

---

# CONTENIDO

---

Prefacio	xv
<b>1</b> Conceptos y definiciones básicas	1
1-1 La naturaleza de la termodinámica	1
1-2 Conversión de energía y eficiencia	4
1-3 Dimensiones y unidades	5
1-4 Sistema, propiedad y estado	10
1-5 Densidad, volumen específico y densidad relativa	13
1-6 Presión	14
1-7 Temperatura y la Ley Cero	18
Problemas (SI)	20
Problemas (USCS)	22
<b>2</b> La primera ley de la termodinámica y el postulado de estado	26
2-1 Introducción	26
2-2 El concepto de trabajo y el proceso adiabático	26
2-3 La primera ley de la termodinámica	29
2-4 Un principio de conservación de energía para sistemas cerrados	31
2-5 La naturaleza de la energía $E$	33
2-6 Modos de trabajo intrínseco cuasiestático	36
2-7 Trabajo de expansión y compresión	37
2-8 Otras formas cuasiestáticas de trabajo	46
2-9 Formas de trabajo irreversible	52
2-10 El postulado de estado y los sistemas simples	55
2-11 Entalpía y capacidades térmicas específicas	57
2-12 Conservación de la energía para sistemas simples compresibles cerrados	59
2-13 Técnicas de resolución de problemas	60
Problemas (SI)	61
Problemas (USCS)	67

<b>3</b>	<b>El gas ideal</b>	<b>73</b>
3-1	Introducción	73
3-2	La ecuación de estado del gas ideal	73
3-3	Relaciones de energía interna, entalpía y capacidad térmica específica para los gases ideales	82
3-4	Capacidades térmicas específicas para los gases ideales	83
3-5	Análisis de energía de sistemas cerrados de gases ideales	
	Problemas (SI)	100
	Problemas (USCS)	104
<b>4</b>	<b>Propiedades físicas de las sustancias puras</b>	<b>110</b>
4-1	La superficie $PvT$	110
4-2	El diagrama presión-temperatura	114
4-3	El diagrama presión-volumen	116
4-4	Tabla de propiedades de las sustancias puras	117
4-5	Los datos tabulares y el análisis de energía en sistemas cerrados	131
4-6	El factor de compresibilidad y los estados correspondientes	143
4-7	Relaciones de propiedades para sustancias incompresibles	149
	Problemas (SI)	152
	Problemas (USCS)	159
<b>5</b>	<b>Análisis de energía mediante volúmenes de control</b>	<b>166</b>
5-1	Introducción	166
5-2	Principio de conservación de la masa para un volumen de control en estado estacionario	167
5-3	El principio de conservación de la energía para un volumen de control	171
5-4	Ecuaciones de energía para un volumen de control en estado estacionario	174
5-5	Comentarios sobre técnicas de resolución de problemas	176
5-6	Aplicaciones a la ingeniería de los sistemas abiertos en estado estacionario	178
	Problemas (SI)	195
	Problemas (USCS)	200
<b>6</b>	<b>La segunda ley y la entropía</b>	<b>205</b>
6-1	Introducción	205
6-2	Equilibrio y la segunda ley	207
6-3	Máquinas térmicas	208
6-4	Enunciado de Kelvin y Planck de la segunda ley	210
6-5	Procesos reversibles e irreversibles	212
6-6	Depósitos de calor y de trabajo	215
6-7	El principio de Carnot	216
6-8	La escala termodinámica de temperatura y la eficiencia de Carnot	217
6-9	El refrigerador y la bomba de calor de Carnot	220
6-10	La desigualdad de Clausius	224
6-11	Entropía	227
6-12	El principio del incremento de entropía	230

