

FONDAMENTI TERMODINAMICI DELL'ENERGETICA

L'impostazione generale del libro tiene conto delle esigenze didattiche dei corsi di Termodinamica applicata e Fisica tecnica per allievi ingegneri meccanici, gestionali e civili, generalmente tenuti al secondo anno delle lauree triennali. Di conseguenza alcuni argomenti applicativi, come i cicli diretti e inversi, sono trattati in modo sintetico per evitare sovrapposizioni con i corsi successivi di Macchine ed Energetica. Dal punto di vista didattico, si è cercato di evitare che la riduzione dei contenuti andasse a scapito della chiarezza espositiva. Per questo motivo, l'esposizione segue il percorso storico e non il percorso assiomatico in cui gli enunciati matematici precedono l'esame degli aspetti fisici che li giustificano. Inoltre, le dimostrazioni non trascurano alcun passaggio e gli argomenti tradizionalmente più ostici sono illustrati da molti esempi di applicazione. Questa terza edizione è stata adeguata alla revisione del Sistema Internazionale di Unità di Misura (SI), entrata in vigore il 20 maggio 2019 in occasione della Giornata Mondiale della Metrologia.

Gianni Comini

Già professore ordinario di Fisica tecnica nelle Università di Trieste e Udine dal 1975 al 2010, dal 2010 è direttore del Dipartimento di Energia e ambiente del Centro Internazionale per le Scienze Meccaniche (CISM) di Udine.

Stefano Savino

È professore associato di Fisica tecnica industriale presso l'Università di Udine, dove tiene i corsi di Termodinamica applicata, Fisica tecnica ed Energie rinnovabili.

libreriauniversitaria.it
edizioni



libreriauniversitaria.it

STUDI E PROGETTI

G. Comini, S. Savino

FONDAMENTI TERMODINAMICI DELL'ENERGETICA

Gianni Comini, Stefano Savino

FONDAMENTI TERMODINAMICI DELL'ENERGETICA

Terza edizione rivista e aggiornata

libreriauniversitaria.it
edizioni

Prefazione

La terza edizione dei Fondamenti Termodinamici dell'Energetica era esaurita da alcuni mesi ed era opportuno riportare nelle librerie un volume ancora molto richiesto. Tuttavia, anziché procedere ad una semplice ristampa, si è deciso di seguire le segnalazioni di colleghi e studenti preparando una Nuova Edizione completamente rivista ed aggiornata. Fortunatamente, la fatica materiale della riscrittura è stata alleviata dall'utilizzo del linguaggio LaTeX che ha evitato preoccupazioni ed errori connessi ad impaginazione, preparazione degli indici e rinumerazione di paragrafi, formule e figure.

Rispetto alle edizioni precedenti, l'impostazione generale del testo non è cambiata ma, grazie alle modifiche apportate, il volume dovrebbe essere di lettura più scorrevole e risultare ancora più adatto alle esigenze didattiche dei corsi di Termodinamica Applicata e Fisica Tecnica per allievi ingegneri meccanici, gestionali e civili.

In tali corsi, generalmente tenuti al secondo anno delle lauree triennali, il principale obiettivo è fornire una solida base concettuale per comprendere le applicazioni della Termodinamica al settore energetico piuttosto che illustrare in dettaglio il maggior numero possibile di applicazioni. In questo volume, ad esempio, alcuni argomenti applicativi, come i cicli diretti e inversi, il moto dei fluidi comprimibili ed i bilanci di exergia sono trattati in modo sintetico per evitare sovrapposizioni con i corsi successivi di Macchine, Energetica, Impianti Tecnici ed Analisi Exergetica.

Dal punto di vista didattico, si è cercato di evitare che la riduzione dei contenuti andasse a scapito della chiarezza espositiva, o creasse quei "vuoti" concettuali che, spesso, impediscono di apprezzare la grande coerenza interna di una disciplina come la Termodinamica. Per questo motivo, l'esposizione dei principi segue il percorso storico che ha portato alla loro scoperta, e non il percorso assiomatico in cui gli enunciati matematici precedono l'esame degli aspetti fisici che li giustificano. Analogamente, le dimostrazioni non trascurano alcun passaggio e gli argomenti tradizionalmente più ostici sono illustrati da molti esempi completamente svolti.

