



## TEMA 6: TERMODINÁMICA. MÁQUINA TÉRMICA Y MÁQUINA FRIGORÍFICA

La **termodinámica** es la parte de la física que se ocupa de las relaciones existentes entre el calor y el trabajo.

El calor es una forma de energía, y al suministrar calor a ciertos dispositivos, estos lo transforman en trabajo mecánico útil, y en pérdidas por calor.

Una **máquina térmica** es un dispositivo capaz de aprovechar el calor que recibe para producir trabajo útil. El calor que recibe (que se puede obtener de una reacción química, combustión), lo absorbe un sistema, normalmente un fluido (agua, aire, gasolina,...), que irá transformando parte de esa energía térmica en energía mecánica. El fluido realiza una serie de transformaciones termodinámicas, y en ellas se puede calcular el trabajo y también el rendimiento de la máquina.

La termodinámica estudia los procesos de transformación de trabajo en calor y viceversa.



Cuando un cuerpo absorbe energía en forma de calor, se dilata aumentando de volumen (realiza un trabajo) y aumenta su energía interna que se manifiesta en aumento de temperatura.

Cuando hay **aumento de volumen**, el trabajo se considera **positivo**, y cuando **disminuye el volumen**, el trabajo es **negativo**.

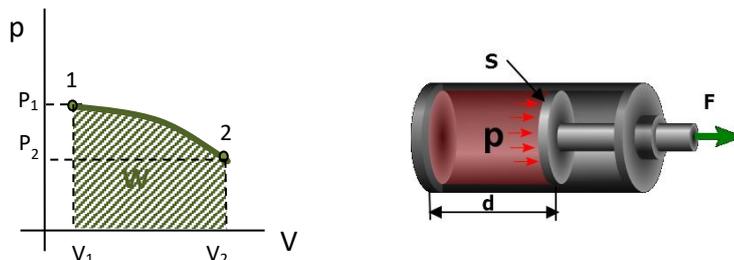
### 1.- Transformación de un sistema termodinámico

En todo proceso, el trabajo realizado por un fluido, no depende sólo del trabajo inicial y final, sino que también depende del camino seguido

Para estudiar los ciclos termodinámicos que describen los fluidos en el interior de una máquina térmica, se parte de las transformaciones básicas representadas en un **diagrama presión – volumen p-V**.

Como ejemplo podemos imaginar el gas encerrado en un cilindro (aire, CO<sub>2</sub>, mezcla aire-combustible, et.)

El trabajo es el área encerrada entre nuestra curva termodinámica y el eje de abscisas



#### Magnitudes básicas:

- **Ecuación de estado de un gas ideal**  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$

$$\frac{pV}{T} = \text{cte}$$

- **Trabajo realizado**  $W = F \cdot d = p \cdot S \cdot d = \int_1^2 p \cdot dV$

- **Calor absorbido**  $Q$

- **Primer principio de la termodinámica:** Una máquina térmica transforma una parte del calor recibido en trabajo y el resto lo destina a modificar su energía interna.

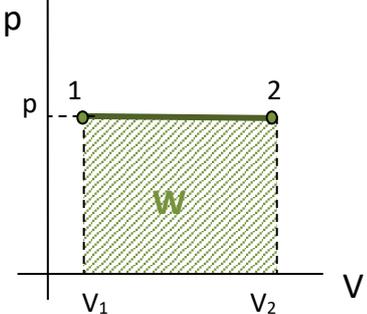
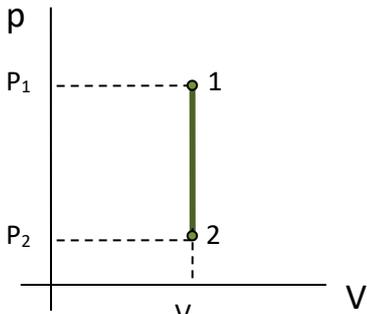
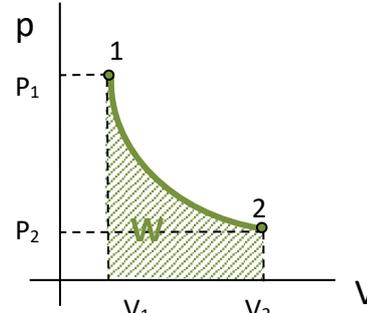
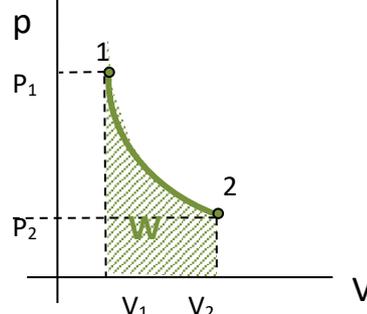
$$\Delta Q = W + \Delta U$$

