

Lista de símbolos XXV

Al estudiante XXIV

PARTE 1 Fundamentos

1. *Conceptos básicos y definiciones* 1
 - 1.1 ¿Qué es la ingeniería? 1
 - 1.2 ¿Qué es la termodinámica? 2
 - 1.3 Definición de la ingeniería termodinámica 4
 - 1.4 Aplicaciones de la ingeniería termodinámica 5
 - 1.5 Importancia de otras ciencias de la ingeniería 14
 - 1.6 Puntos de vista macroscópico y microscópico de la materia 15
 - 1.7 Dimensiones y unidades 16
 - 1.8 Sistemas termodinámicos 20
 - 1.9 Propiedades termodinámicas 23
 - 1.10 Equilibrio termodinámico y estados de equilibrio 24
 - 1.11 Procesos termodinámicos 25
 - 1.12 Temperatura, la ley cero de la termodinámica y equilibrio térmico 27
 - 1.13 Presión y equilibrio mecánico 28
 - 1.14 Potencial químico y equilibrio químico 31
 - 1.15 Estructura simple de la ingeniería termodinámica 32
 - 1.16 Metodología general para la solución de problemas en ingeniería termodinámica 35
 - Problemas 36

2. *La energía y la primera ley de la termodinámica* 43
 - 2.1 Contenido de energía 43
 - 2.2 Conservación de la masa 47

- 2.3 La primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado 48
- 2.4 La primera ley de la termodinámica para procesos cíclicos 50
- 2.5 Definición termodinámica del trabajo 52
- 2.6 Convención de signos para el trabajo 53
- 2.7 Trabajo cuasiestático de expansión 53
- 2.8 Otras formas de trabajo cuasiestático 57
- 2.9 Resumen de las interacciones de trabajo 59
- 2.10 Definición termodinámica del calor 60
- 2.11 La entalpía, una propiedad termodinámica 61
- 2.12 La primera ley de la termodinámica para un sistema abierto 62
- 2.13 Conservación de la masa para un sistema abierto 66
- 2.14 Depósitos termodinámicos 67
- 2.15 Naturaleza fundamental de la energía 68
 - Problemas 69

- 3. *La entropía y la segunda ley de la termodinámica* 77
 - 3.1 La entropía y la calidad de la energía 77
 - 3.2 El cambio de entropía de un depósito de trabajo 79
 - 3.3 El cambio de entropía de un depósito de calor 80
 - 3.4 Transferencia de calor entre dos depósitos de calor 80
 - 3.5 Eficiencias de las máquinas de calor 82
 - 3.6 Eficiencia de los refrigeradores y de las bombas de calor 86
 - 3.7 Ejemplos de procesos irreversibles 88
 - 3.8 La segunda ley de la termodinámica para un sistema cerrado 91
 - 3.9 La segunda ley de la termodinámica para un sistema abierto 93
 - 3.10 El concepto de trabajo perdido 95
 - 3.11 La entropía, el equilibrio y la dirección de los cambios de estado 100
 - 3.12 Naturaleza fundamental de la entropía 103
 - Problemas 103

- 4. *Ecuaciones de estado en forma gráfica y tabular para una sustancia pura* 111
 - 4.1 El postulado de estado 112

- 4.2 Definición de una sustancia pura 113
- 4.3 El postulado de estado para una sustancia simple comprensible 114
- 4.4 Algunas relaciones termodinámicas generales importantes para una sustancia simple comprensible 115
- 4.5 Superficie p - v - T para una sustancia simple comprensible 117
- 4.6 Diagramas termodinámicos para una sustancia simple comprensible 121
- 4.7 Calor específico a volumen constante y calor específico a presión constante 129
- 4.8 Tablas de propiedades termodinámicas para una sustancia simple comprensible 131
- 4.9 Interpolación de propiedades tabuladas 134
- 4.10 Ejemplos sobre evaluación de propiedades y cambios de propiedades debidos a cambios de estado 137
- Problemas 150

