

INTRODUCCIÓN A LA TERMODINÁMICA

José María Sáiz Jabardo
Luben Cabezas Gómez
Pablo Fariñas Alvariño

A Coruña 2015

Universidade da Coruña
Servizo de Publicacións

Introducción a la termodinámica

SÁIZ JABARDO, José María; CABEZAS GÓMEZ, Luben; FARIÑAS ALVARIÑO, Pablo

A Coruña, 2015

Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións

Manuais, n.º 36

N.º de páxinas: 648

17x24 cm.

Índice: páx. 7-10

ISBN: 978-84-9749-630-8

Depósito legal: C 2311-2015

CDU: 536

IBIC: PHH | TGMB | 4GE

EDICIÓN

Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións (<http://www.udc.gal/publicacions>)

© Universidade da Coruña

Esta obra foi revisada e avaliada por dous expertos non pertencentes á UDC

DISTRIBUCIÓN

Galicia:

- Consorcio Editorial Galego. Av. da Estación 25, 36812 Redondela (Pontevedra)
pedimentos@coegal.com

España e internacional:

- Logística Libromares, S.L. C/ Matilde Hernández 34, 28019 Madrid (España)
pedidos@libromares.com
- Pórtico Librerías. C/ Muñoz Seca 6, 50005 Zaragoza (España)
distribución@porticolibrerias.es

DESEÑO DA CUBERTA: Julia Núñez Calo

IMPRIME: Rodi Artes Gráficas S.L.

Reservados todos os dereitos. Nin a totalidade nin parte deste libro pode reproducirse ou transmitirse por ningún procedemento electrónico ou mecánico, incluíndo fotocopia, gravación magnética ou calquera almacenamento de información e sistema de recuperación, sen o permiso previo e por escrito das persoas titulares do *copyright*.

Índice

PREFACIO	11
CAPÍTULO 1. Introducción	13
1.1 Qué es la termodinámica	15
1.2 Punto de vista microscópico y macroscópico.....	15
1.3 Sistema	16
1.4 Estado.....	17
1.5 Propiedad.....	17
1.6 Fase y sustancia pura.....	19
1.7 Estado de equilibrio termodinámico.....	20
1.8 Propiedades primitivas: densidad, presión y temperatura.....	21
Densidad.....	21
Presión.....	22
Temperatura.....	27
1.9 Solución de problemas.....	31
1.10 Algunas aplicaciones de la termodinámica.....	45
(1) Producción de energía.....	45
(2) Ciclos frigoríficos.....	48
1.11 Problemas propuestos.....	50
CAPÍTULO 2. Trabajo, calor y conservación de la energía	53
2.1 Interacción de trabajo en sistemas mecánicos.....	55
2.2 Sistemas termodinámicos.....	58
2.3 Procesos casi-estáticos.....	67
2.4 Interacción de calor.....	70
2.5 Primer principio de la termodinámica. Conservación de la energía.....	72
2.6 Calores específicos.....	76
2.7 Relaciones para gases ideales.....	78
2.8 Procesos casi-estáticos de compresión o expansión de gases ideales.....	84
Proceso isotérmico.....	86
Proceso adiabático.....	86

2.9 Problemas resueltos.....	91
2.10 Problemas propuestos.....	128
CAPÍTULO 3. Propiedades termodinámicas.....	135
3.1 Introducción.....	137
(1) Gas ideal.....	137
(2) Sustancia incompresible.....	138
3.2 Sistema simple.....	138
Postulado.....	140
3.3 Fases de una sustancia pura.....	140
3.4 Ecuación de estado y superficies termodinámicas.....	146
3.5 Fase líquida y de vapor – diagramas y propiedades.....	153
3.6 Tablas de propiedades termodinámicas.....	158
3.7 Problemas resueltos.....	162
3.8 Problemas propuestos.....	185
CAPÍTULO 4. Conservación de la masa y de la energía. Volumen de control... 189	
4.1 Introducción.....	191
4.2 Análisis de Lagrange y de Euler.....	193
4.3 Conservación de la masa para sistemas abiertos.....	196
4.4 Ejemplos: conservación de la masa.....	201
4.5 Conservación de la energía.....	206
(i) Procedimiento directo.....	206
(ii) Procedimiento físico.....	207
4.6 Aplicación de la conservación de la masa y de la energía a distintos procesos en estado estacionario.....	212
4.6.1 Toberas.....	212
4.6.2 Turbinas a vapor.....	216
4.6.3 Compresores.....	218
4.6.4 Intercambiadores de calor.....	220
4.6.5 Procesos de estrangulamiento.....	224
4.7 Procesos transitorios.....	228
4.8 Solución de problemas.....	231
4.9 Problemas propuestos.....	269

