
CONTENIDO

PRÓLOGO	5										
SÍMBOLOS	15										
1 ALGUNOS COMENTARIOS INTRODUCTORIOS	19										
1.1 La termoeléctrica simple, 19	1.2 Celdas de combustible, 23	1.3 El ciclo de refrigeración por compresión de vapor, 25	1.4 El refrigerador termoléctrico, 26	1.5 La planta para separación de aire, 28	1.6 La turbina de gas, 30	1.7 La máquina de cohete químico, 32	1.8 Actualidades sobre el ambiente, 33				
2 ALGUNOS CONCEPTOS Y DEFINICIONES	35										
2.1 Un sistema termodinámico y el volumen de control, 35	2.2 Puntos de vista macroscópico y microscópico, 37	2.3 Propiedades y estado de una sustancia, 38	2.4 Procesos y ciclos, 38	2.5 Unidades para masa, longitud, tiempo y fuerza, 40	2.6 Energía, 43	2.7 Volumen específico, 45	2.8 Presión, 47	2.9 Igualdad de temperatura, 49	2.10 La ley cero de la termodinámica, 49	2.11 Escalas de temperatura, 50	2.12 La escala internacional de temperatura de 1990, 51
3 PROPIEDADES DE UNA SUSTANCIA PURA	61										
3.1 La sustancia pura, 61	3.2 Equilibrio de fases vapor-líquido-sólido en una sustancia pura, 61	3.3 Propiedades independientes de una sustancia pura, 66	3.4 Ecuaciones de estado para la fase vapor de una sustancia compresible simple, 68	3.5 Tablas de propiedades termodinámicas, 73	3.6 Superficies termodinámicas, 76						
4 TRABAJO Y CALOR	91										
4.1 Definición de trabajo, 91	4.2 Unidades para el trabajo, 92	4.3 Trabajo realizado en el límite móvil de un sistema compresible simple en un proceso en									

cuasiequilibrio, 93 4.4 Algunos otros sistemas en los que se realiza trabajo en el límite móvil de un sistema, 99 4.5 Sistemas que tienen otras formas de trabajo, 101 4.6 Algunas observaciones concluyentes relacionadas con el trabajo, 103 4.7 Definición de calor, 105 4.8 Unidades de calor, 105
4.9 Comparación entre calor y trabajo, 106

5 LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA 117

5.1 La primera ley de la termodinámica para una masa de control que experimenta un ciclo, 117 5.2 La primera ley de la termodinámica para un cambio en el estado de una masa de control, 118 5.3 Energía interna: una propiedad termodinámica, 122 5.4 Técnica para analizar y resolver problemas, 124 5.5 La propiedad termodinámica de entalpía, 129
5.6 Calores específicos a volumen constante y a presión constante, 133
5.7 Energía interna, entalpía y calor específico de los gases ideales, 135
5.8 La primera ley como una ecuación de rapidez, 143 5.9 Conservación de la masa, 144 5.10 Conservación de la masa y el volumen de control, 145
5.11 La primera ley de la termodinámica para un volumen de control, 149
5.12 El proceso a régimen permanente con flujo estable, 153 5.13 El coeficiente de Joule-Thomson y el proceso de obturación, 166 5.14 El proceso en estado uniforme con flujo uniforme, 168

6 LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA 221

6.1 Máquinas térmicas y refrigeradores, 221 6.2 Segunda ley de la termodinámica, 225 6.3 El proceso reversible, 228 6.4 Factores que hacen irreversibles los procesos, 229 6.5 El ciclo de Carnot, 232
6.6 Dos proposiciones sobre la eficiencia de un ciclo de Carnot, 234
6.7 La escala termodinámica de temperaturas, 235 6.8 La escala de temperaturas del gas ideal, 239 6.9 Equivalencias de la escala de temperaturas del gas ideal y de la escala termodinámica, 240 6.10 La salida de potencia y el ciclo de Carnot, 242

7 ENTROPÍA 251

7.1 Desigualdad de Clausius, 251 7.2 Entropía: propiedad de un sistema, 255
7.3 La entropía de una sustancia pura, 257 7.4 Cambio de entropía en procesos reversibles, 259 7.5 La relación de la propiedad termodinámica, 263
7.6 Cambio de entropía en una masa de control durante un proceso irreversible, 264 7.7 Generación de entropía, 266 7.8 Principio del incremento de entropía, 268 7.9 Cambio de entropía de un sólido o un líquido, 272
7.10 Cambio de entropía de un gas ideal, 273 7.11 El proceso politrópico reversible para un gas ideal, 279 7.12 La segunda ley de la termodinámica para un volumen de control, 283 7.13 Proceso a régimen permanente con flujo estable y proceso en estado uniforme con flujo uniforme, 285

- 7.14 Proceso reversible a régimen permanente con flujo estable, 292
 7.15 Principio del incremento de entropía, 296 7.16 Eficiencia, 297
 7.17 Comentarios generales sobre la entropía, 299

8 IRREVERSIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD 329

- 8.1 Energía disponible, trabajo reversible e irreversibilidad, 329
 8.2 Disponibilidad y eficiencia según la segunda ley, 341 8.3 Procesos con reacción química, 352

