

In questa terza edizione sono state modificate alcune figure e sono stati corretti errori ed improprietà in base alle segnalazioni pervenute da colleghi e studenti. Le modifiche più importanti, tuttavia, riguardano l'adeguamento alla revisione del Sistema Internazionale di Unità di Misura (SI). Tale revisione, proposta nel 2018 dalla XXVI Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM), è entrata in vigore il 20 Maggio 2019 in occasione della Giornata Mondiale della Metrologia. Da questo punto di vista, quindi, si può affermare che la terza edizione del volume è, probabilmente, il primo testo di termodinamica già coerente con il nuovo SI.

Dal punto di vista pratico, l'impostazione generale 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. Un altro argomento specialistico, ovvero i bilanci di energia utilizzabile, è riassunto nell'ultimo capitolo in quanto viene trattato estesamente nel nuovo volume: "G. Comini, G. Croce e S. Savino, Fondamenti di Analisi Exergetica, SGE, Padova, 2020".

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. Infine, la presentazione è strutturata in modo da consentire l'individuazione di percorsi didattici ulteriormente abbreviati che possono non comprendere, ad esempio, il bilancio dell'energia meccanica, il moto dei fluidi comprimibili e l'energia utilizzabile.

Gianni Comini è stato professore ordinario di Fisica Tecnica nelle Università di Trieste e Udine dal 1975 al 2010 e, 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.

€ 30,00
IVA COMPRESA

ISBN 978-88-89884-36-2

SGE
PADOVA

FONDAMENTI
TERMODINAMICI DELL'ENERGETICA

G. Comini
S. Savino

Gianni Comini - Stefano Savino

FONDAMENTI TERMODINAMICI DELL'ENERGETICA

III edizione

SGE EDITORIALI
PADOVA

Gianni Comini - Stefano Savino

FONDAMENTI TERMODINAMICI DELL'ENERGETICA

III edizione



Volumi pubblicati

G. Comini, G. Croce, S. Savino, ENERGETICA GENERALE

G. Comini, G. Croce, S. Savino, FONDAMENTI DI ANALISI EXERGETICA

G. Comini, G. Cortella, FONDAMENTI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

G. Comini, FONDAMENTI DI TERMODINAMICA APPLICATA

A cura di G. Comini, G. Croce, E. Nobile, FONDAMENTI DI
TERMOFLUIDODINAMICA
COMPUTAZIONALE

Copyright © 2020

Servizi Grafici Editoriali

Via Lagrange, 3 - 35143 Padova

Tel. 049 8302697

sgeditoriali.it

www.sgeditoriali.it

1^a Edizione Gennaio 2011

2^a Edizione Gennaio 2014

3^a Edizione Gennaio 2020

I diritti di traduzione, di riproduzione e di adattamento
totale o parziale, con qualsiasi mezzo
(compreso i microfilms e le copie fotostatiche)
sono riservati per tutti i Paesi.

Prefazione

In questa terza edizione sono state modificate alcune figure e sono stati corretti errori ed improprietà in base alle segnalazioni pervenute da colleghi e studenti. Le modifiche più importanti, tuttavia, riguardano l'adeguamento alla revisione del Sistema Internazionale di Unità di Misura (SI). Tale revisione, proposta nel 2018 dalla XXVI Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM), è entrata in vigore il 20 Maggio 2019 in occasione della Giornata Mondiale della Metrologia. Da questo punto di vista, quindi, si può affermare che la terza edizione del volume è, probabilmente, il primo testo di termodinamica già coerente con il nuovo SI.

In passato, il sistema SI era stato modificato a più riprese, sempre in occasione delle CGPM, per adeguarlo alle mutate esigenze degli utenti ed ai progressi scientifici e tecnologici della Metrologia. La revisione del 20 Maggio 2019 però, costituisce una vera e propria rivoluzione concettuale in quanto lega la definizione delle sette unità di misura fondamentali ai valori, accettati come “esatti”, di sette costanti naturali. I valori delle costanti naturali sono stati definiti esatti in quanto scelti con il criterio di ritornare ai valori delle unità fondamentali determinati, sino a quel momento, sulla base di campioni materiali e processi fisici o chimici. In questo modo non si sono generate discontinuità nei processi di misura e, allo stesso tempo, si è lasciata piena libertà ai ricercatori nelle nuove realizzazioni sperimentali delle unità.

Dal punto di vista culturale non si può fare a meno di ricordare che, fino al 2019, le unità fondamentali erano riferite: al chilogrammo campione di platino-iridio conservato a Sèvres per la massa, ad uno stato fisico come il punto triplo dell'acqua per la temperatura, ad esperimenti ideali per l'intensità di corrente, l'intensità luminosa e la quantità di materia. Non mancavano, tuttavia, i riferimenti a costanti naturali come il periodo di oscillazione dell'isotopo 133 del cesio per il tempo, e la velocità della luce nel vuoto per la lunghezza. Proprio i vantaggi pratici constatati negli ultimi due casi, hanno spinto alla decisione di estendere l'uso di costanti naturali a tutte sette le unità fondamentali.