6-13	Cambio de entropía en depósitos de calor	232
6-14	Efectos de la transferencia de calor reversible e irreversible	237
	Problemas (SI)	239
	Problemas (USCS)	243
<b>7</b>	<b>Algunas consecuencias de la segunda ley</b>	<b>248</b>
7-1	El diagrama temperatura-entropía	248
7-2	Análisis de segunda ley para un volumen de control	249
7-3	Las ecuaciones $TdS$	252
7-4	Cambio de entropía en un gas ideal	253
7-5	Cambio de entropía de una sustancia incompresible	261
7-6	Cambio de entropía de una sustancia real pura	264
	Problemas (SI)	271
	Problemas (USCS)	274
<b>8</b>	<b>Consecuencias adicionales de la segunda ley</b>	<b>279</b>
8-1	Procesos isentrópicos	279
8-2	El diagrama entalpía-entropía	292
8-3	Eficiencias adiabáticas de equipos de flujo estacionario	293
8-4	Algunas relaciones aplicables a interacciones de trabajo	298
8-5	Procesos de flujo adiabático en los que intervienen fluidos incompresibles	301
8-6	El ciclo de Carnot	307
8-7	Energía disponible y no disponible	312
8-8	Un punto de vista estadístico de la entropía	317
	Problemas (SI)	324
	Problemas (USCS)	330
<b>9</b>	<b>Disponibilidad e irreversibilidad</b>	<b>336</b>
9-1	Introducción	336
9-2	Trabajo óptimo e irreversibilidad	337
9-3	Disponibilidad	349
9-4	Efectividad de los procesos	361
	Problemas (SI)	362
	Problemas (USCS)	364
<b>10</b>	<b>Análisis de flujo transitorio</b>	<b>367</b>
10-1	Introducción	367
10-2	Principios generales de conservación de la energía y de la masa para un volumen de control	368
10-3	Carga y descarga de recipientes rígidos	371
10-4	Análisis de un sistema en estado transitorio con trabajo de frontera	378
10-5	Irreversibilidad y disponibilidad en sistemas en estado transitorio	381
	Problemas (SI)	385
	Problemas (USCS)	387

<b>11</b>	<b>Mezclas de gases ideales sin reacción</b>	<b>391</b>
11-1	Introducción	391
11-2	Análisis de composición de las mezclas gaseosas	392
11-3	Relaciones $PvT$ para mezclas de gases ideales	394
11-4	Propiedades de las mezclas de gases ideales	398
11-5	Procesos de mezclado en los que intervienen gases ideales	406
11-6	Propiedades de una mezcla de un gas ideal y un vapor	410
11-7	Las temperaturas de saturación adiabática y de bulbo húmedo	416
11-8	El diagrama psicrométrico (carta psicrométrica)	419
11-9	Procesos de acondicionamiento de aire	421
	Problemas (SI)	442
	Problemas (USCS)	449
<b>12</b>	<b>Comportamiento <math>PvT</math> de gases reales y mezclas de gases reales</b>	<b>457</b>
12-1	La ecuación de estado del virial	457
12-2	La ecuación de estado de van der Waals	459
12-3	Otras ecuaciones de estado	461
12-4	Cargas de compresibilidad generalizadas	465
12-5	Mezclas de gases reales	466
	Problemas (SI)	471
	Problemas (USCS)	473
<b>13</b>	<b>Relaciones termodinámicas generalizadas</b>	<b>477</b>
13-1	Fundamentos de las derivadas parciales	478
13-2	Algunas relaciones fundamentales para sistemas simples compresibles	480
13-3	Relaciones generalizadas para cambios de entropía, energía interna y entalpía	481
13-4	Relaciones generalizadas para $c_p$ y $c_v$	486
13-5	Presión de vapor y la ecuación de Clapeyron	490
13-6	El coeficiente de Joule-Thompson	493
13-7	Cartas termodinámicas generalizadas	497
	Problemas (SI)	504
	Problemas (USCS)	508
<b>14</b>	<b>Combustión y termoquímica</b>	<b>514</b>
14-1	La estequiometría de las reacciones	514
14-2	Procesos de combustión reales	522
14-3	La entalpía de formación	525
14-4	Análisis de energía en flujo estable para mezclas reactivas	527
14-5	Temperatura de combustión adiabática	531
14-6	Análisis termoquímico de sistemas de volumen constante	537
14-7	Entalpía de reacción y poder calorífico	542
14-8	Análisis de segunda ley para las reacciones químicas	547
14-9	Análisis de disponibilidad para sistemas reactivos	554
	Problemas (SI)	561
	Problemas (USCS)	567