CAPÍTULO 5. Segundo principio de la termodinámica	279
5.1 Consideraciones iniciales.....	281
5.2 Reversibilidad.....	282
Proceso 1.....	282
Proceso 2.....	282
Proceso 3.....	283
5.3 Foco térmico (reservorio térmico).....	292
5.4 Motores térmicos y refrigeradores.....	293
5.5 Enunciados del segundo principio de la termodinámica.....	298
Enunciado de Clausius.....	298
Enunciado de Kelvin-Planck.....	299
5.6 El ciclo motor reversible (CMR) o ciclo de Carnot.....	300
5.7 Corolarios del segundo principio de la termodinámica.....	307
5.8 Desigualdad de Clausius.....	315
5.9 Problemas resueltos.....	322
5.10 Problemas propuestos.....	341
CAPÍTULO 6. Entropía y aplicaciones	345
6.1 Introducción a la entropía.....	347
6.2 Relaciones termodinámicas para un sistema simple-compresible.....	361
6.3 Relaciones para gases ideales.....	366
6.4 Tablas de propiedades termodinámicas.....	368
6.5 Sistemas abiertos.....	378
(i) Procedimiento directo.....	378
(ii) Procedimiento físico.....	379
6.6 Combinación de la conservación de la energía con el segundo principio.....	384
6.6.1 Desarrollo de la ecuación.....	384
6.6.2 Flujo en tuberías.....	386
6.6.3 Máquinas de compresión.....	389
6.6.4 Turbinas.....	403
6.6.5 Toberas.....	408
6.7 Problemas resueltos.....	410
6.8 Problemas propuestos.....	464
Parte I: Sistema.....	464
Parte II: Volumen de control.....	465

CAPÍTULO 7. Análisis exergético	471
7.1 Introducción.....	473
Proceso 1-2.....	474
Proceso 2-3.....	476
7.2 El concepto de exergía para un sistema.....	479
7.3 Irreversibilidad.....	490
7.4 Análisis para volúmenes de control.....	495
7.5 Rendimiento de segundo principio.....	508
7.5.1 Procesos que comprenden trabajo mecánico.....	508
7.5.2 Procesos con intercambio de calor.....	509
7.6 Ciclos termodinámicos.....	515
7.6.1 Ciclo motor.....	515
7.6.2 Ciclo de refrigeración.....	518
7.7 Problemas resueltos.....	520
7.8 Problemas propuestos.....	544
 APÉNDICE 1	
Formulario de termodinámica.....	553
 APÉNDICE 2	
Tablas de propiedades termodinámicas (agua, R-134a, NH ₃).....	571
 APÉNDICE 3	
Gases ideales.....	637
 APÉNDICE 4	
Notas sobre el uso de la tabla A3.2.....	641
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	645

Prefacio

La presente publicación tiene su germen en las clases de la asignatura de *Termodinámica* impartidas durante quince años en la Escola Politécnica Superior de la Universidade da Coruña. El temario se ocupa básicamente del primer y segundo principios de la termodinámica y sus aplicaciones, y su nivel de dificultad se adecua a principiantes de este campo en el ámbito de la ingeniería mecánica e industrial. Se ha incluido aquí el análisis exergético (capítulo 7), que generalmente se trata de forma superficial e intuitiva en la asignatura, con el fin de proporcionar al lector una valiosa herramienta de análisis y evaluación de los sistemas térmicos.

Los distintos capítulos se organizan de forma similar: tras una introducción teórica básica a cada tema, se presentan distintos problemas de aplicación con grados de dificultad diversos. La mayoría de estos problemas se ha resuelto utilizando el programa informático EES (*Engineering Equation Solver*) de F-Chart, EE. UU., que puede constituir una eficiente herramienta en el proceso de aprendizaje de la termodinámica; se busca con ello que el lector desarrolle su capacidad de modelado de procesos habituales en la actividad ingenieril. Al final de cada capítulo se le proponen al lector problemas cuya resolución puede abordar como un desafío en su proceso de aprendizaje. Una gran parte de los problemas y ejemplos se inspira en los propuestos en las referencias bibliográficas manejadas, reconociendo los autores su deuda. La introducción a la conservación de la masa y de la energía en sistemas abiertos se ha tratado de la forma convencional, utilizando las nociones físicas del desplazamiento de un sistema a través de un volumen de control; además, en relación con esto, se han introducido las nociones básicas de los enfoques de Euler y de Lagrange, tratamiento poco habitual en publicaciones introductorias.

En el apéndice 1 se ha incluido el Formulario, un sumario o compendio de los términos y expresiones que los autores consideran más relevantes, esperando que sea de utilidad a los lectores a la hora de resolver problemas o preparar pruebas evaluadoras.

Los autores guardan un agradecimiento especial para D.^a Pilar Curras Castiñeira por su amable dedicación para atender las necesidades del grupo de investigación, y por su aportación en la revisión de las notas que han dado origen a esta obra.

Los autores

Ferrol, septiembre de 2015

SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

5.1 Consideraciones iniciales

El segundo principio de la termodinámica es un “principio negativo” según algunos, ya que sus enunciados se presentan, como regla general, en términos de negación. En realidad, el segundo principio constituye una poderosa herramienta en la evaluación o determinación de la posibilidad de que ocurran procesos termodinámicos. Imagínese, por ejemplo, que uno de estos inventores “locos” viniese con la idea de un dispositivo como el de la Figura 5.1, una “caja negra”, sin ninguna interacción con el exterior, en la que se admite aire a temperatura ambiente, digamos, 30°C, y presión de 600 kPa, habiendo dos salidas a la presión atmosférica, 100 kPa, a las temperaturas de 40°C y 0°C. El dispositivo sería interesante en ciertos procesos, pues, a partir de aire comprimido, podría obtenerse aire a baja temperatura o a temperatura más elevada que la ambiente. Sin embargo, ¿el proceso es posible? Inicialmente, es necesario verificar si, para el VC que comprende el dispositivo, se satisfacen las conservaciones de la masa y de la energía. Una simplificación corriente es la que considera que las variaciones de energía cinética y potencial son despreciables, resultando:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3$$

