Física Térmica - Edición 2025

Práctico 4: Máquinas térmicas y segunda ley

Ejercicio 1.

a) Muestre que el coeficiente de performance de una bomba de calor es mayor que la unidad. Esto implica que por cada unidad de energía consumida en forma de trabajo, la bomba transfiere más de una unidad de energía en forma de calor a la zona de alta temperatura. ¿Contraviene esto la primera ley de la termodinámica? Explique.

b) Obtenga la relación entre los coeficientes de performance de una bomba de calor y de un refrigerador y discuta las implicancias prácticas de ese resultado ¿Bajo qué condiciones el coeficiente de performance de un refrigerador es mayor que la unidad?

Ejercicio 2.

a) Un gas ideal que se expande isotérmicamente convierte en trabajo todo el calor que recibe de una única fuente térmica. ¿Contraviene esto el enunciado de Kelvin-Planck del segundo principio? Justifique.

b) ¿Es posible que un dispositivo cíclico ceda a una fuente en forma de calor todo el trabajo que recibe? En caso afirmativo proporcione un ejemplo, y en caso negativo argumente la imposibilidad.

Ejercicio 3. El ciclo de Carnot representa el ejemplo más célebre dentro de los ciclos de potencia reversibles que operan entre dos temperaturas dadas. En dicho ciclo la sustancia de trabajo sufre las cuatro etapas cuasiestáticas que se describen a continuación:

- $1 \rightarrow 2$: expansión isotérmica a temperatura T_a, desde un volumen V_1 hasta el volumen V_2, absorbiendo calor de una fuente de alta a temperatura $T_H \geq T_a$;
- $2 \rightarrow 3$: expansión adiabática desde V_2 hasta V_3;
- $3 \rightarrow 4$: compresión isotérmica a temperatura T_b, desde V_3 a V_4, cediendo calor a una reserva de baja a temperatura $T_L \leq T_b$;
- $4 \rightarrow 1$: compresión adiabática hasta retornar al estado inicial.

a) Bosqueje el ciclo en un diagrama $P - v$, asumiendo que la sustancia de trabajo es un gas ideal.

b) Calcule el calor y el trabajo involucrados en cada etapa, en función de las presiones y los volúmenes de los cuatro estados relevantes.

c) Exprese la eficiencia térmica del ciclo exclusivamente en términos de T_a y T_b.

d) Indique la relación que debe existir entre las temperaturas del ciclo y las temperaturas de las fuentes para que las transferencias de calor sean reversibles. Concluya que la eficiencia de un ciclo de Carnot está dada por la expresión clásica:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

(e) ¿Qué puede afirmar sobre la eficiencia de otro ciclo cualquiera que opere entre las mismas fuentes térmicas? Discuta en función de si el ciclo es reversible o irreversible.

Ejercicio 4.

Un inventor se presenta a la oficina de patentes, afirmando haber desarrollado:

a) una máquina térmica que recibe calor de una fuente a $500\,\mathrm{K}$, produce $300\,\mathrm{kJ}$ de trabajo neto, y transfiere $400\,\mathrm{kJ}$ de calor sobrante a un foco térmico a $290\,\mathrm{K}$.

b) una heladera que mantiene la cámara refrigerada a $-10\,^\circ\mathrm{C}$ cuando es colocada en una habitación a $25\,^\circ\mathrm{C}$, presentando un COP de 8,5.

¿Logra el inventor patentar sus inventos? Justifique.

Ejercicio 5.

Considere una máquina térmica reversible que opera entre dos focos a temperaturas T_H y T_L ($T_H > T_L$). Suponga que Ud. puede aumentar o disminuir la temperatura **de uno de los focos** en un monto ΔT (se asumirá que la máquina sigue operando reversiblemente).

a) Despreciando los costos asociados a esa modificación y pensando exclusivamente en términos de la eficiencia, indique qué cambio efectuaría, justificando matemáticamente su elección.

b) Se considera ahora el caso en el que se modifica la temperatura de ambos focos en un mismo monto ΔT, de modo que la diferencia de temperatura entre ellos permanece constante. Discuta los efectos de dicho cambio en la eficiencia de la máquina. Analice el caso límite en el que ΔTˇT_H, y extraiga conclusiones.

Ejercicio 6. Una bomba de calor mantiene una casa a $20\,^\circ\mathrm{C}$ en invierno, cuando la temperatura exterior es de $0\,^\circ\mathrm{C}$. Se estima que la transferencia de calor a través de las paredes, ventanas y techos es de $2400\,\mathrm{kJ}$ por hora por grado de diferencia de temperatura entre el interior y el exterior.

