisica Tecnica* e soprattutto per acquisire una sorta di “buon senso” fisico-tecnico, è utile mettere in luce fin dall'inizio la successione degli argomenti trattati e la concatenazione logica che si instaura tra essi.

In conformità a quanto appena detto, l'insegnamento della *Fisica tecnica* si articola concettualmente in due parti principali: quella che fornisce gli strumenti progettuali (ovvero le leggi fisiche) e quella che li utilizza per interpretare il comportamento di particolari sistemi di interesse tecnico.

A sua volta, la parte che fornisce gli strumenti progettuali si può suddividere in tre sezioni.

La **prima sezione** riguarda le leggi fisiche propriamente dette e comprende i seguenti capitoli:

Cap. 1 I sistemi termodinamici

- i descrittori dello stato del sistema
- l'evoluzione di un sistema
- le interazioni tra un sistema e ciò che lo circonda (scambi di massa, di lavoro, di calore)
- la temperatura e la sua quantificazione

Cap. 2 Il bilancio di massa

- l'espressione differenziale
- la derivazione e l'integrazione

Cap. 3 Il bilancio energetico

- l'energia e le sue forme
- l'espressione differenziale
- la derivazione e l'integrazione

Cap. 4 L'equazione di Bernoulli generalizzata

- il moto fluido entro condotti
- i fenomeni di attrito viscoso nei condotti

Cap. 5 Il bilancio entropico

- le trasformazioni
- la reversibilità
- le macchine termiche e i vincoli al loro funzionamento
- l'espressione differenziale
- la derivazione e l'integrazione

La **seconda sezione** tratta anch'essa di vincoli esistenti per il comportamento dei sistemi, che tuttavia non costituiscono leggi fisiche in senso stretto, perché riguardano i legami intrinseci che esistono tra grandezze fisiche che ne descrivono lo stato. Questa seconda parte comprende quindi:

Cap. 6 Le relazioni costitutive e le loro proprietà

- la regola delle fasi
- il calore specifico e le equazioni di Maxwell

Cap. 7 Le relazioni costitutive in forma grafica

- la superficie $p-v-T$
- i diagrammi $p-v$ e $p-T$
- i diagrammi entropici $T-s$ e $h-s$
- il diagramma $p-h$

Cap. 8 Le relazioni costitutive in forma analitica

- il modello per i gas ideali
- il modello per le sostanze incomprimibili
- il modello per le miscele ideali di gas ideali

Cap. 9 Le reazioni chimiche e nucleari

- le reazioni chimiche e nucleari
- le reazioni di combustione
- la variazione di energia chimica
- la variazione di entropia

La **terza sezione** riguarda le leggi della trasmissione del calore: sono dunque anch'esse leggi fisiche, ma non potevano essere trattate nella prima sezione perché per la dimostrazione di alcune di esse è richiesta la conoscenza del modello del gas ideale e/o delle sostanze incomprimibili. Di tale sezione fanno parte i seguenti Capitoli:

Cap. 10 Lo scambio termico per conduzione

- il postulato di Fourier
- l'equazione generale della conduzione
- le soluzioni analitiche
- le soluzioni numeriche

Cap. 11 Lo scambio termico per convezione

- le correlazioni sperimentali
- le soluzioni numeriche

Cap. 12 Lo scambio termico per irraggiamento

- le grandezze caratterizzanti
- il comportamento dei materiali
- il modello di corpo nero
- il modello di corpo grigio
- il modello di *ray-tracing*

Cap. 13 Gli scambi termici combinati

- le temperature equivalenti
- l'addittanza superficiale
- la trasmittanza
- le superfici estese

Con il Capitolo 13 si completa la prima parte relativa gli strumenti previsionali e si può quindi passare alla loro applicazione ad un ampio ventaglio di casi di interesse tecnico dove tali strumenti possono dimostrare la propria valenza in termini di progettualità.

Cap. 14 Le trasformazioni elementari

- le trasformazioni in sistemi chiusi
- le trasformazioni in sistemi aperti

Cap. 15 I dispositivi di scambio termico

- le macchine volumetriche e le turbomacchine

Cap. 16 Compressori ed espansori volumetrici alternativi

- la tipologia degli scambiatori
- il metodo della differenza di temperatura media logaritmica
- il metodo dell'efficienza

Cap. 17 I cicli diretti

- i cicli a vapore
- i cicli a gas

Cap. 18 I cicli inversi

- i cicli a vapore
- i cicli a gas
- i cicli ad assorbimento

Nella trattazione di tali argomenti, in aggiunta alle classiche soluzioni analitiche, là dove opportuno verranno messe in luce anche le possibilità offerte da un approccio di tipo numerico, in modo da fornire all'allievo ingegnere una introduzione ai metodi di calcolo che stanno alla base dei modelli di simulazione computerizzata sempre più diffusi nella progettazione.

Completa la trattazione una sezione con tre appendici: l'**Appendice A** contiene alcuni cenni di metrologia e soprattutto le regole per il corretto impiego delle unità di misura, mentre l'**Appendice B** e l'**Appendice C** forniscono dati e diagrammi relativi ad alcuni fluidi di interesse applicativo.

Il volume si chiude con una sintetica **Bibliografia**, nella quale il lettore potrà trovare indicazioni utili per eventuali approfondimenti degli argomenti trattati.

RINGRAZIAMENTI

L'Autore desidera ringraziare il personale della Casa Editrice EdiSES e in particolare la dott.ssa Lucia Cavestri e il dott. Raffaele Spaccini, per la competenza e la professionalità dimostrate nella preparazione di questo volume.

PREFAZIONE

V

CAPITOLO 1 I SISTEMI TERMODINAMICI

1

1.1 L'INDIVIDUAZIONE DEL SISTEMA	1
1.2 GLI SCAMBI DI MASSA	3
1.3 GLI SCAMBI DI LAVORO	6
1.3.1 Lavoro di deformazione	7
1.3.2 Lavoro di torsione	11
1.3.3 Lavoro di deflusso	12
1.3.4 Lavoro delle forze di attrito	13
1.4 GLI SCAMBI DI CALORE	17
1.5 LA MISURA DELLA TEMPERATURA	21

CAPITOLO 2 IL BILANCIO DI MASSA

27

2.1 IL BILANCIO DI MASSA IN ASSENZA DI REAZIONI	27
2.1.1 Il bilancio di massa in forma derivata	28
2.1.2 Il bilancio di massa in forma integrata	29
2.2 IL BILANCIO DI MASSA IN PRESENZA DI REAZIONI	29
2.3 IL BILANCIO DELLA CARICA ELETTRICA	31

CAPITOLO 3 IL BILANCIO ENERGETICO

32

3.1 L'ENERGIA E LE SUE DIVERSE FORME	32
3.1.1 L'energia gravitazionale	33
3.1.2 L'energia elettrica	35
3.1.3 L'energia elastica	36
3.1.4 L'energia cinetica	37
3.1.5 L'energia interna	39
3.1.6 L'energia di legame chimico	40
3.1.7 L'energia di legame nucleare	41
3.1.8 Altre forme di energia	42
3.1.9 L'energia totale	42
3.1.10 Campi non conservativi	43
3.2 IL BILANCIO ENERGETICO	44
3.2.1 Alcuni casi particolari di bilancio energetico	50
3.2.2 Derivazione temporale del bilancio energetico	52
3.2.3 Integrazione analitica del bilancio energetico	53
3.2.4 Integrazione numerica del bilancio energetico	53