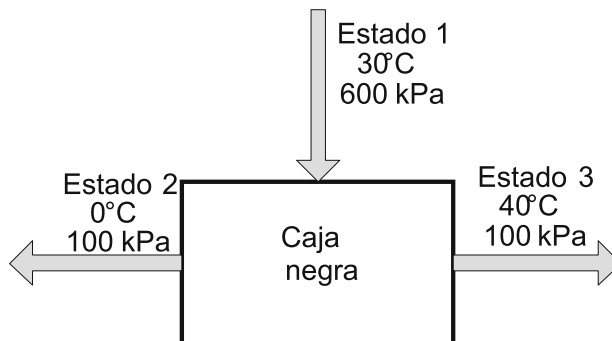


Figura 5.1 Esquema de un dispositivo (caja negra) que opera con aire comprimido en la obtención de aire a baja temperatura y alta temperatura

Combinando las dos ecuaciones es posible determinar la fracción del caudal de entrada, \dot{m}_1 , de cada caudal de las corrientes de salida,

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_3 - h_2} \cong \frac{T_1 - T_2}{T_3 - T_2} = \frac{30 - 0}{40 - 0} = \frac{3}{4} \therefore$$

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = 1 - \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = \frac{1}{4}$$

Bajo el punto de vista de la conservación de la energía (y de la masa), nada hay que desacredite el dispositivo de la Figura 5.1. Sin embargo, nada se puede afirmar con respecto a su viabilidad. Para ello, es necesario echar mano del segundo principio.

Antes de pasar a los enunciados del segundo principio, es necesario introducir algunos conceptos básicos preparatorios, de modo que los enunciados puedan ser adecuadamente asimilados.

5.2 Reversibilidad

Inicialmente se considerarán algunos procesos, denominados “espontáneos”, que se caracterizan por no exigir ninguna acción exterior para que se puedan desarrollar.

Proceso 1

Comprende los dos sistemas de temperaturas distintas de la Figura 5.2(a). Cuando se ponen en comunicación térmica entre sí, se verifica una interacción de calor entre ellos que tiende a uniformizar sus temperaturas. Se trata de un proceso espontáneo ya que ocurre sin ninguna intervención exterior. Fíjese que la evolución del proceso se da en el sentido de establecer un nuevo estado de equilibrio en el que las temperaturas de los dos sistemas se igualan.

Proceso 2

En este caso, ilustrado en la Figura 5.2(b), una masa reposa sobre un apoyo en un campo gravitacional. Una vez retirado el apoyo, la masa se desplazará en sentido descendente hasta alcanzar un nivel inferior donde se establezca una nueva condición de equilibrio.

Proceso 3

En este caso, un depósito está dividido en dos compartimentos separados por una pared o membrana. En uno de ellos, A, hay un gas mientras que el otro, B, se encuentra al vacío. Al romperse la membrana, el gas se expandirá, ocupando el volumen total del depósito, en un proceso espontáneo que ocurre con el sistema “buscando” una nueva condición de equilibrio.

Otros procesos espontáneos podrían referirse, aunque los aquí citados sirven para ilustrar las características generales de tales procesos, que pueden expresarse así:

- (1) En los procesos espontáneos, se pierde la “oportunidad” de realizar trabajo. Véase, por ejemplo, los casos de la caída del peso en el campo gravitacional o de la expansión en vacío del gas de las Figuras 5.2(a) y (c). En ambos casos, la evolución hacia el nuevo estado de equilibrio se realiza sin interacción de trabajo, cuando los sistemas en su estado inicial tenían potencial para realizarlo.
- (2) Una vez realizados, no pueden ser invertidos hasta el estado inicial sin dejar algún “vestigio” (“huella”) en el entorno, lo que lleva al concepto de procesos **REVERSIBLES**. Los procesos espontáneos son **IRREVERSIBLES** puesto que no pueden ser “deshechos” sin dejar alguna “huella” en el entorno del sistema, como se verá más adelante.

El concepto de reversibilidad puede ser considerado como intuitivo, razón por la cual una definición o “conceptuación” es difícil. Una idea para caracterizar la reversibilidad de un proceso es la propuesta por Keenan¹⁸ según la cual **“un proceso ocurre de forma reversible o es reversible si, una vez que ocurre, existe por lo menos un proceso que devuelve el sistema y su entorno a la condición inicial”**. Es decir, todo vuelve a la condición inicial, como si nada hubiese ocurrido. Desafortunadamente, los fenómenos físicos no se comportan como tal y cualquier evento siempre deja algún “rastro”, es decir, los procesos “reales” son siempre **IRREVERSIBLES**, de forma que la reversibilidad es una abstracción. Muy interesante, pues permite, por un lado, establecer un paradigma (referencia), y, por otro, operar (o hacer cálculos) en procesos idealizados (o modelados), que de otra forma serían de difícil tratamiento.

¹⁸ J. H. Keenan, *Thermodynamics*, John Wiley & Sons, 1952.

