

## INDICE

<b>Capitulo Uno. Conceptos Básicos de la Termodinámica</b>	1
<b>1.1. Termodinámica y Energía</b>	2
Áreas de aplicación de la termodinámica	3
<b>1.2. Nota sobre las dimensiones y Unidades</b>	3
Algunas unidades del SI e inglesa	5
Homogeneidad dimensional	7
<b>1.3. Sistemas cerrados y abiertos</b>	8
<b>1.4. Propiedades de un sistema</b>	10
<b>1.5. Estado y equilibrio</b>	12
Postulado de estado	12
<b>1.6. Procesos y ciclos</b>	13
Proceso de flujo estable	14
<b>1.7. Formas de energía</b>	14
Algunas consideraciones físicas de la energía interna	16
Más sobre energía nuclear	18
<b>1.8. Energía y Ambiente</b>	19
Ozono y smog	20
Lluvia ácida	21
El efecto invernadero: el cambio de clima y calentamiento global	22
<b>1.9. Temperatura y la ley de la termodinámica</b>	25
Escalas de temperatura	25
<b>1.10. Presión</b>	28
Variación de la presión con la profundidad	30
<b>1.11. El manómetro</b>	32
Otros instrumentos para medir presión	34
<b>1.12. El barómetro y la presión atmosférica</b>	35
<b>1.13. Técnica para la solución de problemas</b>	37
Una indicación sobre los dígitos significativos	39
Paquetes de software para ingeniería	40
Engineering Equation (Solucionador de Ecuaciones de ingeniería) (EES)	41
<b>Temas de interés especial: Aspectos termodinámica de los sistemas biológicos</b>	42
Aliento y ejercicio	44
Dietas	47
Resumen	50
Referencias y lecturas sugeridas	50
Problemas	51
<b>Capitulo Dos. Propiedades de las Sustancias Puras</b>	63
<b>2.1. Sustancias pura</b>	64
<b>2.2. Fases de una sustancia pura</b>	64
<b>2.3. Procesos de cambio de fase de sustancias puras</b>	65
Líquido comprimido y líquido saturado	65
Vapor saturado y vapor sobrecalentado	66
Temperatura de saturación y presión de saturación	66
Algunas consecuencias de la dependencia de $T_{\text{sat}}$ y $P_{\text{sat}}$	68
<b>2.4. Diagramas de Propiedades para Procesos de Cambio de Fase</b>	70
1. El diagrama $T - v$	70

2. El diagrama P –v	71
Ampliación de los diagramas para incluir la fase sólida	72
3. El diagrama P – t	75
La superficie P – v- T	75
<b>2.5. Tablas de Propiedades</b>	73
Entalpía: una propiedad de combinación	77
1a. Estados de líquido saturado y de vapor saturado	77
1b. Mezcla saturada de líquido – vapor	82
2. Vapor sobrecalentado	82
3. Líquido comprimido	83
Estado de referencia y valores de referencia	84
2.6. Ecuación de estado de gas ideal	86
¿Es el vapor de agua un gas ideal?	88
<b>2.7. Factor de compresibilidad, una medida de la desviación del comportamiento de gas ideal</b>	88
<b>2.8. Otras ecuaciones de estado</b>	93
Ecuación de estado de van der Waals	93
Ecuación de estado de Beattie – Bridgeman	94
Ecuación de estado de Benedict – Webb – Rubin	94
Ecuación de estado virial	94
<b>2.9. Calores específicos</b>	97
<b>2.10. Energía interna, entalpía y calores específicos de gases ideales</b>	99
Relaciones de calores específicos para gases ideales	102
<b>2.11. Energía interna, entalpía y calores específicos de sólidos y líquidos</b>	103
Cambios en la energía interna	104
Cambos de entalpía	104
Temas de interés especial: Presión de vapor y equilibrio de fases	105
Resumen	109
Referencia y lectura sugeridas	110
Problemas	111
<b>Capítulo Tres. Transferencias de Energía por Calor, Trabajo y Masa</b>	121
<b>3.1. Transferencia de calor</b>	122
Antecedentes históricos acerca del calor	123
<b>3.2. Transferencia de energía por trabajo</b>	124
Trabajo eléctrico	127
<b>3.3. Formas Mecánicas de Trabajo</b>	127
1. Trabajo de la frontera móvil	128
2. Trabajo en flecha	133
3. Trabajo de resorte	134
4. Otras formas mecánicas de trabajo	136
<b>3.4. Formas no mecánicas del trabajo</b>	138
<b>3.5. Principio de conservación de la masa</b>	139
Tasas de flujo másico y de volumen	139
Principio de conservación de la masa	140
Balance de masa para procesos con flujo estable	141
3.6. Trabajo de flujo y la energía de un fluido en movimiento	144
Energía total de un fluido en movimiento	145