CAPITOLO 4 L'EQUAZIONE DI BERNoulli GENERALIZZATA

55

4.1 LA DEMOSTRAZIONE DELL'EQUAZIONE	55
4.2 L'ESPRESSONE DEL LAVORO DELLE FORZE DI ATTRITO NEL FLUIDO	59
4.3 LE PERDITE DI CARICO	62

CAPITOLO 5 IL BILANCIO ENTROPICO

63

5.1 LE CARATTERISTICHE DELLE TRASFORMAZIONI	63
5.2 LE TRASFORMAZIONI CICLICHE	64
5.3 LE MACCHINE TERMICHE	67
5.4 GLI ENUNCIATI DEL SECONDO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA	68
5.5 I CICLI DIRETTI E INVERSI	72
5.6 I PARAMETRI PRESTAZIONALI DELLE MACCHINE TERMICHE	73
5.6.1 Il rendimento di un motore	73

5.6.2 Il rendimento di una macchina frigorifera	74
5.6.3 Il rendimento di una pompa di calore	74
5.7 LA REVERSIBILITÀ DELLE TRASFORMAZIONI	75
5.8 IL TEOREMA DI CARNOT	77
5.9 LA TEMPERATURA TERMODINAMICA	79
5.10 IL RENDIMENTO MASSIMO DEI CICLI TERMODINAMICI	82
5.10.1 Il rendimento massimo di un motore	82
5.10.2 Il rendimento massimo di una macchina frigorifera	82
5.10.3 Il rendimento massimo delle pompe di calore	84
5.11 IL TEOREMA DI CLAUSIUS	85
5.12 LA FUNZIONE ENTROPIA	88
5.13 IL BILANCIO ENTROPICO	89
5.14 TRASFORMAZIONI DESCRITTE NELLE COORDINATE $T - S$	92
5.15 IL CICLO DI CARNOT	94
5.16 IL VERSO SPONTANEO DEGLI SCAMBI TERMICI	96
CAPITOLO 6 LE RELAZIONI COSTITUTIVE E LE LORO PROPRIETÀ	97
6.1 LA REGOLA DELLE FASI	98
6.2 RELAZIONI AUSILIARIE TRA VARIABILI DI STATO E LORO DERIVATE PARZIALI	101
6.2.1 Relazioni ausiliarie basate sulla definizione di grandezze di stato	101
6.2.2 Relazioni ausiliarie tra differenziali di grandezze di stato	102
6.2.3 Relazioni ausiliarie tra grandezze di stato e derivate parziali di grandezze di stato	102
6.2.4 Relazioni ausiliarie tra derivate parziali di grandezze di stato	104
6.3 CALORI SPECIFICI	106
6.3.1 Calore specifico a volume costante	108
6.3.2 Calore specifico a pressione costante	108
6.4 DETERMINAZIONE DELLE GRANDEZZE DI STATO NON MISURABILI DIRETTAMENTE	109
6.4.1 Determinazione delle variazioni di entropia	109
6.4.2 Determinazione delle variazioni di energia interna	110
6.4.3 Determinazione delle variazioni di entalpia	111
CAPITOLO 7 LE RELAZIONI COSTITUTIVE IN FORMA GRAFICA	112
7.1 LE RELAZIONI COSTITUTIVE PER LE SOSTANZE PURE	112
7.1.1 Il diagramma tridimensionale $p-v-T$ e le sue proiezioni $p-v$ e $p-T$	120
7.1.2 Il diagramma $T-s$	131
7.1.3 Il diagramma $h-s$	133
7.1.4 Il diagramma $p-h$	135
7.2 LE RELAZIONI COSTITUTIVE PER LE MISCELE	135
7.3 CONSIDERAZIONI SULLE POSSIBILITÀ DI IMPIEGO DEI DIAGRAMMI	137
CAPITOLO 8 LE RELAZIONI COSTITUTIVE IN FORMA ANALITICA	139
8.1 IL MODELLO DEI GAS IDEALI	139
8.1.1 La prima equazione di stato dei gas ideali	140
8.1.2 La seconda equazione di stato dei gas ideali	143
8.1.3 La terza equazione di stato dei gas ideali	145
8.1.4 La quarta equazione di stato dei gas ideali	146
8.1.5 La quinta equazione di stato dei gas ideali	146
8.1.6 La sesta equazione di stato dei gas ideali	146
8.1.7 Calori specifici dei gas ideali	147
8.1.8 Integrazioni delle equazioni di stato dei gas ideali ottenute in forma differenziale	149
8.1.9 Validità del modello di gas ideale	150

8.1.10 Diagrammi di stato per i gas ideali	152
8.1.11 Legame tra la temperatura termodinamica e la temperatura a gas ideale	154
8.2 IL MODELLO PER I GAS REALI	156
8.3 IL MODELLO PER LE SOSTANZE INCOMPRESSIBILI	159
8.3.1 La prima equazione di stato	160
8.3.2 La seconda equazione di stato	160
8.3.3 La terza equazione di stato	161
8.3.4 La quarta equazione di stato	161
8.3.5 Integrazioni delle equazioni di stato ottenute in forma differenziale	161
8.3.6 Validità del modello di sostanza incompressibile	162
8.4 RACCORDO TRA MODELLI E DIAGRAMMI DI STATO PER UNA SOSTANZA PURA	163
8.4.1 Liquido sottoraffreddato	163
8.4.2 Sostanza aeriforme	165
8.5 IL MODELLO PER LE MISCELE DI GAS IDEALI	166
8.5.1 Pressione parziale e volume parziale	166
8.5.2 Massa molare equivalente	168
8.5.3 Le variazioni di energia interna e il calore specifico a volume costante della miscela	169
8.5.4 Le variazioni di entalpia e il calore specifico a pressione costante della miscela	170
8.5.5 Il rapporto k della miscela	171
8.5.6 Le variazioni di entropia della miscela	171
8.5.7 La miscela aria secca	171
8.6 IL MODELLO PER LE MISCELE BINARIE GAS-VAPORE	173
8.6.1 Lo stato della miscela	174
8.6.2 Le variazioni dell'energia interna, dell'entalpia e dell'entropia della miscela	177
8.6.3 La miscela aria umida e il suo diagramma di stato	179
CAPITOLO 9 LE REAZIONI CHIMICHE E NUCLEARI	183
9.1 ASPETTI CHIMICI DELLA COMBUSTIONE	183
9.2 VARIAZIONE DI ENERGIA DI LEGAME E DI ENERGIA INTERNA	190
9.2.1 Il potere calorifico a volume costante	193
9.2.2 Il potere calorifico a pressione costante	195
9.2.3 Impiego del potere calorifico a volume costante e del potere calorifico a pressione costante	198
9.2.4 Il potere calorifico superiore e il potere calorifico inferiore	200
9.2.5 Valori indicativi dei poteri calorifici	205
9.3 VARIAZIONE DI ENTROPIA TRA PRODOTTI E REAGENTI	206
CAPITOLO 10 LO SCAMBIO TERMICO PER CONDUZIONE	207
10.3 IL POSTULATO DI FOURIER	209
10.2 L'EQUAZIONE GENERALE DELLA CONDUZIONE	210
10.3 PARETE PIANA IN REGIME STAZIONARIO SENZA GENERAZIONE INTERNA	214
10.4 PARETE CILINDRICA IN REGIME STAZIONARIO SENZA GENERAZIONE INTERNA	217
10.5 PARETE PIANA IN REGIME STAZIONARIO CON GENERAZIONE INTERNA	221
10.6 BARRA CILINDRICA IN REGIME STAZIONARIO CON GENERAZIONE INTERNA	223
10.7 METODI NUMERICI PER LO STUDIO DELLA CONDUZIONE TERMICA	224
10.8 VALORI DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA	229
10.9 ANALOGIA TRA LO SCAMBIO TERMICO CONDUTTIVO E IL TRASPORTO DI VAPORE NEI MATERIALI	231
10.10 FENOMENI DI CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE NELLE PARETI	234