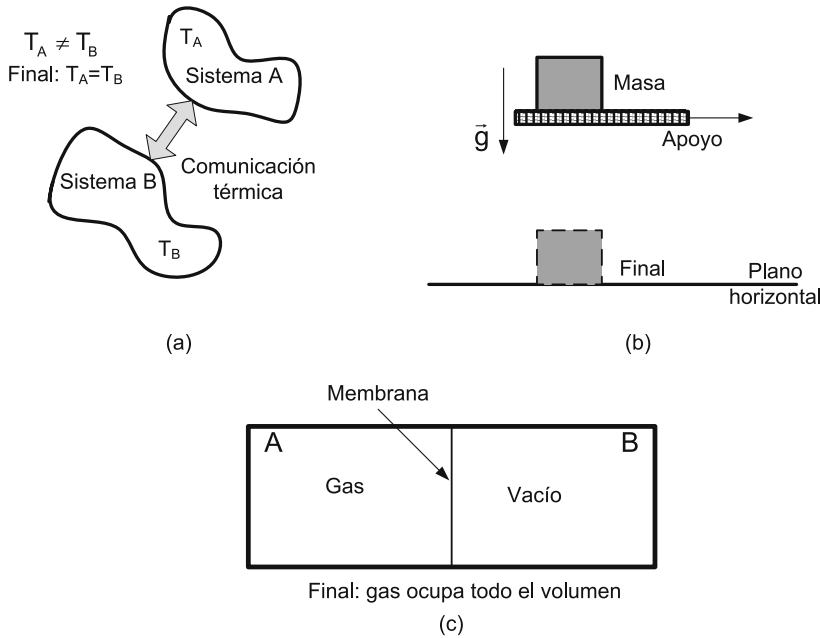


Figura 5.2 Ejemplos de procesos espontáneos

Ejemplo 5.2.1

Considérese el dispositivo cilindro-pistón de la Figura 5.3(a), en que todas las paredes son adiabáticas y de capacidad térmica nula. Sobre el pistón reposa una masa m . Inicialmente el sistema se encuentra en equilibrio con la presión resultante de los pesos del pistón y de la masa m , y si fuera el caso, la presión atmosférica, todas compensadas por la presión del gas. Imagínese un proceso en el que se retira la masa m y el pistón asciende rápidamente, sin rozamiento, hasta una nueva posición de equilibrio después de una serie de oscilaciones. Se trata de determinar, en base al concepto de proceso reversible, si el proceso es reversible.

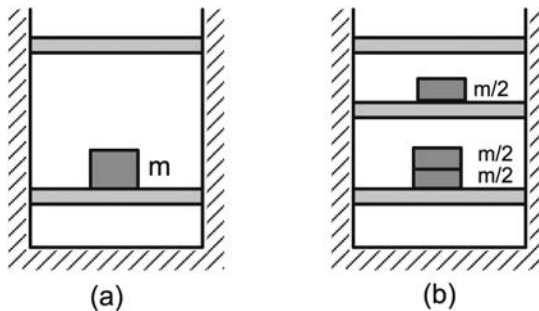


Figura 5.3 Conjunto cilindro-pistón en procesos con niveles distintos de irreversibilidad

Solución

La remoción de la masa m corresponde a la eliminación de un “vínculo”, resultando el desplazamiento rápido del pistón hacia una nueva posición de equilibrio en la que la presión del gas será compensada por aquella resultante del peso del pistón y de la atmosférica. El proceso es de la categoría de los espontáneos.

Para caracterizar el “grado de espontaneidad” del proceso sería interesante resolver el problema poniéndole números. Para tal efecto considérese uno de los problemas resueltos en el Capítulo 2, el Problema 2.9.17, en el que se trata el mismo proceso. El estado inicial y el final del gas (aire) en el proceso, estados 1 y 2, están indicados en la Tabla 5.1. Para caracterizar la reversibilidad o irreversibilidad del proceso 1-2 es necesario encontrar un proceso que devuelva el aire a su estado inicial, estado 1. Para ello, imagine que la masa m se deposita nuevamente sobre el pistón. Un observador menos atento podría imaginar que el pistón retorna a su posición inicial lo mismo ocurriendo con el aire. En realidad, en la posición final de equilibrio, estado 3 del aire, el pistón se situará algo por encima de su posición inicial, estado 1 del aire, como ilustran los volúmenes en la Tabla 5.1. La gráfica de la Figura 5.4 ilustra el proceso 1-2-3.

Tabla 5.1 Estados correspondientes al Problema 2.9.17

Estado	p [kPa]	T [K]	∇ [m ³]
1	200	300	0,0100
2	150	278,6	0,0124
3	200	305,1	0,0102

La presión del aire en el estado 3 es la misma que en el estado 1 aunque su temperatura es algo superior. Por tanto es necesario enfriar el aire a presión constante, proceso 3-1, para provocar que el aire retorne a su estado inicial, estado 1. El problema ahora consiste en verificar si en el proceso 2-3-1 el entorno ha vuelto a su estado inicial. Si tal ocurriera, el proceso 1-2 sería reversible. Caso contrario, irreversible.

