

# INDICE

*XIII Prefazione*

*XIV L'Editore ringrazia*

**I CAPITOLO PRIMO - Introduzione**

**I 1.1 Contenuti**

1.1.1 Termodinamica applicata, p. 2 - 1.1.2 Trasmissione del calore, p. 8 - 1.1.3 Termodinamica dell'aria umida, p. 11

**12 1.2 Soluzione dei problemi**

**13 1.3 Unità di misura**

**17 CAPITOLO SECONDO - Introduzione alla Termodinamica applicata**

**17 2.1 Termodinamica applicata**

**19 2.2 Sistemi termodinamici**

2.2.1 Sistema chiuso e sistema aperto, p. 20 - 2.2.2 Sistema isolato, p. 21

**22 2.3 Descrizione di un sistema attraverso le sue proprietà**

2.3.1 Termodinamica classica e del continuo, p. 23 - 2.3.2 Termodinamica statistica, p. 24 - 2.3.3 Stato termodinamico ed equilibrio, p. 25 - 2.3.4 Caratteristiche delle proprietà o grandezze di stato, p. 27 - 2.3.5 Interpretazione matematica delle grandezze di stato, p. 29

**32 2.4 Trasformazioni**

2.4.1 Trasformazioni quasi-statiche, p. 33 - 2.4.2 Trasformazioni reversibili, p. 34 - 2.4.3 Piani termodinamici, p. 35 - 2.4.4 Trasformazioni cicliche, p. 36

**37 2.5 Equazione di bilancio di una proprietà estensiva**

2.5.1 Equazione di bilancio della massa, p. 38 - 2.5.2 Portata massica e volumetrica, p. 39 - 2.5.3 Regime stazionario, p. 40 - 2.5.4 Flusso monodimensionale, p. 40 - 2.5.5 Calcolo della portata massica e volumetrica, p. 41

**44 2.6 Pressione, densità e temperatura**

2.6.1 Pressione, p. 44 - 2.6.2 Densità e volume specifico, p. 49 - 2.6.3 Temperatura, p. 50

**61**    **CAPITOLO TERZO - Proprietà delle sostanze pure ed equazioni di stato**

**61**    3.1 Postulato di stato e sistemi semplici

**63**    3.2 Sostanza pura

3.2.1 Fasi di una sostanza pura, p. 64 - 3.2.2 Il comportamento delle sostanze pure in natura: l'esperimento  $pV_T$ , p. 65 - 3.2.3 Superficie caratteristica, p. 67 - 3.2.4 Punto critico, p. 69 - 3.2.5 Regola delle fasi, p. 71 - 3.2.6 Il caso dell'acqua, p. 72 - 3.2.7 Diagramma pressione-Temperatura ( $pT$ ), p. 73 - 3.2.8 Diagramma pressione-volume specifico (piano di Clapeyron), p. 77

**81**    3.3 Equazioni di stato

3.3.1 Equazione di stato dei gas ideali, p. 82 - 3.3.2 Altre equazioni di stato, p. 86

**86**    3.4 Energia interna, entalpia e calore specifico

**89**    3.5 Metodi semplificati per il calcolo delle proprietà

3.5.1 Proprietà dei vapori, p. 89 - 3.5.2 Proprietà dei gas reali a comportamento ideale, p. 99 - 3.5.3 Proprietà dei liquidi, p. 111

**121**    **CAPITOLO QUARTO - Energia e 1° principio della Termodinamica**

**121**    4.1 Energia totale

4.1.1 Energia esterna, p. 122 - 4.1.2 Energia interna, p. 125 - 4.1.3 Energia meccanica ed energia termica, p. 126

**127**    4.2 Variazione del contenuto di energia di un sistema

**128**    4.3 Energia come Calore

4.3.1 Convenzione sui segni, p. 129

**129**    4.4 Energia come Lavoro

4.4.1 Convenzione sui segni, p. 130 - 4.4.2 Forme di lavoro, p. 131 - 4.4.3 Lavoro di variazione di volume, p. 131 - 4.4.4 Lavoro all'albero (lavoro di elica), p. 134 - 4.4.5 Altre forme meccaniche di lavoro, p. 136 - 4.4.6 Forme non meccaniche di lavoro, p. 138