- 5. *Comportamiento y propiedades termodinámicas de los gases ideales 157*
 - 5.1 Definición de un gas ideal 158
 - 5.2 Consecuencias importantes del modelo de un gas ideal 163
 - 5.3 Cambio de energía interna de un gas ideal 164
 - 5.4 Cambio de entalpía de un gas ideal 165
 - 5.5 Calores específicos de un gas ideal 165
 - 5.6 Cambio de entropía de un gas ideal 167
 - 5.7 Diagramas termodinámicos para un gas ideal 170
 - 5.8 Tabulación de las propiedades termodinámicas de un gas ideal 172
 - 5.9 Proceso isentrópico en un gas ideal 177
 - 5.10 Proceso politrópico reversible en un gas ideal 178
 - Problemas 183

- 6. *Algunas consecuencias de la segunda ley de la termodinámica con una introducción a los sistemas de componentes múltiples 191*
 - 6.1 El ciclo de Carnot y la escala termodinámica de temperaturas 191
 - 6.2 El ciclo de Carnot utilizando un gas ideal como sustancia de trabajo 195

- 6.3 Equivalencia entre la temperatura absoluta y la temperatura empírica de un gas ideal 197
- 6.4 Cero absoluto, entropía absoluta y la tercera ley de la termodinámica 198
- 6.5 La desigualdad de Clausius 202
- 6.6 Transferencia de calor cuasiestática para un sistema cerrado 203
- 6.7 Otra interpretación del cambio de entropía de un depósito de calor 206
- 6.8 El concepto de disponibilidad 206
- 6.9 Disponibilidad de un flujo en estado permanente 214
- 6.10 El potencial químico y la función de Gibbs 219
- 6.11 La temperatura como fuerza impulsora de la transferencia de calor 223
- 6.12 La presión como fuerza impulsora de los cambios de volumen 224
- 6.13 El potencial químico como fuerza impulsora de la transferencia de materia 226
- 6.14 La regla de fase de Gibbs para un sistema sin reacciones químicas 227
- Problemas 229

PARTE II Aplicaciones

- 7. *Análisis de ingeniería de procesos para sistemas cerrados* 239
 - 7.1 Proceso a volumen constante 239
 - 7.2 Proceso a presión constante 245
 - 7.3 Proceso isotérmico 249
 - 7.4 Proceso adiabático 253
 - 7.5 Proceso con energía interna constante 254
 - Problemas 255

- 8. *Análisis de ingeniería de procesos para sistemas abiertos* 265
 - 8.1 Características distintivas de los sistemas abiertos en estado permanente con flujo permanente 265
 - 8.2 Clasificación de los dispositivos en estado y con flujo permanentes de acuerdo con su función 266

- 8.3 Trabajo de flecha ideal en un dispositivo en estado y flujo permanentes 267
- 8.4 Bombas y compresores 268
- 8.5 Turbinas 271
- 8.6 Dispositivos de estrangulación 276
- 8.7 Cambiadores de calor 280
- 8.8 Sistemas abiertos con flujo permanente que incluyen más de un dispositivo en estado y flujo permanentes 289
- 8.9 Sistemas abiertos en estado no permanente, pero con flujo permanente 307
 - Problemas 317

- 9. *La termodinámica de fluidos con flujo unidimensional permanente* 331
 - 9.1 La ecuación de la energía para un flujo unidimensional permanente sin transferencia de trabajo 332
 - 9.2 Ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible 338
 - 9.3 Deducción de la ecuación de Bernoulli a partir del principio de conservación de la cantidad de movimiento 339
 - 9.4 Velocidad del sonido y el número de Mach 346
 - 9.5 Propiedades de estanciamiento 351
 - 9.6 Variación de la velocidad y la presión en un flujo adiabático a través de un ducto con sección transversal variable 353
 - 9.7 Eficiencias de toberas y difusores 355
 - 9.8 El flujo de masa a través de una tobera convergente 362
 - 9.9 Flujo adiabático en tuberías de sección transversal constante 367
 - Problemas 373