<b>15</b>	<b>Equilibrio químico</b>	<b>574</b>
15-1	Introducción	574
15-2	Criterios de equilibrio	575
15-3	Equilibrio y potencial químico	578
15-4	El potencial químico de un gas ideal	580
15-5	La constante de equilibrio $K_p$	581
15-6	Cálculo de valores de $K_p$	583
15-7	Cálculo de composiciones en equilibrio	585
15-8	Reacciones de ionización	588
15-9	Análisis de primera ley de mezclas de gases ideales en equilibrio	589
15-10	Reacciones simultáneas	594
15-11	Una relación entre $K_p$ y la entalpía de la reacción	596
	Problemas (SI)	598
	Problemas (USCS)	602
<b>16</b>	<b>Ciclos de potencia de gases</b>	<b>605</b>
16-1	El ciclo de aire estándar	605
16-2	El ciclo de Carnot de aire estándar	606
16-3	Nomenclatura introductoria para dispositivos alternativos	609
16-4	El ciclo de Otto de aire estándar	611
16-5	El ciclo de Diesel de aire estándar y el ciclo dual	617
16-6	El ciclo de Brayton de aire estándar	624
16-7	La eficiencia adiabática de dispositivos de trabajo	630
16-8	El ciclo regenerativo de turbina de gas	635
16-9	El proceso politrópico	640
16-10	Análisis de compresores en flujo estable	642
16-11	Ciclos de turbina de gas con enfriamiento intermedio y recalentamiento	645
16-12	Funcionamiento de toberas y difusores	651
16-13	Turbinas de gas para aviones	654
16-14	Ciclos cerrados para turbinas de gas	664
16-15	Los ciclos de Ericsson y de Stirling	667
	Problemas (SI)	669
	Problemas (USCS)	678
<b>17</b>	<b>Ciclos de potencia de vapor</b>	<b>688</b>
17-1	El ciclo de vapor de Carnot	688
17-2	El ciclo de Rankine	689
17-3	El ciclo de recalentamiento ideal	698
17-4	El ciclo regenerativo ideal	701
17-5	Efecto de las irreversibilidades en funcionamiento de los ciclos de potencia de vapor	716
17-6	Ciclo Rankine supercrítico	718
17-7	Ciclos de vapor de alta temperatura y binarios	720
	Problemas (SI)	722
	Problemas (USCS)	727

<b>18</b>	<b>Sistemas de refrigeración</b>	<b>733</b>
18-1	El ciclo de Carnot invertido	733
18-2	El ciclo de refrigeración por compresión de vapor	735
18-3	La bomba de calor	741
18-4	Ciclos de refrigeración de gas	743
18-5	Licuefacción y solidificación de gases	745
18-6	Sistemas de compresión de vapor en cascada y en etapas múltiples	749
18-7	Ciclo de refrigeración de Stirling	753
18-8	Refrigeración por absorción	756
	Problemas (SI)	758
	Problemas (USCS)	764
<b>19</b>	<b>Sistemas de energía avanzados y novedosos</b>	<b>770</b>
19-1	Baterías y pilas de combustión	770
19-2	El ciclo combinado	778
19-3	Sistemas de cogeneración	782
19-4	Magnetohidrodinámica	787
19-5	Conversión de energía geotérmica	790
19-6	Conversión de energía térmica del océano	792
	Lecturas recomendadas	795
	Problemas (SI)	795
	Problemas (USCS)	798
	<b>Bibliografía</b>	<b>801</b>
	<b>Apéndice A-1 Tablas y figuras suplementarias (Unidades del SI)</b>	<b>803</b>
	Tabla A-1M Constantes físicas y factores de conversión	803
	Tabla A-2M Unidades del SI derivadas y factores usuales	804
	Tabla A-3M Masa molar, constantes críticas y capacidades térmicas específicas de la fase gaseosa a 25 K y 1 atm para algunas sustancias comunes	805
	Tabla A-4M Datos de capacidad térmica específica de gas ideal para gases selectos, en kJ/(kg · K)	806
	Tabla A-5M Propiedades del aire como gas ideal	808
	Tabla A-6M Entalpía, energía interna y entropía absoluta del nitrógeno diatómico (N <sub>2</sub> ) como gas ideal	810
	Tabla A-7M Entalpía, energía interna y entropía absoluta del oxígeno diatómico (O <sub>2</sub> ) como gas ideal	812
	Tabla A-8M Entalpía, energía interna y entropía absoluta del monóxido de carbono (CO) como gas ideal	814
	Tabla A-9M Entalpía, energía interna y entropía absoluta del dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) como gas ideal	816
	Tabla A-10M Entalpía energía interna y entropía absoluta del agua (H <sub>2</sub> O)	818