(a) ¿Cuál es la potencia mínima que se requiere para impulsar la bomba?

(b) Al llegar el verano, la bomba se invierte para mantener la casa refrigerada. ¿Cuál es la temperatura exterior máxima para la cual la casa se puede mantener a $25\,^\circ\mathrm{C}$ consumiendo la misma potencia que en invierno?

Ejercicio 7.

Se desea mantener una cámara refrigerada a $-30\,^\circ\mathrm{C}$ empleando trabajo producido por una máquina térmica que opera entre una fuente a $200\,^\circ\mathrm{C}$ y el ambiente, que se encuentra a $30\,^\circ\mathrm{C}$ (ver Fig. (1)). Si el refrigerador también cede el calor extraido de la cámara al ambiente, calcule la relación entre dicho calor y el que activa la máquina, asumiendo que ambos dispositivos operan reversiblemente.

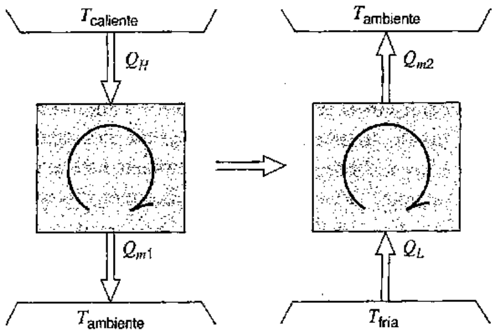

Figura 1: Ejercicio 7

Ejercicio 8.

Los ciclos de potencia completamente reversibles no solo son difíciles de implementar, sino que además no son útiles en la práctica debido a la baja potencia que producen. Esto queda de manifiesto al observar que en el ciclo de Carnot estudiado en el Problema 5, la reversibilidad de las transferencias de calor implica que las temperaturas T_a y T_b deben diferir tan solo infinitesimalmente de T_H y T_L, por lo que la tasa a la que ingresa calor al ciclo es muy baja, y, en consecuencia, también lo es la potencia producida. La conclusión de esta observación es que en la práctica **es necesario sacrificar eficiencia en pos de producir una potencia que logre satisfacer la demanda de trabajo útil**. Una forma de lograrlo es manteniendo la reversibilidad interna del ciclo y de las reservas, pero permitiendo que las transferencias de calor sean irreversibles, de modo que el calor ingrese al sistema a una tasa mayor. Suponiendo que las trasferencias de calor hacia y desde el sistema satisfacen la *ley de Ohm térmica*:

$$\begin{cases} \dot{Q}_H = C_H(T_H - T_a) \\ \dot{Q}_L = C_L(T_b - T_L), \end{cases}$$

donde C_H y C_L son los inversos de las resistencias térmicas (que se asumirán constantes), se pide:

a) Determine la temperatura T_b en función de T_a, las temperaturas de los focos, y los parámetros C_H y C_L.

b) Utilizando que el ciclo es internamente reversible, calcule la potencia producida en función de los mismos parámetros.

c) Asumiendo que las temperaturas de los focos permanecen constantes, halle la temperatura de operación T_a que maximiza la potencia producida.

d) Calcule la potencia máxima y muestre que, cuando la misma es producida, la eficiencia del ciclo vale

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{T_L}{T_H}} < \eta_C = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Ejercicio 9.

Se desea emplear un colector solar como fuente de alta para una máquina térmica reversible que desechará calor al ambiente a temperatura T_0. El colector tiene una eficiencia ε definida como la fracción del calor incidente desde el sol que efectivamente queda disponible para activar la máquina térmica:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_S},$$

y que adopta la expresión:

$$\varepsilon = \frac{3}{4}\left(1 - \frac{(T - T_0)}{(T_1 - T_0)}\right),$$

donde T_1 es una temperatura aparente dada conocida tal que $T_1 > T > T_0$. Si el calor procedente desde el sol incide en el colector a una tasa $\dot{Q}_S$ constante, determine la temperatura T de operación del colector que maximiza la potencia producida por la máquina.

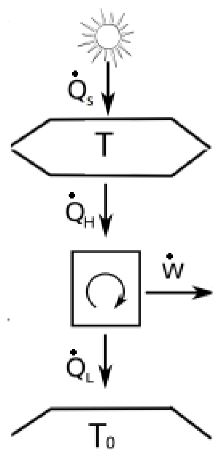

Figura 2: Ej. 9