Termodinámica (FIS1523)

Ciclo de Carnot

Felipe Isaule
felipe.isaule@uc.cl

Miércoles 28 de Mayo de 2025

Resumen clases anteriores

- Definimos las **máquinas térmicas** y la **eficiencia**:

$$\eta = \frac{W_{\text{neto,salida}}}{Q_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{Q_{\text{salida}}}{Q_{\text{entrada}}}.$$

- Definimos los **refrigeradores**, **bombas de calor**, y sus coeficientes de desempeño:

$$\text{COP}_{\text{R}} = \frac{Q_L}{W_{\text{neto,entrada}}} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}.$$

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto,entrada}}} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}..$$

- Revisamos los **procesos reversibles** e **irreversibles**. Los procesos reversibles dictan el límite teórico de un proceso.

Clase 21: Ciclo de Carnot

- Ciclo de Carnot.
- Principios de Carnot y escala de temperatura.
- Máquinas, refrigeradores y bombas de calor de Carnot.

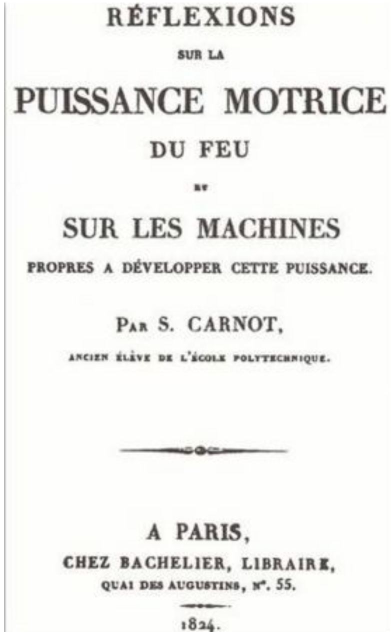
- Bibliografía recomendada:
  - Cengel (6-7, 6-8, 6-9, 6-10, 6-11).

Clase 21: Ciclo de Carnot

- **Ciclo de Carnot.**
- Principios de Carnot y escala de temperatura.
- Máquinas, refrigeradores y bombas de calor de Carnot.

Ciclo de Carnot

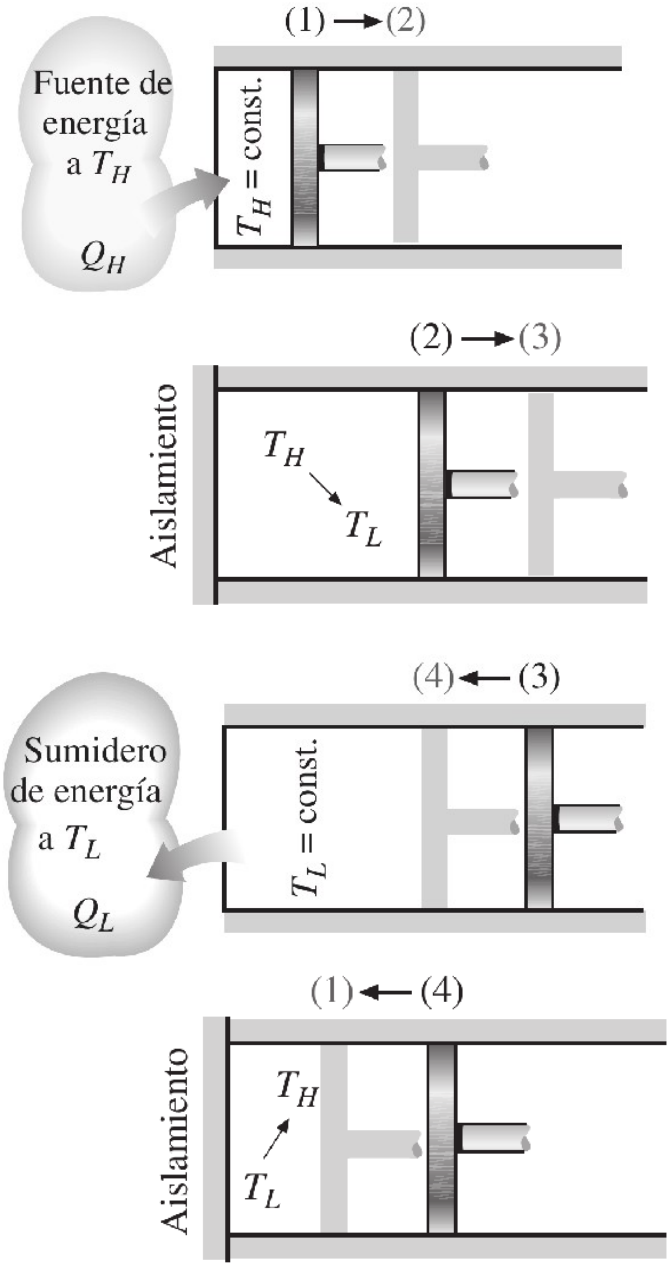
- El **Ciclo de Carnot** es posiblemente el **ciclo reversible más conocido**.
- Provee el **límite de eficiencia** de cualquier **motor térmico** clásico.