**139**    4.5 Grandezze di stato e grandezze di scambio

**142**    4.6 1° principio della Termodinamica

4.6.1 1° principio della Termodinamica per i sistemi chiusi, p. 143 - 4.6.2 1° principio della Termodinamica per i sistemi aperti, p. 154 - 4.6.3 Confronto fra le formulazioni per i sistemi chiusi e per i sistemi aperti, p. 165

**171**    **CAPITOLO QUINTO - Entropia e 2° principio della Termodinamica**

- 171 5.1 Introduzione  
 5.1.1 Formulazione del 2° principio della Termodinamica, p. 177
- 178 5.2 Entropia  
 5.2.1 Equazione di bilancio dell'entropia, p. 178 - 5.2.2 Variazione del contenuto di entropia di un sistema, p. 179
- 179 5.3 2° principio della Termodinamica  
 5.3.1 2° principio della Termodinamica per i sistemi chiusi, p. 180 - 5.3.2 2° principio della Termodinamica per i sistemi aperti, p. 182 - 5.3.3 2° principio della Termodinamica per i sistemi isolati, p. 184 - 5.3.4 Reversibilità e irreversibilità, p. 185 - 5.3.5 Disuguaglianza di Clausius, p. 190 - 5.3.6 Verso di una trasformazione, p. 192
- 201 **CAPITOLO SESTO - Conseguenze del 2° principio della Termodinamica**
- 202 6.1 Equazioni del TdS o di Gibbs  
 6.1.1 Prima equazione del TdS, p. 202 - 6.1.2 Seconda equazione del TdS, p. 202 - 6.1.3 Equazioni di Maxwell, p. 204
- 205 6.2 Calore specifico (o capacità termica specifica)
- 209 6.3 Calcolo della variazione di energia interna, entalpia ed entropia
- 211 6.4 Metodi semplificati per il calcolo della variazione di entropia  
 6.4.1 Vapori, p. 212 - 6.4.2 Gas reali a comportamento ideale, p. 213 - 6.4.3 Liquidi, p. 214
- 218 6.5 Espressioni del lavoro ed equazione dell'energia meccanica  
 6.5.1 Lavoro scambiato nei sistemi chiusi, p. 219 - 6.5.2 Lavoro scambiato nei sistemi aperti – equazione dell'energia meccanica, p. 221
- 225 6.6 Trasformazioni politropiche  
 6.6.1 Trasformazioni isocore, p. 227 - 6.6.2 Trasformazioni isobare, p. 228 - 6.6.3 Trasformazioni isoterme del gas ideale, p. 229 - 6.6.4 Trasformazioni adiabatiche, p. 231
- 236 6.7 Piani termodinamici  
 6.7.1 Diagramma Temperatura-entropia ( $Ts$ ), p. 237 - 6.7.2 Diagramma entalpia-entropia, di Mollier ( $hs$ ), p. 242 - 6.7.3 Diagramma pressione-entalpia ( $ph$ ), p. 243
- 249 **CAPITOLO SETTIMO - 2° principio e sistemi di conversione dell'energia**
- 249 7.1 Introduzione
- 250 7.2 Macchina Termica o Motore Termico  
 7.2.1 Postulato di Kelvin-Planck, p. 253 - 7.2.2 Rendimento della Macchina Termica, p. 254 - 7.2.3 Rendimento massimo della Macchina Termica – Teorema di Carnot, p. 255 - 7.2.4 Rendimento di secondo principio, p. 258