Transporte de energía por masa	146
Temas de interés especial: Mecanismos de transferencia de calor	148
Resumen	153
Referencia y lectura sugeridas	153
Problemas	154
<b>Capítulo Cuatro. La Primera Ley de la Termodinámica</b>	163
<b>4.1. La Primera Ley de la Termodinámica</b>	164
Balace de energía	165
Cambio de energía de un sistema, $X_{\text{E sistema}}$	165
Mecanismos de transferencia de energía $E_{\text{entra}}$ $E_{\text{sale}}$	166
<b>4.2. Balance de energía para sistemas cerrados</b>	168
<b>4.3. Balance de energía para sistemas de flujo estable</b>	178
Balace de energía para sistemas de flujo estable	179
<b>4.4. Algunos Dispositivos con Ingeniería de Flujo Estable</b>	182
1. Toberas y difusores	182
2. Turbinas y compresores	185
3. Válvulas de estrangulamiento	187
4a. Cámaras de mezclado	189
4b. Intercambiadores de calor	190
5. Flujo de tuberías y ductos	193
<b>4.5. Balance de Energía para procesos de Flujo no Estable</b>	194
Balace de masa	195
Balace de energía	195
<b>Temas de Interés Especial: Refrigeración y Congelación de Alimentos</b>	200
Propiedades térmicas de los alimentos	202
Refrigeración de frutas y verduras	204
Refrigeración de carnes	205
Productos de aves de corral	207
Resumen	211
Referencia y lectura sugeridas	212
Problemas	212
<b>Capítulo Cinco. La Segunda Ley de la Termodinámica</b>	241
<b>5.1. Introducción a la Segunda Ley de la Termodinámica</b>	242
<b>5.2. Depósito de energía térmica</b>	243
<b>5.3. Máquinas térmicas</b>	243
¿Podemos ahorrar $Q_{\text{SAI}}$ ?	246
Segunda ley de la termodinámica: enunciado de Kelvin – Planck	249
<b>5.4. Eficiencias de conversión de energía</b>	249
<b>5.5. Refrigeradores y bombas de calor</b>	253
Coeficiente de funcionamiento	254
Bombas de calor	255
Segunda ley de la termodinámica: enunciado de Clausius	258
Equivalencia de los dos enunciados	258
<b>5.6. Máquinas de movimiento perpetuo</b>	259
Irreversibilidades	263
Procesos interna y externamente reversibles	264
<b>5.8. El ciclo de Carnot</b>	265