Infine, la presentazione è strutturata in modo da facilitare i docenti nell'individuazione di percorsi didattici abbreviati che possono non comprendere, ad esempio, le

PREFAZIONE

sezioni dedicate ad approfondimenti, come le equazioni di stato degli aeriformi e le relazioni di Maxwell, ed i capitoli finali relativi al moto dei fluidi comprimibili ed all'energia utilizzabile.

Udine, luglio 2022

Gianni Comini e Stefano Savino

Indice

1	Concetti introduttivi e definizioni	1
1.1	INTRODUZIONE	1
1.2	SISTEMI CHIUSI	2
1.3	SISTEMI APERTI	4
1.3.1	Conservazione della massa	6
1.4	UNITÀ DI MISURA	8
1.5	SISTEMA INTERNAZIONALE	10
1.5.1	Le costanti naturali	12
1.5.2	Dalle costanti alle unità	14
1.6	USO DEL SISTEMA INTERNAZIONALE	19
1.6.1	Conversione tra sistemi di unità di misura	21
1.7	SCALE DI TEMPERATURA	24
1.7.1	Scala di temperature di gas ideale	27
1.7.2	Scala Internazionale Pratica delle Temperature	28
1.8	CONCLUSIONI	29
2	Lavoro e bilancio di energia meccanica	31
2.1	INTRODUZIONE	31
2.2	SCAMBI DI LAVORO	32
2.3	LAVORO IN UN SISTEMA CHIUSO	33
2.3.1	Lavoro tecnico in un sistema chiuso	36
2.3.2	Bilancio dell'energia meccanica in un sistema chiuso	37
2.4	LAVORO TECNICO IN UN SISTEMA APERTO	41
2.5	BILANCIO DELL'ENERGIA MECCANICA NEI SISTEMI MONODIMENSIONALI STAZIONARI	44
2.5.1	Applicazioni del bilancio dell'energia meccanica ai sistemi monodimensionali stazionari	47
2.5.2	Lavoro delle forze di attrito viscoso	50
2.6	CONCLUSIONI	53

3	Primo principio della termodinamica e bilancio dell'energia totale	55
3.1	INTRODUZIONE	55
3.2	PRIMO PRINCIPIO PER I SISTEMI CHIUSI	56
3.3	PRIMO PRINCIPIO PER I SISTEMI APERTI	59
3.3.1	Primo principio per sistemi a deflusso monodimensionale stazionario	63
3.4	ESEMPI DI APPLICAZIONE	64
3.4.1	Compressori e turbine	64
3.4.2	Scambiatori di calore	66
3.4.3	Organi di laminazione	67
3.4.4	Sistemi di riempimento	67
3.5	PRIMO PRINCIPIO PER TRASFORMAZIONI CICLICHE	69
3.6	CALORI SPECIFICI	73
3.6.1	Calori specifici delle sostanze incompressibili	75
3.7	CONCLUSIONI	79
4	Secondo principio della termodinamica e bilancio di entropia	81
4.1	INTRODUZIONE	81
4.2	ENUNCIATI DEL SECONDO PRINCIPIO	82
4.3	REVERSIBILITÀ ED IRREVERSIBILITÀ	83
4.4	CICLO DI CARNOT E TEMPERATURA TERMODINAMICA	85
4.4.1	Rendimento del ciclo di Carnot diretto e coefficienti di effetto utile dei cicli di Carnot inversi	87
4.5	ENTROPIA	90
4.5.1	Disuguaglianza di Clausius	93
4.6	ESPRESSIONI DELLA FORMA DIFFERENZIALE “ Tds ”	95
4.6.1	Entropia delle sostanze incompressibili	96
4.6.2	Primo e secondo principio e bilancio dell'energia meccanica	97
4.7	BILANCIO DI ENTROPIA PER I SISTEMI CHIUSI	98
4.8	BILANCIO DI ENTROPIA PER I SISTEMI APERTI	103
4.8.1	Bilancio di entropia per sistemi a deflusso monodimensionale stazionario	106
4.9	CONCLUSIONI	109
5	Gas ideali e loro miscele	111
5.1	INTRODUZIONE	111
5.2	EQUAZIONE DI STATO DEI GAS IDEALI	112
5.2.1	Calori specifici, energia interna ed entalpia dei gas ideali	114
5.2.2	Valutazione dei calori specifici dei gas ideali	117
5.2.3	Entropia dei gas ideali	119