9 SISTEMAS DE POTENCIA Y REFRIGERACIÓN 369

- 9.1 Introducción a los sistemas de potencia, 369 9.2 El ciclo de Rankine, 371 9.3 Efecto de la presión y la temperatura en el ciclo de Rankine, 375 9.4 El ciclo de recalentamiento, 380 9.5 El ciclo regenerativo, 383 9.6 Divergencia entre los ciclos reales y los ciclos ideales, 389 9.7 Cogeneración, 395 9.8 Ciclos de potencia con estándar de aire, 396 9.9 El ciclo de Brayton, 397 9.10 El ciclo de la turbina de gas simple con un regenerador, 404 9.11 El ciclo de potencia ideal en la turbina de gas de varias etapas de compresión con interenfriamiento, expansión en varias etapas con recalentamiento y un regenerador, 407 9.12 El ciclo con estándar de aire para propulsión a chorro, 410 9.13 El ciclo de Otto, 411 9.14 El ciclo de Diesel, 418 9.15 El ciclo de Stirling, 421 9.16 Introducción a los sistemas de refrigeración, 421 9.17 El ciclo de refrigeración por compresión de vapor, 422 9.18 Fluidos de trabajo para sistemas de refrigeración por compresión de vapor, 425 9.19 Divergencia entre el ciclo real de refrigeración por compresión de vapor y el ciclo ideal, 426 9.20 Ciclo de refrigeración por absorción de amoníaco, 428 9.21 Ciclo de refrigeración con estándar de aire, 430 9.22 Sistemas de potencia y refrigeración con ciclos combinados, 436

10 RELACIONES TERMODINÁMICAS 467

- 10.1 Dos relaciones importantes, 467 10.2 Relaciones de Maxwell, 470
 10.3 Ecuación de Clapeyron, 473 10.4 Algunas relaciones termodinámicas en que intervienen la entalpía, la energía interna y la entropía, 475
 10.5 Algunas relaciones termodinámicas en que interviene el calor específico, 480 10.6 Expansividad volumétrica y compresibilidad isotérmica y adiabática, 482 10.7 Obtención de tablas de propiedades termodinámicas a partir de datos experimentales, 486 10.8 El gas ideal, 488 10.9 El comportamiento de los gases reales, 490
 10.10 Ecuaciones de estado, 495 10.11 Tabla o carta generalizada para los cambios de entalpía a temperatura constante, 500 10.12 Tabla o carta generalizada para los cambios de entropía a temperatura constante, 503
 10.13 Fugacidad y la carta generalizada de fugacidad, 506

11	MEZCLAS Y SOLUCIONES	525
	11.1 Consideraciones generales y mezclas de gases ideales, 525	
	11.2 Modelo simplificado de una mezcla en que intervienen gases y un vapor, 532	
	11.3 La primera ley aplicada a mezclas de vapor-gas, 538	
	11.4 El proceso de saturación adiabática, 541	
	11.5 Temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, 543	
	11.6 La carta psicrométrica, 544	
	11.7 Introducción a las mezclas y a las soluciones reales, 545	
	11.8 Modelos de sustancias pseudopuras para mezclas de gases reales, 546	
	11.9 Propiedades molales parciales, 552	
	11.10 Cambio de las propiedades al mezclar, 555	
	11.11 Relación entre las propiedades termodinámicas para una composición variable, 556	
	11.12 Definición general de la función de Gibbs y la entalpía, 558	
	11.13 Fugacidad en una mezcla y su relación con otras propiedades, 561	
	11.14 La solución ideal, 565	
	11.15 Actividad, 569	
12	REACCIONES QUÍMICAS	595
	12.1 Combustibles, 595	
	12.2 El proceso de combustión, 598	
	12.3 Entalpía de formación, 606	
	12.4 Análisis con la primera ley de los sistemas reaccionantes, 608	
	12.5 Temperatura de flama adiabática, 614	
	12.6 Entalpía y energía interna de combustión. Calor de reacción, 616	
	12.7 La tercera ley de la termodinámica y la entropía absoluta, 620	
	12.8 Análisis con la segunda ley de los sistemas reaccionantes, 622	
	12.9 Evaluación de los procesos de combustión reales, 632	
13	INTRODUCCIÓN AL EQUILIBRIO QUÍMICO Y DE FASES	653
	13.1 Condiciones para el equilibrio, 653	
	13.2 Equilibrio entre dos fases de una sustancia pura, 655	
	13.3 Equilibrio de un sistema de componentes múltiples y fases múltiples, 660	
	13.4 Regla de las fases de Gibbs (sin reacción química), 669	
	13.5 Equilibrio metaestable, 670	
	13.6 Equilibrio químico, 672	
	13.7 Reacciones simultáneas, 682	
	13.8 Ionización, 686	
14	FLUJO POR TOBERAS Y PASAJES DE ÁLABES	701
	14.1 Propiedades de estancamiento, 701	
	14.2 La ecuación de momentum para el volumen de control, 703	
	14.3 Fuerzas que actúan en una superficie de control, 706	
	14.4 Flujo estable a régimen permanente, adiabático, unidimensional, de un fluido incompresible a través de una tobera, 708	
	14.5 Velocidad del sonido en un gas ideal, 710	
	14.6 Flujo reversible, adiabático, unidimensional y estable de un gas ideal a través de una tobera, 713	
	14.7 Flujo másico de un gas ideal por una tobera isentrópica, 716	
	14.8 Choque normal en un gas ideal que fluye por	

una tobera, 721	14.9 Flujo de vapor por una tobera, 726
14.10 Coeficientes de toberas y difusores, 728	14.11 Toberas y orificios como dispositivos para la medición del flujo, 731
14.12 Flujo por pasajes entre álabes, 735	14.13 Etapas de impulso y reacción para turbinas, 740
14.14 Otras consideraciones sobre las etapas de impulso, 741	14.15 Consideraciones adicionales sobre las etapas de reacción, 744

APÉNDICE A TABLAS, FIGURAS Y CARTAS	755
APÉNDICE B TABLAS Y CARTAS DE COMPRESIBILIDAD GENERALIZADAS	875
BIBLIOGRAFÍA	881
RESPUESTAS A PROBLEMAS SELECCIONADOS	883
ÍNDICE	889