Dal punto di vista pratico, l'impostazione generale del testo non è cambiata ma, grazie alle modifiche apportate, il volume dovrebbe essere 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 quello di fornire una solida base concettuale per l'analisi delle applicazioni ingegneristiche, con particolare riferimento a quelle del settore energetico. In questo volume alcuni argomenti applicativi, come i cicli diretti e inversi, sono trattati in modo sintetico per evitare sovrapposizioni con i corsi paralleli di Macchine ed Energetica. Altri argomenti specialistici, come i bilanci di energia utilizzabile, sono riassunti nell'ultimo capitolo, in quanto sono trattati estesamente in un nuovo volume appena uscito: "G. Comini, G. Croce e S. Savino, Fondamenti di Analisi Exergetica, SGE, Padova, 2020".

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, inoltre, gli argomenti tradizionalmente più ostici sono illustrati da molti esempi di applicazione. Infine, la presentazione è strutturata in modo da consentire l'individuazione di percorsi didattici ulteriormente abbreviati che possono non comprendere, ad esempio, il bilancio dell'energia meccanica, il moto dei fluidi comprimibili e l'energia utilizzabile.

Udine, gennaio 2020

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	118

5.3	TRASFORMAZIONI ISOCORE DEI GAS IDEALI	120
5.4	TRASFORMAZIONI ISOBARE DEI GAS IDEALI	122
5.5	TRASFORMAZIONI ISOTERME DEI GAS IDEALI	122
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	126
5.6.3	Rendimenti isoentropici	130
5.7	TRASFORMAZIONI POLITROPICHE	133
5.7.1	Lavoro scambiato nelle trasformazioni politropiche	134
5.7.2	Calore scambiato nelle trasformazioni politropiche	136
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)	181
6.7.2	Diagramma (h, s)	182
6.7.3	Diagramma (p, h)	184
6.8	TRASFORMAZIONI DEGLI AERIFORMI	185

6.9	CONCLUSIONI	189
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	236
8.3.2	Variazioni del potere calorifico	238
8.4	TEMPERATURA DEI FUMI	238
8.5	RENDIMENTI DI CONVERSIONE DEI PROCESSI DI COMBUSTIONE	242

8.6	RENDIMENTI DI CALDAIE E GENERATORI DI VAPORE . . .	243
8.7	RENDIMENTI DELLE CAMERE DI COMBUSTIONE	245
8.8	RENDIMENTI DEGLI IMPIANTI TERMICI MOTORI	247
8.9	CONCLUSIONI	249
9	Cicli diretti	251
9.1	INTRODUZIONE	251
9.2	CICLO JOULE	253
9.2.1	Ciclo Joule ideale	253
9.2.2	Influenza delle irreversibilità interne	258
9.2.3	Impianti con turbina a gas	261
9.3	CICLI DEI MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA	263
9.3.1	Ciclo Otto	263
9.3.2	Ciclo Diesel	269
9.3.3	Ciclo misto	275
9.4	CICLI DIRETTI A VAPORE	277
9.4.1	Ciclo Rankine a vapore saturo	279
9.4.2	Influenza delle irreversibilità interne	282
9.4.3	Miglioramenti del ciclo a vapore saturo	283
9.4.4	Ciclo Rankine a vapore surriscaldato	285
9.4.5	Miglioramenti del ciclo a vapore surriscaldato	288
9.4.6	Impianti con turbina a vapore	289
9.5	CONCLUSIONI	291
10	Cicli inversi	293
10.1	INTRODUZIONE	293
10.2	CICLI INVERSI STANDARD	293
10.2.1	Ciclo frigorifero standard	296
10.2.2	Ciclo standard a pompa di calore	299
10.2.3	Influenza delle irreversibilità esterne	302
10.3	FLUIDI FRIGORIGENI	302
10.4	MACCHINE AD ASSORBIMENTO	305
10.4.1	Valori massimi dei coefficienti di effetto utile	309
10.5	CONCLUSIONI	314
11	Cenni sul moto dei fluidi comprimibili	315
11.1	INTRODUZIONE	315
11.2	TEOREMA DELLA QUANTITÀ DI MOTO	316
11.3	VELOCITÀ DEL SUONO	317
11.4	STATO DI RISTAGNO	320

11.5	CONDOTTI A SEZIONE VARIABILE	323
11.5.1	Stato critico	325
11.6	ESPANSORI IDEALI	327
11.7	ESPANSORI REALI	331
11.7.1	Ugello convergente	331
11.7.2	Ugello convergente-divergente	332
11.7.3	Rendimento isoentropico di un ugello	335
11.8	CONCLUSIONI	337
12	Energia utilizzabile	339
12.1	INTRODUZIONE	339
12.2	BILANCIO DI EXERGIA PER UN SISTEMA CHIUSO	340
12.2.1	Energia utilizzabile di una quantità di calore	343
12.2.2	Energia utilizzabile di una massa di fluido in un sistema chiuso	346
12.3	BILANCIO DI EXERGIA PER UN SISTEMA APERTO	347
12.3.1	Energia utilizzabile di una massa di fluido che attraversa un sistema aperto	351
12.4	RENDIMENTI DI PRIMO E SECONDO PRINCIPIO	353
12.5	ESEMPI DI APPLICAZIONE	355
12.5.1	Cicli diretti bitermici	355
12.5.2	Cicli inversi bitermici	357
12.5.3	Espansori e compressori	360
12.5.4	Scambiatori di calore	364
12.6	CONCLUSIONI	366
	Appendice	367
	Bibliografia	397
	Indice analitico	399