# 8 LOS PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA

## Sugerencias Didácticas

- Se aborda en esta Unidad el estudio de las bases teóricas que rigen el funcionamiento de las máquinas térmicas y frigoríficas. Para ello, es necesario primeramente establecer con claridad los conceptos de calor y temperatura, que muchas veces los alumnos –incluso en este nivel– confunden. Conviene mencionar que la imprecisión del lenguaje cotidiano (por ejemplo, la frase «hace mucho calor») puede ser causa de estos errores, que resultan inadmisibles en alumnos de Bachillerato.
- La fórmula fundamental de la Calorimetría servirá de punto de partida para definir los calores específicos de los gases a presión y a volumen constante, así como la relación existente entre ellos.
- En cuanto a la temperatura, una vez establecido su concepto, se fijarán las distintas escalas termométricas, procurando que el alumnado sepa expresar una misma temperatura en las diferentes escalas consideradas.
- El estudio de los principios de la Termodinámica, por muy elemental que sea, requiere la introducción de una serie de conceptos primarios, tales como sistema, estado, variables termodinámicas, funciones de estado, ecuación de estado, estados de equilibrio... En el caso de los gases ideales es importante diferenciar las transformaciones isocoras, isobaras, isotermas y adiabáticas.
- El enunciado del primer principio permitirá introducir el concepto de energía interna. Se deberá explicar cómo esta magnitud es una función de estado, mientras que el calor y el trabajo dependen de la transformación que experimente el sistema, y son fácilmente calculables en las transformaciones antes citadas de los gases ideales.
- Se prestará una atención especial a las diferencias existentes entre procesos reversibles e irreversibles, cuyo estudio exige considerar una nueva magnitud, la entropía, como medida del grado de desorden de un sistema. Todo esto conducirá al segundo principio de la Termodinámica. Es importante que los alumnos capten su significado y sepan aplicarlo al funcionamiento de las máquinas térmicas y frigoríficas.
- El estudio del ciclo teórico de Carnot permite poner de manifiesto que su rendimiento depende exclusivamente de las temperaturas absolutas de los focos caloríficos y es el máximo posible para cualquier máquina térmica.

## SOLUCIONES a las Actividades propuestas

### Pág. 146

**1.** El ejemplo más conocido es el de los cambios de estado de fusión y ebullición; en estos casos el calor suministrado al cuerpo se emplea en vencer las fuerzas de cohesión entre las moléculas, pero sin elevar la temperatura.

Otro ejemplo sería el de una barra calentada por un extremo, la cual, transcurrido cierto tiempo, alcanza un equilibrio térmico, de forma que pierde energía calorífica por convección o radiación al mismo tiempo que la recibe.

**2.** Según la ecuación fundamental de la Calorimetría:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t$$

se calentará antes (mayor incremento de temperatura) el de menor calor específico.

**3.** En el caso del cinc:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = 4\ \text{g} \cdot 0,093\ \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot {}^\circ\text{C}} \cdot (180 - 20)\ {}^\circ\text{C} = \boxed{59,52\ \text{cal}}$$

Si suministramos esta misma cantidad de calor a 35 gramos de plomo, el aumento de temperatura que experimenta es:

$$\Delta t = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{59,52\ \text{cal}}{35\ \text{g} \cdot 0,031\ \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot {}^\circ\text{C}}} = \boxed{55\ {}^\circ\text{C}}$$

### Pág. 149

**1.** Estará expresada en grados Frahrenheit. Su equivalente en grados Celsius será:

$$\frac{C}{5} = \frac{72 - 32}{9}$$

de donde: $\boxed{C = 22,2\ {}^\circ\text{C}}$

**2.** No existe límite superior de temperaturas. Sin embargo, sí existe un límite inferior, que es el de –273,16 °C, equivalente a 0 K.

**3.** Las razones por las que se elige el mercurio como líquido termométrico son las siguientes:

- Su coeficiente de dilatación constante y muy elevado.
- Su calor específico muy pequeño.
- Su buena conductividad térmica.
- Su punto de ebullición muy elevado.