CAPITOLO 11 LO SCAMBIO TERMICO PER CONVEZIONE	236
11.1 LA PREVISIONE DEI FENOMENI CONVETTIVI MEDIANTE METODI NUMERICI	237
11.2 LA PREVISIONE DEI FENOMENI CONVETTIVI MEDIANTE L'USO DI CORRELAZIONI	238
11.2.1 Il ruolo dello sperimentatore	239
11.2.2 Il ruolo dell'utilizzatore	245
11.3 LO SCAMBIO CONVETTIVO CON SOSTANZE PURE IN ASSENZA DI CAMBIAMENTO DI FASE	245
11.4 LO SCAMBIO CONVETTIVO CON SOSTANZE PURE IN PRESENZA DI CAMBIAMENTO DI FASE	251
11.5 LO SCAMBIO CONVETTIVO CON LA MISCELA ARIA UMIDA	254
11.6 VALORI INDICATIVI DEL COEFFICIENTE DI SCAMBIO CONVETTIVO CON SOSTANZE PURE	260
CAPITOLO 12 LO SCAMBIO TERMICO PER IRRAGGIAMENTO	261
12.1 GRANDEZZE CARATTERIZZANTI L'EMISSIONE	262
12.2 GRANDEZZE CARATTERIZZANTI LA RICEZIONE	267
12.2.1 Grandezze caratterizzanti la ricezione sulla superficie esterna del corpo	268
12.2.2 Grandezze caratterizzanti la ricezione all'interno del corpo	279
12.2.3 Grandezze caratterizzanti complessivamente un corpo in ricezione	284
12.3 IL MODELLO PER I CORPI NERI	287
12.3.1 Le leggi dei corpi neri	288
12.3.2 Lo scambio termico tra corpi neri	292
12.3.3 I fattori di forma per superfici lambertiane	293
12.4 IL COMPORTAMENTO DEI CORPI REALI	296
12.4.1 Il comportamento dei corpi reali in ricezione	296
12.4.2 Il comportamento dei corpi reali in emissione	307
12.4.3 Il comportamento del Sole	314
12.5 L'APPLICABILITÀ DEL MODELLO DI CORPO NERO	315
12.6 IL MODELLO DI SCAMBIO TERMICO PER I CORPI GRIGI	317
12.7 L'APPLICABILITÀ DEL MODELLO DEI CORPI GRIGI	320
12.7.1 Scambi termici tra due soli corpi grigi con temperature simili	322
12.7.2 Scambi termici tra corpi grigi con temperature molto diverse	324
12.8 IL MODELLO PER I CORPI OPACHI LAMBERTIANI	329
12.9 IL MODELLO DI "RAY TRACING MONTECARLO"	331
12.9.1 Ray tracing in assenza di corpi semitrasparenti	331
12.9.2 Ray tracing in presenza di corpi semitrasparenti	333
12.10 LA LINEARIZZAZIONE DEGLI SCAMBI RADIAZIVI	335
12.11 COMPORTAMENTO RADIAZIVO DELL'ATMOSFERA	337
12.11.1 Il buco dell'ozono	337
12.11.2 L'effetto serra	338
CAPITOLO 13 GLI SCAMBI TERMICI COMBINATI	344
13.1 LA COMBINAZIONE DEGLI SCAMBI TERMICI SUPERFICIALI	344
13.2 LA COMBINAZIONE DEGLI SCAMBI TERMICI NELLE INTERCAPEDINI	348
13.2.1 Intercapedini piane	348
13.2.2 Intercapedini cilindriche	350
13.3 LO SCAMBIO TERMICO GLOBALE	352
13.3.1 Lo scambio termico globale nel caso di pareti piane	352
13.3.2 Le pareti cilindriche	354
13.4 LE SUPERFICI ESTESE	357
13.5 I MATERIALI ISOLANTI	359
13.6 LA SIMULAZIONE DEGLI SCAMBI TERMICI COMBINATI MEDIANTE METODI NUMERICI	360