Tabla A-11M Entalpía, energía interna y entropía absoluta del hidrógeno diatómico ( $H_2$ ) como gas ideal de oxígeno monoatómico (O) y de hidróxilo (OH)	820
Tabla A-12M Propiedades del agua saturada: tabla de temperatura	822
Tabla A-13M Propiedades del agua saturada: tabla de presión	824
Tabla A-14M Propiedades del agua: tabla de vapor sobrecalentado	825
Tabla A-15M Propiedades del agua: tabla de líquido comprimido	829
Tabla A-16M Propiedades del refrigerante 12 ( $CCl_2F_2$ ) saturado: tabla de temperatura	830
Tabla A-17M Propiedades del refrigerante 12 ( $CCl_2F_2$ ) saturado: tabla de presión	832
Tabla A-18M Propiedades del refrigerante 12 ( $CCl_2F_2$ ) sobrecalentado	833
Tabla A-19M Propiedades del nitrógeno ( $N_2$ ) saturado: tablas de presión y temperatura	836
Tabla A-20M Propiedades del nitrógeno ( $N_2$ ): tabla de vapor sobrecalentado	837
Tabla A-21M Propiedades termodinámicas del potasio	838
Tabla A-22M Capacidades térmicas específicas de algunos líquidos y sólidos comunes	839
Tabla A-23M Constantes para las ecuaciones de estado de Benedict, Webb y Rubin, de Redlich y Kwong y de van der Waals	840
Tabla A-24M Valores de la entalpía de formación, de la función de Gibbs de formación, de la entropía absoluta y de la entalpía de vaporización a $25^\circ C$ y 1 atm	841
Figura A-25M Carta psicrométrica, unidades métricas, presión barométrica de 1.01 bares	842
Figura A-26M Diagrama de Mollier	843
Figura A-27M Carta de compresibilidad generalizada	844
Figura A-28M Carta de compresibilidad, intervalo de presiones medianas	845
Figura A-29M Carta de compresibilidad, intervalo de presiones elevadas	846
Figura A-30M Carga de entalpía generalizada	847
Figura A-31M Carta de entropía generalizada	848
Tabla A-32M Logaritmos en base 10 de la constante de equilibrio $K_p$	849
<b>Apéndice A-2 Tablas y figuras suplementarias (Unidades del 7SCS)</b>	<b>850</b>
Tabla A-1 Constantes físicas y factores de conversión	851
Tabla A-2 Unidades del SI derivadas (unidades de uso en ingeniería)	851
Tabla A-3 Masa molar, constantes críticas y capacidades térmicas específicas de la fase gaseosa a $77^\circ F$ y 1 atm para algunas sustancias comunes	852
Tabla A-4 Datos de capacidad térmica específica de gas ideal para gases, en Btu/lb · $^\circ F$	853
Tabla A-5 Propiedades del aire como gas ideal	855
Tabla A-6 Entalpía, energía interna y entropía absoluta del nitrógeno diatómico ( $N_2$ ) como gas ideal	857

Tabla A-7	Entalpía energía interna y entropía absoluta del oxígeno diatómico ( $O_2$ ) como gas ideal	859
Tabla A-8	Entalpía, energía interna y entropía absoluta del monóxido de carbono (CO) como gas ideal	861
Tabla A-9	Entalpía, energía interna y entropía absoluta del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) como gas ideal	863
Tabla A-10	Entalpía, energía interna y entropía absoluta del agua ( $H_2O$ ) como gas ideal	865
Tabla A-11	Entalpía, energía interna y entropía absoluta del hidrógeno diatómico ( $H_2$ ) como gas ideal	867
Tabla A-12	Propiedades del agua saturada: tabla de temperatura	869
Tabla A-13	Propiedades del agua saturada: tabla de presión	871
Tabla A-14	Propiedades del agua: tabla de vapor saturada	874
Tabla A-15	Propiedades del agua: tabla de líquido comprimido	886
Tabla A-16	Propiedades del refrigerante 12 ( $CCl_2F_2$ ) saturado: tabla de temperatura	881
Tabla A-17	Propiedades del refrigerante 12 ( $CCl_2F_2$ ) saturado: tabla de presión	882
Tabla A-18	Propiedades del refrigerante 12 ( $CCl_2F_2$ ) sobrecalentado	883
Tabla A-19	Propiedades del nitrógeno ( $N_2$ ) saturado: tabla de temperatura	886
Tabla A-20	Propiedades del nitrógeno ( $N_2$ ): tabla de vapor saturado	887
Tabla A-21	Propiedades termodinámicas del potasio	888
Tabla A-22	Capacidades térmicas específicas de algunos líquidos y sólidos comunes	889
Tabla A-23	Constantes para las ecuaciones de estado de Benedict, Webb y Rubin, de Redlich y Kwong y de van der Waals	890
Tabla A-24	Valores de la entalpía de formación, de la función de Gibbs de formación, de la entropía absoluta y de la entalpía de vaporización a $77^\circ F$ y 1 atm	891
Figura A-25	Carta psicrométrica de la General Electric, presión barométrica de 14.696 psia	892
Figura A-26	Diagrama de Mollier para el agua	893
Figura A-27	Diagrama temperatura-entropía del dióxido de carbono ( $CO_2$ )	894
Símbolos		895
Respuestas a problemas selectos (SI)		899
Respuestas a problemas selectos (USCS)		907
Índice		