4. La relación entre la escala Celsius y la Fahrenheit es:

$$\frac{C}{5} = \frac{F-32}{9}$$

Como $F = C + 500$, sustituyendo resulta:

$$\frac{C}{5} = \frac{C+500-32}{9}$$

de donde: $\boxed{C = 585\ °C}$

5. En este caso $C = F/3$. Por tanto: $\frac{F/3}{5} = \frac{F-32}{9}$

de donde se obtiene:

$$\boxed{F = 80\ °F = 26,67\ °C}$$

## Pág. 156

1. Como $Q = 500 \text{ cal} = 500 \text{ cal} \cdot \frac{4,1855 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 2\,092 \text{ J}$

y $W = 40 \text{ kgm} = 40 \text{ kgm} \cdot \frac{9,8 \text{ J}}{1 \text{ kgm}} = 392 \text{ J}$

resulta $\Delta U = Q - W = 2\,092 \text{ J} - 392 \text{ J} = \boxed{1\,700 \text{ J}}$

2. La presión de 10 atmósferas equivale a:

$$p = 10 \text{ atm} \cdot \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}} = 1,013 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

y la variación de volumen es:

$$\Delta V = \pi \cdot R^2 \cdot \Delta h = \pi \cdot (0,2 \text{ m})^2 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 6,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Por lo tanto:

$$W = p \cdot \Delta V = 1,013 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 6,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 6,36 \cdot 10^3 \text{ J} =$$

$$= 6,36 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \frac{0,24 \text{ cal}}{1 \text{ J}} = \boxed{1\,526 \text{ cal}}$$

3. El volumen que ocupan 25 gramos de vapor de agua a 20 °C y presión normal es:

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{mRT}{MP} = \frac{25 \text{ g} \cdot 0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 293 \text{ K}}{18 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 1 \text{ atm}} = 33,369 \text{ L}$$

mientras que en estado líquido y a esa misma temperatura el volumen que ocupa es:

$$25 \text{ g} \cdot \frac{1 \text{ cm}^3}{1 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ L}}{10^3 \text{ cm}^3} = 0,025 \text{ L}$$

Por lo tanto, al evaporarse el agua a 20°C, experimenta un aumento de volumen de:

$$\Delta V = 33,369 \text{ L} - 0,025 \text{ L} = 33,344 \text{ L}$$

Hallemos, ahora, la cantidad de calor y el trabajo realizado al evaporarse el agua:

$$Q = 25 \text{ g} \cdot 580 \frac{\text{cal}}{\text{g}} = 14\,500 \text{ cal}$$

$$W = p \cdot \Delta V = 1 \text{ atm} \cdot \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}} \cdot 33,344 \text{ L} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^3 \text{ L}} =$$

$$= 3\,377 \text{ J} = 3\,377 \text{ J} \cdot \frac{0,24 \text{ cal}}{1 \text{ J}} = 810 \text{ cal}$$

Aplicando el primer principio de la Termodinámica resulta:

$$\Delta U = Q - W = 14\,500 \text{ cal} - 810 \text{ cal} = \boxed{13\,690 \text{ cal}}$$

## Pág. 161

1. De acuerdo con el primer principio de la Termodinámica, existe dicha posibilidad, ya que la energía calorífica puede convertirse en trabajo. Sin embargo, esta posibilidad queda eliminada al aplicar el segundo principio, que exige la existencia de dos focos a distinta temperatura.

2. Los sistemas evolucionan espontáneamente hacia estados de mayor entropía y, por consiguiente, de mayor desorden. De ahí esa expresión.

Lo que sucede es que, por extensión, se ha aplicado esa frase a fenómenos de tipo social, político, religioso, etc., que están fuera del alcance de la Termodinámica.

## Pág. 162

1. El rendimiento de una máquina de Carnot viene dado por:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Si aumentamos $T_1$ manteniendo constante $T_2$:

$$\eta_1 = \frac{T_1 + t - T_2}{T_1 + t}$$

mientras que si disminuimos $T_2$ manteniendo constante $T_1$:

$$\eta_2 = \frac{T_1 - T_2 + t}{T_1}$$

Al comparar las expresiones de $\eta_1$ y $\eta_2$ vemos que los numeradores son iguales. Por lo tanto, será mayor aquella fracción que tenga menor denominador, concretamente $\eta_2$.