El ciclo de Carnot inverso	267
<b>5.9. Los principios de Carnot</b>	267
<b>5.10. La escala termodinámica de temperatura</b>	268
<b>5.11. La máquina térmica de Carnot</b>	270
La calidad de la energía	272
Cantidad contra calidad en la vida diaria	273
<b>5.12. El refrigerador y la bomba de calor de Carnot</b>	274
Temas de interés especial: Refrigeradores caseros	277
Resumen	281
Referencia y lectura sugeridas	282
Problemas	282
<b>Capítulo Seis. Entropía</b>	297
6.1. Entropía	298
Un caso especial: procesos isotérmicos de transferencia de calor internamente reversibles	300
<b>6.2. El principio del incremento de entropía</b>	301
Algunos comentario sobre la entropía	303
<b>6.3. Cambio de entropía de sustancias puras</b>	305
<b>6.4. Procesos isoentrópicos</b>	308
<b>6.5. Diagramas de propiedades que incluyen a la entropía</b>	309
6.6. ¿Qué es la entropía?	311
La entropía y la generación de entropía en la vida diaria	
6.7. Las relaciones T ds	315
6.8. El cambio de entropía de sólidos y líquidos	316
6.9. El cambio de entropía de gases ideales	319
Calores específicos constantes (Tratamiento aproximado)	320
Calores específicos variable (Tratamiento exacto)	320
Procesos isoentrópicos de gases ideales	322
Calores específicos constantes (tratamiento aproximado)	322
Calores específicos variables (Tratamiento exacto)	323
Presión relativa y volumen específico relativo	323
<b>6.10. Trabajo Reversible en Flujo del Compresor</b>	326
Demostración de que los dispositivos de flujo estable entregan al máximo trabajo y consumen el mínimo cuando el proceso es reversible	329
<b>6.11. Minimización del Trabajo del Compresor</b>	330
Compresión por etapas múltiples con interenfriamiento	331
<b>6.12. Eficiencias Isoentrópicas de Algunos Dispositivos de Flujo Estable</b>	334
Eficiencia isoentrópica de turbinas	335
Eficiencia isoentrópica de compresores y bombas	336
Eficiencia isoentrópica de toberas	339
<b>6.13. Balance de Entropía</b>	
Cambio de entropía de un sistema, $X S_{\text{sistema}}$	342
Mecanismos de transferencia de entropía $S_{\text{entra}}$ y $S_{\text{sale}}$	342
Generación de entropía, $S_{\text{gen}}$	344
Sistemas cerrados	345
Volúmenes de control	345
La generación de entropía asociada a un proceso de transferencia de calor	352

Temas de interés especial: Reducción del costo del aire comprimido	353
Resumen	363
Referencia y lectura sugeridas	364
Problemas	365
<b>Capitulo Siete. Exergía: Una Medida del Potencial de Trabajo</b>	383
7.1. Exergía: Potencial de trabajo de la energía	384
Exergía (potencial de trabajo) asociada con las energías cinética y potencial	385
<b>7.2. Trabajo reversible e irreversible</b>	387
<b>7.3. Eficiencia de segunda ley, <math>\eta</math></b>	391
7.4. Cambio de exergía de un sistema	394
Exergía de una masa fija: exergía no de flujo (o de sistema cerrado)	394
Exergía de un fluido en movimiento: exergía de flujo	396
<b>7.5. Transferencia de Exergía por Calor, Trabajo y Masa</b>	399
Transferencia de exergía por transferencia de calor, $Q$	399
Transferencia de exergía por trabajo, $W$	400
Transferencia de exergía por masa, $m$	400
<b>7.6. El Principio de Decremento de Exergía y la Destrucción de Exergía</b>	401
Destrucción de exergía	402
7.7. Balance de exergía: sistemas cerrados	403
7.8. Balance de exergía: volúmenes de control	414
Balance de exergía para sistemas con flujo estable	414
Temas de interés especial: aspectos de la segunda ley en la vida diaria	420
Resumen	424
Referencia y lectura sugeridas	425
Problemas	425
<b>Capitulo Ocho. Ciclos de Potencias de Gas</b>	439
<b>8.1. Consideraciones básicas en el análisis de ciclos de potencia</b>	440
<b>8.2. El ciclo de Carnot y su valor en ingeniería</b>	442
<b>8.3. Suposiciones de aire estándar</b>	444
<b>8.4. Breve panorama de las máquinas recíprocas</b>	444
<b>8.5. Ciclo de Otto: el ciclo ideal para las máquinas de encendido de chispa</b>	445
<b>8.6. Ciclo Diesel: el ciclo ideal para las máquinas de encendido por compresión</b>	451
<b>8.7. Ciclos de Stirling y Ericsson</b>	454
<b>8.8. Ciclo Brayton: el ciclo ideal para los motores de turbina de gas</b>	458
Desarrollo de las turbinas de gas	461
Desviación de los ciclos de turbina de gas reales de los idealizados	463
<b>8.9. El ciclo Brayton con regeneración</b>	465
<b>8.10. El ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración</b>	467
<b>8.11. Ciclos ideales de propulsión por reacción</b>	470
Modificaciones para los motores de turborreactor	474
<b>8.12. Análisis de segunda ley en ciclos de potencia de gas</b>	477
<b>Temas de interés especial: Ahorro de Combustible y Dinero al Manejar sensatamente</b>	780
Antes de conducir	481

