

Física 2 Biólogos y Geólogos - Curso de Verano 2009

Serie 7: Primera y Segunda Ley de la Termodinámica. Máquinas térmicas y Entropía

- Un mol de gas ideal se expande en contacto con una fuente de calor a $T = 373 \text{ K}$ contra una presión exterior constante de 5 atm, partiendo del estado en que la presión es de 10 atm, hasta llegar al volumen de equilibrio.
 - Calcule el trabajo realizado por el gas.
 - Calcule ese trabajo en el caso en que el gas se expanda reversiblemente.
 - Calcule el calor recibido por el gas, de la fuente, en cada caso.
 - Calcule ΔU y ΔH , y compare ΔH con el calor en cada caso.
- Se tiene un cilindro con un pistón sin rozamiento que contiene 1 m^3 de gas monoatómico ($\gamma = 5/3$) a presión atmosférica ($1.01 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$). Se comprime el gas hasta que el volumen sea 0.4 m^3 . ¿Cuánto trabajo se realizó para comprimir este gas?
 - Si el proceso es isotérmico.
 - Si el proceso es a $P = P_{\text{ext}} = \text{cte}$.
 - Si el proceso es adiabático reversible.
- Un cilindro en el cual el pistón es sostenido por un resorte, contiene 0.03 m^3 de aire a una presión de 1050 mbar, equilibrada con la presión atmosférica constante de 1050 mbar. El peso del pistón y del resorte pueden considerarse despreciables. En el estado inicial el resorte no ejerce ninguna fuerza sobre el pistón. Entonces se calienta el gas hasta duplicar su volumen. La presión final del gas es 3500 mbar, y durante el proceso el resorte ejerce una fuerza proporcional al desplazamiento del pistón a partir de su posición inicial, siendo la constante de proporcionalidad $k = 10000 \text{ N/m}^2$. Considerando el gas como sistema, calcular el trabajo total efectuado por el sistema. De este trabajo total, ¿qué porcentaje está hecho contra la atmósfera y cuál contra el resorte?
- Un buzo sumergido puede respirar con normalidad a grandes profundidades si el aire que se le suministra está a una presión igual a la presión del agua que le rodea. Para suministrar aire a la presión reinante se ha diseñado un aparato autónomo de respiración subacuática (scuba). El aparato consta de un depósito de aire a alta presión (inicialmente por encima de 170 atm), rígido y diatérmico, conectado a una boquilla por medio de un tubo flexible. Un regulador entre el depósito y la boquilla permite al aire entrar en la boca del buzo a una presión igual a la de la del agua que le rodea. La presión a una altura h bajo el agua está dada por la suma de la presión atmosférica y la presión ejercida por la columna de agua, siendo para el caso en que $P_{\text{atm}} = 1 \text{ atm}$ y h en m,

$$P(h) = 1 \text{ atm} + h\rho g \simeq 1\text{atm} + h0.1\text{atm/m} \quad (1)$$

Completar los siguientes cuadros y preguntas de acuerdo a las distintas etapas de inmersión del buzo. Considerar al aire como un gas ideal diatómico, $c_v = 5/2 \text{ R}$ y $c_p = 7/2 \text{ R}$.

- Antes de inspirar el buzo se encuentra a una profundidad de 10 m, donde la temperatura del agua es de 17°C . Sus pulmones contienen 4 L de aire a 27°C y el tanque (que tiene 10 L de capacidad) tiene una presión de 200 atm.

A 10 m (Posición inicial)	Agua	Pulmones	Tanque
Temperatura T(K)			
Presión P(atm)			
Volumen V(L)	—		
Número de moles n	—		

- (b) En estas condiciones se sumerge hasta 15 m donde la temperatura del agua es de 12°C (el tanque se equilibra térmicamente) de forma que los pulmones sufren una compresión adiabática y reversible durante el descenso.

A 15 m (Antes de inspirar)	Agua	Pulmones	Tanque
Temperatura T(K)			
Presión P(atm)			
Volumen V(L)	—		
Número de moles n	—		

- (c) Una vez allí inspira cierta cantidad de moles hasta que el aire de los pulmones se equilibra térmicamente con el proveniente del tanque, y sus pulmones alcanzan un volumen de 5 L.