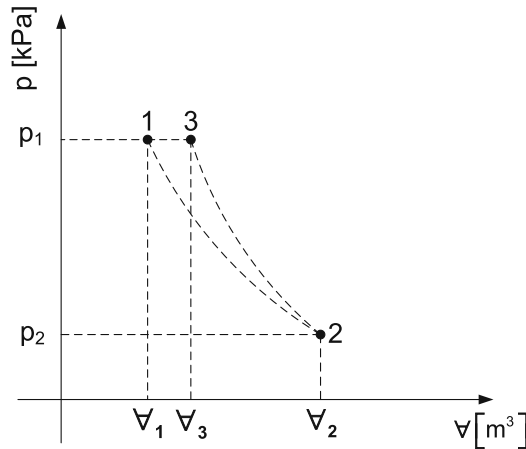


Figura 5.4 Procesos del Ejemplo 5.2.1 (Problema 2.9.17) en un diagrama (p, v)

En el proceso 1-2 el sistema aire ha transferido energía al entorno a través de la interacción de trabajo, que puede ser determinado por la siguiente expresión (ver el Capítulo 2):

$${}_1W_2 = p_2(v_2 - v_1) = 0,357 \text{ kJ} > 0$$

En el proceso 2-3, cuando el pistón desciende bajo el efecto de la masa m , el entorno restituye “con creces” el trabajo al sistema:

$${}_2W_3 = \underbrace{p_3}_{p_1}(v_3 - v_2) = -0,442 \text{ kJ} < 0$$

$$|{}_2W_3| > {}_1W_2$$

Hasta el estado 3, el entorno ha transferido netamente energía al sistema a través de las interacciones de trabajo en los procesos 1-2 y 2-3, razón por la cual la temperatura del aire en el estado 3 es superior a la del estado 1. Para que el aire vuelva a su estado inicial, estado 1, es necesario ceder calor al entorno, cuyo valor se puede determinar en base a que en el proceso 1-2-3-1 el sistema ha recorrido un ciclo termodinámico, en el que vale la siguiente igualdad:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \Leftrightarrow \underbrace{Q_{\text{neto}}}_{\text{Ciclo}} = \underbrace{W_{\text{neto}}}_{\text{Ciclo}} \therefore$$

$${}_2W_3 + {}_1W_2 + {}_3W_1 = W_{\text{neto}}$$

$$Q_{\text{neto}} = {}_3Q_1$$

Obsérvese que en el proceso 3-1, admitido reversible, ocurre una interacción de trabajo como resultado del movimiento descendente del pistón resultante de la transferencia de calor al entorno.

$${}_3W_1 = p_3 (\nabla_1 - \nabla_3) = -0,0340 \text{ kJ} \therefore$$

$$W_{\text{neto}} = -0,119 \text{ kJ} \Rightarrow Q_{\text{neto}} = {}_3Q_1 = -0,119 \text{ kJ}$$

Observe que el calor transferido del aire en el proceso 3-1 podría haberse determinado directamente por la conservación de la energía aplicada a un proceso a presión constante:

$${}_3Q_1 = m(h_1 - h_3) = mc_p (T_1 - T_3) = -0,119 \text{ kJ}$$

Resumiendo, netamente, en el proceso global 1-2-3-1, el entorno transfiere 0,119 kJ de trabajo al aire y este le devuelve 0,119 kJ a través de la transferencia de calor en el proceso 3-1. A esta altura, podría decirse que el entorno no ha sufrido variaciones puesto que ha recibido la misma energía que ha cedido. El problema es que, para todos los efectos, el entorno ha **recorrido un ciclo termodinámico en el que ha recibido cierta cantidad de calor que se ha transformado integralmente en trabajo**, lo que según el segundo principio de la termodinámica, que se tratará más adelante, es imposible. Por tanto es imposible hacer que el entorno vuelva a su condición inicial y, por tanto, el proceso 1-2 del aire es **IRREVERSIBLE**, como ya se preveía puesto que se trata de un proceso espontáneo. Ya se comentó en el Capítulo 2 que el proceso 1-2 no es casi-estático, puesto que los estados intermedios del aire no son de equilibrio debido al movimiento rápido del pistón bajo la acción de la presión del aire. Se puede generalizar la conclusión de que todos los procesos reversibles son casi-estáticos y, por tanto, se realizan en condiciones de equilibrio.

Es interesante analizar las tendencias cuando, en lugar de retirar integralmente la masa m , se la retira en etapas, como se ilustra en la Figura 5.3 (b), para el caso de 2 etapas. El proceso total continúa siendo irreversible, aunque menos que el de la Figura 5.3(a). Volviendo a depositar la masa en etapas ($m/2$ seguida de $m/2$) sobre el pistón, lo que se verificará nuevamente es que el estado final alcanzado no es el mismo que el inicial, aunque “más próximo” que en el caso anterior, Figura 5.3(a). Para devolver el gas a su estado inicial será necesario ceder calor, lo que comprueba que el proceso de subida del pistón es irreversible, como observado anteriormente. Si la masa m fuera dividida en más “partes” y se repitiera el proceso anterior de retirada y posterior depósito de las mismas, el estado final se aproximaría al inicial cuanto mayor fuera el número de “partes”. En el límite, si las “partes” fueran infinitas, como

el caso de los granos de arena del Capítulo 2, el estado final sería el mismo. En este caso los procesos (de ida y de vuelta) serían casi-estáticos y, por tanto, reversibles. Se observa que hay distintos niveles de irreversibilidad. El proceso de la Figura 5.3(a) es más irreversible que el de la Figura 5.3(b). La tendencia a la reversibilidad se obtiene haciendo que el proceso sea tal que los estados intermedios se aproximen del equilibrio. Es importante tener presente que la reversibilidad está relacionada con estados de equilibrio, como en los procesos casi-estáticos.