CAPITOLO 14 LE TRASFORMAZIONI ELEMENTARI	362
14.1 TRASFORMAZIONI IN SISTEMI CHIUSI	362
14.1.1 Trasformazioni isocore	363
14.1.2 Trasformazioni isobare	377
14.1.3 Trasformazioni isoterme	383
14.1.4 Trasformazioni isoentropiche	386
14.1.5 Espansioni e compressioni libere	392
14.2 MISCELAZIONI IN SISTEMI CHIUSI	393
14.2.1 Miscelazioni riguardanti la medesima sostanza	394
14.2.2 Miscelazioni riguardanti sostanze diverse	396
14.3 TRASFORMAZIONI ALL'INTERNO DI CONDOTTI IN REGIME STAZIONARIO	397
14.3.1 Trasformazioni isobare	397
14.3.2 Trasformazioni isoterme	402
14.3.3 Trasformazioni isoentropiche	406
14.3.4 Trasformazioni isoentalpiche	411
14.4 MISCELAZIONI ENTRO CONDOTTI IN REGIME STAZIONARIO	413
14.4.1 Miscelazioni adiabatiche riguardanti la medesima sostanza	414
14.4.2 Miscelazioni adiabatiche riguardanti gas ideali diversi	415
14.4.3 Miscelazioni con scambio termico	415
14.5 TRASFORMAZIONI POLITROPICHE	417
14.6 LEGAME ESISTENTE TRA LE TRASFORMAZIONI DEI SISTEMI APERTI E DEI SISTEMI CHIUSI	419
14.7 TRASFORMAZIONI IN SISTEMI IN REGIME VARIABILE	421
14.7.1 Sistemi a massa costante	421
14.7.2 Sistemi a massa variabile	422
CAPITOLO 15 I DISPOSITIVI DI SCAMBIO TERMICO	425
15.1 TIPOLOGIA DEGLI SCAMBIATORI DI CALORE	426
15.1.1 Scambiatori a flussi paralleli	427
15.1.2 Scambiatori a flussi incrociati	429
15.2 I METODI DI CALCOLO DEGLI SCAMBIATORI DI CALORE	434
15.2.1 Il metodo della differenza di temperatura media logaritmica	435
15.2.2 Il metodo dell'efficienza	442
15.2.3 La simulazione numerica (anche con cambiamento di fase)	445
CAPITOLO 16 COMPRESSORI ED ESPANSORI VOLUMETRICI ALTERNATIVI	448
16.1 COMPRESSORI VOLUMETRICI ALTERNATIVI	448
16.2 ESPANSORI VOLUMETRICI ALTERNATIVI	458
CAPITOLO 17 I CICLI DIRETTI	464
17.1 I MOTORI A VAPORE DI TIPO "ATMOSFERICO"	465
17.2 I MOTORI A VAPORE A CICLO RANKINE	467
17.2.1 Il ciclo Rankine semplice	467
17.2.2 Il ciclo Rankine con condensatore	471
17.2.3 Il ciclo Rankine con surriscaldamento	473
17.2.4 Adozione di espansori alternativi a più stadi e di turboespansori	474
17.2.5 Il ciclo Rankine con risurriscaldamento	475
17.2.6 I cicli Rankine con rigenerazione	477
17.2.7 I cicli Rankine adottati nelle moderne centrali termoelettriche	483
17.2.8 I cicli Rankine con cogenerazione	485
17.3 I MOTORI A GAS A CICLO STIRLING	486
17.4 I MOTORI A GAS A CICLO OTTO	492

17.5 I MOTORI A GAS A CICLO DIESEL	500
17.6 I MOTORI A GAS A CICLO MISTO	505
17.7 I MOTORI A GAS A CICLO BRAYTON – JOULE	506
17.7.1 Il ciclo Joule	506
17.7.2 Il ciclo Brayton	508
17.7.3 Il ciclo turbogas	509
17.8 I MOTORI A GAS A CICLO LENOIR	522
CAPITOLO 18 I CICLI INVERSI	525
18.1 IL CICLO INVERSO A COMPRESSIONE DI VAPORE	525
18.1.1 Il ciclo semplice	526
18.1.2 Il ciclo con scambiatore rigenerativo	532
18.1.3 Il ciclo con separatore di liquido	533
18.1.4 I cicli in cascata	535
18.1.5 I fluidi impiegati nei cicli inversi a compressione di vapore	537
18.2 IL CICLO INVERSO A COMPRESSIONE DI GAS	540
18.2.1 Il ciclo chiuso	541
18.2.2 Il ciclo ad aria per la climatizzazione degli edifici	545
18.2.3 I cicli per la climatizzazione ambientale nel settore aeronautico	548
18.2.4 La regolazione dei cicli per la climatizzazione ambientale	550
18.3 IL CICLO STIRLING INVERSO	550
18.4 I CICLI INVERSI DI TIPO TRITERMICO	551
18.4.1 Le macchine tritermiche di tipo combinato	551
18.4.2 Le macchine ad assorbimento	553
APPENDICE A LA QUANTIFICAZIONE DELLE GRANDEZZE	556
A.1 LA CLASSIFICAZIONE DELLE GRANDEZZE IN BASE ALLA LORO MISURABILITÀ	556
A.2 I SISTEMI DI UNITÀ DI MISURA	558
A.3 IL PROCESSO DI ARMONIZZAZIONE DELLE UNITÀ DI MISURA	559
A.4 IL SISTEMA INTERNAZIONALE DI UNITÀ DI MISURA	561
A.4.1 Le grandezze fondamentali e le loro unità	561
A.4.2 Le principali unità derivate	562
A.4.3 Multipli e sottomultipli delle unità di misura	563
A.4.4 Unità ammesse in particolari ambiti scientifici, tecnici e commerciali	564
A.4.5 Regole per l'uso corretto delle unità di misura	564
A.5 ALTRE UNITÀ ESTRANEE AL SISTEMA INTERNAZIONALE	567
APPENDICE B PROPRIETÀ DEL VAPOR D'ACQUA SATURO	569
APPENDICE C DIAGRAMMI DI STATO DI ALCUNI FLUIDI	575
C.1 DIAGRAMMA T - S DELL'AMMONIACA	575
C.2 DIAGRAMMA T - S DELL'ANIDRIDE CARBONICA	576
C.3 DIAGRAMMA T - S DELL'OSSIGENO	577
C.4 DIAGRAMMA H - S DELL'ACQUA	578
C.5 DIAGRAMMA P - H DEL R134A	579
C.6 DIAGRAMMA P - H DEL R410A	580
BIBLIOGRAFIA	581
INDICE	583

IL BILANCIO ENTROPICO

In aggiunta ai bilanci di massa e di energia esaminati nei Capitoli precedenti, i sistemi fisici devono soddisfare un terzo bilancio, relativo alla grandezza *entropia*.

Si tratta di una grandezza con la quale il grande pubblico ha poca familiarità e, cosa ancor peggiore, sulla quale esistono non pochi preconcetti: ne consegue che, mentre non ci sono remore a parlare di energia, in molti l'entropia suscita un vago senso di disagio, forse legato alla (errata!) convinzione che sia una grandezza che aumenta sempre.

In realtà, almeno dal punto di vista dell'ingegnere, il bilancio entropico si colloca sullo stesso piano del bilancio di massa e del bilancio di energia: rappresenta cioè un ulteriore strumento progettuale in grado di fornire informazioni utili per prevedere il modo di evolvere di un sistema.

5.1 LE CARATTERISTICHE DELLE TRASFORMAZIONI

Come si è già detto, la *trasformazione* di un sistema termodinamico si manifesta sempre tramite la variazione delle grandezze di stato che lo caratterizzano, quali ad esempio la massa, la pressione, la temperatura, la densità, la posizione, la velocità, la composizione chimica, ecc.

Molte trasformazioni sono caratterizzate dalla costanza di una o più di tali parametri: in questi casi, la trasformazione viene connotata da un aggettivo che evidenzia la variabile che rimane costante e dal prefisso *iso* – (dal greco *ἴσος*, uguale). Si potranno quindi incontrare ad esempio:

- trasformazioni *isoterme*: a temperatura costante;
- trasformazioni *isobare*: a pressione costante;
- trasformazioni *isocore*: a densità costante;
- trasformazioni *isoentalpiche*: a entalpia costante;
- trasformazioni *isoentropiche*: a entropia costante.