A 15 m (Después de inspirar)	Agua	Pulmones	Tanque
Temperatura T(K)			
Presión P(atm)			
Volumen V(L)	—		
Número de moles n	—		

- (d) ¿Qué trabajo realiza el sistema (pulmones + tanque) sobre el medio (agua) en la inspiración?
 (e) ¿Qué volumen adquirirían los pulmones si el buzo ascendiera sin exhalar el aire inspirado hasta la superficie, de forma que sus pulmones sufrieran una expansión adiabática reversible?

5. Diez moles de un gas ideal ($\gamma = 5/3$), que se encuentran inicialmente a 27°C y 760 mmHg, se comprimen a la mitad del volumen inicial.

- (a) Calcule Q , W , ΔU y ΔH del sistema cuando el proceso se realiza isotérmicamente.
 (b) Calcule Q , W , ΔU y ΔH del sistema cuando el proceso se realiza adiabáticamente.

6. Calcular el trabajo realizado y el calor absorbido (o entregado) por 1 m^3 de gas ideal a presión atmosférica cuando se lo somete a los siguientes procesos:

- (a) Desde las condiciones iniciales se comprime el gas isotérmicamente hasta 20 veces la presión inicial.
 (b) Desde las condiciones iniciales se calienta el gas a volumen constante 20 veces la presión inicial. Luego se lo lleva reversiblemente, a presión constante, hasta el volumen final del caso anterior.
 (c) Dibuje el diagrama P-V.

7. La temperatura de 5 kg de N_2 gaseoso se eleva desde 10°C a 130°C .

- (a) Si se realiza el proceso a presión constante, halle la cantidad de calor necesaria para ello, el incremento de la energía interna y el trabajo exterior realizado sobre el gas.
 (b) Calcule la cantidad de calor necesario si el proceso se lleva a cabo a volumen constante.

Los calores específicos del gas N_2 son: $c_p = 0.248\text{ kcal}/(\text{kg}^{\circ}\text{K})$; $c_v = 0.177\text{ kcal}/(\text{kg}^{\circ}\text{K})$.

8. Un gas tiene una ecuación de estado $P = \frac{RT}{V}(1 + \frac{aT}{V})$, con $a = \text{cte}$. Su energía interna responde a la ecuación $U(T, V) = U_0(T) - Ra\frac{T}{V}$.

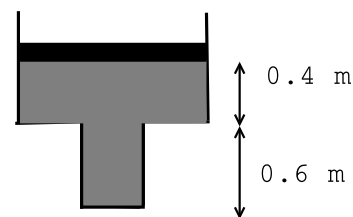
- (a) Halle el trabajo entregado por el gas durante una expansión isotérmica desde V_0 a $3V_0$.
- (b) Idem, durante una expansión en contacto con una sola fuente y contra una presión exterior constante P_{ext} menor que $P(3V_0, T)$ desde V_0 hasta $3V_0$.
- (c) Halle la variación de energía interna del gas y los calores absorbidos en los casos a) y b).
9. Un gas experimenta una transformación que lo lleva de un estado inicial caracterizado por P_0, V_0 a un estado final caracterizado por P_f, V_f . ¿En cuáles de los siguientes casos la variación de entalpía es igual al calor absorbido por el gas durante la transformación? Justifique analizando detalladamente cada caso:
- (a) $P_0 \neq P_f$; la transformación ocurre en forma reversible.
- (b) $P_0 \neq P_f$; la transformación ocurre en forma irreversible.
- (c) $P_0 \neq P_f$; la transformación ocurre en forma reversible y el sistema está sometido a presión externa variable.
- (d) $P_0 = P_f$; la transformación ocurre en forma reversible y el sistema está sometido a presión exterior constante.
- (e) $P_0 = P_f$; la transformación ocurre en forma irreversible y el sistema está sometido a presión exterior constante.
- (f) Verifique sus respuestas anteriores para el caso de un gas ideal, imaginando cada uno de los procesos y realizando el cálculo de Q y H .
10. Un mol de gas se halla encerrado en un cilindro provisto de un pistón. El cilindro y el pistón son adiabáticos. En el estado inicial el pistón se halla trabado. El volumen es $V_A = 2$ L, la temperatura $T_A = 300$ K y la presión $P_A = 5.5$ atm. El gas se expande contra una presión nula. Cuando el volumen llega a $V_B = 2V_A$, se traba nuevamente el pistón. La ecuación de estado del gas es:

$$P(V, T) = \frac{nRT}{V} - \frac{a}{V^2}. \quad (2)$$

La energía interna del gas está dada por $U(T, V) = 2.5nRT - \frac{a}{V}$.