Como se ha observado anteriormente, los procesos “reales” son irreversibles. ¿Cuáles son las causas de la irreversibilidad? Algunas son inmediatas, como por ejemplo:

- **Rozamiento (fricción)**, cuya acción es bien conocida.
- **Transferencia de calor** con diferencia finita de temperaturas. Este proceso se tratará con más detalle más adelante. Es interesante notar que la transferencia de calor con diferencia infinitesimal de temperaturas es reversible, pero en la práctica, imposible, pues exigiría procesos excesivamente lentos o equipamientos de tamaño inconmensurable. Sin embargo, en termodinámica tales aspectos no son considerados, de forma, que, como se verá más adelante, algunos procesos reversibles importantes implican intercambios de calor con diferencia infinitesimal de temperatura.
- **Efecto Joule** en electricidad, asociado a la transformación en energía interna de aquella disipada en la resistencia eléctrica.

Ejemplo 5.2.2

A efectos de argumentación, considérese el efecto del rozamiento. Imagínese un bloque de masa m apoyado en una superficie horizontal, Figura 5.5. Bajo la acción de una fuerza F el bloque se desplaza hacia la derecha de tal forma que, como resultado del rozamiento entre el bloque y la superficie, la energía interna de ambos (bloque y superficie) aumenta. El proceso es semejante al frotamiento de las manos para “calentarlas”. Compruebe que el proceso es irreversible.

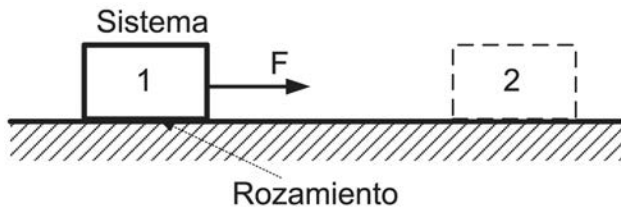


Figura 5.5 Bloque desplazándose con fricción, Ejemplo 5.2.2

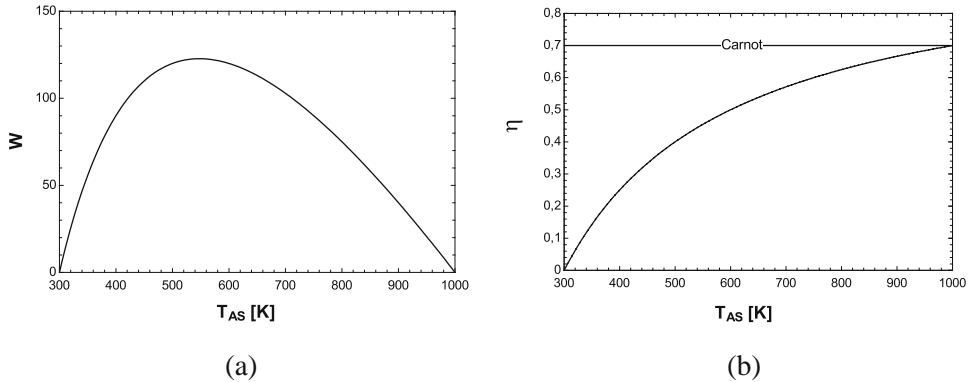


Figura 5.19 Variación (a) del trabajo y (b) del rendimiento térmico con T_{AS} ; del ciclo motor del Ejemplo 5.8.2 para $T_A=1000K$ y $T_B=300K$ y $K=0,6$

5.9 Problemas resueltos

Problema 5.9.1

Determine el rendimiento del motor térmico constituido por el “pájaro bebedor”, admitiendo que es reversible y que las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire ambiente son respectivamente iguales a 30°C y 25°C.

Solución

Como el motor es reversible, el rendimiento térmico puede determinarse por la expresión que implica las temperaturas de los focos:

$$\eta = 1 - \frac{T_A}{T_B} = 1 - \frac{273,15 + 25}{273,15 + 30} = 0,0165$$

El rendimiento es muy bajo en virtud de la proximidad de las temperaturas de los focos térmicos. El resultado trae a la memoria proyectos como el de aprovechar la diferencia entre las temperaturas de las aguas de los ríos Solimões (Amazonas, alimentado por aguas de la cordillera de los Andes, por tanto frías) y Negro, de aguas más calientes, para producir energía eléctrica. Evidentemente, como consecuencia del bajo rendimiento, para obtener una potencia eléctrica económicamente atractiva, el tamaño de los intercambiadores de calor debería ser excesivo. En esta misma línea, al inicio de la década de los 80 hubo un movimiento serio en el sentido de aprovechar la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fondo del agua del mar para producir energía eléctrica. El campo de investigación relacionado recibió el nombre de OTEC, acrónimo para “Ocean Thermal Energy Conversion”,

produciendo una serie de resultados interesantes, inclusive en el desarrollo de intercambiadores de calor de alto rendimiento. Estos tenían un papel importante, como consecuencia de la reducida diferencia entre las temperaturas límite. Así, para mantener el rendimiento térmico en niveles aceptables, las diferencias entre las temperaturas del fluido de trabajo (del sistema que opera en ciclos) y la del mar deberían ser reducidas, lo que exigía intercambiadores de calor de alta eficiencia para mantener su tamaño dentro de límites económicamente aceptables. Es importante recordar que el tamaño de un intercambiador de calor es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de los fluidos que interactúan.