En consecuencia:

**La mejor manera de aumentar el rendimiento de una máquina de Carnot consiste en disminuir $T_2$ manteniendo $T_1$ constante.**

2. Como: $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, sustituyendo, tenemos:

$$\frac{100 \text{ cal} - 80 \text{ cal}}{100 \text{ cal}} = \frac{400 \text{ K} - T_2}{400 \text{ K}}$$

de donde resulta: $\boxed{T_2 = 320 \text{ K} = 47\ °C}$

3. El rendimiento viene dado por: $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$

Las temperaturas absolutas de ambos focos son:

$$T_1 = 200\ °C = 473\ K \ ; \ T_2 = 50\ °C = 323\ K$$

Por tanto:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{473\ K - 323\ K}{473\ K} = 0{,}317 = \boxed{31{,}7\ \%}$$

Para que el rendimiento sea del 50 %: $0{,}5 = \frac{T_1 - 323\ K}{T_1}$, de donde:

$$\boxed{T_1 = 646\ K = 373\ °C}$$

## SOLUCIONES a las Actividades de Síntesis

1. El alumnado debe explicar estas diferencias mediante ejemplos que le sean conocidos. Véase a este respecto la respuesta a la actividad 2.

2. Efectivamente, puesto que el calor es la energía total del cuerpo, debida fundamentalmente al movimiento de sus moléculas. Por tanto, depende de la energía media de cada molécula (temperatura) y del número de moléculas que tenga el cuerpo (y, por tanto de su masa).

   Por consiguiente, un cuerpo frío (por ejemplo, el mar) puede tener mucha energía térmica (dada su enorme masa), del mismo modo que un depósito puede contener gran cantidad de agua y, sin embargo, alcanzar un nivel muy pequeño.

3. a) Calor en otra forma de energía:
   - Energía calorífica en energía mecánica: motor de explosión, máquina de vapor, turbina de vapor...
   - Energía calorífica en energía radiante: alumbrado de incandescencia.
   - Energía calorífica en mecánica y posteriormente en eléctrica: centrales térmicas.
   - Energía calorífica en energía eléctrica: efecto termoiónico.

   b) Estos mismos ejemplos, a la inversa, sirven para ilustrar la transformación de otras formas de energía en calor.

4. Como al volumen de 5 $dm^3$ de agua, a 4 °C, corresponde una masa de 5 kg, resulta:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = 5\ kg \cdot 1\frac{kcal}{kg \cdot °C} \cdot 25\ °C = \boxed{125\ kcal}$$

5. Se calentará más el aluminio por ser de menos calor específico. Véase el razonamiento seguido en la respuesta a la actividad 2 de la página 146.

6. Calculemos, en primer lugar, la cantidad de calor $Q_r$, necesaria para calentar el recipiente. Considerando el caso del agua, tenemos:

$$18\,000\ cal = Q_r + 320\ g \cdot 1\frac{cal}{g \cdot °C} \cdot (60 - 10)\ °C$$

de donde: $Q_r = 2\,000\ cal$

Aplicando a la glicerina la ecuación fundamental de la Calorimetría:

$$11\,280\ cal = 2\,000\ cal + 320\ g \cdot c_{glicerina} \cdot (60 - 10)\ °C$$

resultando: $\boxed{c_{glicerina} = 0{,}58\ cal/(g \cdot °C)}$

Haciendo lo mismo para el cloroformo:

$$5\,740\ cal = 2\,000\ cal + 320\ g \cdot c_{cloroformo} \cdot (60 - 10)\ °C$$

de donde se obtiene: $\boxed{c_{cloroformo} = 0{,}234\ cal/(g \cdot °C)}$

7. La temperatura de 298 K, expresada en grados Celsius es:

$$C = T - 273 = 298 - 273 = \boxed{25\ °C}$$

Para expresar esta temperatura en grados Fahrenheit emplearemos la relación:

$$\frac{C}{5} = \frac{F - 32}{9}$$

Sustituyendo, tenemos: $\frac{25}{5} = \frac{F - 32}{9}$

de donde: $\boxed{F = 77\ °F}$

Si el calor específico de una sustancia es 1 cal/(g · °C), se trata del $\boxed{\text{agua}}$.