260	7.3 Ciclo di Carnot
	7.3.1 Temperatura termodinamica, p. 263 - 7.3.2 Ciclo a più di due sorgenti, p. 265
266	7.4 Macchine frigorifere e pompe di calore
	7.4.1 Postulato di Clausius, p. 267 - 7.4.2 Macchina Inversa, p. 268 - 7.4.3 Ciclo di Carnot inverso, p. 274
283	<b>CAPITOLO OTTAVO - Componenti</b>
283	8.1 Introduzione
284	8.2 Macchine a fluido
	8.2.1 Espansori a vapore, p. 287 - 8.2.2 Espansori a gas, p. 292 - 8.2.3 Compressori di vapore, p. 298 - 8.2.4 Compressori di gas, p. 303 - 8.2.5 Pompe, p. 318
322	8.3 Componenti per lo scambio di calore
	8.3.1 Scambiatori a superficie, p. 324 - 8.3.2 Caldaie e generatori di vapore, p. 328
334	8.4 Valvole di laminazione
	8.4.1 Coefficiente di Joule-Thomson, p. 339
351	<b>CAPITOLO NONO - Cicli diretti</b>
352	9.1 Introduzione
352	9.2 Cicli diretti a vapore
	9.2.1 Ciclo di Rankine a surriscaldamento endoreversibile, p. 354 - 9.2.2 Modi per aumentare il rendimento del ciclo endoreversibile di Rankine, p. 370 - 9.2.3 Ciclo di Rankine reale, p. 384
388	9.3 Cicli diretti a gas
	9.3.1 Ciclo endoreversibile di Joule standard, p. 390 - 9.3.2 Ciclo di Joule standard, p. 399 - 9.3.3 Motori alternativi, p. 405 - 9.3.4 Ciclo di Stirling, p. 418 - 9.3.5 Cicli combinati e cogenerazione, p. 421
433	<b>CAPITOLO DECIMO - Cicli inversi</b>
433	10.1 Introduzione
436	10.2 Cicli inversi a vapore
	10.2.1 Ciclo di Carnot inverso, p. 436 - 10.2.2 Ciclo a compressione di vapore standard, p. 444 - 10.2.3 Ciclo a compressione di vapore reale, p. 455 - 10.2.4 Fluidi frigorigeni, p. 465
468	10.3 Altre tecnologie
	10.3.1 Cicli alimentati con energia termica, p. 468 - 10.3.2 Tecnologie elettromeccaniche, p. 474 - 10.3.3 Tecnologie allo stato solido, p. 475

- 485    **CAPITOLO UNDICESIMO - Miscele di gas – Aria atmosferica**
- 485    11.1 Introduzione
- 486    11.2 Miscele di gas
- 11.2.1 Comportamento delle miscele di gas ideali e reali, p. 488 - 11.2.2 Proprietà delle miscele di gas ideali, p. 495 - 11.2.3 Processi di miscelazione di gas ideali, p. 503
- 507    11.3 Miscele di gas e vapori
- 509    11.4 Aria atmosferica
- 11.4.1 Proprietà dell'aria atmosferica, p. 513 - 11.4.2 Temperatura di rugiada, p. 518 - 11.4.3 Temperatura di saturazione adiabatica, p. 520 - 11.4.4 Temperatura di bulbo umido (o bagnato), p. 522 - 11.4.5 Diagramma psicrometrico, p. 524
- 541    **CAPITOLO DODICESIMO - Termodinamica e Trasmissione del calore**
- 541    12.1 Termodinamica e Trasmissione del calore
- 543    12.2 I meccanismi di scambio termico: descrizione introduttiva
- 12.2.1 Generalità sulla conduzione termica, p. 544 - 12.2.2 Generalità sulla convezione termica, p. 545 - 12.2.3 Generalità sull'irraggiamento termico, p. 546
- 548    12.3 Equazioni fondamentali, relazioni empiriche, ipotesi semplificative
- 12.3.1 Ipotesi relative alle proprietà del mezzo materiale in cui avviene lo scambio termico, p. 551 - 12.3.2 Ipotesi relative alla dipendenza dal tempo dei processi di scambio termico: il regime stazionario, p. 554 - 12.3.3 Ipotesi relative alla generazione interna di calore, p. 556 - 12.3.4 Ipotesi relative alla direzione del flusso di calore, p. 557
- 560    12.4 Esempi applicativi di problemi di scambio termico
- 569    **CAPITOLO TREDICESIMO - Conduzione termica in regime stazionario**
- 569    13.1 Introduzione
- 570    13.2 Il postulato di Fourier della conduzione termica
- 13.2.1 Il gradiente di temperatura e il flusso termico conduttivo, p. 571 - 13.2.2 La conducibilità termica dei materiali, p. 575
- 580    13.3 La conduzione termica monodimensionale in regime stazionario
- 13.3.1 Flusso termico conduttivo monodimensionale in regime stazionario in uno strato piano, p. 580 - 13.3.2 conducibilità termica dei materiali, p. 585 - 13.3.3 Il metodo risolutivo della analogia elettrica, p. 589 - 13.3.4 Flusso termico conduttivo monodimensionale in regime stazionario in uno strato cilindrico, p. 607 - 13.3.5 Flusso termico conduttivo monodimensionale in regime stazionario in uno strato sferico, p. 617