Problema 5.9.2

El esquema de la Figura 5.20 ilustra los elementos básicos de una central térmica para producción de energía eléctrica (ver Problema 4.8.6). La central satisface las condiciones de un motor térmico pues incorpora: (i) un sistema que opera en ciclos constituido de un fluido de trabajo que, en este caso, es normalmente el agua; (ii) un foco de alta temperatura: el medio de temperatura elevada constituido por la combustión de un combustible fósil (por ejemplo, carbón, “fuel”, o gas natural); y (iii) un foco de baja temperatura: el agua de condensación del vapor. Admita que en la central de la Figura 5.20 las presiones alta y baja del agua de trabajo sean iguales a 10 MPa y 10 kPa y que el agua que entra en la caldera se encuentre en el estado de líquido saturado y el vapor que sale en el de vapor saturado. La central debe producir 100 MW de energía eléctrica. Desprecie el trabajo de la bomba.

- (a) Determine el máximo rendimiento térmico de la central y las correspondientes tasas de transferencia de calor en la caldera y condensador.
- (b) Determine las tasas de transferencia de calor en la caldera y en el condensador si el rendimiento térmico fuera igual a 40%.

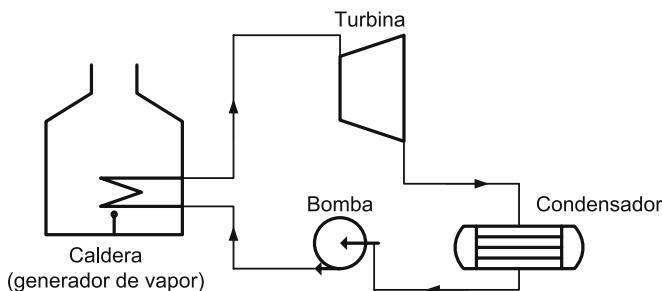


Figura 5.20 Representación esquemática de una central térmica de producción de energía eléctrica con sus componentes principales

Solución

Antes de la solución numérica del problema, se procederá a explicar de forma sucinta el papel que cada uno de los componentes en el ciclo. El fluido de trabajo, como regla general, es el agua, que recorre un ciclo termodinámico en el que intercambia calor con una fuente de alta temperatura en la caldera, pasando de líquido a vapor, razón por la cual a tales equipos también se les denomina “generadores de vapor”. El vapor que deja la caldera se dirige a la turbina, donde cederá la mayor parte de su energía interna, que se transformará en trabajo mecánico utilizado en el accionamiento del generador de energía eléctrica. Al salir de la turbina, la presión y la temperatura del vapor son muy inferiores a las de la entrada. El vapor (o parte de él) de baja presión se condensa en el “condensador” (cuya designación es evidente) cediendo calor al agua de condensación proveniente de una torre de refrigeración, de un río o del mar. En la bomba se eleva la presión del agua hasta la presión de la caldera. El proceso de compresión requiere un aporte de trabajo, que, por lo general, es reducido, razón por la cual se ha despreciado en este problema. En la salida de la bomba se completa el ciclo recorrido por el agua de trabajo.

El proceso de generación de vapor ocurre a una presión constante, la presión alta del agua de trabajo, de modo que la temperatura se mantiene constante e igual a la de saturación del agua. Al igual que en la caldera, en el condensador la presión del agua es constante y por tanto su temperatura será igualmente constante e igual a la de saturación.

(a) **Rendimiento máximo.** El rendimiento máximo de la central se obtiene cuando opera como un ciclo motor de Carnot, cuyo rendimiento viene dado por la Ec. (5.13):

$$\eta = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

Como las presiones alta y baja son conocidas, las temperaturas de saturación correspondientes se pueden obtener, resultando iguales a:

$$T_A = 311,0^\circ\text{C} = 548,1 \text{ K}$$

$$T_B = 45,8^\circ\text{C} = 319,0 \text{ K}$$

El rendimiento máximo resulta igual a: 0,454. De la definición del rendimiento térmico se puede determinar la tasa de transferencia de calor en la caldera:

$$\dot{Q}_A = \frac{\dot{W}}{\eta_{\text{Carnot}}} = \frac{100}{0,454} = 220,273 \text{ MW}$$

De la conservación de la energía para el ciclo se obtiene la tasa de transferencia de calor en el condensador:

$$\dot{Q}_B = \dot{Q}_A - \dot{W} = 120,273 \text{ MW}$$

Como complemento a la solución propuesta, considerando las hipótesis del enunciado, es posible determinar el caudal del agua de trabajo en el ciclo. Efectivamente, como el agua entra en la caldera como líquido saturado ($x=0$) y sale como vapor saturado ($x=1$), la correspondiente variación de entalpía del agua es igual a la entalpía de vaporización, h_{lv} , cuyo valor a la presión de 10 MPa es 1318 kJ/kg. Por tanto, por la conservación de la energía aplicada al proceso de generación de vapor, resulta:

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_{\text{agua}} h_{lv} \Rightarrow \dot{m}_{\text{agua}} = \frac{\dot{Q}_A}{h_{lv}} = \frac{220273}{1318} = 167,2 \text{ kg/s}$$

(b) En este caso el motor térmico opera entre los mismos focos térmicos, mas su rendimiento es inferior al máximo. Por tanto se trata de un motor irreversible. Como se conoce el rendimiento, la tasa de transferencia de calor en la caldera se puede determinar directamente de la definición de rendimiento:

$$\dot{Q}_A = \frac{\dot{W}}{\eta} = \frac{100}{0,4} = 250 \text{ MW} .:$$

$$\dot{Q}_B = \dot{Q}_A - \dot{W} = 150 \text{ MW}$$

Es interesante confrontar estos resultados con los del apartado (a). Se observa que para la misma potencia del motor, el ciclo reversible (Carnot) requiere un aporte menor de calor en la caldera lo que tiene una implicación económica evidente: menor coste operacional con el combustible. Por otro lado el calor cedido al foco de baja temperatura también es inferior en el caso reversible, con implicaciones medioambientales ya que el aporte de calor al ambiente es inferior. Los resultados del problema permiten comprender el esfuerzo tecnológico en mejorar el rendimiento térmico de las centrales térmicas de generación de energía eléctrica. El problema siguiente vuelve a tratar de una central y las implicaciones medioambientales.

