

TERMODINÁMICA

Máquinas térmicas y máquinas frigoríficas

Termodinámica: Estudia la transformación de trabajo en calor y viceversa: **Trabajo** \rightleftharpoons **Calor**

Al suministrar calor (forma de energía) a ciertos dispositivos, se transforma en trabajo mecánico útil, y en pérdidas por calor.

Máquina térmica: dispositivo capaz de aprovechar el calor que recibe para producir trabajo útil.

El calor que recibe (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, donde calcularemos el *trabajo* y el *rendimiento* de la máquina.

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.

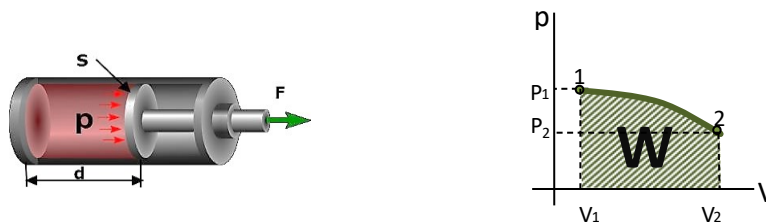
Cuando hay **aumento de volumen**, el trabajo se considera **positivo**, y cuando **disminuye el volumen**, el trabajo es **negativo**.

1.- Transformación de un sistema termodinámico

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, CO₂, mezcla aire-combustible, et.)

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



Magnitudes básicas:

- *Ecuaciones gases ideales:* $p \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow \frac{pV}{T} = Cte. \rightarrow$; ($R=8,314 \text{ J/mol.K}$, $0,08206 \text{ L.atm/mol.K}$)

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

- *Trabajo realizado* $W = F \cdot d = \text{Presión} \cdot \text{Sup} \cdot d = \text{Pres} \cdot \text{Vol} = \int_1^2 p \cdot dV$; *Calor absorbido:* Q

- *Primer principio de la termodinámica:* $\Delta Q = W + \Delta U$

Una máquina térmica transforma el calor recibido en trabajo y el resto modifica su energía interna ΔU

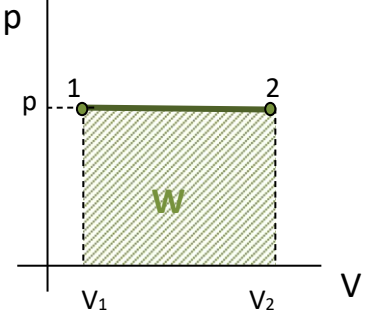
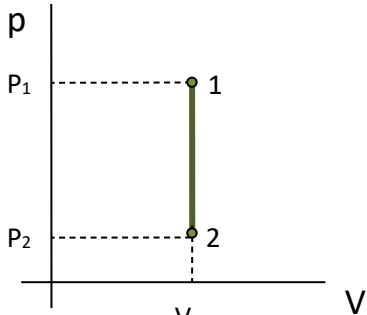
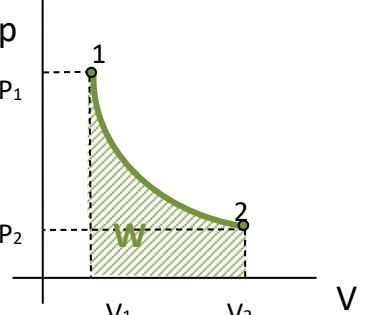
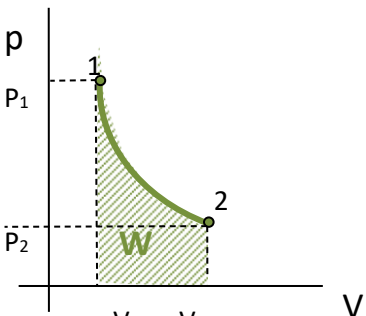
$\Delta Q = (Q_{entra} - Q_{sal})$ es el calor agregado al sistema y W el trabajo realizado por el sistema.