donde  $\Delta U$  es la variación de energía interna,  $\Delta Q$  es el calor agregado al sistema y  $W$  el trabajo realizado por el sistema.

**Segundo principio de la termodinámica:**

- **Enunciado de Kelvin-Planck:** No es posible ninguna transformación cíclica que transforme íntegramente el calor absorbido en trabajo.
- **Enunciado de Clausius:** Es imposible transferir calor desde un foco frío a un foco caliente sin un aporte externo de energía

**Tipos de transformaciones termodinámicas:**

<p>► <b>Transformación isobárica:</b> <b>p = constante</b></p>  <p><math>\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}</math></p> <p><b><math>W = p \cdot (V_2 - V_1)</math></b></p>	<p>► <b>Transformación isocórica:</b> <b>V = constante</b></p>  <p><math>\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}</math></p> <p><b><math>W = p \cdot \Delta V = 0</math></b></p>
<p>► <b>Transformación isoterma:</b> <b>T = constante</b></p>  <p><b><math>p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2</math></b></p> <p><b><math>W = \int_1^2 p \cdot dV = n \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}</math></b></p>	<p>► <b>Transformación adiabática:</b> <b>Q = constante, no existe intercambio de calor con el exterior</b></p>  <p><b><math>p \cdot V^\gamma = \text{cte}</math></b></p> <p><math>\gamma = \text{Índice adiabático de un gas ideal}</math></p> <p><b><math>W = \frac{p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1}{1 - \gamma}</math></b></p>

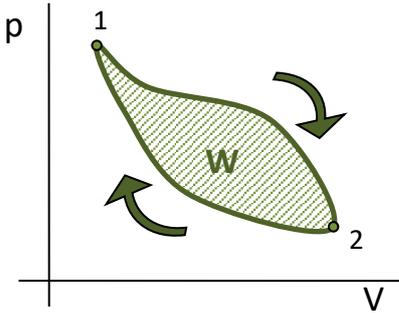
**2.- Transformaciones cíclicas:**

En las máquinas térmicas los sistemas evolucionan de forma que partiendo de un estado inicial, vuelven a él, mediante transformaciones cerradas. El punto de inicio y fin, tiene las mismas condiciones de presión, volumen y temperatura.

En un ciclo, la variación de energía interna es, pues, nula  $\Delta U = 0$

$$\Delta Q = W + \Delta U \quad \Delta Q = W$$

$W = Q_2 - Q_1$



En la transformación  $1 \rightarrow 2$  el trabajo  $W$  es positivo.

En la transformación  $2 \rightarrow 1$  el trabajo  $W$  es negativo.

El trabajo en una máquina térmica es **positivo** cuando el ciclo se realiza en el **sentido de las agujas del reloj**, el sistema recibe calor y realiza un trabajo de expansión (motor térmico). Y el trabajo es **negativo** cuando se realiza en **sentido antihorario**, el sistema cede calor al exterior y se realiza un trabajo de compresión (máquina frigorífica).

El trabajo neto resultante de un ciclo completo será:  $W_{TOTAL} = W_{12} + W_{21}$  (cada uno con su signo), que corresponde al trabajo encerrado en la curva.