Mientras maneja	483
Después de conducir	486
Resumen	486
Referencia y lectura sugeridas	488
Problemas	488
<b>Capítulo Nueve. Ciclos de Potencia de Vapor y Combinados</b>	499
<b>9.1. El ciclo de vapor de Carnot</b>	500
<b>9.2. Ciclo Rankine: el ciclo ideal para los ciclos de potencia de vapor</b>	501
Análisis de energía del ciclo Rankine ideal	502
<b>9.3. Desviación de los ciclos de potencia de vapor reales respecto de los idealizados</b>	505
9.4. ¿Cómo Incrementar la eficiencia del ciclo Rankine?	507
Reducción de la presión del condensador (disminución de $T_{baja, prom}$ )	507
Sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas (aumento de $T_{alta, prom}$ )	508
Incremento de la presión de la caldera (aumento de $T_{alta, prom}$ )	508
<b>9.5. El ciclo Rankine ideal con recalentamiento</b>	511
<b>9.6. El ciclo Rankine ideal regenerativo</b>	514
Calentadores abiertos de agua de alimentación	515
Calentadores cerrados de agua de alimentación	516
<b>9.7. Análisis de segunda ley en ciclos de potencia de vapor</b>	521
<b>9.8. Cogeneración</b>	524
<b>9.9. Ciclos de potencia combinados de gas – vapor</b>	528
Temas de interés especial: Ciclos binarios de vapor	531
Resumen	533
Referencia y lectura sugeridas	534
Problemas	534
<b>Capítulo Diez. Ciclos de Potencia de Vapor y Combinados</b>	499
<b>10.1. Refrigeradores y bombas de calor</b>	548
<b>10.2. El ciclo invertido de Carnot</b>	549
<b>10.3. El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor</b>	551
<b>10.4. Ciclos reales de refrigeración por compresión de vapor</b>	554
<b>10.5. Selección de refrigerante adecuado</b>	557
<b>10.6. Sistema de bombas de calor</b>	558
<b>10.7. Sistemas innovadores de refrigeración por compresión de vapor</b>	559
Sistemas de refrigeración en cascadas	560
Sistemas de refrigeración por compresión de múltiples etapas	563
Sistemas de refrigeración de propósito múltiple con un solo compresor	565
Licuefacción de gases	566
<b>10.8. Ciclos de refrigeración de gas</b>	567
<b>10.9. Sistemas de refrigeración por absorción</b>	570
Temas de interés especial: generación de energía termoeléctrica y Sistemas de Refrigeración	573
Resumen	575
Referencia y lectura sugeridas	576
Problemas	576
<b>Capítulo Once. Relaciones de Propiedades Termodinámicas</b>	585