- *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:

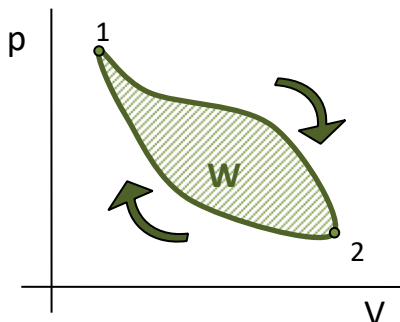
<p>► Transformación isobara: $p = \text{constante}$</p>  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ $W = p (V_2 - V_1)$	<p>► Transformación isocora: $V = \text{constante}$</p>  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ $W = p \cdot \Delta V = 0$
<p>► Transformación isoterma: $T = \text{constante}$</p>  $p_1 \cdot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

Transformaciones cíclicas:

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: $\Delta U = 0$

$$\Delta Q = W + \Delta U \rightarrow \Delta Q = W \rightarrow W = Q_2 - Q_1$$



En la transformación 1 → 2 el trabajo W es positivo (+).

En la transformación 2 ← 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: $W_{\text{TOTAL}} = W_{1 \rightarrow 2} + W_{2 \rightarrow 1}$ (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* $\Delta Q \rightarrow \eta \rightarrow W$

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

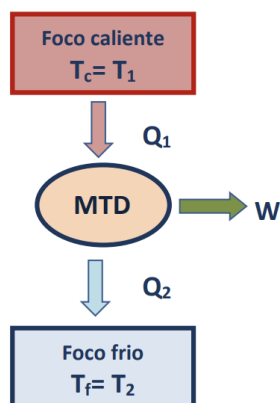
► **Máquina térmica inversa:** *Máquina frigorífica y bomba de calor* $W \rightarrow \varepsilon \rightarrow \Delta Q$

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 .

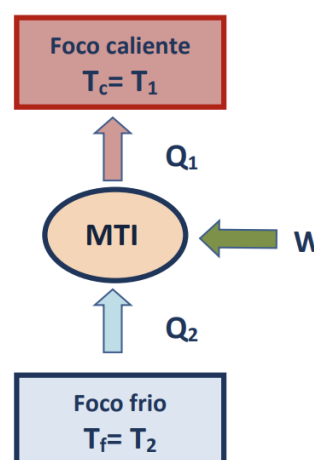
$$Q_2 = W + Q_1 \rightarrow W = Q_2 - Q_1$$



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 .

$$Q_2 + (-W) = Q_1 \rightarrow W = Q_2 - Q_1$$



Cálculo de la eficiencia o rendimiento:

Rendimiento: relación entre el trabajo que sale / entra o potencia que sale / entra: $\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{absorbida}}}$

$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq 1$	$\varepsilon = \eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \geq 1$	$\varepsilon = \eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} \geq 1$

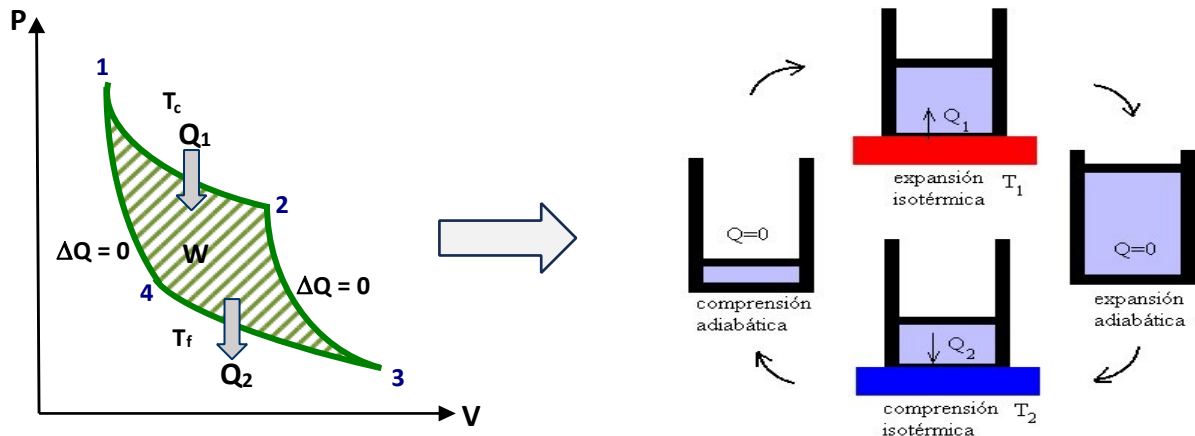
En las máquinas térmicas inversas el rendimiento puede ser mayor del 100%, por eso hablamos de **eficiencia** y no de rendimiento. Esto es posible debido a que el calor transmitido al foco caliente es la suma del calor extraído del foco frío más el trabajo o potencia aportado por el compresor, que se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

Es un ciclo termodinámico ideal para obtener el máximo rendimiento teórico. Es un ciclo reversible formado por *dos* transformaciones isotérmicas y otras *dos* adiabáticas. Es un ciclo teórico e ideal no real.