### 3.- Máquina térmica:

Es un conjunto de elementos que permite obtener un trabajo mecánico útil a partir de un desnivel térmico natural o artificial; o bien, que, a partir de un trabajo externo, permite obtener un desnivel térmico entre dos focos. Estas dos formas de trabajar nos clasifican las máquinas térmicas:

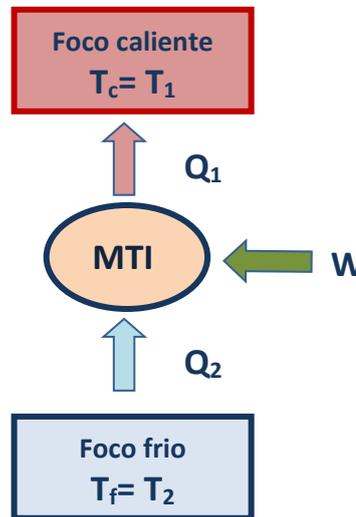
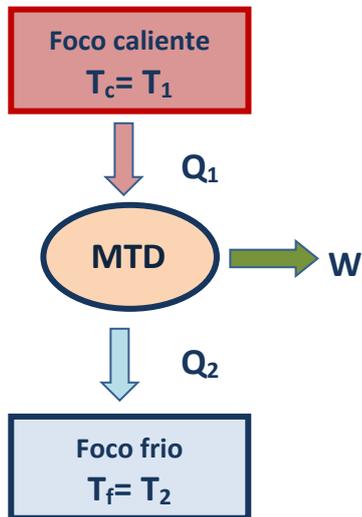
- ▶ **Máquina térmica directa: Motores térmicos**  $\Delta Q \xrightarrow{\eta} W$

Una máquina térmica es un dispositivo que, operando de forma cíclica, toma de calor de un foco caliente, realiza un trabajo útil y entrega calor de desecho a un foco frío, normalmente el ambiente.

Este proceso tiene un rendimiento

- ▶ **Máquina térmica inversa:** Máquina frigorífica y bomba de calor  $W \xrightarrow{\epsilon} \Delta Q$

Reciben un trabajo para pasar calor desde un foco frío a otro caliente. El trabajo lo suele proporcionar un compresor. Este proceso tiene un rendimiento o eficiencia



#### MTD: máquina térmica directa.

Ej: **motor térmico** de combustión interna alternativo: se inyecta una mezcla de aire/combustible en el interior de los cilindros donde se producirá la combustión. El calor  $Q_1$  se transforma en trabajo mecánico útil  $W$  y en pérdidas en forma de calor  $Q_2$ .

$$Q_2 = W + Q_1 \quad \boxed{W = Q_2 - Q_1}$$

#### MTI: máquina térmica inversa.

Ej: **máquina frigorífica**: se extraen calorías del foco frío  $Q_2$  (medio a refrigerar) y lo transfieren al foco caliente  $Q_1$ , consumiendo un trabajo  $W$ .