Inoltre una trasformazione viene spesso connotata con il termine *quasi-statica*, che sembra limitare fortemente la velocità della trasformazione stessa. In realtà, come già detto al Capitolo 4, questo concetto vuole semplicemente mettere in luce il fatto che la trasformazione avviene mediante una successione di stati di equilibrio e quindi in ogni condizione intermedia sono definite le grandezze di stato che descrivono il sistema. Il motivo per cui si usa l'aggettivo *quasi-statico* deriva dal fatto che questa condizione viene automaticamente garantita quando la trasformazione è infinitamente lenta, per cui il sistema ha ampia possibilità di adeguarsi alle sollecitazioni a cui è assoggettato. In realtà, pur con una certa approssimazione, tale caratteristica potrà essere associata a moltissime trasformazioni anche veloci, che potranno quindi essere considerate quasi-statiche.

Per quanto riguarda invece gli scambi a cui il sistema è soggetto, si avranno:

- trasformazioni *con o senza deflusso*, a seconda che siano o non siano presenti scambi di massa, cioè a seconda che il sistema sia aperto o chiuso;
- trasformazioni *con o senza scambi di lavoro*;
- trasformazioni *non adiabatiche o adiabatiche*, a seconda che siano o non siano presenti scambi di calore.

Per quanto riguarda in particolare gli scambi di calore, capita spesso che il sistema considerato interagisca con altri sistemi la cui temperatura resta costante: come già detto si parlerà in questi casi di *sorgenti termiche*, che rappresentano delle condizioni al contorno per il sistema in esame.

Un'osservazione alquanto ovvia, ma ugualmente importante riguarda poi il fatto che l'evoluzione di un sistema avviene in generale nel dominio del tempo e nel dominio dello spazio.

Tuttavia, come indicato schematicamente in Figura 5.1, nelle trasformazioni riguardanti sistemi chiusi prevale l'aspetto temporale, cioè esse saranno caratterizzate da un *prima* e un *dopo*, ovvero da un *inizio* e una *fine* della trasformazione (anche se magari essa comporta uno spostamento nello spazio).

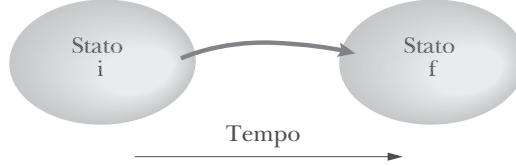


Figura 5.1

Invece, come indicato in Figura 5.2, nel caso di trasformazioni riguardanti sistemi aperti in regime permanente prevale l'aspetto spaziale e ci sarà un *qui* e un *lì*, cioè un' *entrata* e una *uscita*, a prescindere dal fatto che il transito dall'ingresso all'uscita richieda un certo tempo.

In entrambi i casi si potrà comunque pensare a *trasformazioni chiuse* (dette anche *trasformazioni cicliche*), caratterizzate dal fatto che alla fine del processo si ritorna nelle condizioni iniziali. Tali trasformazioni rivestono un'importanza tale da meritare una trattazione più approfondita.



Figura 5.2

5.2 LE TRASFORMAZIONI CICLICHE

In base a quanto appena detto, si potrà realizzare una *trasformazione chiusa* o *trasformazione ciclica* sia mediante un sistema chiuso (cioè privo di scambi di massa) che compie una serie di trasformazioni parziali che lo riportano nelle condizioni di partenza (Figura 5.3), sia mediante una successione di sistemi aperti in regime stazionario che fanno sì che la sostanza che li attraversa assuma nuovamente le condizioni iniziali (Figura 5.4). In entrambi i casi, si tratterà di modulare opportunamente gli scambi di calore e di lavoro, ai quali viene assoggettato il sistema chiuso o la successione di sistemi aperti, in modo da chiudere il ciclo.

Nel caso di un sistema chiuso, per ciascuna trasformazione parziale il bilancio energetico comporta che:

$$Q_{if} = (U_{Tf} - U_{Ti}) + L_{if} \quad (5.1)$$

dove, al solito con Q si indicano gli scambi termici, con L gli scambi di lavoro e con U_T la variazione di energia totale del sistema. Ma nel caso di una serie di trasformazioni parziali che complessivamente si chiudono su sé stesse dando luogo ad una trasformazione ciclica, se si sommano membro a membro le singole equazioni (5.1) si ottiene:

$$\sum Q_{if} = \sum L_{if} \quad (5.2)$$

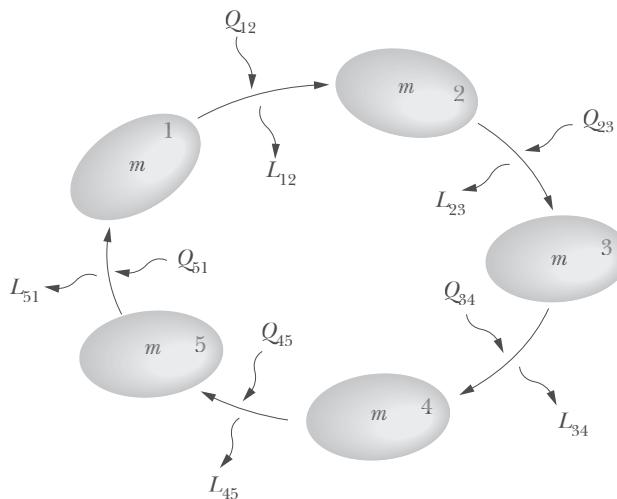


Figura 5.3

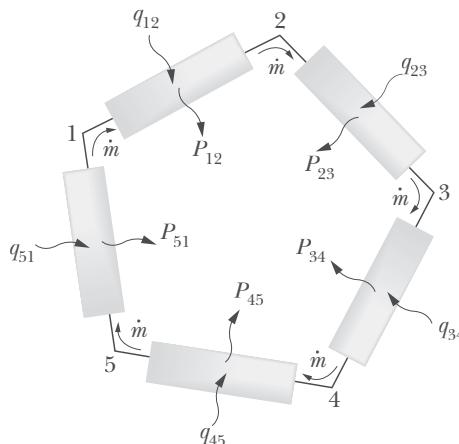


Figura 5.4

ovvero in una trasformazione ciclica gli scambi termici e gli scambi di calore complessivamente si equivalgono. Pertanto, trasformazioni di questo tipo non solo consentono la conversione di calore in lavoro e viceversa, ma godono anche del vantaggio di poter essere ripetute indefinitamente: in tal modo, detto $\Delta\tau$ il tempo richiesto per compiere un ciclo completo, si avranno degli scambi di potenza termica e di potenza meccanica i cui valori mediati nel tempo saranno rispettivamente $\bar{q} = Q_{if}/\Delta\tau$ e $\bar{P} = L_{if}/\Delta\tau$. Dividendo quindi ambo i membri per $\Delta\tau$ la (5.2) può anche essere riscritta come:

$$\sum \bar{q} = \sum \bar{P} \quad (5.3)$$

In modo analogo, considerando una trasformazione ciclica realizzata mediante una successione di sistemi aperti in regime permanente, in base al bilancio energetico per ciascuno di essi si avrà:

$$q = \dot{m} [(h + u_T')_u - (h + u_T')_e] + P \quad (5.4)$$

dove q è il flusso termico, P la potenza meccanica e \dot{m} la portata che evolve nel ciclo. Sommando membro a membro le (5.4) i termini relativi alle variazioni di energia si elidono e complessivamente si ottiene che:

$$\sum q = \sum P \quad (5.5)$$

relazione che risulta del tutto analoga a quella appena vista per il sistema chiuso.