Un ciclo reversible puede realizarse en ambos sentidos y además se puede iniciar en cualquier punto.



- 1→2: **expansión isotérmica.** El fluido absorbe calor Q_1 desde 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, gastando su energía interna y disminuyendo su temperatura desde T_c hasta T_f . $Q = 0$
- 3→4: **compresión isotérmica:** El fluido cede 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:

La **eficiencia** térmica en una máquina frigorífica es un concepto equiparable al del **rendimiento** en un motor térmico, pero con la salvedad de que puede ser mayor que uno. Cuando la máquina sigue un ciclo de Carnot el cálculo de la eficiencia o rendimiento se realiza con los datos de la temperatura en grados Kelvin. ($1^\circ K = 273^\circ C$).

Eficiencia térmica: $\varepsilon = \eta_t = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$
Eficiencia térmica de Carnot: $\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$

Relación entre la eficiencia Térmica real y la de Carnot: $\eta_s = \frac{\eta_t}{\eta_c}$

▶ 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):	$\varepsilon = \eta_t = \frac{E \text{ útil}}{E \text{ absorbida}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$
▶ BC (bomba de calor):	$\varepsilon = \eta_t = \frac{E \text{ útil}}{E \text{ absorbida}} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$ COP = $\frac{Q_c}{W}$

Máquinas reales con el ciclo de Carnot: Al no ser teórico, se aplica un *coeficiente*. Para obtener un alto rendimiento, interesa que la temperatura del foco caliente sea lo mayor posible y la del foco frío lo menor posible.

Frigorífico: si mantiene los productos a $5^\circ C$ en una habitación a $22^\circ C$ la eficiencia es 16.3.

Un frigorífico real posee una eficiencia en torno a 4 (un 25% de la del ciclo de Carnot)

Bomba de calor: si mantiene una habitación a $22^\circ C$ mientras el exterior está a $5^\circ C$ tiene una eficiencia de 17.4.

Una bomba de calor real tiene una eficiencia entre el 2 y el 7.

Coficiente de Operación (COP) determina el rendimiento entre el calor aportado o extraído y el trabajo consumido para conseguirlo: $COP = \frac{Q}{W}$; $Q_h = Q_c + W$ (ó $Q_c = Q_f + W$ en español)

Como refrigerador: $COP = \frac{Q_f}{W}$ extrae la mayor cantidad de calor de un foco frío con el menor trabajo posible

Como calefactor: $COP = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_f + W}{W}$ el efecto útil es el calor introducido en el foco caliente.

5.- Potencia de la máquina: $P_{util} = \frac{E_{util}}{t}$; $P_{cons} = \frac{E_{cons}}{t}$ Watio (SI ó CV = 735 W)

6.- Entropía: Flujo de la energía disipada por un sistema hacia el exterior.

$$|Q| = T_1 \cdot \Delta S = T_2 \cdot \Delta S \dots \rightarrow \Delta S = \frac{|Q|}{T} \rightarrow \Delta S_h = \frac{|Q_h|}{T_h} ; \Delta S_c = \frac{|Q_c|}{T_c}$$

- ▶ Sistema reversible: $\Delta S_{Total} = \Delta S_h + \Delta S_c = 0 \rightarrow W_{perd} = 0$
- ▶ Sistema irreversible (con pérdidas): $W_{perd} = T_c \cdot \Delta S_{tot}$

EJERCICIOS 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.

