

# Indice

## Parte I Fondamenti di termodinamica

<b>1</b>	<b>Il sistema termodinamico ed il primo principio della termodinamica</b> . . .	3
1.1	Introduzione . . . . .	3
1.2	Lo stato del sistema termodinamico . . . . .	4
1.3	Classificazione dei sistemi termodinamici: pareti e vincoli . . . . .	4
1.4	Il lavoro termodinamico . . . . .	5
1.5	L'energia interna . . . . .	6
1.6	Il calore . . . . .	6
1.7	Il primo principio della termodinamica . . . . .	8
<b>2</b>	<b>I postulati</b> . . . . .	11
2.1	L'equilibrio termodinamico . . . . .	11
2.2	Le grandezze estensive . . . . .	12
2.3	Grandezze di stato e di percorso . . . . .	13
2.4	I postulati entropici . . . . .	13
2.5	Conseguenze delle proprietà formali della funzione $S(U, V, \mathbf{N})$ . . . . .	18
2.6	Grandezze intensive . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Le trasformazioni termodinamiche</b> . . . . .	23
3.1	Trasformazioni quasi-statiche . . . . .	23
3.2	Depositi quasi-statici di calore e di lavoro . . . . .	24
3.3	Lavoro e calore lungo trasformazioni quasi-statiche . . . . .	24
3.4	Relazione di Gibbs . . . . .	26
3.5	Produzione di entropia per un sistema isolato . . . . .	29

<b>4</b>	<b>L'equilibrio termodinamico</b> .....	31
4.1	Descrizione degli stati di equilibrio di un sistema semplice .....	31
4.2	Equilibrio di un sistema composto isolato .....	33
4.3	L'entropia di miscelamento .....	38
4.4	Il secondo principio della termodinamica .....	39
4.5	Le relazioni di Eulero e di Gibbs-Duhem .....	39
4.5.1	L'equazione di Eulero .....	39
4.5.2	Equazione di Gibbs-Duhem .....	40
4.6	La dipendenza funzionale della relazione fondamentale .....	41
<b>5</b>	<b>I potenziali termodinamici e le loro applicazioni</b> .....	43
5.1	Definizione dei potenziali termodinamici .....	43
5.2	Significato fisico dei potenziali .....	44
5.3	Relazioni di Maxwell e loro conseguenze .....	46
<b>6</b>	<b>Stabilità dell'equilibrio termodinamico</b> .....	53
6.1	Conseguenze delle condizioni di stabilità .....	53
6.2	Miscela multifase .....	57
6.3	Condizioni di equilibrio e regola delle fasi .....	57
6.4	Proprietà delle miscele multifase di sostanze pure .....	59
6.5	L'equazione di Clausius - Clapeyron .....	61
<b>Parte II Termodinamica applicata</b>		
<b>7</b>	<b>I gas ideali</b> .....	67
7.1	Relazione fondamentale ed equazioni di stato di un gas ideale .....	67
7.2	I coefficienti $\alpha$ , $k_T$ , $k_S$ , $c_V$ , $c_P$ .....	69
7.3	Il gas perfetto .....	72
7.4	Trasformazioni politropiche .....	74
<b>8</b>	<b>I diagrammi di stato delle sostanze pure</b> .....	79
8.1	Diagramma Pressione-Temperatura .....	79
8.2	Diagrammi P-v e T-s .....	81
8.3	Rappresentazione delle trasformazioni sui diagrammi P-v e T-s .....	85
8.3.1	Trasformazioni isocora e isobara .....	86
8.3.2	Trasformazioni isoterma e isoentropica .....	87
8.3.3	Trasformazione isoentalpica sul diagramma $T - s$ .....	88
8.4	Il diagramma di Mollier .....	90

<b>9</b>	<b>Le macchine termodinamiche</b> .....	93
9.1	Definizione e bilanci .....	93
9.2	Macchine termodinamiche e secondo principio della termodinamica ..	95
9.3	Macchine termodinamiche dirette .....	97
9.4	Macchine termodinamiche inverse .....	99
9.5	Processi di massimo lavoro .....	101
<b>10</b>	<b>I sistemi aperti</b> .....	103
10.1	I sistemi aperti in regime stazionario .....	103
10.1.1	Il bilancio di massa .....	106
10.1.2	Il bilancio di energia .....	107
10.1.3	L'analisi entropica per un sistema fluente .....	110
10.2	Applicazioni dei bilanci e dell'analisi entropica alle macchine a fluido	113
10.2.1	Turbine a gas o a vapore .....	113
10.2.2	Compressore adiabatico .....	115
10.2.3	Pompa .....	116
10.2.4	Scambiatori di calore .....	117
10.2.5	Lavoro utile e lavoro di pulsione .....	118
10.3	Sistemi con più di un ingresso e di un'uscita .....	119
10.4	Il moto dei fluidi nei condotti .....	120
10.4.1	Perdite di carico distribuite .....	122
10.4.2	Perdite di carico concentrate .....	122
10.4.3	Legame tra perdite di carico distribuite e sforzo tangenziale di parete.....	123
10.5	I sistemi aperti in regime variabile .....	125
10.6	Il concetto di exergia .....	127
<b>11</b>	<b>I processi ciclici</b> .....	129
11.1	Classificazione dei processi ciclici .....	129
11.2	Il Ciclo di Carnot .....	131
11.3	Cicli a gas simmetrici .....	132
11.4	Cicli diretti a gas .....	134
11.4.1	Il ciclo Otto .....	134
11.4.2	Il ciclo Diesel .....	138
11.4.3	Il ciclo Joule-Brayton .....	140
11.4.4	Altri cicli diretti a gas .....	145
11.4.5	Rigenerazione nei cicli a gas .....	145
11.5	Cicli diretti a vapore .....	147
11.5.1	Aumento della pressione massima .....	151