Lo stretto legame esistente tra le due modalità di realizzazione di una trasformazione ciclica (mediante un sistema chiuso e mediante una successione di sistemi aperti) è reso ancor più evidente immaginando in entrambi i casi che le trasformazioni siano quasi-statiche e che sia quindi possibile monitorarne la pressione p e il volume specifico v , ottenendo un tracciato come quello di Figura 5.5.

Considerando dapprima il caso del sistema chiuso e detta m la sua massa, si è visto che in assenza di attrito risulta:

$$\frac{dL}{m} = p \, dv \quad (5.6)$$

Integrando sull'intero ciclo, si ottiene:

$$\frac{\sum L}{m} = \oint p \, dv \quad (5.7)$$

per cui l'area racchiusa dalla trasformazione ciclica nelle coordinate $p - v$ di Figura 5.5 rappresenta il lavoro complessivamente espletato nel ciclo, per unità di massa del sistema che compie la trasformazione. Tale lavoro risulta positivo o negativo a seconda che il ciclo venga percorso in senso orario e antiorario: nel primo caso si parlerà di *ciclo diretto*, nel secondo di *ciclo inverso*.

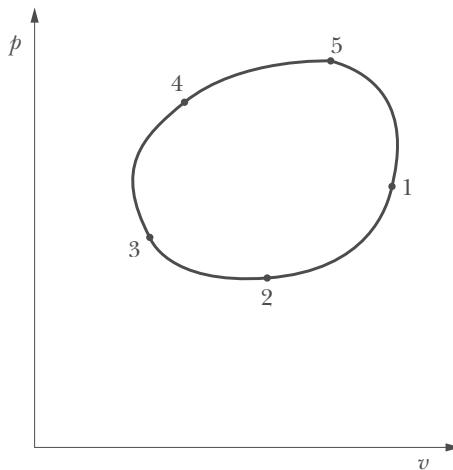


Figura 5.5

D'altra parte, trattandosi di una trasformazione ciclica, vale la (5.2) e quindi tale area rappresenta anche il calore complessivamente scambiato, sempre per unità di massa m del sistema.

Se invece si considera il ciclo formato da una successione di sistemi con deflusso, applicando l'equazione di Bernoulli generalizzata in assenza di attrito si ottiene che:

$$0 = \dot{m} \int v \, dp + P \quad (5.8)$$

da cui, per l'intero ciclo:

$$\frac{\sum P}{\dot{m}} = - \oint v \, dp \quad (5.9)$$

In questo caso, quindi, l'area racchiusa dalla trasformazione ciclica tracciata nel diagramma $p - v$ di Figura 5.5 rappresenta la potenza erogata per unità di portata, ovvero il lavoro per unità di massa che evolve nel ciclo: risulta quindi evidente lo stretto legame con quanto visto per il sistema chiuso.

È anche facile dimostrare che valgono le medesime conclusioni viste precedentemente per quanto riguarda il segno del lavoro in relazione al verso di percorrenza del ciclo e quindi, anche in questo caso si parlerà di *ciclo diretto* e di *ciclo inverso*, a seconda che il lavoro venga complessivamente erogato o ricevuto. Infine, in virtù della (5.5), l'area di Figura 5.5 rappresenta ancora il calore complessivamente scambiato per unità di massa del fluido.

La possibilità che uno stesso ciclo nelle coordinate $p - v$ possa essere realizzato con una successione di trasformazioni di un sistema chiuso o con una successione di sistemi aperti in regime stazionario non è una mera curiosità: come si vedrà infatti ai Capitoli 17 e 18, questo troverà un preciso riscontro tecnico, almeno per alcuni cicli termodinamici di comune impiego.

5.3 LE MACCHINE TERMICHE

Quanto detto in merito alle trasformazioni cicliche consente di prefigurare dei sistemi termodinamici che, evolvendo ciclicamente, consentano di rispondere a due importanti esigenze tecnologiche, entrambe legate agli scambi di calore (per cui si giustifica il nome di *macchine termiche* dato a questi dispositivi):

- erogare lavoro per un arco di tempo lungo a piacere, sfruttando il calore fornito da un sistema esterno; tali macchine sono schematizzabili come indicato in Figura 5.6, dove si evidenzia l'interazione termica q_a con la sorgente esterna a temperatura T_a e la produzione di potenza meccanica P . In analogia ad altri tipi di macchine destinate a produrre lavoro (i motori elettrici, i motori idraulici, ecc.), tali macchine sono denominate *motori termici*.

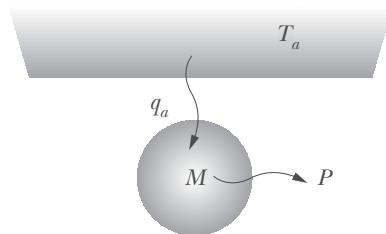


Figura 5.6

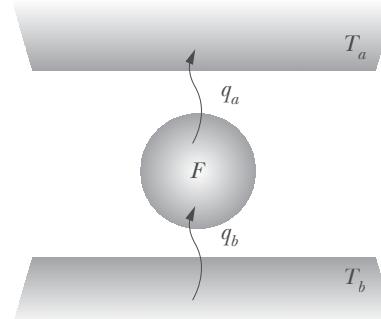


Figura 5.7

- trasferire per un arco di tempo lungo a piacere una quantità di calore da una sorgente più fredda ad una più calda e quindi con verso contrario a quello spontaneo; queste macchine termiche sono schematizzabili come indicato in Figura 5.7, dove si vede la sorgente più calda a temperatura T_a , quella più fredda a temperatura T_b e i due scambi termici q_a e q_b . Tali macchine sono chiamate *macchine frigorifere* quando il loro obiettivo è la sottrazione di calore dal corpo più freddo, ovvero *pompe di calore* quando l'attenzione è rivolta al calore ceduto al corpo più caldo. Si osservi che queste macchine non contravengono affatto alla regola secondo cui il flusso termico è diretto da un sistema più caldo ad uno più freddo: infatti, affinché i flussi termici abbiano il verso voluto è sufficiente

che nella zona di contatto con la sorgente fredda la temperatura della macchina sia più bassa di quella della sorgente, mentre nella zona di contatto con la sorgente calda, la temperatura della macchina dovrà essere più alta di quella della sorgente. Ne consegue semplicemente che la macchina non potrà trovarsi tutta alla stessa temperatura.

Entrambe queste esigenze tecnologiche possono essere soddisfatte sfruttando una trasformazione ciclica, che potrà essere indifferentemente espletata tramite un sistema chiuso o una successione di sistemi aperti, i quali devono intendersi presenti all'interno dell'involucro con cui schematicamente si rappresenta la macchina termica, come indicato in Figura 5.8a e 5.8b, facendo riferimento al caso di un motore.