- 622 13.4 La conduzione termica multidimensionale in regime stazionario  
 13.4.1 Il metodo del fattore di forma per la conduzione termica, p. 622
- 635 **CAPITOLO QUATTORDICESIMO - Introduzione alla Termofluidodinamica: la convezione termica**
- 635 14.1 Introduzione
- 636 14.2 Generalità sulle proprietà e sul moto di un fluido  
 14.2.1 Flusso interno e flusso esterno, p. 636 - 14.2.2 Forze di volume in un fluido. La densità di un fluido, p. 637 - 14.2.3 Forze di superficie in un fluido. La pressione e gli sforzi tangenziali, p. 640 - 14.2.4 I regimi di flusso: flusso laminare e flusso turbolento, p. 651
- 655 14.3 Le leggi della convezione termica  
 14.3.1 Introduzione alle leggi fondamentali della convezione termica, p. 655 - 14.3.2 La legge di Newton della convezione termica, p. 657
- 674 14.4 Lo scambio termico in convezione forzata con flusso esterno  
 14.4.1 Convezione forzata esterna su lastra piana, p. 676 - 14.4.2 Convezione forzata esterna su superficie cilindrica in flusso incrociato, p. 681
- 687 14.5 Lo scambio termico in convezione forzata con flusso interno  
 14.5.1 Convezione forzata interna in un tubo cilindrico, p. 688
- 705 14.6 Lo scambio termico in convezione naturale  
 14.6.1 Convezione termica naturale con flusso esterno, p. 708 - 14.6.2 Convezione mista naturale e forzata, p. 714
- 715 14.7 Il metodo della analogia elettrica per la convezione termica: la resistenza termica convettiva
- 729 **CAPITOLO QUINDICESIMO - La Trasmissione del calore per irraggiamento**
- 730 15.1 Introduzione e concetti preliminari
- 732 15.2 Interazione della radiazione termica con la materia
- 736 15.3 L'irraggiamento termico da "corpo nero"  
 15.3.1 La distribuzione di Planck, p. 737 - 15.3.2 La legge di Wien, p. 739 - 15.3.3 La legge di Stefan-Boltzmann, p. 741 - 15.3.4 L'emissione di banda, p. 744
- 748 15.4 L'irraggiamento termico da superfici reali  
 15.4.1 Il potere emissivo e l'emissività di una superficie reale, p. 748 - 15.4.2 I coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione di una superficie reale, p. 750 - 15.4.3 Superfici semitrasparenti selettive: l'effetto serra, p. 752 - 15.4.4 La radiazione solare sul suolo terrestre, p. 757 - 15.4.5 Il modello di "corpo grigio" per le superfici reali e la legge di Kirchhoff, p. 760
- 764 15.5 Lo scambio termico per irraggiamento  
 15.5.1 Il fattore di vista, p. 764 - 15.5.2 Relazioni tra fattori di vista, p. 767 - 15.5.3 Bilancio termico radiativo su una superficie "grigia": la resistenza radia-