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

El calor absorbido en una hora: $Q = P_{ab} \cdot t = 250000 \text{ Kcal/h} \cdot 1 \text{ h} = 250000 \text{ Kcal} \cdot 4,18 \text{ J/cal} = 1045000 \text{ KJ}$

El rendimiento entre el trabajo realizado y el calor absorbido: $\eta = \frac{E \text{ útil}}{E \text{ absorbida}} = \frac{W}{Q_1} = 0,30 \rightarrow 30 \%$

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: a) Rendimiento de la máquina b) Temperatura del foco frío

$$a) \eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{1100 - 500}{1100} = 0,545 \rightarrow 54,5 \%$$

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 $T_1 = 380^\circ\text{C} + 273 = 653^\circ\text{K}$

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

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

Solución: a) Resultado $T_1 = 410,35 \text{ K} = 137,35^\circ\text{C}$ b) Resultado $T_1 = 452,8 \text{ K} = 179,8^\circ\text{C}$

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

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

$$a) \text{ Máquina frigorífica: } \varepsilon = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{270}{295 - 270} = 10,8 \rightarrow 10,8 * 0,40 = 4,32 = 432 \%$$

$$b) \text{ Bomba de calor: } \varepsilon = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{295}{295 - 270} = 11,8 \rightarrow 11,8 * 0,40 = 4,72 \rightarrow 472\%$$

$$c) \text{ Energía del foco caliente } Q_1: \text{ fórmula de bomba de calor } \varepsilon = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{7200} = 4,72 \rightarrow Q_1 = 33040 \text{ KJ}$$

$$d) \text{ Energía del foco frío } Q_2: W = Q_1 - Q_2 \rightarrow 7000 = 33040 - Q_2 \rightarrow Q_2 = 26040 \text{ KJ}$$

Ejercicio 5

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

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

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{283}{283 - 278} = 56,6 \rightarrow 56,6 * 0,22 = 12,45 \quad \text{Eficiencia} = 1245 \%$$

- En **verano** la máquina funciona como una **máquina frigorífica**. La temperatura del foco frío será la del interior de la cámara $10^\circ\text{C} = 283 \text{ K}$ y la temperatura del foco caliente será la del exterior de la cámara $25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{283}{298 - 284} = 18,87 \rightarrow 18,87 * 0,22 = 4,15 \quad \text{Eficiencia} = 415 \%$$

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

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

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

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{abs}}} = \frac{Q_2/t}{P_{\text{abs}}} \rightarrow 4,155 = \frac{Q_2/t}{3000} \rightarrow \frac{Q_2}{t} = 12450 \text{ w} = 12450 \text{ J/s}$$

Ejercicio 6

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:

- a) Rendimiento de la máquina. b) Calor aportado al foco frío.
c) Trabajo realizado. d) 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 sigue un ciclo de Carnot aplicamos las fórmulas para calcular el rendimiento o eficiencia del motor térmico:

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

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{absorbida}}} = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{529 - 350}{529} = 0,34 \rightarrow 34\%$$

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

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

- c) El trabajo realizado W : $W = Q_1 - Q_2 = 1350 - 891 = 459\text{ J}$

- d) Para conseguir un rendimiento del 56 %, manteniéndose la temperatura del foco caliente a 256°C :

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

Ejercicios soluciones al final:

E7: Una máquina frigorífica de 1,5 kW de potencia mantiene una temperatura en su interior de 1°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°C , calcule: a) El rendimiento de la máquina b) El calor eliminado por unidad de tiempo del interior del frigorífico c) El calor aportado por unidad de tiempo al exterior del frigorífico

E 8: Una máquina térmica absorbe un 360 J de calor mientras realiza un trabajo de 25 J durante cada ciclo. Determinar: a) Eficiencia que presenta la máquina. b) Calor liberado cedido durante cada ciclo.

E 9: Una máquina térmica que presenta una eficiencia del 30%, realiza un trabajo de 200 J. durante cada ciclo. Determina: a) ¿Que cantidad de calor absorbe durante el ciclo? b) ¿Qué cantidad de calor libera?

E 10: Una máquina térmica absorbe del foco caliente 1500 J, y cede al foco frío 800J. Determina: a) Eficiencia de la máquina. b) Trabajo producido durante un ciclo. c) Potencia de la máquina térmica, si la duración de cada ciclo es de 0,2s.

E 11: Un frigorífico con un COP de 5, absorbe 120J de calor de una fuente fría durante cada ciclo. Determina: a) Trabajo realizado durante cada ciclo. b) Calor cedido a la fuente caliente.

E12: Un frigorífico absorbe 100 J del foco frío durante cada ciclo, cediendo 130 J al foco caliente. Determinar: a) La potencia que debe tener el compresor si se realizan 60 ciclos por segundo durante el proceso de refrigeración. b) COP del frigorífico.