Problema 5.9.3

Una central generadora de energía eléctrica está instalada en la orilla de un río con objeto de aprovechar sus aguas en la operación (condensación del vapor). El río presenta una profundidad de 8 m y una anchura de 60 m, como se ilustra en la Figura 5.21. La velocidad media del agua puede admitirse igual a 10 m/min. La central

produce 1000 MW de energía eléctrica, siendo la temperatura máxima del fluido de trabajo (agua) de 550°C y la mínima aquella que corresponde a una presión de condensación de 10 kPa. Estime la variación de la temperatura de las aguas del río en el paso por la central.

Solución

El problema trata de una central térmica en la que el agua de condensación proviene de un río. El objetivo es determinar qué efectos puede tener sobre la fauna acuática la elevación de la temperatura del agua del río resultante de la transferencia de calor en el condensador de la central térmica. Para ello, el problema se resuelve de forma relativamente sencilla para obtener un orden de magnitud del aumento de temperatura y, a través del resultado, comprobar el efecto medioambiental.

Los componentes del ciclo representativo de la central a que se refiere este problema son los mismos de la Figura 5.20. Como no se informan las características del ciclo motor, se admitirá que el mismo sea reversible y, conocidos los resultados, se discutirán las consecuencias de las irreversibilidades. Como el ciclo es reversible,

$$\eta = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

Se admite que la temperatura máxima del enunciado corresponde a la de saturación del proceso de generación de vapor, como en el Problema 5.9.2. La temperatura mínima puede determinarse a partir de la presión de condensación, ya que la cesión de calor a baja temperatura ocurre en el condensador de la planta, como se sugiere en las Figura 5.20 y Figura 5.21.

$$T_B = T_{\text{sat}}(10 \text{ kPa}) = 45,8^\circ\text{C}$$

Entonces,

$$\eta = 1 - \frac{273,15 + 45,81}{273,15 + 550} = 0,612$$

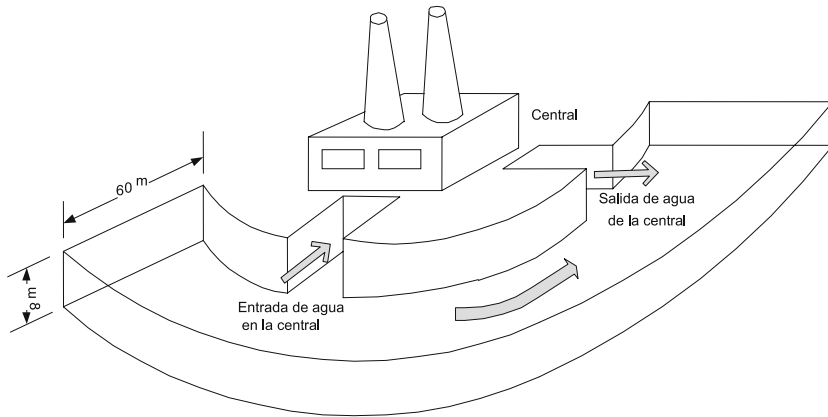


Figura 5.21 Esquema de la central térmica del Ejemplo 5.9.3

De la definición de rendimiento,

$$\dot{Q}_A = \frac{\dot{W}}{\eta} = \frac{1.000}{0,612} = 1632 \text{ MW}$$

Por tanto,

$$\dot{Q}_B = \dot{Q}_A - \dot{W} = 632 \text{ MW}$$

Como en el condensador se transfiere calor del vapor al agua del río, para un volumen de control que comprende el agua del río desde la región aguas arriba hasta la región inmediatamente aguas abajo de la central, por la conservación de energía,

$$\dot{Q}_B = \dot{m}_{\text{arío}} (c_p)_{\text{arío}} \Delta T_{\text{arío}}$$

Como

$$\dot{m}_{\text{arío}} = \rho_{\text{arío}} V_{\text{arío}} A_{\text{arío}} = 1000 \times \left(\frac{10}{60} \right) \times (60 \times 8) = 80000 \text{ kg/s}$$

El índice “arío” se refiere al agua del río y $A_{\text{arío}}$ al área de la sección transversal del río. En estas condiciones, conocido el valor de \dot{Q}_B , del caudal de agua del río y de su calor específico, en este caso se admite el típico para el agua, 4,186 kJ/kgK, la variación de temperatura resultante del paso por la central se puede determinar y resulta igual a 1,9°C.

Si el ciclo motor fuera irreversible, el rendimiento térmico sería inferior y, para una misma potencia, el calor transferido por el foco de alta temperatura sería superior ocurriendo lo mismo con el calor rechazado, resultando una elevación de la temperatura del agua del río superior a 1,9°C, con posibles efectos perversos sobre la fauna del río.