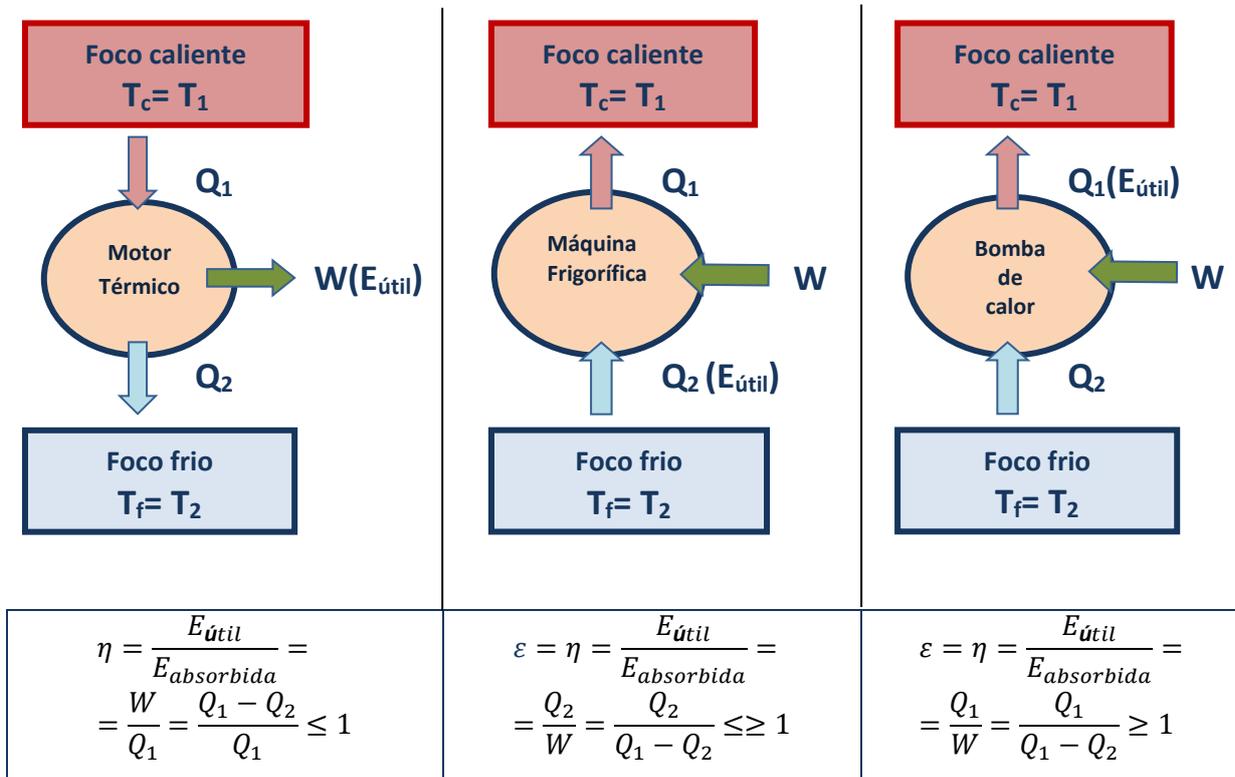
$$Q_2 + (-W) = Q_1 \quad \boxed{W = Q_2 - Q_1}$$



**Cálculo de la eficiencia o rendimiento:**

El **rendimiento** en cualquier máquina es la relación entre el trabajo que sale (trabajo o energía útil) y el que entra (energía suministrada o absorbida), o como la relación entre la potencia que sale y la que entra.

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{absorbida}}}$$



En las máquinas térmicas inversas el rendimiento puede ser mayor del 100%, por eso hablamos de **eficiencia** y no de rendimiento. Esto es posible debido a que el calor transmitido al foco caliente es la suma del calor extraído del foco frío más el trabajo o potencia aportado por el compresor, que se transmite al fluido.

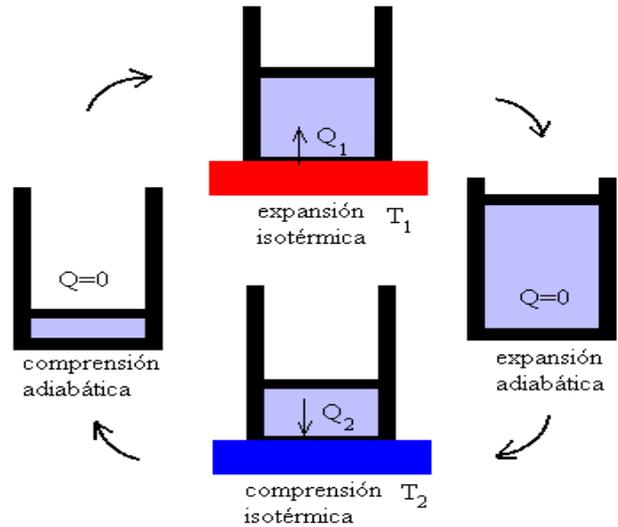
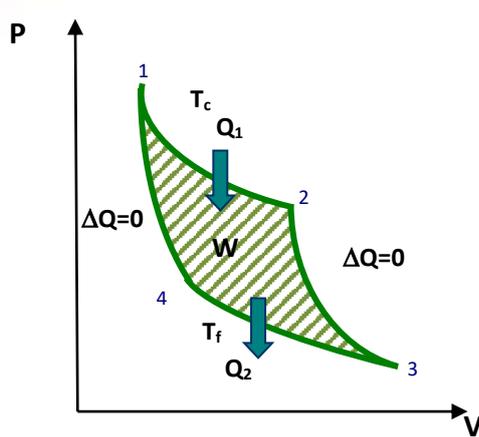
El calor puede medirse en Julios o en calorías. Se llama frigoría a una caloría extraída del sistema.