- (a) ¿Es reversible el camino entre A y B? Justifique su respuesta.
- (b) ¿Cuánto vale ΔU ? ¿Por qué?
- (c) Calcule T_B y P_B .
- (d) Calcule ΔH_{AB} . ¿Coincide este valor con el calor intercambiado?
- (e) Calcule c_v .
11. Se tienen 3 moles de un gas ideal que se expande isotérmicamente desde $P_0 = 5$ atm hasta $P_f = 3$ atm a temperatura $T = 0^\circ\text{C}$.
- (a) ¿Cuántas calorías absorbe el gas?
- (b) ¿Cuánto vale ΔH ?
12. Se tienen 200 g de un gas ideal que se encuentran confinados en un cilindro como el de la figura, provisto de un émbolo de peso despreciable que se desplaza sin rozamiento. El área mayor del cilindro es de 1 m² y el área menor es de 0.5 m². La presión externa es constante e igual a $3 \cdot 10^5$ N/m². Inicialmente, el sistema se encuentra en equilibrio con el medio y la temperatura inicial de todo el sistema es de 700 K. El gas se deja enfriar por transmisión de calor al medio.

- (a) Halle la temperatura del gas cuando el émbolo llega al escalón suponiendo que en ese punto la presión del gas coincide con la presión exterior. Calcule el trabajo para esta parte del proceso.
- (b) Luego del proceso descrito en a), se coloca el recipiente en contacto con una fuente de 223 K, y se deja que alcance el nuevo estado de equilibrio. Calcule ahora W , ΔV y ΔH para este segundo proceso ($c_v = 0.3 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$).



13. Suponga un mol de gas ideal encerrado en un cilindro provisto de un pistón, inicialmente trabado en un volumen $V_1 = 2 \text{ L}$. El cilindro se halla en contacto térmico con una mezcla de 2 kg de agua y 2 kg de hielo. Se sabe que cada vez que la fuente entrega 80 cal al gas, congela 1 g de agua.
- (a) ¿A qué temperatura se halla inicialmente el gas? Tomará ésta el mismo valor luego de que el gas realice una expansión? ¿Por qué?
- (b) Halle el estado final de la fuente de calor, (es decir, la masa de hielo presente) luego de que el gas se haya expandido reversiblemente hasta $V_2 = 10 \text{ L}$.
- (c) Idem, si el gas se expande desde el mismo estado inicial del gas, y la fuente hasta el mismo estado final para el gas, pero esta vez de forma irreversible, contra una presión exterior de 1 atm.
14. Un cilindro de volumen $V = 9 \text{ L}$, cerrado en sus dos extremos, contiene una mezcla de 10 moles de N_2 y 8 moles de O_2 que pueden considerarse gases ideales. Un pistón diatérmico y semipermeable, permeable al N_2 e impermeable al O_2 , está inicialmente en un extremo y es desplazado de modo que deja atrás de sí un volumen $V_1 = 5 \text{ L}$ que contiene únicamente N_2 . Un segundo pistón diatérmico y semipermeable, permeable al O_2 e impermeable al N_2 está al comienzo en el otro extremo y es desplazado de modo que deja detrás de sí un volumen $V_2 = 4 \text{ L}$ que contiene solamente O_2 .
- (a) Los desplazamientos se realizan isotérmicamente a 27°C . Calcular el trabajo realizado por el sistema.
- (b) Si se destrabaran los pistones, ¿se moverían? Justifique.
- (c) Se fijan los pistones en la posición del punto a) y se reviste al cilindro de paredes adiabáticas, luego a través de una resistencia colocada en el interior del cilindro se le suministra calor al sistema durante 10 minutos. ¿Cuál es la temperatura final del sistema y cuánto varía la energía interna del mismo?
- (d) ¿Cuál es la variación de entalpía del O_2 y del N_2 durante el proceso descrito en c)?

Datos: $I_{\text{resistencia}} = 5 \text{ A}$, $V_{\text{resistencia}} = 2 \text{ V}$, tomar $c_{V_{O_2}} = c_{V_{N_2}} = 5/2R$.