RÉFLEXIONS
SUR LA
PUISSANCE MOTRICE
DU FEU
ET
SUR LES MACHINES
PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE.
PAR S. CARNOT,
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.
A PARIS,
CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,
QUAI DES AUGUSTINS, N°. 55.
1824.

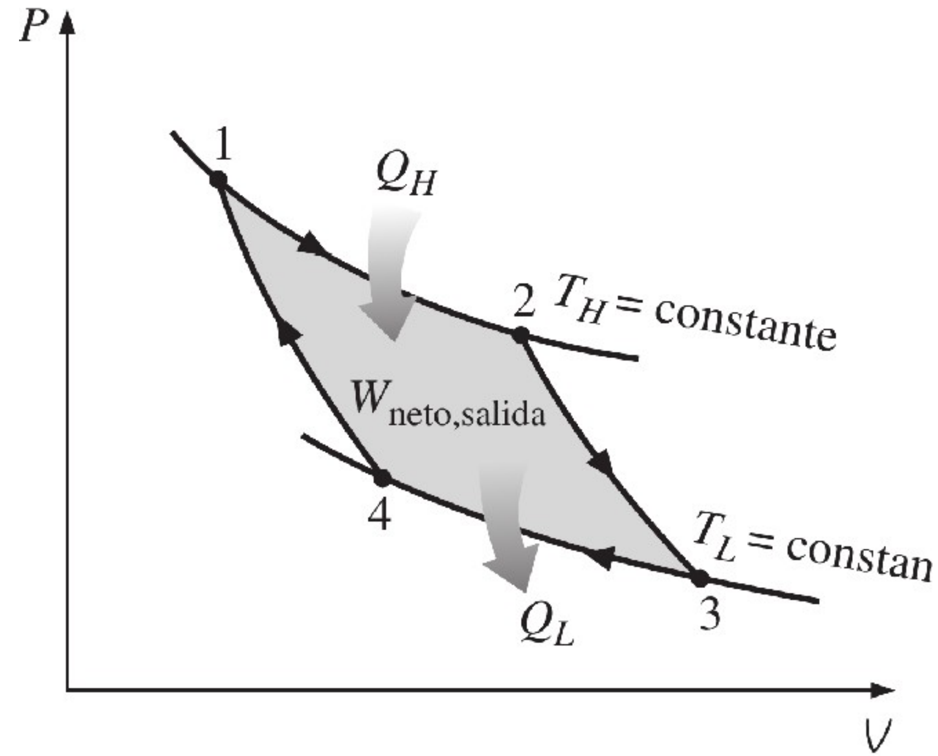
Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego

S. Carnot (1796 – 1832)

Ciclo de Carnot



- $1 \rightarrow 2$: Expansión isotérmica
- $2 \rightarrow 3$: Expansión adiabática
- $3 \rightarrow 4$: Compresión isotérmica
- $4 \rightarrow 1$: Compresión adiabática



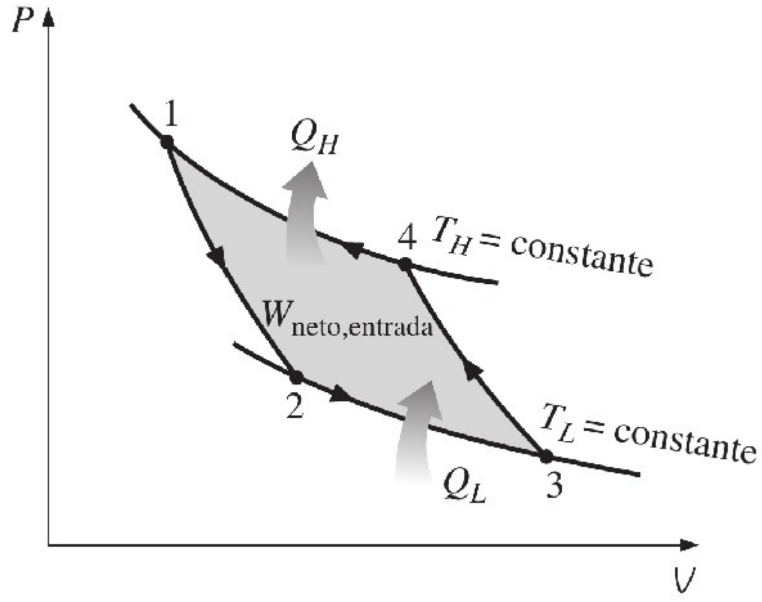
- ○ El área bajo la curva nos da el trabajo neto de salida.

Ciclo de Carnot

- Cada uno de los **procesos** en el ciclo de Carnot es **reversible**.
- El ciclo de Carnot ilustra la **necesidad** de **tener** una **fuente y** un **sumidero** en un **ciclo**.
- Por ser un ciclo reversible, es el **ciclo más eficiente** que opera **entre las temperaturas** T_H **y** T_L.
- Aunque es un **ciclo idealizado**, la eficiencia de los ciclos reales aumenta al aproximarse al ciclo de Carnot.