**4.- Ciclo de Carnot:**

Carnot, en 1824, estableció el ciclo termodinámico ideal de una máquina térmica, de la que se podría obtener el máximo rendimiento teórico.

Este ciclo se conoce con el nombre de "Ciclo de Carnot" y es un ciclo reversible formado por dos transformaciones isotérmicas y otras dos adiabáticas. Es un ciclo teórico e ideal que no puede realizar ninguna máquina térmica.

Un ciclo reversible es aquel que puede realizarse en sentido horario y antihorario, y además la inversión se puede realizar en cualquier punto



- 1 → 2: **expansión isotérmica.** El fluido absorbe un calor  $Q_1$  desde el foco caliente ( $T_c$ ) manteniéndose a esa temperatura y realiza un trabajo, aumentando de volumen.  
Al no haber variación de temperatura,  $\Delta U = 0$
- 2 → 3: **expansión adiabática:** El fluido realiza trabajo, aumentando de volumen, a expensas de su energía interna y disminuyendo su temperatura desde  $T_c$  hasta  $T_f$ .  $Q = 0$
- 3 → 4: **compresión isotérmica:** El fluido cede un calor  $Q_2$  al foco frío ( $T_f$ ) sin variar de temperatura y recibe un trabajo, disminuyendo de volumen.  
Al no haber variación de temperatura,  $\Delta U = 0$
- 4 → 1: **compresión adiabática:** El fluido recibe trabajo, disminuyendo de volumen, por lo que aumenta su energía interna y su temperatura desde  $T_f$  hasta  $T_c$ , cerrando el ciclo.  $Q = 0$

**Cálculo de la eficiencia o rendimiento de una máquina con ciclo de Carnot:**

Cuando la máquina sigue un ciclo de Carnot el cálculo de la eficiencia o rendimiento también puede realizarse con los datos de la temperatura en grados Kelvin. ( 1 K = 273°C)

- ▶ **MT (motor térmico)**  $\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$
- ▶ **MF (máquina frigorífica)**  $\varepsilon = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$
- ▶ **BC (bomba de calor)**  $\varepsilon = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$

En las máquinas reales el cálculo se realiza con el ciclo de Carnot y luego se aplica un coeficiente.

Para obtener un alto rendimiento, interesa que la temperatura del foco caliente sea lo mayor posible y que la temperatura del foco frío sea lo menor posible.

Para un frigorífico que mantiene los productos a 5°C en una habitación a 22°C la eficiencia es 16.3. Un frigorífico real posee una eficiencia en torno a 4 (un 25% de la del ciclo de carnot)

Una bomba de calor que mantiene una habitación a 22°C mientras el exterior está a 5°C tiene una eficiencia de 17.4. Una bomba de calor real tiene una eficiencia entre el 2 y el 7.



## 5.- Cálculo de la potencia de una máquina:

La potencia en cualquier máquina se puede calcular como la energía consumida o el trabajo realizado por la máquina en un intervalo de tiempo

$$P_{\text{útil}} = \frac{E_u}{t}$$

$$P_{\text{absorbida}} = \frac{E_a}{t}$$

**P** en el S.I. se mide en **Vatio (1 W)**

Otra unidad de medida es el **caballo de vapor CV (1 CV = 735 W)**



## EJERCICIOS TEMA 6: TERMODINÁMICA. MÁQUINAS TÉRMICAS

### Ejercicio 1

Un motor térmico de 120 CV consume 250.000 Kcal/h. Calcula el rendimiento del motor y el calor suministrado al foco frío.