15. Se tiene un mol de gas de Van der Waals $(P + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT$, para el cual $U = c_v T - a/V + \text{cte}$ que se expande de V_0 a $2V_0$ contra $P_{\text{ext}} = P_0 = \text{cte}$ en un baño térmico de temperatura T_0 . Calcular las variaciones de entropía del gas, la fuente y el universo indicando en cada caso si son positivas, nulas o negativas. Comparar con un gas ideal.
16. Un mol de gas ideal ($c_v = 3/2R$) realiza el siguiente ciclo:
- AB** Se expande contra un presión exterior constante, en contacto térmico con una fuente de calor a 300 K, desde $V_A = 10 \text{ L}$ hasta el volumen de equilibrio con la presión externa $V_B = 20 \text{ L}$.
- BC** Se traba el volumen en 10 L, se pone el gas en contacto térmico con una fuente de calor 200 K hasta llegar al equilibrio.
- CD** Manteniéndolo en contacto térmico con esta última fuente, se lo comprime reversiblemente hasta volver a su volumen inicial.
- DA** Trabando el volumen en 10 L, se pone el gas en contacto térmico con la fuente a 300 K, hasta llegar al equilibrio.

- (a) Calcule el trabajo entregado por el gas en cada etapa del ciclo.
- (b) Calcule el trabajo total entregado. ¿Varió la energía interna del gas respecto del valor inicial al completarse el ciclo? En base a su respuesta, indique el calor absorbido por el gas durante el ciclo.
- (c) Calcule el calor total que entregó cada una de las fuentes. ¿Cuál perdió calor? ¿Cuál lo ganó?
- (d) Calcule la eficiencia del ciclo, definida como $\epsilon = W/Q_1$, donde Q_1 es el calor absorbido de la fuente de 300 K.

17. Se tiene una máquina térmica reversible que opera según el ciclo de Carnot entre dos fuentes de calor a temperaturas T_1 t T_2 , siendo $T_1 > T_2$. Si dicha máquina toma 550 kcal de la fuente a temperatura T_1 y entrega un trabajo equivalente a 300 kcal, ¿qué cantidad de calor se entrega a la fuente fría y cuánto vale la eficiencia (rendimiento) de dicha máquina?

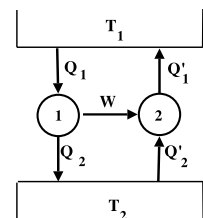
18. Si una máquina de Carnot opera entre dos fuentes de la misma naturaleza, entregando un trabajo equivalente a 500 kcal y devolviendo a la fuente fría 300 kcal, ¿cuál es la relación entre las temperaturas absolutas de dichas fuentes?

19. Supóngase tener una máquina de Carnot operando como refrigerador, entre las temperaturas de 277 K y 300 K.

- (a) ¿Cuánto vale su eficiencia?
- (b) Si se desean extraer 200 cal de la fuente fría, ¿qué cantidad de trabajo habrá que entregarle y qué cantidad de calor se entrega a la fuente caliente?

20. Dos máquinas operan tal como lo indica el gráfico. Se sabe que la temperatura de la fuente caliente es de 600 K, que la máquina 1 es reversible y absorbe 300 kcal cediendo 100 kcal, y la máquina 2 absorbe 50 kcal de la fuente 2.

- (a) Calcule la temperatura de la fuente fría.
- (b) ¿Cuál es la eficiencia de ambas máquinas?
- (c) ¿Es reversible la máquina 2? ¿Por qué?



21. Supóngase tener un sistema que evoluciona reversiblemente, entregando 500 cal a 500 K y recibiendo 300 cal a 300 K. ¿Cuánto vale su variación de entropía?

22. Si un sistema evoluciona isotérmicamente a $27^\circ C$ y la entropía varía en 4 kcal/K, ¿cuánto calor recibió?

23. Dado un gas ideal en condiciones de P, V y T que sufre una transformación cualquiera quedando en condiciones P_2, V_2, T_2 , calcular la variación de entropía usando como variables:

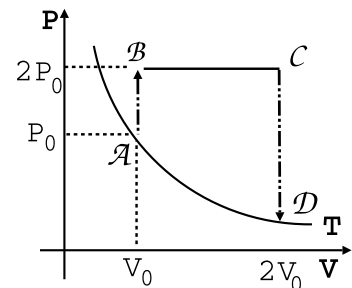
- (a) P y T .
- (b) P y V .
- (c) V y T .

24. Suponga que tiene un kilo de hielo a $-20^\circ C$ al que se le entrega calor hasta llevarlo a agua líquida a $20^\circ C$. Si la capacidad calorífica específica del hielo en esas condiciones es $0.5 \text{ cal/g}^\circ C$, la del agua es $1 \text{ cal/g}^\circ C$ y el calor latente de fusión del hielo es 80 cal/g . Calcule la variación de entropía del proceso.