La cantidad de calor que será preciso comunicar a m gramos de agua para elevar su temperatura 10 °C es:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = m_{(g)} \cdot 1\frac{cal}{g \cdot °C} \cdot 10\ °C = \boxed{10\ m\ \text{calorías}}$$

8. La temperatura de 59 °F equivale a 15 °C. Por consiguiente, la cantidad de calor necesario será:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = 250\ g \cdot 0{,}2\frac{cal}{g \cdot °C} \cdot (15 - 5)\ °C = \boxed{500\ cal}$$

9. Al agitarse el agua del mar las moléculas que lo constituyen aumentan su energía. De esta forma el sistema posee más calor y, consecuentemente, más temperatura.

10. La energía cinética del coche es:

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1\,000\ kg \cdot (30\ m/s)^2 = 450\,000\ J$$

Esta energía equivale a una cantidad de calor:

$$Q = 450\,000\ J \cdot \frac{0{,}24\ cal}{1\ J} = 108\,000\ cal = \boxed{108\ kcal}$$

La elevación de temperatura que experimenta 1 $m^3$ de agua, equivalente a una masa de $10^6$ g, con esta cantidad de calor será:

$$\Delta t = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{108\,000\ cal}{10^6\ g \cdot 1\frac{cal}{g \cdot °C}} = \boxed{0{,}108\ °C}$$

**11.** Consideramos m kg de agua que caen desde una altura de 213 metros y que, por consiguiente, pierden una energía potencial:

$$E_P = W = mgh = m\,(\text{kg}) \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 213\ \text{m} = 2\,087{,}4 \cdot m\ (\text{J})$$

Esta energía corresponde a una cantidad de calor de:

$$Q = m\,(\text{kg}) \cdot \frac{1\,000\ \text{g}}{1\ \text{kg}} \cdot 1\,\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot {}^\circ\text{C}} \cdot 0{,}50\ {}^\circ\text{C} = 500 \cdot m\ (\text{cal})$$

Por lo tanto, el equivalente mecánico del calor valdrá:

$$J = \frac{W}{Q} = \frac{2\,087{,}4 \cdot m\ (\text{J})}{500 \cdot m\ (\text{cal})} = \boxed{4{,}17\ \text{J/cal}}$$

**12.** Supongamos una gota de agua de masa m (kg). Su energía cinética, al llegar al suelo, es:

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot m\,(\text{kg}) \cdot (15\ \text{m/s})^2 = 112{,}5 \cdot m\ (\text{J})$$

Esta energía, convertida en calor, equivale a:

$$Q = 112{,}5 \cdot m\ (\text{J}) \cdot \frac{0{,}24\ \text{cal}}{1\ \text{J}} = 27 \cdot m\ (\text{cal})$$

que provocarán un aumento de temperatura de:

$$\Delta t = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{27 \cdot m\ (\text{cal})}{m\,(\text{kg}) \cdot \frac{1000\ \text{g}}{1\ \text{kg}} \cdot 1\,\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot {}^\circ\text{C}}} = \boxed{0{,}027\ {}^\circ\text{C}}$$

**13.** La frase bíblica citada es, en realidad, una forma de enunciar el segundo principio de la Termodinámica, ya que se trata de una transformación calor-trabajo.

**14.** Sí; pero no de una forma espontánea, sino **provocada**, de manera que la entropía del agente exterior causante de la transformación aumente en una proporción superior a la disminución de dicha magnitud en la transformación considerada.