E13: Una oficina de proyectos técnicos se ha comprometido a diseñar un equipo que mantendrá una temperatura de 22°C en un edificio que presenta unas pérdidas de calor de 8 kw, para lo que extraerá el calor de las aguas de un embalse próximo que se mantiene a una temperatura de 2°C , empleando para ello una bomba de calor que tiene un consumo de 0,5 kw.

E14: Una máquina térmica reversible con un rendimiento del 30% y cuyo foco frío se encuentra a 107°C , cede una cantidad de calor de 120 kcal a dicho foco frío durante cada ciclo. Determina la temperatura y el calor cedido por el foco caliente.

E15: Para mantener una temperatura en su interior de -18°C un congelador funciona con un COP real de $1/3$ de su valor teórico máximo, para ello consume una potencia de 2kw. Si consideramos que la temperatura ambiental permanece a 20°C . Determina la energía que se tiene que extraer del congelador.

Soluciones:

Sol 7: a) Resultado $\varepsilon = 2,88 = 288\%$ b) $Q_2 / t = 4,32\text{ kW}$ c) $Q_1 / t = 5,82\text{ kW}$

Sol 8: $E = W/Q_2 = 0,069 = 69\%$ b) $Q_{\text{lib}} = Q_0W = 360-25$

Sol 9: a) $\eta = W/Q_2 \rightarrow Q_2 = W/\eta = 200/0,3 = 666,75\text{ J}$ b) $Q_1 = Q_2 - W = 466,75\text{ J}$

Sol 10: $\eta = W/Q_2 = Q_2 - 1/Q_2 = 1500 - 800/1500 = 0,566$ b) $W = Q_2 - Q_1 = 700\text{ J}$ c) $W = P \cdot t \rightarrow P = W/t = 3500\text{ w}$

Sol 11: a) $COP = Q_2/W = W + Q_1 / W \rightarrow W = 120/5 - 1 = 30\text{ J}$ b) $Q_2 = W + Q_1 = 150\text{ J}$

Sol 12: a) $W = Q_2 - Q_1 = 30\text{ J} \rightarrow P = W \cdot f / 30 \cdot 60 = 1800\text{ w}$ b) $COP = Q_2/W = 130/30 = 4,3$

Sol 13: $\varepsilon = COP = Q_a/W = 8\text{kw}/0,5\text{ kw} = 16$; $\varepsilon_{\text{efect}} = COP_{\text{re}} = T_a/T_a - T_b = 295/20 = 14,75$

Sol 14: $\eta_{\text{rev}} = 1 - T_b/T_a = 1 - 380/T_a = 0,3 \rightarrow T_a = 269,8^\circ\text{C}$; $\eta_{\text{rev}} = 1 - Q_b/Q_a = 1 - 120/Q_a \rightarrow Q_a = 171,4\text{ Kcal}$

Sol 15: $COP_t = T_b/T_a - T_b = 255/38 = 6,71$ $COP_{\text{real}} = COP_t \cdot 1/3 = 2,24$; $\eta_{\text{real}} = Q_b/W = 2,24 \rightarrow Q_b = 4,48$

Ejercicios MG

1.- En un motor de 4T, es produeixen $W = 30 \text{ J}$ nets a cada cicle de treball. Si el motor gira a $n = 3\,000 \text{ min}^{-1}$, quina serà la seva potència? Quin parell motor Γ desenvoluparà i quanta gasolina consumirà en L/h, si el seu rendiment és del $\eta = 45\%$? (P_c gasolina = $43\,472 \text{ kJ/kg}$; $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$; $v = 144 \text{ km/h}$)

Sol: $\omega = n \cdot 2\pi / 60 = 3000 = 314,16 \text{ rad/s} = 50 \text{ voltes/s}$ En ser de 4T fa un cicle de treball per a cada 2 voltes, per tant fa 25 cicles de treball/s. La potència desenvolupada val: $P_u = W / t = 30 \cdot 25 = 750 \text{ W}$; $P_u = t \cdot \omega \rightarrow 750 \text{ W} = \tau \cdot 314,16 \rightarrow \tau = 2,38 \text{ Nm}$ La potència consumida val: $P_c = P_u / \eta = 750 / 0,45 = 1\,666,6 \text{ W}$; L'energia consumida en una hora: $W = P_c \cdot t = 1666,6 \cdot 3600 = 6 \cdot 10^6 \text{ J}$; Consum en L cada hora: $6 \cdot 10^3 / 43472 \cdot 0,7 = 0,197 \text{ L}$

2.- Un refrigerador amb un COP = 2,5 extreu calor de l'evaporador a raó de $Q_c = 104,5 \text{ kJ/minut}$. Determina: a) La potència elèctrica P consumida pel motor del compressor si el grup motor-compressor té un rendiment del $\eta = 85\%$. b) La calor transmesa pel condensador $|Q_h|$ en un dia de funcionament.