25. Un cilindro térmicamente aislado cerrado por ambos extremos está provisto de un pistón sin rozamiento, conductor de calor y que divide en dos partes. Inicialmente se sujeta al pistón en el centro, quedando a un lado 1 litro de gas ideal a 300 K y 2 atm de presión, y al otro lado 1 litro de gas ideal a 300 K y 1 atm de presión. Se libera el pistón, alcanzando el equilibrio de presión y temperatura en una nueva posición. Halle la presión y temperatura finales y la variación de entropía.

26. Una máquina térmica trabaja entre $T_1 = 400 \text{ K}$ y $T_2 = 200 \text{ K}$, extrayendo en cada ciclo 10 kcal de la fuente 1. La eficiencia de la máquina es un 40% de la máxima posible para dicho par de temperaturas. Calcule:
- El trabajo por ciclo.
 - El calor entregado a la fuente de calor 2, por ciclo.
 - Las variaciones de entropía por ciclo de la sustancia que trabaja en la máquina, de la fuente 1, de la fuente 2 y del Universo.
 - Idem a), b) y c), pero para la máquina que tiene la eficiencia máxima posible trabajando entre las temperaturas T_1 y T_2 .

27. Una máquina funciona usando un gas ideal según el ciclo de la figura. Calcule:



- La eficiencia de la máquina.
- ΔS_U .

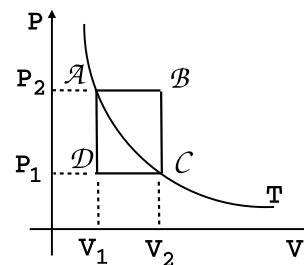
Datos: $P_B = P_C$; $V_A = V_B$; $V_C = V_D$; $c_v = 3/2R$; $T_A = 200 \text{ K}$; $P_0 = 1 \text{ atm}$; $V_0 = 10 \text{ L}$

28. 1 kilogramo de agua a 0°C se pone en contacto con una fuente a 100°C .
- Calcule la variación de entropía del Universo cuando el agua alcanza la temperatura de la fuente.
 - Calcule la variación de entropía del Universo si el agua se pone primero en contacto con una fuente a 50°C , y luego de alcanzada esa temperatura, se la pone en contacto con la fuente de 100°C .
 - Calcule la variación de energía interna del agua y de las fuentes.
29. Una máquina reversible lleva un mol de gas ideal monoatómico ($c_v = 3/2R$, $\gamma = 5/3$) a través del ciclo ABCDA, con las siguientes características en cada una de las etapas:
- AB: Expansión isotérmica hasta duplicar el volumen tal que $V_B = 2V_A$.
- BC: Es una expansión adiabática hasta disminuir la temperatura hasta la mitad $T_C = T_B/2$.
- CD: Compresión hasta $V_D = V_A$ a presión constante.
- DA: Se cierra el ciclo a volumen constante, aumentando la presión hasta P_A .
- Calcular el trabajo, el calor entregado y la variación de energía en cada etapa del ciclo.
 - Calcular la variación de entropía del sistema y del Universo en un ciclo.
 - Calcular el rendimiento.

Datos: $P_A = 16.2 \text{ atm}$, $V_A = 2 \text{ L}$

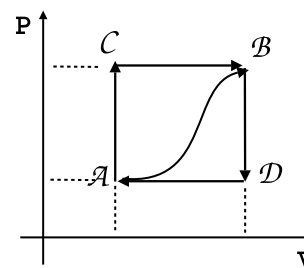
30. La figura representa cinco transformaciones, $a - b$, $b - c$, $c - d$, $d - a$ y $a - c$, trazadas en el plano $P - V$, correspondientes a un gas ideal en un sistema cerrado. Representar los mismos procesos:

- (a) en el plano $P - T$
- (b) en el plano $T - V$
- (c) Sean $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2, P_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2, V_1 = 2.5 \text{ m}^3$. Determinar:
- la temperatura T .
 - el volumen V_2 .
 - las temperaturas en los puntos b y d .
 - el volumen real V en el punto (i) si el sistema consiste en 4 kilomoles de hidrógeno.
 - la masa del hidrógeno.



31. Cuando el sistema pasa del estado a al estado b , a lo largo de la trayectoria $a - c - b$, recibe un flujo de calor 80 J y el sistema realiza un trabajo de 30 J .