- tiva superficiale, p. 769 - 15.5.4 Scambio termico tra due superfici “grigie”: la resistenza radiativa spaziale, p. 771 - 15.5.5 Scambio termico radiative in cavità con N superfici “grigie”: reti di resistenze radiative , p. 772 - 15.5.6 Scambio termico per irraggiamento tra “corpi neri” , p. 774 - 15.5.7 Potenza termica trasmessa per irraggiamento in una cavità composta da due superfici a diversa temperatura, p. 775
- 780 15.6 Il modello resistivo ed il coefficiente di scambio termico per irraggiamento
- 784 15.7 Grandezze caratteristiche dell’irraggiamento
- 797 **CAPITOLO SEDICESIMO - Meccanismi combinati di scambio termico**
- 798 16.1 Meccanismi combinati di scambio termico in regime stazionario  
16.1.1 Introduzione, p. 798 - 16.1.2 Il modello termico resistivo e le reti di resistenze termiche, p. 800 - 16.1.3 Il modello termico resistivo per il calcolo della potenza termica trasmessa attraverso la parete di separazione tra due ambienti a temperatura differente, p. 803
- 825 16.2 Meccanismi combinati di scambio termico in regime stazionario in sistemi con temperatura superficiale non uniforme  
16.2.1 Generalità sulle alette e sulle superfici alettate, p. 825 - 16.2.2 Distribuzione di temperatura in una aletta potenza termica potenza dissipata, p. 827 - 16.2.3 Parametri caratteristici di una aletta: efficienza ed efficacia di una aletta, p. 831 - 16.2.4 Superfici alettate, p. 837 - 16.2.5 Resistenza di contatto, p. 849
- 850 16.3 Scambiatori di calore  
16.3.1 Tipologie di scambiatori, p. 850 - 16.3.2 Analisi termica, p. 853 - 16.3.3 Coefficiente globale di scambio termico, p. 858 - 16.3.4 Media logaritmica delle differenze di temperatura, p. 864 - 16.3.5 Disposizione di flusso in equicorrente e in controcorrente, p. 867 - 16.3.6 Progettazione di uno scambiatore col metodo del  $\Delta T_{ML}$ , p. 878 - 16.3.7 Efficienza di uno scambiatore di calore, p. 879 - 16.3.8 Il metodo “efficienza-NTU”, p. 886
- 886 16.4 Meccanismi di scambio termico in regime variabile nel tempo  
16.4.1 Introduzione, p. 886 - 16.4.2 Flusso termico transitorio in sistemi con resistenza interna trascurabile, p. 892
- 909 **CAPITOLO DICIASSETTESIMO - Benessere termoigrometrico. Le trasformazioni dell’aria umida**
- 909 17.1 Introduzione
- 910 17.2 Benessere termoigrometrico  
17.2.1 Termodinamica e sistemi biologici, p. 910 - 17.2.2 Il bilancio energetico del corpo umano, p. 911 - 17.2.3 Le grandezze che influenzano il comfort termoigrometrico, p. 918 - 17.2.4 Le equazioni di Fanger del comfort termoigrometrico, p. 929 - 17.2.5 Gli indici di valutazione del comfort termoigrometrico, p. 934

- 942 17.3 Le trasformazioni dell'aria umida  
17.3.1 Riscaldamento e raffreddamento sensibile (a umidità specifica costante), p. 943 - 17.3.2 Riscaldamento con umidificazione, p. 947 - 17.3.3 Raffreddamento con deumidificazione, p. 955 - 17.3.4 Raffreddamento evaporativo, p. 960 - 17.3.5 Miscelazione adiabatica, p. 963
- 967 17.4 Torri evaporative
- A1 APPENDICI
- A3 Piani termodinamici
- A15 Tabelle con le proprietà di sostanze di impiego comune nella fisica tecnica
- A47 Tabelle di conversione delle unità di misura
- A53 Nomenclatura
- A59 *Bibliografia*