- 10. *Disponibilidad, irreversibilidad y análisis energético de procesos* 381
 - 10.1 Ecuación de la disponibilidad (exergía) para un sistema cerrado 382
 - 10.2 Análisis de la segunda ley para sistemas cerrados 385
 - 10.3 Ecuación de la disponibilidad (exergía) para un sistema abierto 392
 - 10.4 Análisis de la segunda ley para sistemas abiertos 394

- 10.5 Eficiencia de la segunda ley 401
- Problemas 421

11. *Sistemas para la generación de energía, ciclo combinado y cogeneración* 429

- 11.1 Toma de decisiones en el diseño de plantas generadoras 429

Ciclos de potencia de vapor

- 11.2 El ciclo de Carnot de vapor 432
- 11.3 El ciclo de Rankine simple 434
- 11.4 El ciclo de Rankine con sobrecalentamiento 442
- 11.5 El ciclo de Rankine con recalentamiento 449
- 11.6 El ciclo de Rankine con recuperación 453
- 11.7 Otras sustancias de trabajo para ciclos de potencia a base de vapor 458

Ciclos de potencia de gas

- 11.8 Ciclos estándar de aire 459
- 11.9 El ciclo de Carnot con gas 460
- 11.10 El ciclo de Otto 465
- 11.11 El ciclo de Diesel 468
- 11.12 El motor rotatorio de combustión de Wankel 471
- 11.13 El ciclo de Stirling 474
- 11.14 El ciclo de Brayton 475
- 11.15 Planta de generación de turbina de gas sencilla incluyendo un compresor y una turbina reales 479
- 11.16 Plantas generadoras en ciclo cerrado con turbina de gas y compresor reales y caídas de presión en intercambiadores de calor 483
- 11.17 El ciclo de Brayton con recuperación 490
- 11.18 Plantas generadoras recuperativas con turbina de gas, compresor y recuperador reales y caídas de presión en intercambiadores de calor 493
- 11.19 La eficiencia térmica de una planta de ciclo combinado 500
- 11.20 Sistema de cogeneración 502
- 11.21 Sistema de cogeneración con turbina de gas 505
- 11.22 El ciclo de potencia de Cheng y la cogeneración 513
- Problemas 514

- 12. *Sistemas de refrigeración y bombas de calor* 527**
- 12.1 Toma de decisiones en el diseño de un sistema de refrigeración 528
 - 12.2 El ciclo de Carnot invertido 530
 - 12.3 El ciclo de refrigeración a base de la compresión de un vapor 531
 - 12.4 El ciclo de refrigeración mediante un gas 534
 - 12.5 Ciclo de refrigeración mediante un gas con turbina, compresor y caídas de presión en los intercambiadores reales 537
 - 12.6 El ciclo de Brayton invertido con recuperación 541
 - 12.7 Ciclo recuperativo de refrigeración mediante un gas con turbina, compresor y caídas de presión en los intercambiadores reales 544
 - 12.8 Refrigeración utilizando calor en lugar de trabajo 548
 - 12.9 El sistema de refrigeración por absorción 550
 - 12.10 Producción de calor a baja temperatura utilizando un sistema de generación de energía combinado con una bomba de calor 552
 - 12.11 Bombas de calor 554
Problemas 555
- 13. *Termodinámica de la sustancia simple compresible* 563**
- 13.1 Relaciones matemáticas de importancia 563
 - 13.2 Relaciones de Maxwel 564
 - 13.3 Algunas cantidades que se pueden obtener a partir de datos p - v - T 565
 - 13.4 Algunas relaciones termodinámicas que incluyen a los calores específicos 568
 - 13.5 Efectos de los cambios de presión y de volumen en los calores específicos 573
 - 13.6 Algunas relaciones termodinámicas para los cambios de entropía, de energía interna y de entalpía 575
 - 13.7 El coeficiente de Joule-Thomson 577
 - 13.8 La ecuación de Clapeyron 580
 - 13.9 Comportamiento de un gas de van der Waals 584
 - 13.10 Los gases reales y el factor de compresibilidad 586
 - 13.11 Carta de entalpía generalizada para los gases reales 589
 - 13.12 Carta de entropía generalizada para los gases reales 592
 - 13.13 La propiedad de fugacidad y su función 594