Sol: a) $\text{COP} = Q_c / W$; $2,5 = 104,5 / W \rightarrow W = 41,8 \text{ kJ}$; $P_u = W \cdot t = 41800 \cdot 60 = 696,66 \text{ W}$; $P_c = P_u \cdot \eta = 819,60 \text{ W}$
b) $Q_h = W + Q_c = 41,8 + 104,5 = 146,3 \text{ kJ}$; En un dia: $146,3 / \text{min} \cdot 24 \cdot 60 = 210672 \text{ kJ/dia}$

3.- Una instal·lació industrial necessita produir $m = 500 \text{ kg}$ de gel a $T_g = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ cada hora a partir d'uns dipòsits on l'aigua es troba a $T_a = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Quina serà la potència P que consumirà el refrigerador si té un COP = 5,6? Si aprofitéssim la calor despresada al condensador, quants kJ/h es podrien obtenir?

Sol: De les taules de la pàgina 19 obtenim que: $ce(\text{aigua}) = 4,18 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C}$ i $L_f = 333,5 \text{ kJ/kg}$ $ce(\text{gel}) = 2,05 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C}$, llavors la calor necessària en una hora (3 600 s) per obtenir els 500 kg de gel serà: $Q_1 = m \cdot ce(\text{aigua}) \Delta T = 500 \cdot 4,18 \cdot (0 - 15) = -31\,350 \text{ kJ}$ $Q_2 = m \cdot L_f = 500 \cdot (-333,5 \text{ kJ/kg}) = -166\,750 \text{ kJ}$; $Q_3 = m \cdot ce(\text{gel}) \Delta T = 500 \cdot 2,05 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C} \cdot (-5 - 0 \text{ }^\circ\text{C}) = -5125 \text{ kJ}$; $Q_{\text{Tot}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = -203225 \text{ kJ}$. El valor és negatiu perquè es tracta d'extreure la calor de l'aigua. Tanmateix, a efectes de càlcul de la potència ens interessa només el valor absolut: $|Q_c| = 203\,225 \text{ kJ}$. Llavors: $\text{COP} = |Q_c| / W \rightarrow 5,6 = 203225 / W \rightarrow W = 36290,17 \text{ kJ}$; $P = W / t = 36290,17 / 600 = 10,08 \text{ kW}$ La quantitat de calor despresada al condensador en una hora: $Q_h = W + |Q_c| = 36\,290 + 203\,225 = 239\,515,17 \text{ kJ}$.

4.- Es vol escalfar una casa que es troba inicialment a $T_1 = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ fins a $T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ amb una bomba de calor amb un COP = 8 i en un temps màxim de $t = 30 \text{ minuts}$. Si es necessiten $Q = 376\,200 \text{ kJ}$ per aconseguir la temperatura desitjada, determina la potència P_b que consumirà la bomba. Quina potència P_c consumiríem si féssim servir estufes elèctriques en comptes de la bomba de calor?

Sol: $W = Q_h / (1 + \text{COP}) = 376200 / (1 + 8) = 41800 \text{ kJ}$; $P = W / t = 23,22 \text{ kW}$, Potència utilitzant estufes elèctriques: $P = W / t = 376200 / 30 \cdot 60 = 209 \text{ kW}$

5.- Una màquina de vapor que extreu $Q_h = 800 \text{ MJ}$ de la font tèrmica calenta a $T_h = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ fa un treball net de $W = 250 \text{ MJ}$ i en cedeix $|Q_c| = 550 \text{ MJ}$ a la font freda a $T_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$. Quina és la seva eficiència η_s segons el segon principi? Quant val el treball perdut W_p en irreversibilitats? Quina és la variació d'entropia ΔS de l'aigua del riu que s'utilitza per refrigerar el condensador?