Ciclo de Carnot inverso

- Al ser un ciclo **reversible**, el ciclo de Carnot **se puede invertir** sin afectar el alrededor.
- En cuyo caso se convierte en el **ciclo de refrigeración de Carnot**.
- Nos otorga un **límite teórico** a la **eficiencia** de los **refrigeradores**.



  - El área bajo la curva nos da el trabajo neto de entrada.

Clase 21: Ciclo de Carnot

- Ciclo de Carnot.
- **Principios de Carnot y escala de temperatura.**
- Máquinas, refrigeradores y bombas de calor de Carnot.

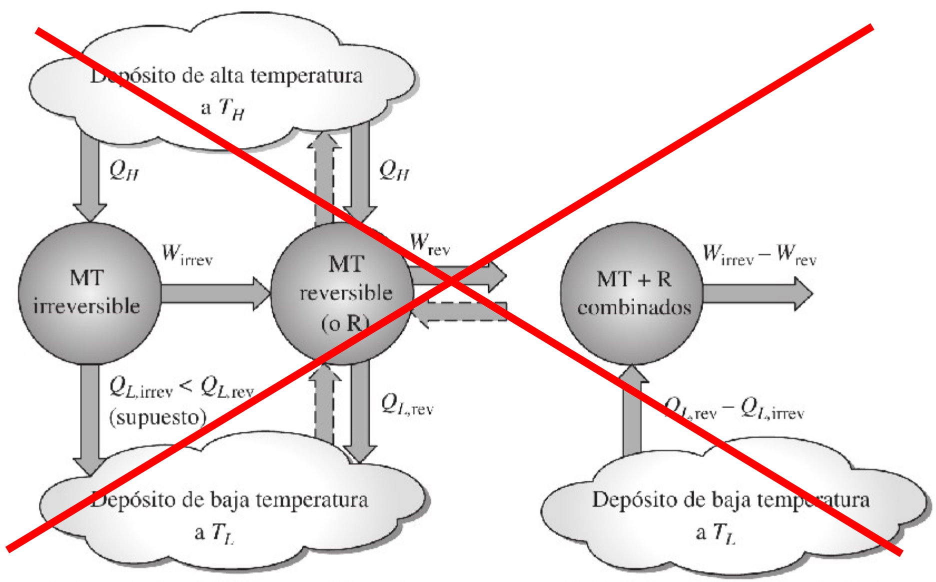
Principios de Carnot

- Los **principios de Carnot** son dos consecuencias de la **2da Ley**:

  1. La **eficiencia** de una **máquina térmica irreversible** es siempre **menor** que la eficiencia de una **máquina reversible** que **opera** entre los **mismos dos depósitos**.

  → Es una **consecuencia** del postulado de **Kelvin-Planck**.

Máquinas que no cumplen el principio de Carnot



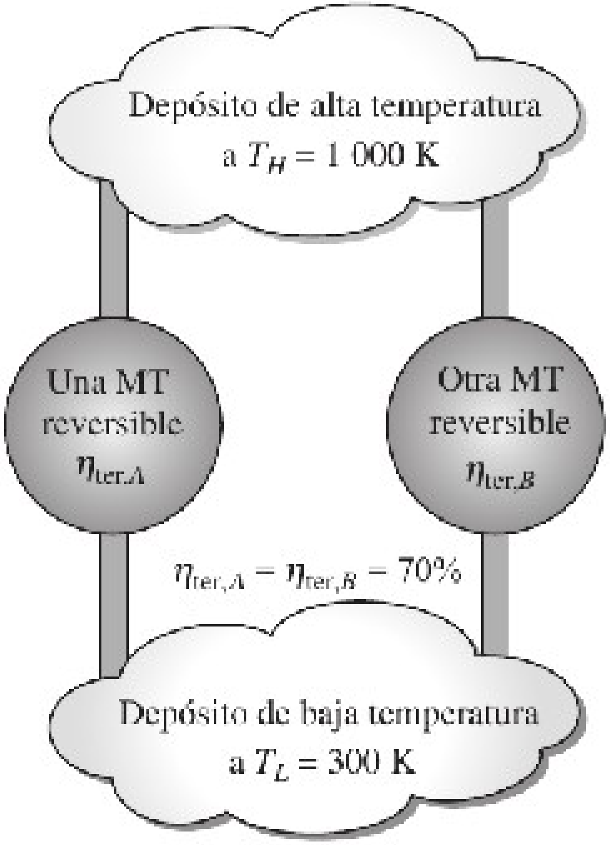
a) Una máquina térmica reversible y otra irreversible entre los mismos dos depósitos (la máquina térmica reversible se invierte para que funcione como refrigerador)