- 13.14 La ecuación virial de estado 598
- Problemas 599

14. *Termodinámica de mezclas no reactivas de gases y vapores* 607

- 14.1 Fracción molal, fracción de masa y peso molecular de una mezcla 607
- 14.2 La ley de Dalton de las presiones parciales 609
- 14.3 Ley de Amagat-Leduc de los volúmenes parciales 611
- 14.4 Energía interna, entalpía y calores específicos de una mezcla de gases ideales 613
- 14.5 Entropía de una mezcla de gases ideales 617
- 14.6 Mezcla de gases ideales y de un vapor condensable 621
- 14.7 Determinación de la presión de vapor de agua y de la temperatura del punto de rocío 626
- 14.8 Entalpía y entropía de una mezcla de aire y vapor de agua 628
- 14.9 Proceso de saturación adiabática 630
- 14.10 La carta psicrométrica 635
- 14.11 Procesos de mezclas de aire y vapor de agua 636
- 14.12 Mezclas de gases reales 650
- Problemas 651

15. *Reacciones químicas y mezclas reactivas* 659

- 15.1 Estequiometría y ecuaciones químicas 660
- 15.2 Ecuaciones básicas de combustión para combustibles fósiles 660
- 15.3 Aire teórico, exceso de aire y relación aire-combustible 661
- 15.4 Análisis de los productos de la combustión 664
- 15.5 Balance de energía para sistemas en estado permanente con flujo permanente y reacciones químicas 665
- 15.6 La entalpía de reacción y los poderes caloríficos de los combustibles 667
- 15.7 La entalpía de formación 671
- 15.8 Aplicaciones de la primera ley a sistemas abiertos en estado permanente con flujo también permanente y con reacciones químicas 674
- 15.9 La entropía absoluta y la tercera ley de la termodinámica 682

- 15.10 Aplicaciones de la segunda ley a sistemas abiertos en estado permanente con flujo también permanente y con reacciones químicas 684
- 15.11 Función de Gibbs de formación estándar 689
- 15.12 Equilibrio químico 692
- 15.13 La constante de equilibrio para una mezcla reactiva de gases ideales 695
- 15.14 La constante de equilibrio como una función de la temperatura 707
- 15.15 Conclusiones acerca de los sistemas reactivos 713
Problemas 713

- 16. *Diseño de sistemas que incluyan depósitos de calor, de trabajo y de materia 721*
 - Sistemas de licuefacción de gases**
 - 16.1 Trabajo requerido para un sistema de licuefacción ideal 721
 - 16.2 Sistema reversible de licuefacción de un gas 724
 - 16.3 Sistema simple de Linde-Hampson para la licuefacción de un gas 725
 - Sistemas de separación de gases**
 - 16.4 Trabajo requerido en un sistema ideal para la separación de gases 728
 - 16.5 Sistema reversible para la separación de gases 732
 - 16.6 Diagrama de fase para un fluido de dos componentes 734
 - 16.7 Sistema simple de Linde para la separación de los componentes del aire mediante una sola columna 735
 - Sistema para la desalación del agua**
 - 16.8 Energía mínima requerida en la desalación 737
 - 16.9 El proceso de ósmosis inversa 740
 - 16.10 Sistemas de destilación de varios pasos 743
 - 16.11 Destilación mediante la compresión de un vapor 745
 - 16.12 Exergía química de los combustibles hidrocarburos 747
Problemas 753