Sol: $\eta = \eta_t / \eta_c$; $W = Q_h - Q_c = 800 - 550 = 250 \text{ MJ}$; $\eta_t = 1 - T_c / T_h = 0,4916$ $\eta_s = 0,3125 / 0,4916 = 0,6356 \rightarrow 63,56\%$
 $W_p = \text{Treball possible} - \text{Treball realitzat} = 800 \text{ MJ} \cdot 0,4916 - 250 \text{ MJ} = 143,28 \text{ MJ}$; $\Delta S_h = Q_h / T_h = -1,035 \text{ MJ/K}$; $\Delta S_c = |Q_c| / T_c = 550 / (273 + 120) = 1,300 \text{ MJ/K}$; $\Delta S_t = \Delta S_h + \Delta S_c = 0,365 \text{ MJ/K}$

6.- Un motor dièsel de sis cilindres de 80 mm de diàmetre i $c = 82,8 \text{ mm}$ de cursa té una relació de compressió de $r = 22/1$. Determina les cilindrades total V_t i unitària V_c , així com el volum V_{min} de la cambra de compressió.

Sol: $V_c = \pi r^2 \cdot c = 416,2 \text{ cm}^3$; $V_t = V_c \cdot n_c = 416,2 \cdot 6 = 2\,498 \text{ cm}^3$; $r = V_c + V_{\text{mim}} / V_{\text{min}} \rightarrow 22 = 416,2 + V_{\text{mim}} / V_{\text{min}} \rightarrow V_{\text{mim}} = 19,81 \text{ cm}^3$

7.- A l'activitat anterior calcula la pressió P_2 i la temperatura T_2 de l'aire al final de la compressió, considerant un exponent adiabàtic $\gamma = 1,35$, i la pressió i temperatura inicials p_1 d'1,5 bar i $T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Sol: $V_1 = 416,2 \text{ cm}^3 + 19,81 \text{ cm}^3 \approx 436 \text{ cm}^3$; $T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_1 = 1,5 \text{ bar}$; $V_2 = 19,81 \text{ cm}^3$ $\gamma = 1,35$
Pressió final val: $p_1 \cdot V_1^\gamma = p_2 \cdot V_2^\gamma \rightarrow 1,5 \text{ bar} \cdot (436)^{1,35} = p_2 \cdot (19,81)^{1,35}$ d'on $p_2 = 97,35 \text{ bar}$;
Temperatura final: $T_1 \cdot V_1^{\gamma-1} = T_2 \cdot V_2^{\gamma-1} \rightarrow (273 + 40) \cdot (436)^{1,35-1} = T_2 \cdot (19,81)^{1,35-1}$ d'on $T_2 = 923,53 \text{ K} \approx 650 \text{ }^\circ\text{C}$

8.- Un automòbil té un motor que subministra una potència útil de $P = 58,88 \text{ kW}$ quan va a $v = 108 \text{ km/h}$. Si el seu rendiment és del $\eta = 40\%$, determina el consum en L/h de gasoil amb un poder calorífic de $41\,800 \text{ kJ/kg}$ i una densitat de $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$.

Sol: Treball realitzat en una hora: $W = P \cdot t = 58880 \cdot 3600 = 211968\,000 \text{ J}$; $\eta = W / Q \rightarrow 0,4 = 211968000 / Q$ d'on $Q = 529920000 \text{ J} = 529920 \text{ kJ}$; Potència calorífica: $41800 \cdot 0,65 = 27170 \text{ kJ}$; Consum = $529920 / 170 = 19,5 \text{ L/h}$

9.- Un refrigerador domèstic amb un motor de $P = 450 \text{ W}$ i un COP = 2,5 vol refredar a $T_2 = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ una massa $m = 10 \text{ kg}$ de fruita que es troben inicialment a $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Quant de temps t trigarà a fer-ho, considerant la calor específica de la fruita de $C_e = 4,2 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C}$?

Sol: $Q = m \cdot c_e \cdot \Delta T = 10 \cdot 4,2 \cdot (20 - 8) = 504 \text{ kJ}$; $\text{COP} = Q_c / W \rightarrow 2,5 = 504 / W \rightarrow W = 201,6 \text{ kJ}$; $P = W / t \rightarrow t = 448$