5.3	TRASFORMAZIONI ISOCORE DEI GAS IDEALI	121
5.4	TRASFORMAZIONI ISOBARE DEI GAS IDEALI	122
5.5	TRASFORMAZIONI ISOTERME DEI GAS IDEALI	123
5.6	TRASFORMAZIONI ADIABATICHE ED ISOENTROPICHE DEI GAS IDEALI	125
5.6.1	Lavoro scambiato in trasformazioni adiabatiche	126
5.6.2	Lavoro scambiato in trasformazioni isoentropiche	127
5.6.3	Rendimenti isoentropici	130
5.7	TRASFORMAZIONI POLITROPICHE	133
5.7.1	Lavoro scambiato nelle trasformazioni politropiche	135
5.7.2	Calore scambiato nelle trasformazioni politropiche	137
5.7.3	Rendimenti Politropici	138
5.8	COMPOSIZIONE DELLE MISCELE DI GAS IDEALI	143
5.9	MODELLI DI DALTON E AMAGAT	145
5.10	ENERGIA INTERNA, ENTALPIA ED ENTROPIA DELLE MISCE- LE	148
5.10.1	Variazioni delle proprietà termodinamiche nelle trasformazioni	149
5.10.2	Miscelazione di gas ideali	152
5.11	CONCLUSIONI	153
6	Sostanze pure	155
6.1	INTRODUZIONE	155
6.2	DIAGRAMMI (p, v, T) e (p, T)	156
6.3	DIAGRAMMA (p, v)	159
6.3.1	Liquido sottoraffreddato e vapore surriscaldato	161
6.4	FATTORE DI COMPRIMIBILITÀ	162
6.5	EQUAZIONI DI STATO DEGLI AERIFORMI	166
6.5.1	Equazione di Van der Waals	167
6.5.2	Equazione del viriale	168
6.5.3	Equazione di Lee-Kesler	169
6.6	GRANDEZZE ENERGETICHE DEGLI AERIFORMI	169
6.6.1	Relazioni di Maxwell	170
6.6.2	Equazione di Clausius-Clapeyron	171
6.6.3	Espressione dell'energia interna	177
6.6.4	Espressione dell'entalpia	178
6.7	DIAGRAMMI TERMODINAMICI	179
6.7.1	Diagramma (T, s)	180
6.7.2	Diagramma (h, s)	182
6.7.3	Diagramma (p, h)	183
6.7.4	Analisi dei cicli termodinamici a vapore	184

INDICE

6.8	CONCLUSIONI	188
7	Aria umida	191
7.1	INTRODUZIONE	191
7.2	ARIA SECCA E VAPORE D'ACQUA	192
7.3	PROPRIETÀ TERMODINAMICHE DELL'ARIA UMIDA	194
7.3.1	Umidità specifica	194
7.3.2	Umidità Relativa	196
7.3.3	Entalpia specifica dell'aria umida	196
7.3.4	Calore specifico a pressione costante dell'aria umida	198
7.4	DIAGRAMMI PSICROMETRICI	200
7.4.1	Diagramma Carrier	200
7.4.2	Diagramma di Mollier	202
7.4.3	Diagramma ASHRAE	203
7.5	MISURE SULL' ARIA UMIDA	204
7.5.1	Temperatura di rugiada	204
7.5.2	Temperatura di bulbo bagnato	205
7.5.3	Individuazione dello stato dell'aria umida	207
7.6	TRASFORMAZIONI DELL' ARIA UMIDA	208
7.6.1	Mescolamento adiabatico	208
7.6.2	Umidificazione adiabatica	210
7.6.3	Umidificazione a vapore	212
7.6.4	Riscaldamento e raffreddamento sensibile	213
7.6.5	Raffreddamento con deumidificazione	215
7.7	CONDIZIONAMENTO DELL' ARIA	217
7.7.1	Condizionamento invernale	220
7.7.2	Condizionamento estivo	222
7.8	CONCLUSIONI	225
8	Combustione	227
8.1	INTRODUZIONE	227
8.2	RICHIAMI DI STECHIOMETRIA	228
8.2.1	Eccesso d'aria	231
8.2.2	Analisi dei fumi	232
8.3	POTERI CALORIFICI	233
8.3.1	Combustioni reali	237
8.3.2	Variazioni del potere calorifico	238
8.4	TEMPERATURA DEI FUMI	239
8.5	RENDIMENTI DI CONVERSIONE DEI PROCESSI DI COMBU- STIONE	242