**15.** El calor producido en el interior del motor es:

$$Q = 1\ \text{kg} \cdot \frac{500\ \text{kcal}}{1\ \text{kg}} \cdot \frac{1000\ \text{cal}}{1\ \text{kcal}} \cdot \frac{4{,}18\ \text{J}}{1\ \text{cal}} = 2{,}09 \cdot 10^6\ \text{J}$$

y el trabajo producido:

$$W = \Delta E_{pg} = m \cdot g \cdot h =$$
$$= 4\,000\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 40\ \text{m} = 1{,}568 \cdot 10^6\ \text{J}$$

Por lo tanto, el porcentaje de calor que se transforma en trabajo será:

$$\frac{1{,}568 \cdot 10^6\ \text{J}}{2{,}09 \cdot 10^6\ \text{J}} \cdot 100 = \boxed{75\ \%}$$

**16.** Hemos de tener presente que la masa, cuando se trate de ejercicios de Mecánica, debe expresarse en kilogramos (si se opera en el Sistema Internacional), mientras que en ejercicios de Calorimetría ha de venir dada en gramos (recordar la definición de caloría).

La energía potencial de m(kg) de agua situados a 100 m de altura es:

$$m \cdot g \cdot h = m\,(\text{kg}) \cdot 10\ \text{m/s}^2 \cdot 100\ \text{m} =$$
$$= 1\,000 \cdot m\ (\text{J}) = 240 \cdot \text{m}\ (\text{cal})$$

Este calor (240 ·m calorías) se suministra a los 1 000 ·m gramos de agua. Aplicando la ecuación fundamental de la Calorimetría: $Q = m \cdot c \cdot \Delta t$ tenemos:

$$\Delta t = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{240 \cdot m\ (\text{cal})}{1000 \cdot m\ (\text{g}) \cdot 1\,\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot {}^\circ\text{C}}} = \boxed{0{,}24\ {}^\circ\text{C}}$$

**17.** $$W = 0{,}5\ \text{kg gasolina} \cdot \frac{10^3\ \text{g}}{1\ \text{kg}} \cdot \frac{10^4\ \text{cal}}{1\ \text{g gasolina}} \cdot \frac{4{,}1855\ \text{J}}{1\ \text{cal}} \cdot \frac{30\ \text{J aprovechados}}{100\ \text{J consumidos}} = \boxed{6{,}28 \cdot 10^6\ \text{J}}$$

**18.** $$W = 100\ \text{kg carbón} \cdot \frac{9\,000\ \text{kcal}}{1\ \text{kg carbón}} \cdot \frac{1000\ \text{cal}}{1\ \text{kcal}} \cdot \frac{40\ \text{cal aprovechadas}}{100\ \text{cal producidas}} \cdot \frac{4{,}1855\ \text{J}}{1\ \text{cal}} = \boxed{1{,}5 \cdot 10^9\ \text{J}}$$

**19.** a) La energía que utilizó el motor para incrementar la energía cinética del coche es:

$$W = E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 =$$
$$= \frac{1}{2} \cdot 1\,000\ \text{kg} \cdot (10\ \text{m/s})^2 = 5 \cdot 10^4\ \text{J} = \boxed{1{,}2 \cdot 10^4\ \text{cal}}$$

b) Como el automóvil aprovecha el 20 % de la energía producida en la combustión de la gasolina, esta energía será:

$$W = 1{,}2 \cdot 10^4\ \text{cal aprovechadas} \cdot \frac{100\ \text{cal producidas}}{20\ \text{cal aprovechadas}} =$$
$$= \boxed{6 \cdot 10^4\ \text{cal}}$$

c) La cantidad de gasolina gastada es:

$$m = 6 \cdot 10^4\ \text{cal} \cdot \frac{1\ \text{g gasolina}}{10^4\ \text{cal}} = \boxed{\text{6 gramos de gasolina}}$$

**20.** La energía mecánica procedente del azúcar consumido por el alpinista es:

$$E = 938\ \text{kcal} \cdot \frac{1\,000\ \text{cal}}{1\ \text{kcal}} \cdot \frac{15\ \text{cal aprovechadas}}{100\ \text{cal producidas}} \cdot \frac{4{,}1855\ \text{J}}{1\ \text{cal}} =$$
$$= 588\,900\ \text{J}$$

Con esta energía el alpinista podrá subir una altura:

$$h = \frac{E}{m \cdot g} = \frac{588\,900\ \text{J}}{60{,}234\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2} = 997{,}64\ \text{m} \approx \boxed{1000\ \text{m}}$$