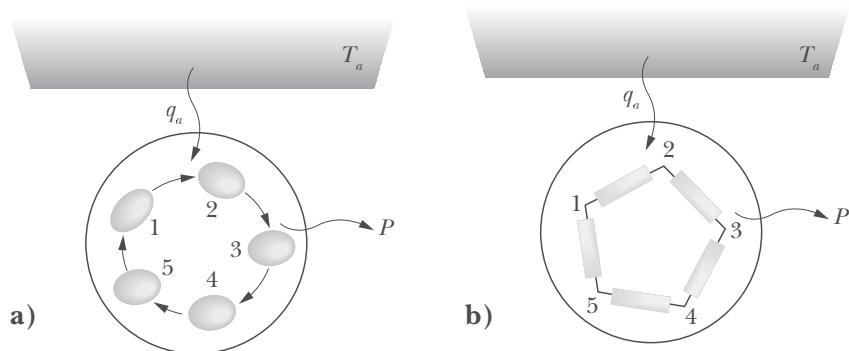


Figura 5.8

Infatti, si può osservare che il bilancio energetico di una trasformazione ciclica risulta perfettamente compatibile con la realizzazione sia di un motore termico, sia di una macchina frigorifera sia di una pompa di calore. Nel caso del motore il bilancio energetico del ciclo sarà:

$$q_a = P \quad (5.10)$$

mentre nel caso della macchina frigorifera (o della pompa di calore) si avrà:

$$q_a + q_b = 0 \quad (5.11)$$

In entrambi i casi, inoltre, la ciclicità della trasformazione garantisce la possibilità di protrarre il processo per tutto il tempo necessario.

In realtà, affrontando la realizzazione pratica di queste macchine si può constatare che le cose non stanno affatto nei termini sopra descritti, da un lato perché la conversione di calore in lavoro risulta sempre parziale e dall'altro perché non c'è modo di far funzionare una macchina frigorifera (o una pompa di calore) senza ricorrere ad un apporto energetico esterno.

Per molto tempo si pensò che tali inefficienze fossero dovute a carenze tecnologiche, ma gradualmente ci si rese conto che la ragione era ben più profonda, come verrà illustrato nel paragrafo seguente.

5.4 GLI ENUNCIATI DEL SECONDO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

Solo dopo molti anni dedicati al miglioramento delle macchine termiche, sia nella versione di motore termico, sia in quella di macchina frigorifera (o di pompa di calore), si è arrivati a comprendere che è realmente impossibile che esse operino nella maniera prefigurata in Figura 5.6 e in Figura 5.7.

Ciò è stato sancito tramite due enunciati. Il primo, espresso in forma embrionale nel 1851 da William Thomson (lord Kelvin, 1824 – 1907) e completato nel 1897 da Max Planck (1858 – 1947), fa riferimento ai motori termici; il secondo, formulato nel 1854 da Rudolf Clausius (1822 – 1888) riguarda invece le macchine frigorifere e le pompe di calore.

Più precisamente, l'enunciato di Kelvin – Planck afferma che:

È impossibile realizzare una trasformazione il cui unico effetto sia l'assorbimento di calore e la sua trasformazione in lavoro.

Invece, l'enunciato di Clausius, afferma che:

È impossibile realizzare una trasformazione il cui unico effetto sia il trasferimento di calore da un sistema a temperatura più bassa a un sistema a temperatura più alta.

Si può innanzitutto osservare che le trasformazioni impossibili di cui si parla sono di fatto trasformazioni cicliche: infatti, se il loro unico effetto sono determinati scambi (di calore e di lavoro), significa che non ci possono essere variazioni di stato del sistema tra le condizioni iniziali e finali e quindi che il sistema deve ripresentarsi nel medesimo stato.

Questo requisito è essenziale, perché eliminandolo l'impossibilità non sussiste più. Ad esempio, se si considera un gas all'interno di un sistema pistone – cilindro in equilibrio termico con l'ambiente (Figura 5.9), è perfettamente possibile fornirgli una quantità di calore Q_a mettendolo in contatto con una sorgente calda a temperatura T_a e lasciare che si espanda liberamente erogando una quantità di lavoro L ; se il riscaldamento è sufficientemente lento, la trasformazione evolve mantenendo la propria temperatura T_g costantemente uguale alla temperatura esterna T_e , il che implica due cose:

- che non ci sono scambi termici con l'ambiente e quindi gli unici scambi termici che hanno luogo durante la trasformazione sono quelli con la sorgente calda;
- che mantiene la sua energia interna costante perché, come si vedrà al Capitolo 8, se il gas è sufficientemente rarefatto l'energia interna è funzione solo della temperatura.

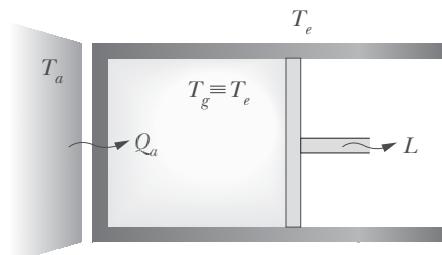


Figura 5.9

Dato che non ci sono variazioni di altre forme di energia, dal bilancio energetico del sistema gas risulta che:

$$\begin{aligned} Q_a &= U_{i2} - U_{i1} + L \\ &= L \end{aligned} \tag{5.12}$$

e quindi tutto il calore fornito si è trasformato in lavoro. Ma in questo caso la trasformazione non è certamente del tipo richiesto dall'enunciato di Kelvin – Planck: infatti, la conversione del calore in lavoro non è l'unico risultato, perché si ha anche un aumento di volume. In altri termini, la trasformazione non è ciclica.

Alla luce di ciò, l'oggetto dei due enunciati sono proprio le macchine termiche, i motori per l'enunciato di Kelvin – Planck e le macchine frigorifere (o le pompe di calore) per l'enunciato di Clausius.

In sintesi, dunque, i due enunciati semplicemente negano che sia possibile realizzare le trasformazioni prefigurate in Figura 5.6 e in Figura 5.7: tali impossibilità non vengono in alcun modo dimostrate, ma vengono assunte a livello di principio fisico, che prende il nome di *Secondo Principio della Termodinamica*. Si tratta comunque di un Principio alquanto particolare perché:

- si limita ad indicare delle impossibilità: non stabilisce infatti cosa deve avvenire, ma cosa non può avvenire;
- viene espresso mediante due enunciati distinti: sebbene riguardino entrambi le macchine termiche, si tratta comunque di macchine completamente diverse tra loro;
- fa riferimento ad ambiti tecnologici molto specifici: sembra improbabile poterne trarre delle conseguenze di carattere generale;
- nessuno dei suoi enunciati si presta ad essere formulato matematicamente.