b) Sistema combinado equivalente

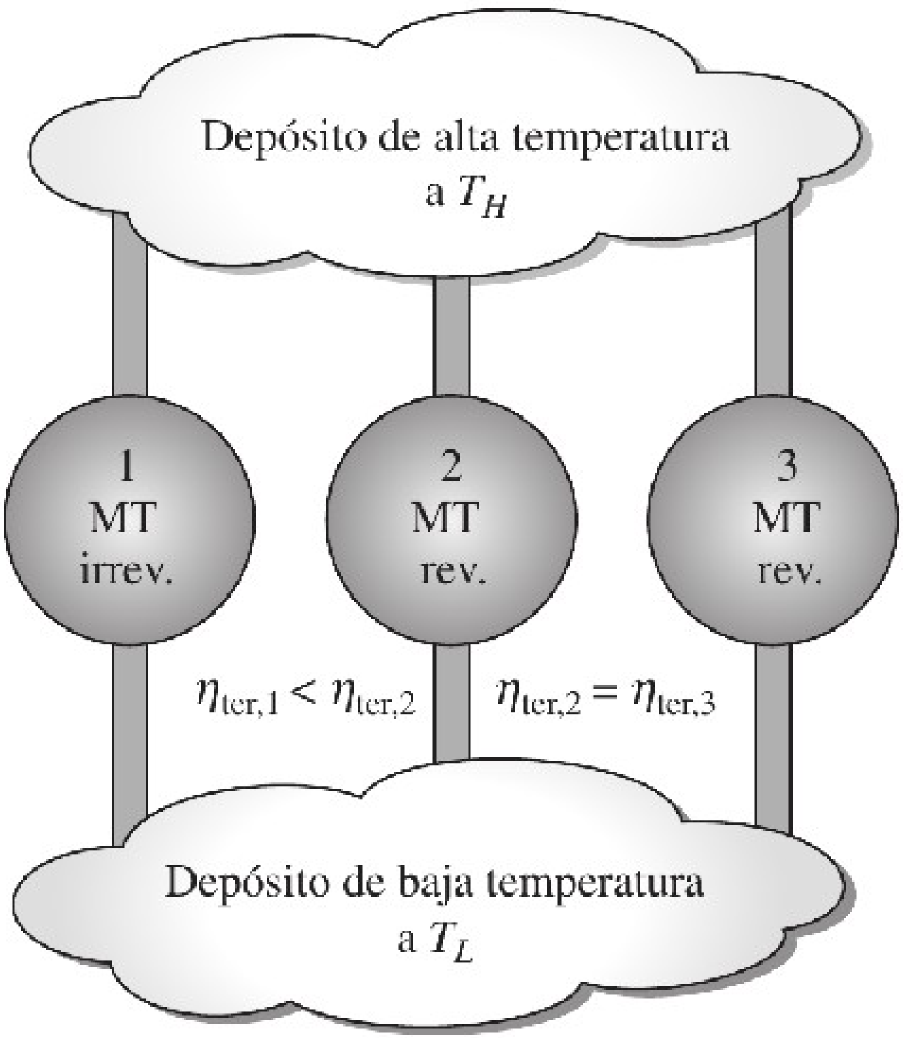
Principios de Carnot

- Los **principios de Carnot** son dos consecuencias de la **2da Ley**:

  2. Las **eficiencias** de las **máquinas térmicas reversibles** que **operan** entre los **mismos dos depósitos** son las **mismas**.



Principios de Carnot



Escala termodinámica de la temperatura

- Los **principios de Carnot** nos permiten **relacionar** las **temperaturas** de los **depósitos** con los **calores** transferidos.
- Debido a que los depósitos se caracterizan por su temperatura, la **eficiencia** de una **máquina reversible** debe ser una **función de las temperaturas**:

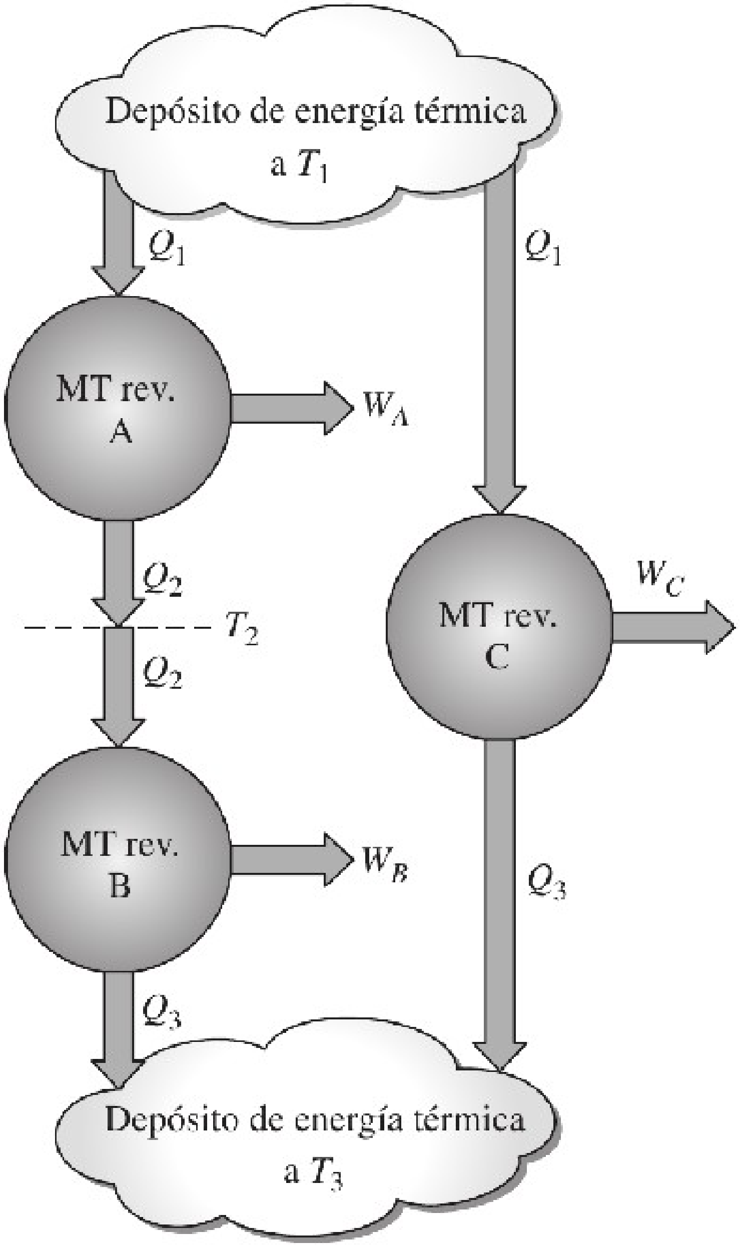
$$\eta_{\mathrm{rev}} = g(T_H, T_L).$$

- Entonces:

$$\eta_{\mathrm{rev}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad \longrightarrow \quad Q_H/Q_L = f(T_H, T_L),$$

donde g y f son funciones.

Escala termodinámica de la temperatura



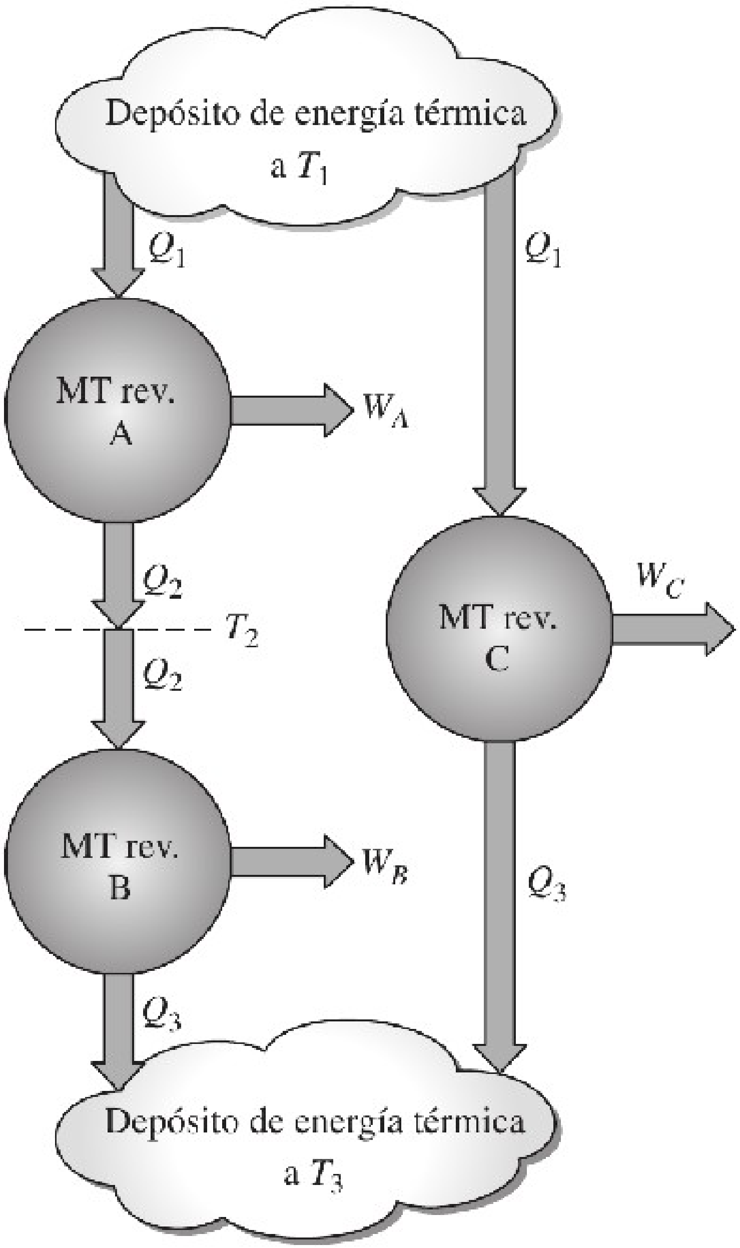
- Imaginemos las máquinas reversibles de la figura.
- De lo visto en la diapositiva anterior, tenemos que:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2)$$

$$\frac{Q_2}{Q_3} = f(T_2, T_3)$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3)$$

Escala termodinámica de la temperatura



- Entonces:

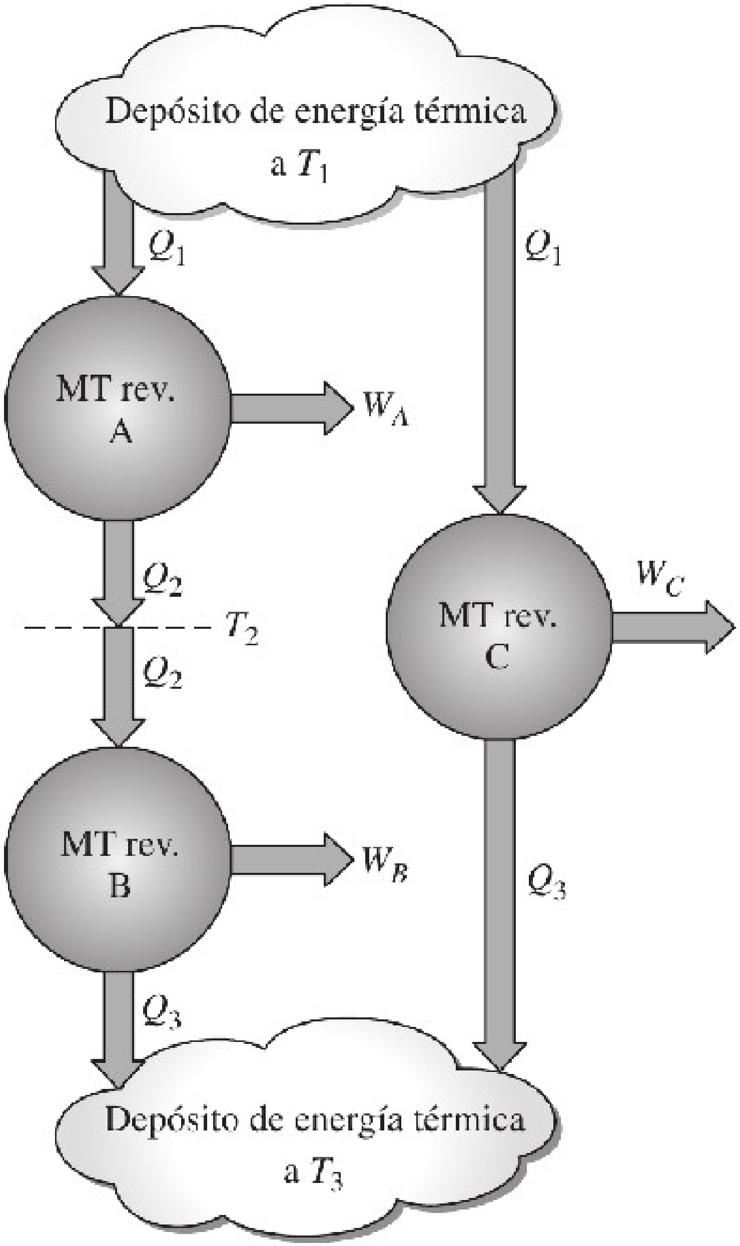
$$f(T_1, T_3) = \frac{Q_1}{Q_2}\frac{Q_2}{Q_3} = f(T_1, T_2) f(T_2, T_3)$$

- Debido a que $f(T_1,T_3)$ no depende de T_2, necesariamente la función f debe tener la forma:

$$f(T_a, T_b) = \frac{\phi(T_a)}{\phi(T_b)},$$

donde ϕ es otra función.

Escala termodinámica de la temperatura



- Lord Kelvin propuso utilizar $\phi(T)=T$.
- Entonces, se tiene que:

$$\boxed{\left(\frac{Q_H}{Q_L}\right)_{\text{rev}} = \frac{T_H}{T_L}.}$$

- Esto define una **escala absoluta de temperatura**.
- Al utilizar la graduación de la escala de Celsius, obtenemos la **escala de Kelvin**.

Clase 21: Ciclo de Carnot

- Ciclo de Carnot.
- Principios de Carnot y escala de temperatura.
- **Máquinas, refrigeradores y bombas de calor de Carnot.**

Máquina térmica de Carnot

- La hipotética **máquina térmica** que **opera** en el **ciclo reversible de Carnot** se llama **máquina térmica de Carnot**.
- Al utilizar la **escala termodinámica de temperatura**, la **eficiencia** de una **máquina térmica reversible** es:

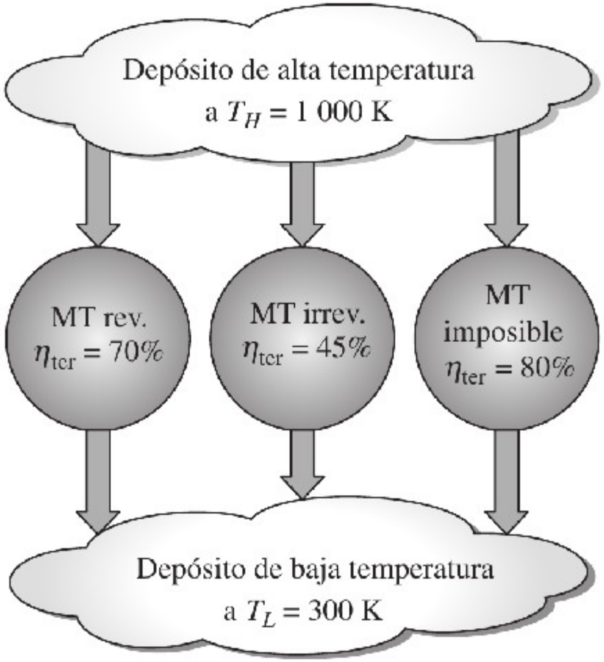
$$\eta_{\mathrm{rev}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\eta_{\mathrm{rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}.}$$