<b>11.1. Un poco de matemática: derivadas parciales u relaciones asociadas</b>	586
Diferencias parciales	587
Relaciones de diferenciales parciales	588
<b>11.2. Las relaciones de Maxwell</b>	590
<b>11.3. La ecuación de Clapeyron</b>	592
<b>11.4. Relaciones generales para <math>du</math>, <math>dh</math>, <math>ds</math>, <math>c_v</math> y <math>c_p</math></b>	595
Cambios de la energía interna	595
Cambio de entalpía	596
Cambios de entropía	597
Calores específicos $C_v$ y $C_p$	597
<b>11.5. El coeficiente Joule – Thomson</b>	601
<b>11.6. Las <math>A_h</math>, <math>A_u</math> y <math>A_s</math> de gases reales</b>	603
Cambios de entalpía de gases reales	603
Cambios de energía interna de gases reales	605
Cambios de entropía de gases reales	605
Resumen	608
Referencia y lectura sugeridas	609
Problemas	609
<b>Capítulo Doce. Mezcla de Gases</b>	615
<b>12.1. Composición de una mezcla de gases: fracciones molares y de masa</b>	616
<b>12.2. Comportamiento <math>P - v - T</math> de mezcla de gases: gases ideales y reales</b>	618
Mezcla de gases ideales	619
Mezcla de gases reales	619
<b>12.3. Propiedades de Mezcla de gases: Gases ideales y reales</b>	622
Mezcla de gases ideales	623
Mezcla de gases reales	626
Temas de interés especial: Potencial químico y el trabajo de separación de mezcla	630
Mezcla de gas ideal y soluciones ideales	632
Trabajo mínimo de separación de mezcla	634
Procesos de mezclado reversibles	635
Eficiencia de segunda ley	636
Caso especial: separación de una mezcla de dos componentes	636
Una aplicación: Procesos de desalinización	637
Resumen	640
Referencia y lectura sugeridas	641
Problemas	641
<b>Capítulo Trece. Mezcla de Gas – Vapor y Acondicionamiento de Aire</b>	647
13.1. Aire seco y atmosférico	648
13.2. Humedad específica y relativa del aire	649
13.3. Temperatura de punto de rocío	651
13.4. Temperaturas de saturación adiabática y bulbo húmedo	653
13.5. La carta psicrométrica	656
13.6. Comodidad humana y acondicionamiento de aire	658
13.7. Procesos de Acondicionamiento de aire	660

Calentamiento y enfriamiento simple ( $w = \text{constante}$ )	660
Calentamiento con humidificación	661
Enfriamiento con deshumidificación	663
Enfriamiento evaporativo	665
Mezcla adiabática de corrientes de aire	667
Torres de enfriamiento húmedo	669
Resumen	671
Referencia y lectura sugeridas	672
Problemas	673
<b>Capítulo Catorce. Reacciones Químicas</b>	681
<b>14.1. Combustible y combustión</b>	682
<b>14.2. Procesos de combustión teóricos y reales</b>	686
<b>14.3. Entalpía de formación y entalpía de combustión</b>	691
<b>14.4. Análisis de primera ley de sistema reactivos</b>	695
Sistemas de flujo estable	695
Sistemas cerrados	696
<b>14.5. Temperatura de flama adiabática</b>	699
<b>14.6. Cambio de entropía de sistemas reactivos</b>	702
<b>14.7. Análisis de segunda ley de sistema reactivos</b>	703
Temas de interés especial: Celdas de Combustibles	709
Resumen	710
Referencia y lectura sugeridas	712
Problemas	712
<b>Apéndice 1. Tablas de Propiedades y Diagramas (Unidades del SI)</b>	721
Tabla A.1. Masa molar, constante de gas y propiedades del punto – crítico	
Tabla A.2. Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes	723
Tabla A.3. Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes	726
Tabla A.4. Agua saturada – tabla de presiones	730
Tabla A.5. Agua saturada – tabla de presiones	730
Tabla A.6. Agua sobrecalentada	732
Tabla A.7. Agua líquida comprimida	736
Tabla A.8. Hielo saturado – vapor de agua	738
Tabla A.9. Diagrama T – s para el agua	738
Tabla A.10. Diagrama de Mollier para el agua	739
Tabla A.11. Refrigerante 134 <sup>a</sup> saturado – Tabla de temperatura	740
Tabla A.12. Refrigerante 134 <sup>a</sup> . Sobrecalentado	742
Tabla A.13. Refrigerante 134 <sup>a</sup> . Sobrecalentado	742
Figura A.14. Diagrama P – h para el refrigerante 134a	744
Tabla A.15. Funciones unidimensionales isoentrópicas de flujo compresible para un gas ideal con calores específicos y masa molar constante, con $k = 1.4$	745
Tabla A.16. Funciones unidimensionales de choque normal para un gas ideal con calores específicos y masa molar constantes, con $k = 1.4$	746
Tabla A.17. Propiedades de gas ideal del aire	747
Tabla A.18. Propiedades de gas ideal de nitrógeno, N <sub>2</sub>	749
Tabla A.19. Propiedades de gas ideal de oxígeno, O <sub>2</sub>	751
Tabla A.20. Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	753
Tabla A.21. Propiedades de gas ideal del monóxido de carbono, CO	755