- ¿Cuánto calor fluye en el sistema a lo largo de $a - d - b$ si el trabajo realizado es 10 J .
- ¿El sistema vuelve del estado b al estado a a lo largo de la trayectoria curva. El trabajo realizado sobre el sistema es 20 J . ¿Cuánto calor absorbe o cede el sistema, si es que lo absorbe o lo cede?
- Si $U_a = 0$ y $U_d = 40 \text{ J}$, determinar el calor absorbido en los procesos $a - d$ y $d - b$. Calcular el rendimiento o coeficiente de eficiencia según corresponda.

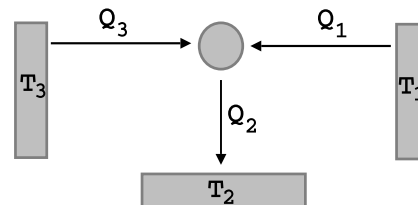


32. Para el problema 4 de la serie 9, halle la variación de entropía del gas, de la fuente de calor, y del Universo para los casos en que:

- La expansión es irreversible.
- La expansión es reversible.

33. Una heladera “de campo” no recibe trabajo de ningún tipo, y sin embargo, extrae calor de una fuente fría a T_1 (el interior de la heladera) y lo entrega al medio ambiente, que se halla a una temperatura $T_2 > T_1$. Esto es posible porque la máquina térmica trabaja entre tres fuentes de calor (no es simple) y aunque parezca paradójico, esta tercera fuente, que en la práctica es cualquier sustancia en combustión, se halla a una temperatura $T_3 > T_2$. El esquema de la máquina es el que se muestra en la figura.

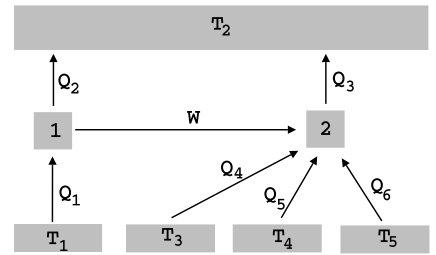
- Recordando que $W = 0$, calcule la relación que debe haber entre Q_1 , Q_2 y Q_3 .
- Haciendo la aproximación *grosera* de que la máquina es reversible, utilice la igualdad de Clausius para hallar Q_1 sabiendo que $Q_3 = 1000 \text{ cal}$ y conociendo las temperaturas $T_1 = 200 \text{ K}$, $T_2 = 300 \text{ K}$ y $T_3 = 1000 \text{ K}$.



34. A la máquina del problema anterior se la puede considerar como una combinación de dos máquinas reversibles: M_1 que trabaja como máquina térmica entre T_3 y T_2 , absorbiendo Q_3 y entregando Q'_2 a T_2 y un trabajo W que se utiliza para arrastrar a otra máquina M_2 (frigorífica reversible) que trabaja entre T_2 y T_1 , extrayendo Q'_1 de T_1 y entregando Q''_2 a T_2 . Compare Q_1 con Q'_1 , y Q_2 con $Q'_2 + Q''_2$, respetando la convención de signos: el calor absorbido por la máquina es POSITIVO y el calor entregado por la máquina es NEGATIVO.

35. Sean las máquinas de la figura. Se sabe que la máquina 2 es reversible. **Datos:** $T_1 = 800$ K; $T_3 = 150$ K; $T_4 = 300$ K; $T_5 = 100$ K; $|Q_2| = 400$ cal; $|Q_3| = 400$ cal; $|Q_4| = 100$ cal; $|Q_5| = 70$ cal; $|Q_6| = 10$ cal.

- Halle la eficiencia de la máquina 1.
- Calcule la temperatura de la fuente 2.
- ¿Es reversible la máquina 1? Justifique.
- Calcule la variación de la entropía del Universo.



36. Un recipiente de 10 litros se encuentra dividido por un pistón móvil que separa 1 mol de gas ideal monoatómico de un mol de gas de Van der Waals, cuya ecuación de estado es $PV + a/V = RT$ y la energía $U = c_v T - a/V + \text{cte}$ ($dU = c_v dT - aV^{-2}dV$, $a = 1\text{L}^2 \text{ atm}$). El sistema se pone en contacto con una fuente de temperatura $T_0 = 243.9$ K.

- ¿Qué volumen ocupa cada gas?
- Si se destraba el pistón superior realizándose una expansión contra presión externa $P_{\text{ext}} = 1$ atm. ¿Cuáles son los nuevos volúmenes de equilibrio?
- Calcular la variación de entropía de cada gas y del universo.