11.5.2	Surriscaldamento del vapore .....	152
11.5.3	Ciclo Rankine con ri-surriscaldamento .....	153
11.5.4	Ciclo Rankine con spillamenti .....	154
11.5.5	Effetti delle irreversibilità .....	156
11.6	I cicli frigoriferi .....	157
11.6.1	Cicli frigoriferi a gas .....	158
11.6.2	Il ciclo frigorifero a vapore .....	160
<b>12</b>	<b>Termodinamica dell'aria umida</b> .....	<b>165</b>
12.1	Le miscele di gas perfetti .....	165
12.2	Miscele di gas e vapori: l'aria umida .....	168
12.3	Grandezze caratteristiche dell'aria umida .....	168
12.3.1	Stati omogenei .....	169
12.3.2	Stati eterogenei .....	171
12.4	Diagramma di Mollier per l'aria umida .....	175
12.5	Trasformazioni dell'aria umida .....	179
 <b>Parte III Fenomeni di trasporto</b>		
<b>13</b>	<b>La conduzione del calore</b> .....	<b>189</b>
13.1	Il postulato di Fourier .....	189
13.2	Il bilancio energetico e l'equazione di Fourier .....	191
13.3	La conduzione in regime stazionario .....	196
13.3.1	Problemi monodimensionali .....	196
13.3.2	Pareti piane multistrato .....	200
13.3.3	Il metodo dell'analogia elettrica .....	202
13.3.4	Resistenza di contatto .....	206
13.3.5	Problemi monodimensionali con simmetria cilindrica .....	207
13.3.6	L'analogia elettrica in simmetria cilindrica .....	211
13.3.7	Il raggio critico .....	213
13.3.8	Cilindro pieno con generazione di potenza .....	214
13.4	La conduzione del calore in regime variabile .....	215
13.4.1	Il metodo delle capacità concentrate .....	215
13.4.2	Casi con numero di Biot non trascurabile .....	220
<b>14</b>	<b>Lo scambio termico convettivo</b> .....	<b>229</b>
14.1	Lo strato limite .....	229
14.2	Il coefficiente di scambio termico convettivo .....	231
14.3	I numeri adimensionali e il teorema di Buckingham .....	233

14.4 Un'applicazione: le alettature	235
14.5 La convezione naturale	240
<b>15 Lo scambio termico per irraggiamento</b>	<b>245</b>
15.1 Grandezze caratteristiche dello scambio radiativo	246
15.2 I coefficienti di assorbimento, riflessione, trasmissione	247
15.3 Il corpo nero e il coefficiente di emissione	249
15.4 La legge di Kirchhoff e le superfici grigie	252
15.5 I fattori di forma	253
15.6 Il bilancio energetico	256
15.7 Lo scambio termico tra superfici nere	257
15.8 Scambio termico per irraggiamento tra superfici grigie	259
15.9 Il metodo delle reti elettriche	263
15.10 Gli schermi antiradianti	267
15.11 Lo scambio radiativo con il cielo	268
<b>16 Gli scambiatori di calore</b>	<b>271</b>
16.1 La temperatura di nocciolo	271
16.2 Il bilancio energetico globale	273
16.3 La conduttanza termica	274
16.4 Il bilancio energetico locale	275
16.5 I profili di temperatura	279
16.6 Scambiatori di calore con fluidi in transizione di fase	281
16.7 L'efficienza di uno scambiatore di calore	282
<b>A Appendice</b>	<b>285</b>
A.1 Simbologia	285
A.1.1 L'operatore differenziale $d$ ed il simbolo $\delta$	285
A.1.2 La derivata parziale	286
A.1.3 Operatori differenziali basati sul simbolo $\nabla$	287
A.2 Omogeneità della relazione fondamentale	289
A.3 Trasformate di Legendre	290
A.4 Le relazioni di Maxwell e alcune conseguenze	294
A.4.1 I determinanti Jacobiani	297
A.4.2 Alcune applicazioni delle relazioni di Maxwell	298
A.5 Stabilità dell'equilibrio di un sistema semplice omogeneo monocomponente	299
A.5.1 Alcune conseguenze delle condizioni di stabilità	303
A.6 Velocità medie di sezione in un condotto	305

A.7 Analisi entropica di un sistema aperto in regime variabile . . . . .	307
A.8 Conseguenze delle ipotesi semplificative per la termodinamica dell'aria umida . . . . .	309
<b>Bibliografia</b> . . . . .	<b>313</b>