Tabla A.22. Propiedades de gas ideal del hidrógeno, H <sub>2</sub>	757
Tabla A.23. Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H <sub>2</sub> O	758
Tabla A.24. Propiedades de gas ideal del oxígeno monoatómico, O	760
Tabla A.25. Propiedades de gas ideal del hidroxilo OH	760
Tabla A.26. Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a 25°C 1 atm	761
Tabla A.27. Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos comunes	762
Tabla A.28. Logaritmos base O de la constante de equilibrio K <sub>p</sub>	763
Tabla A.29. Propiedades de la atmósfera a gran altitud	764
Figura.30a. Gráfica generalizada de compresibilidad de Nelson – Obert – bajas presiones	765
Figura A.30b. Gráfica generalizada de compresibilidad de Nelson – Obert – presiones intermedias	765
Figura A.33c. Gráfica generalizada de compresibilidad de Nelson – Obert – Altas presiones	767
Figura A.31. Gráfica generalizada de desviación de entalpía	768
Figura A.32. Gráfica generalizada de desviación de entropía	769
Figura A.33. Gráfica psicométrica a 1 atm de presión total	770
<b>Apéndice 2. Tablas de Propiedades, Figuras y Diagramas (Unidades Inglesas)</b>	771
Tabla A.1E. Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico	772
Tabla A.2E. Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes	773
Tabla A.3E. Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes	776
Tabla A.4E. Agua saturada – Tabla de temperatura	778
Tabla A.5E. Agua saturada – tabla de presiones	779
Tabla A.6E. Agua sobrecalentada	871
Tabla A.7E. Agua líquida comprimida	785
Tabla A.8E. Hielo Saturado – vapor el agua	787
Tabla A.9E. Diagrama T – s para el agua	787
Tabla A.10E. Diagrama de Mollier para el agua	788
Tabla A.11E. Refrigerante 134 <sup>a</sup> saturado – tabla de temperatura	789
Tabla A.12E. Refrigerante 134 <sup>a</sup> saturado – Tabla de presiones	790
Tabla A.13E. Refrigerante 134 <sup>a</sup> sobrecalentado	791
Figura A14E. Diagrama P – h para el refrigerante 134a	793
Tabla A.17E. Propiedades de gas ideal del aire	794
Tabla A.18E. Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N <sub>2</sub>	796
Tabla A.19E. Propiedades de gas ideal del oxígeno, O <sub>2</sub>	798
Tabla A.20E. Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	800
Tabla A.21E. Propiedades de gas ideal del monóxido de carbono, CO	802
Tabla A.22E. Propiedades de gas ideal de hidrógeno, H <sub>2</sub>	804
Tabla A.23E. Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H <sub>2</sub> O	805
Tabla A.26E. Entalpía de formación. Función de Gibbs de formación t entropía absoluta a 77°F, 1 atm	807
Tabla A.27E. Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos comunes	808
Tabla A.28E. Propiedades de la atmósfera a gran altitud	809
Figura A.33. Gráfica psicométrica a 1 atm de presión total	810

Apéndice 3. Introducción al Software EES	811
Índice	825