8.6	RENDIMENTI DI CALDAIE E GENERATORI DI VAPORE	243
8.7	RENDIMENTI DELLE CAMERE DI COMBUSTIONE	246
8.8	RENDIMENTI DEGLI IMPIANTI TERMICI MOTORI	249
8.9	CONCLUSIONI	250
9	Cicli diretti	253
9.1	INTRODUZIONE	253
9.2	CICLO JOULE	255
9.2.1	Ciclo Joule ideale	255
9.2.2	Influenza delle irreversibilità interne	260
9.2.3	Impianti con turbina a gas	263
9.3	CICLI DEI MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA	264
9.3.1	Ciclo Otto	265
9.3.2	Ciclo Diesel	271
9.3.3	Ciclo misto	277
9.4	CICLI DIRETTI A VAPORE	279
9.4.1	Ciclo Rankine a vapore saturo	281
9.4.2	Influenza delle irreversibilità interne	284
9.4.3	Miglioramenti del ciclo a vapore saturo	285
9.4.4	Ciclo Rankine a vapore surriscaldato	286
9.4.5	Miglioramenti del ciclo a vapore surriscaldato	289
9.4.6	Impianti con turbina a vapore	291
9.5	CONCLUSIONI	293
10	Cicli inversi	295
10.1	INTRODUZIONE	295
10.2	CICLI INVERSI STANDARD	295
10.2.1	Ciclo frigorifero standard	298
10.2.2	Ciclo standard a pompa di calore	301
10.2.3	Influenza delle irreversibilità esterne	303
10.3	FLUIDI FRIGORIGENI	304
10.4	MACCHINE AD ASSORBIMENTO	307
10.4.1	Valori massimi dei coefficienti di effetto utile	310
10.5	CONCLUSIONI	315
11	Cenni sul moto dei fluidi comprimibili	317
11.1	INTRODUZIONE	317
11.2	TEOREMA DELLA QUANTITÀ DI MOTO	317
11.3	VELOCITÀ DEL SUONO	319
11.4	STATO DI RISTAGNO	322

INDICE

11.5	CONDOTTI A SEZIONE VARIABILE	325
11.5.1	Stato critico	327
11.6	ESPANSORI IDEALI	329
11.7	ESPANSORI REALI	333
11.7.1	Ugello convergente	333
11.7.2	Ugello convergente-divergente	334
11.7.3	Rendimento isoentropico di un ugello	337
11.8	CONCLUSIONI	338
12	Energia utilizzabile o exergia?	341
12.1	INTRODUZIONE	341
12.2	BILANCIO DI EXERGIA PER UN SISTEMA CHIUSO	343
12.2.1	Energia utilizzabile di una quantità di calore	345
12.2.2	Energia utilizzabile di una massa di fluido in un sistema chiuso	347
12.3	BILANCIO DI EXERGIA PER UN SISTEMA APERTO	349
12.3.1	Energia utilizzabile di una massa di fluido che attraversa un sistema aperto	352
12.4	RENDIMENTI DI PRIMO E SECONDO PRINCIPIO	354
12.5	ESEMPI DI APPLICAZIONE	356
12.5.1	Cicli diretti bitermici	356
12.5.2	Cicli inversi bitermici	358
12.5.3	Espansori e compressori	361
12.5.4	Scambiatori di calore	365
12.6	CONCLUSIONI	367
	Appendice	369
	Bibliografia	399
	Indice analitico	401