- Esta relación se llama **eficiencia de Carnot**.
- **Dicta** la **eficiencia máxima** que puede tener una máquina térmica que opera entre dos depósitos a temperaturas T_L y T_H.
- La **eficiencia** tiende al **100%** cuando $T_L \rightarrow 0$ o $T_H \rightarrow \infty$, lo que **no es posible de realizar**.

Máquina térmica de Carnot

- Debido al **primer principio de Carnot** la **eficiencia** de una máquina térmica nos dice:

$$\eta \begin{cases} < \eta_{\text{rev}} & : \text{ máquina térmica irreversible} \\ = \eta_{\text{rev}} & : \text{ máquina térmica reversible} \\ > \eta_{\text{rev}} & : \text{ máquina térmica imposible} \end{cases}$$



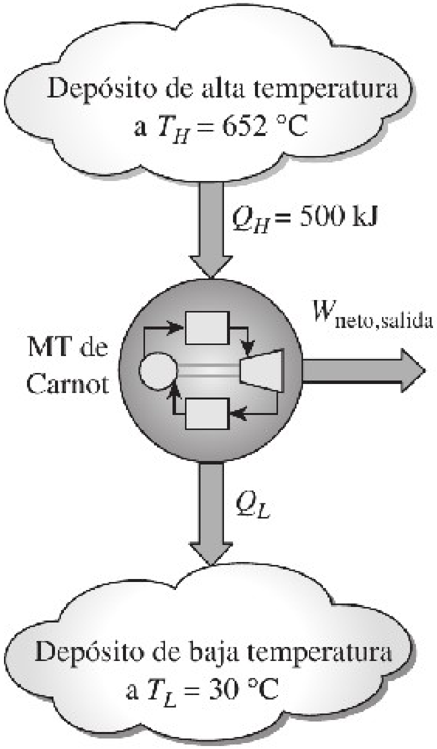
Máquina térmica de Carnot

- La **eficiencia** térmica de las **máquinas térmicas reales** se **maximiza** al:
  - **Suministrar calor** hacia la máquina a la **temperatura máxima posible** (limitada por la resistencia del material).
  - **Rechazar calor** de la máquina a la **menor temperatura posible** (limitada por la temperatura del sumidero).

- ***Más*** *de la* ***energía*** *térmica de* ***alta temperatura*** *se puede* ***convertir en trabajo****. Por lo tanto, mientras* ***más alta sea la temperatura****,* ***mayor*** *es la* ***calidad*** *de la* ***energía***

Ejemplo 1:

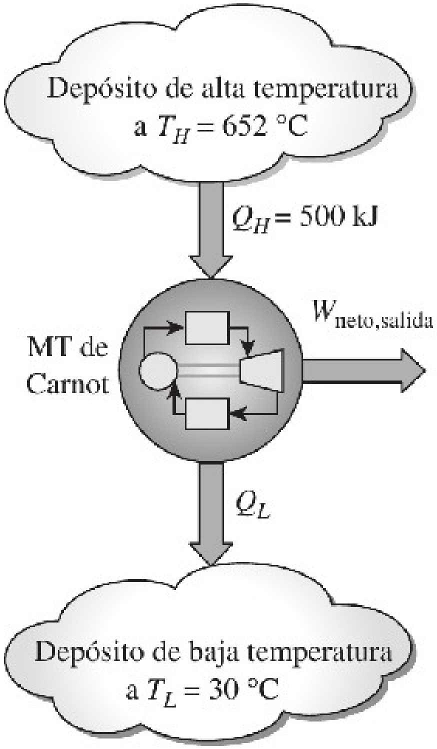
- Una **máquina térmica de Carnot recibe 500 kJ** de calor **por ciclo desde** una **fuente** de **alta temperatura** a **652°C** y **rechaza calor** hacia un **sumidero** de **baja temperatura** a **30 °C**. Determine
  - La **eficiencia térmica** de esta máquina de Carnot.
  - La **cantidad** de **calor rechazado por ciclo** hacia el sumidero.



Ejemplo 1:

- Una **máquina térmica de Carnot recibe 500 kJ** de calor **por ciclo desde** una **fuente** de **alta temperatura** a **652°C** y **rechaza calor** hacia un **sumidero** de **baja temperatura** a **30 °C**. Determine
  - La **eficiencia térmica** de esta máquina de Carnot.