Nonostante ciò, è davvero sorprendente la messe di risultati che si possono ottenere da tali enunciati e vale la pena di elencarli subito, anche se ciascuno di essi verrà trattato singolarmente nel seguito. Si anticipa quindi fin da ora che sarà possibile:

- dimostrare che i due enunciati sono tra loro equivalenti e che si tratta effettivamente di un unico principio fisico coniugato in ambiti diversi;
- dimostrare che esiste un limite teorico per le prestazioni delle macchine termiche, individuandone anche il valore;
- individuare le cause di penalizzazione delle prestazioni delle macchine termiche reali rispetto al limite teorico menzionato al punto precedente;
- fornire una modalità del tutto generale per quantificare la grandezza temperatura, che finora ha richiesto l'impiego di un gas infinitamente rarefatto;
- introdurre una nuova variabile di stato denominata *entropia* e quantificarne le variazioni;
- formulare un bilancio che qualunque sistema fisico deve soddisfare tra le variazioni della sua entropia e gli scambi termici a cui è soggetto; tale bilancio potrà essere considerato come l'espressione matematica del Secondo Principio;
- distinguere tra trasformazioni possibili e trasformazioni impossibili;
- individuare la direzione spontanea dei processi;
- quantificare le variazioni della grandezza energia interna.

Limitandosi per il momento all'equivalenza tra i due enunciati, la dimostrazione si basa sul fatto che la violazione di uno dei due implica necessariamente la violazione dell'altro: infatti, in questo caso la logica matematica consente di affermare che si tratta di affermazioni tra loro equivalenti o, in altri termini, che esse costituiscono due facce della stessa medaglia.

Si considerino dunque due sorgenti a temperatura T_a e T_b (con $T_a > T_b$) e tra di esse si facciano lavorare due macchine termiche, un motore e una macchina frigorifera. Come indicato in Figura 5.10a, si supponga dapprima che l'enunciato di Kelvin – Planck sia falso e quindi che sia possibile far funzionare il motore convertendo in potenza meccanica tutto il flusso termico $q_{M,a}$ da esso prelevato dalla sorgente ad alta temperatura. Si potrà quindi utilizzare tale potenza meccanica per far sì che la macchina frigorifera funzioni rispettando l'enunciato di Clausius: tale macchina preleverà quindi il flusso termico $q_{F,b}$ dalla sorgente a bassa temperatura e contemporaneamente cederà alla sorgente ad alta temperatura un flusso termico $q_{F,a}$ che, in base al bilancio energetico, sarà in modulo pari a:

$$\begin{aligned} |q_{F,a}| &= |q_{F,b}| + |P| \\ &= |q_{F,b}| + |q_{M,a}| \end{aligned} \tag{5.13}$$

Considerando ora l'insieme delle due macchine (racchiuse dalla linea tratteggiata in Figura 5.10b), esso rappresenta a sua volta una macchina C, la quale preleva dalla sorgente a T_b la quantità di calore:

$$|q_{C,b}| = |q_{F,b}| \quad (5.14)$$

e contemporaneamente cede alla sorgente a T_a la quantità di calore:

$$\begin{aligned} |q_{C,a}| &= [|q_{F,b}| + |q_{M,a}|] - |q_{M,a}| \\ &= |q_{F,b}| \end{aligned} \quad (5.15)$$

Poiché le interazioni con le due sorgenti rappresentano gli unici effetti della macchina ciclica complessiva e tali interazioni sono di pari entità, si può affermare che la violazione dell'enunciato di Kelvin – Planck comporta la violazione dell'enunciato di Clausius.

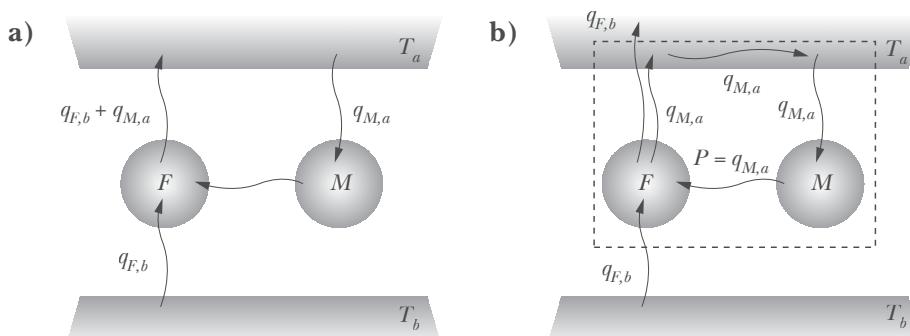


Figura 5.10

Si supponga ora che, come indicato in Figura 5.11a, sia la macchina frigorifera ad operare in violazione dell'enunciato di Clausius, cioè avendo come unico risultato il prelievo di un flusso termico $q_{F,b}$ dalla sorgente a bassa temperatura e la fornitura di un pari flusso termico $|q_{F,a}| = |q_{F,b}|$ alla sorgente ad alta temperatura. Passando al motore termico, si supponga che esso funzioni in accordo con l'enunciato di Kelvin – Planck, cioè che prelevi un flusso termico $q_{M,a}$ dalla sorgente ad alta temperatura e lo trasformi solo in parte in potenza meccanica P , cedendo la rimanente parte $q_{M,b}$ alla sorgente a bassa temperatura. Con un opportuno dimensionamento del motore si può allora far sì che $|q_{F,b}| = |q_{M,a}|$ e in tal modo, considerando la macchina ciclica complessiva racchiusa dalla linea tratteggiata di Figura 5.11b, si vede che essa opera producendo la potenza P ed interagendo solo con la sorgente ad alta temperatura, dato che con quella a bassa temperatura l'assorbimento e la cessione di calore si elidono tra loro. Ciò configura una palese violazione dell'enunciato di Kelvin – Planck, che discende dalla violazione dell'enunciato di Clausius.

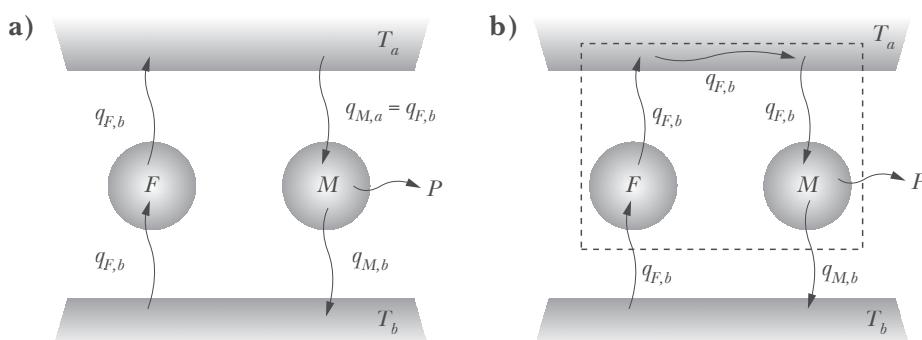


Figura 5.11



Pierfrancesco Brunello

Fisica Tecnica

Accedi all'**ebook** e ai
contenuti digitali ➤ **Espandi le tue risorse** ➤ con un libro che **non pesa** e si **adatta**
alle dimensioni del tuo **lettore**



All'interno del volume il **codice personale** e le istruzioni per accedere alla versione **ebook** del testo e agli ulteriori servizi. L'accesso alle risorse digitali è **gratuito** ma limitato a **18 mesi dalla attivazione del servizio**.



www.edises.it