#### Solución:

**DATOS:**  $P_u = 120 \text{ CV} \cdot 735 \text{ W/CV} = 88200 \text{ W}$   $P_{ab} = 250000 \text{ Kcal/h}$

El trabajo realizado en una hora será:  $W_u = P_u \cdot t = 88200 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 317520000 \text{ J}$

El calor absorbido en una hora será  $Q = P_{ab} \cdot t = 250000 \text{ Kcal/h} \cdot 1 \text{ h} = 250000 \text{ Kcal} \cdot 4,18 \text{ J/cal}$   
 $= 1045000000 \text{ KJ}$

El rendimiento será la relación entre el trabajo realizado y el calor absorbido

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{W}{Q_1} = \frac{317520000}{1045000000} = 0,30$$

**Resultado = 30 %**

### Ejercicio 2

Una máquina térmica que sigue un ciclo de Carnot toma 1100 Kcal del foco caliente a 380°C y cede 500 Kcal al foco frío. Calcula:

- Rendimiento de la máquina
- Temperatura del foco frío

#### Solución:

**DATOS:**  $Q_1 = 1100 \text{ kcal}$   $T_1 = 380^\circ \text{C} = 653 \text{ K}$   $Q_2 = 500 \text{ kcal}$

a)

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{1100 - 500}{1100} = 0,545$$

**Resultado = 54,5 %**

- b) Como el funcionamiento de la máquina térmica sigue un ciclo de Carnot se puede aplicar la siguiente fórmula para calcular el rendimiento o eficiencia:

Las temperaturas deben ir en grados Kelvin  $T_1 = 380^\circ \text{C} + 273 = 653^\circ \text{K}$

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad 0,545 = \frac{653 - T_2}{653} \quad T_2 = 297^\circ \text{K} = 24^\circ \text{C}$$

**Resultado = 24 °C**



### Ejercicio 3

Un motor térmico que describe el ciclo ideal de Carnot presenta un rendimiento del 45% cuando la temperatura ambiente es de 10°C. Calcula:

- Temperatura del foco caliente
- ¿En cuántos grados se tendría que aumentar la temperatura del foco caliente para alcanzar un rendimiento del 60%?

#### Solución:

a) Resultado  $T_1 = 410,35 \text{ K} = 137,35 \text{ °C}$

b) Resultado  $T_1 = 452,8 \text{ K} = 179,8 \text{ °C}$

### Ejercicio 4

Una máquina funciona con un rendimiento del 40% del ciclo reversible de Carnot entre dos focos a -3 °C y 22 °C y recibe desde el exterior una energía de 7000 KJ. Calcula:

- Eficiencia de la máquina cuando funciona como máquina frigorífica
- Eficiencia de la máquina cuando funciona como bomba de calor
- Energía térmica entregada al foco caliente
- Energía térmica absorbida desde el foco frío

#### Solución:

**DATOS:**  $T_1 = 22 \text{ °C} = 295 \text{ K}$      $T_2 = -3 \text{ °C} = 270 \text{ K}$      $W = 7000 \text{ kJ}$

Aplicamos la fórmula con los datos de temperatura según el ciclo de Carnot y luego le aplicamos el 40%

a) Máquina frigorífica

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{270}{295 - 270} = 10,8$$

$$10,8 * 0,40 = 4,32$$

**Resultado = 432 %**

b) Bomba de calor

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{295}{295 - 270} = 11,8$$

$$11,8 * 0,40 = 4,72$$

**Resultado = 472 %**

c) Energía del foco caliente  $Q_1$

Vamos a utilizar la fórmula de bomba de calor

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{7000} = 4,72 \quad Q_1 = 33040 \text{ KJ}$$

**Resultado = 33040 KJ**

d) Energía del foco frío  $Q_2$

$$W = Q_1 - Q_2 \quad 7000 = 33040 - Q_2 \quad Q_2 = 26040 \text{ KJ}$$

**Resultado = 26040 KJ**



## Ejercicio 5

De acuerdo al segundo principio de la termodinámica:

- Explique el fundamento del funcionamiento de los motores térmicos
- Explique el fundamento del funcionamiento de las máquinas frigoríficas

## Ejercicio 6

Algunos productos hortofrutícolas pueden conservarse a una temperatura comprendida entre 6 y 12°C durante varios días hasta el momento de su consumo. Para conseguir que la temperatura de la cámara de un almacén sea constantemente 10°C se emplea una máquina térmica reversible que funciona con un rendimiento del 22% del Ciclo de Carnot. Considerando que la temperatura media en el exterior es de 5°C en invierno, y 25°C en verano, calcula:

- La eficiencia de la máquina térmica en la época de invierno, y en la de verano
- El calor retirado de la cámara o aportado a la misma en cada estación, si la potencia calorífica utilizada es de 3 kW

### Solución:

- a) - En **invierno** la máquina funciona como una **bomba de calor**. La temperatura del foco caliente será la del interior de la cámara 10°C = 283 K y la temperatura del foco frío será la del exterior de la cámara 5°C = 278 K

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{283}{283 - 278} = 56,6$$

$$56,6 * 0,22 = 12,45$$

**Eficiencia = 1245 %**

- En **verano** la máquina funciona como una **máquina frigorífica**. La temperatura del foco frío será la del interior de la cámara 10°C = 283 K y la temperatura del foco caliente será la del exterior de la cámara 25°C = 298 K

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{283}{298 - 283} = 18,87$$

$$18,87 * 0,22 = 4,15$$

**Eficiencia = 415 %**

- b) - En **invierno** el calor aportado por unidad de tiempo, para calentar la cámara será:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_1}{W} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_1/t}{P_{\text{absorbida}}}$$
$$12,45 = \frac{Q_1/t}{P_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_1/t}{3000} \quad Q_1/t = 37350 \text{ w} = 37350 \text{ J/s}$$

- En **verano** el calor retirado por unidad de tiempo, para enfriar la cámara será:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_2/t}{P_{\text{absorbida}}}$$
$$4,15 = \frac{Q_2/t}{P_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_2/t}{3000} \quad Q_2/t = 12450 \text{ w} = 12450 \text{ J/s}$$



## Ejercicio 7

Una máquina térmica funciona de acuerdo con un ciclo de Carnot perfecto entre las temperaturas  $T_1 = 256^\circ\text{C}$  y  $T_2 = 77^\circ\text{C}$ . Si el calor tomado del foco caliente es de 1350 J, determine:

- Rendimiento de la máquina.
- Calor aportado al foco frío.
- Trabajo realizado.
- Temperatura del foco frío si se desea conseguir un rendimiento del ciclo del 56%.

### Solución:

Vamos a suponer que se trata de una máquina térmica directa (motor térmico). Como el funcionamiento de la máquina térmica sigue un ciclo de Carnot se puede aplicar la siguiente fórmula, para calcular el rendimiento o eficiencia:

$$\text{► MT (motor térmico)} \quad \varepsilon = \eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

- a) La temperatura del foco caliente será  $256^\circ\text{C} = 529 \text{ K}$  y la temperatura del foco frío será  $77^\circ\text{C} = 350 \text{ K}$

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{529 - 350}{529} = 0,34 \quad \text{Rendimiento} = 34\%$$

- b) El calor tomado del foco caliente es de  $Q_1 = 1350 \text{ J}$  y el calor aportado al foco frío  $Q_2$  será:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad 0,34 = \frac{1350 - Q_2}{1350} \quad Q_2 = 891 \text{ J}$$

- c) El trabajo realizado  $W$  será:

$$W = Q_1 - Q_2 = 1350 - 891 = 459 \text{ J}$$

- d) Para conseguir un rendimiento del 56 %, manteniéndose la temperatura del foco caliente a  $256^\circ\text{C}$

$$\eta = 0,56 = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{529 - T_2}{529} \quad T_2 = 232,76 \text{ K} = -40,24^\circ\text{C}$$

## Ejercicio 8

Una máquina frigorífica de 1,5 kW de potencia mantiene una temperatura en su interior de  $1^\circ\text{C}$ , funcionando al 20% del Ciclo de Carnot. Considerando que el valor de la temperatura en el exterior de la máquina se mantiene constante en  $18^\circ\text{C}$ , calcule:

- El rendimiento de la máquina
- El calor eliminado por unidad de tiempo del interior del frigorífico
- El calor aportado por unidad de tiempo al exterior del frigorífico

### Solución:

- Resultado  $\varepsilon = 2,88 = 288 \%$
- Resultado  $Q_2 / t = 4,32 \text{ kW}$
- Resultado  $Q_1 / t = 5,82 \text{ kW}$