**21.** En cada uno de los casos la variación de energía potencial que experimenta el agua es:

$$\Delta E_{pg} = m \cdot g \cdot h\ (\text{J})$$

que corresponde a una cantidad de calor de $Q = 0{,}24 \cdot m \cdot g \cdot h$ (cal). Si esta cantidad de calor se emplea en calentar el agua, el aumento de temperatura que ésta experimenta es:

$$\Delta t = \frac{0{,}24 \cdot m \cdot g \cdot h\ (\text{cal})}{1\,000 \cdot \text{m}\ (\text{g}) \cdot 1\,\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot {}^\circ\text{C}}} = \frac{0{,}24 \cdot g \cdot h}{1\,000}\ ({}^\circ\text{C})$$

(Recuérdese que en las fórmulas de la Mecánica la masa se expresa en kilogramos, mientras que en las de la Calorimetría la masa viene dada en gramos).

Para las cataratas del Niágara:

$$\Delta t = \frac{0{,}24 \cdot 10 \cdot 50}{1000} = \boxed{0{,}12\ °C}$$

y para las de Yosemite:

$$\Delta t = \frac{0{,}24 \cdot 10 \cdot 736}{1000} = \boxed{1{,}77\ °C}$$

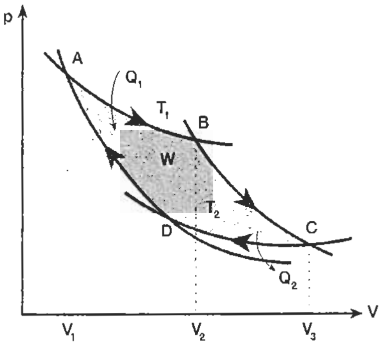
**22.** a) *Proceso isotermo*. Se realiza a temperatura constante.

b) *Proceso isocoro*. Se verifica a volumen constante.

c) *Proceso isobaro*. Se lleva a cabo a presión constante.

d) *Proceso adiabático*. Se realiza sin intercambio de calor con el exterior.

**23.** El ciclo de Carnot es un proceso cíclico simple compuesto por dos transformaciones isotermas y otras dos adiabáticas y que tiene lugar reversiblemente, describiendo el sistema la curva cerrada que aparece representada en el diagrama p-V de la figura.




El sistema puede ser sólido, líquido o gas –ideal o no–, y puede cambiar de fase durante el ciclo. Supongamos que se trate de un gas ideal y analicemos las cuatro transformaciones que experimenta:

- El gas, inicialmente a la temperatura $T_1$ correspondiente al foco caliente (punto A), se expansiona isotérmicamente desde el volumen $V_1$ al $V_2$, recorriendo la isoterma AB, absorbiendo el calor $Q_1$ y realizando un trabajo contra el exterior.
- El gas se expansiona adiabáticamente desde el volumen $V_2$ al $V_3$ (B $\rightarrow$ C), produciendo trabajo, a la vez que su temperatura disminuye de $T_1$ a $T_2$.
- El gas se comprime isotérmicamente a la temperatura $T_2$ del refrigerante, cediendo a éste una cantidad de calor $Q_2$ y experimentando la acción de un trabajo exterior. En este proceso el gas sigue la isoterma CD.
- Tiene lugar una compresión adiabática desde D a A, recuperando el gas su volumen primitivo $V_1$ y pasando su temperatura de $T_2$ a $T_1$.

El trabajo neto que realiza el sistema durante todo el ciclo viene representado por el área rayada de la figura, siendo el balance calorífico $Q_1 - Q_2$, pero como coinciden los estados inicial y final, $\Delta U = 0$, por lo que, de acuerdo con el primer principio, $W = |Q_1 - Q_2|$, y el rendimiento del ciclo valdrá:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

siendo tanto mayor cuanto más pequeña sea la relación $Q_2/Q_1$

Ahora bien, la entropía del sistema, por ser una función de estado, ha de ser la misma al comienzo y al final del ciclo, siendo nula su variación en las dos transformaciones adiabáticas, mientras que en las isotermas las variaciones respectivas serán: $Q_1/T_1$ y $- Q_2/T_2$. Por tanto:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0\ ;\ \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

pudiendo expresarse el rendimiento del ciclo de Carnot en la forma:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

**El rendimiento de un ciclo de Carnot, que es el máximo posible, depende exclusivamente de las temperaturas absolutas de los dos focos caloríficos, siendo independiente de la naturaleza del sistema.**

Por otra parte, aplicando el segundo principio, se puede demostrar la imposibilidad de construir ninguna máquina que, operando entre dos temperaturas determinadas, posea un rendimiento superior a la de una reversible de Carnot que trabaje entre las mismas temperaturas.

**24.** En el primer caso:

$$T_1 = 227\ °C = 500\ K\ \ ;\ \ T_2 = 27\ °C = 300\ K$$

$$\eta_1 = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{500\ K - 300\ K}{500\ K} = 0{,}4 = \boxed{40\ \%}$$

y en el segundo:

$$T_1 = 327\ °C = 600\ K\ \ ;\ \ T_2 = 27\ °C = 300\ K$$

$$\eta_2 = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{600\ K - 300\ K}{600\ K} = 0{,}5 = \boxed{50\ \%}$$

**25.** a) Como $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ y $T_2 = 7\ °C = 280\ K$

sustituyendo, tenemos: $0{,}4 = \frac{T_1 - 280\ K}{T_1}$

de donde:

$$\boxed{T_1 = 466{,}7\ K = 193{,}7\ °C}$$

b) Llamemos $\Delta t$ al aumento de temperatura pedido. Como $\eta = 0{,}5$, resulta:

$$0{,}5 = \frac{(466{,}7 + \Delta t)\,K - 280\ K}{(466{,}7 + \Delta t)\,K}$$

de donde se obtiene: $\boxed{\Delta t = 93{,}3\ °C}$

**26.** Ya que la eficiencia de una máquina frigorífica viene dada por:

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

sustituyendo, tenemos:

$$\varepsilon = \frac{273\ K}{288\ K - 273\ K} = \boxed{18{,}2}$$

**27.** Aplicando la fórmula del rendimiento en los dos casos del problema, tenemos:

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}2 = \dfrac{T_1 - T_2}{T_1} \\ 0{,}4 = \dfrac{T_1 - (T_2 - 73)}{T_1} \end{array}\right\}$$

La resolución de este sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas conduce a:

$$\boxed{\mathbf{T_1 = 365\ K\ ;\ T_2 = 292\ K}}$$

**28.** Las temperaturas absolutas de los dos focos son:

$$T_1 = 327\ °C = 600\ K \quad ; \quad T_2 = 27\ °C = 300\ K$$

El rendimiento de la máquina valdrá:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{600\ K - 300\ K}{600\ K} = 0{,}5 = \boxed{\mathbf{50\ \%}}$$

Calculemos, ahora, las cantidades de calor absorbido y cedido. Como:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad y \quad Q_1 - Q_2 = 7\,000\ cal$$

resulta:

$$Q_1 = \frac{7\,000\ cal}{\eta} = \frac{7\,000\ cal}{0{,}5} = \boxed{\mathbf{14\,000\ cal}}$$

$$Q_2 = Q_1 - 7\,000\ cal = 14\,000\ cal - 7\,000\ cal = \boxed{\mathbf{7\,000\ cal}}$$

**29.** a) Todos aquellos procesos en que exista rozamiento.

b) La mezcla de agua fría y caliente.

c) La deformación inelástica de una varilla.

d) El paso de una corriente eléctrica a través de una resistencia.

e) La disolución de una sal en agua.

f) Las reacciones químicas espontáneas, etc.

**30.** El rendimiento de una máquina reversible viene dado por:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

Como en este caso $Q_1 = 150$ cal, sustituyendo resulta:

$$0{,}3 = \frac{150\ cal - Q_2}{150\ cal}$$

de donde: $\boxed{\mathbf{Q_2 = 105\ cal}}$

El trabajo que produce la máquina valdrá:

$$W = Q_1 - Q_2 = 150\ cal - 105\ cal = 45\ cal =$$
$$= 45\ cal \cdot \frac{4{,}1855\ J}{1\ cal} = \boxed{\mathbf{188{,}3\ J}}$$