La eficiencia es directamente:



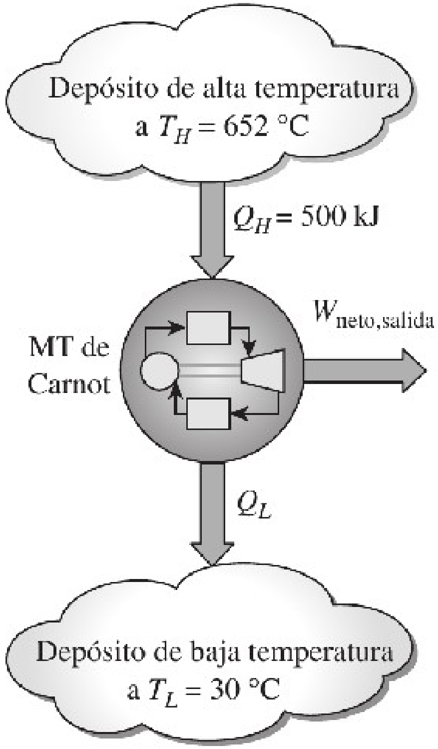
$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{(30 + 273)\,°\mathrm{K}}{(652 + 273)\,°\mathrm{K}}$$

$$\longrightarrow \boxed{\eta = 0.672}$$

Ejemplo 1:

- Una **máquina térmica de Carnot recibe 500 kJ** de calor **por ciclo desde** una **fuente** de **alta temperatura** a **652°C** y **rechaza calor** hacia un **sumidero** de **baja temperatura** a **30 °C**. Determine
  - La **cantidad** de **calor rechazado por ciclo** hacia el sumidero.

Utilizando la escala de temperatura:



$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L} \quad \longrightarrow \quad Q_L = Q_H \frac{T_L}{T_H}$$

$$= 500 \text{ kJ} \; \frac{(30 + 273)\,^\circ\text{K}}{(652 + 273)\,^\circ\text{K}}$$

$$\longrightarrow \quad \boxed{Q_L = 164 \text{ kJ}}$$

Refrigerador de Carnot y bomba de calor

- Un **refrigerador** o **bomba de calor** que opera en el **ciclo inverso de Carnot**, se llama **refrigerador de Carnot** o bomba de **calor de Carnot**.

- Utilizando la **escala termodinámica de temperatura** los **coeficientes de desempeño** toman la forma:

$$\mathrm{COP_R} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\mathrm{COP_R} = \frac{1}{T_H/T_L - 1}.}$$

$$\mathrm{COP_{HP}} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\mathrm{COP_{HP}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H}.}$$

- **Dicta** la **eficiencia máxima** que puede tener un refrigerador o bomba de calor que opera entre dos depósitos a temperaturas T_L y T_H.

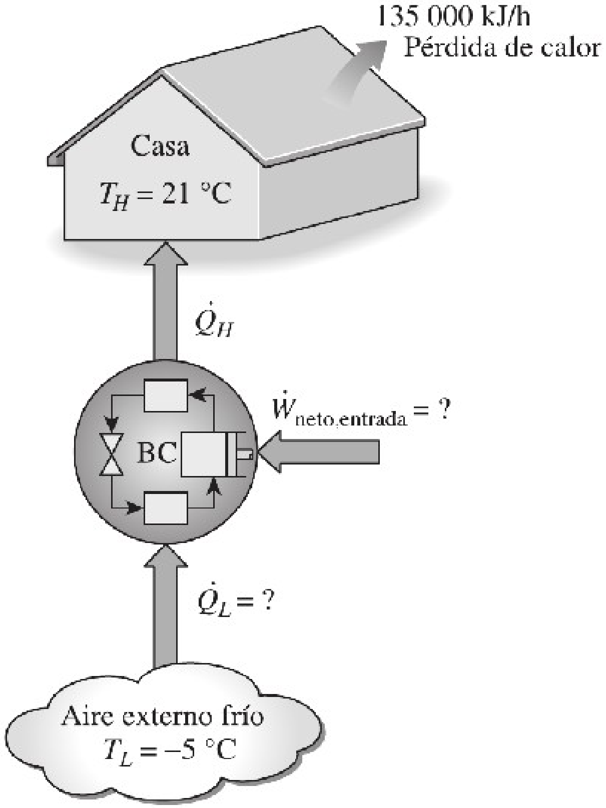
Refrigerador de Carnot y bomba de calor

- Los **coeficientes de desempeño disminuyen** cuando T_L **decrece**:
  - Se **requiere más trabajo** para **mantener la temperatura**.
- Caundo $T_L \to 0$, el **trabajo requerido** para **producir** una **cantidad finita de refrigeración** se aproxima a **infinito** y el **coeficiente de desempeño** tiende a **cero**.

$$\mathrm{COP}_{\mathrm{R/HP}} \begin{cases} < \mathrm{COP}_{\mathrm{rev,R/HP}} & : \text{ refrigerador o bomba de calor irreversible} \\ = \mathrm{COP}_{\mathrm{rev,R/HP}} & : \text{ refrigerador o bomba de calor reversible} \\ > \mathrm{COP}_{\mathrm{rev,R/HP}} & : \text{ refrigerador o bomba de calor imposible} \end{cases}$$

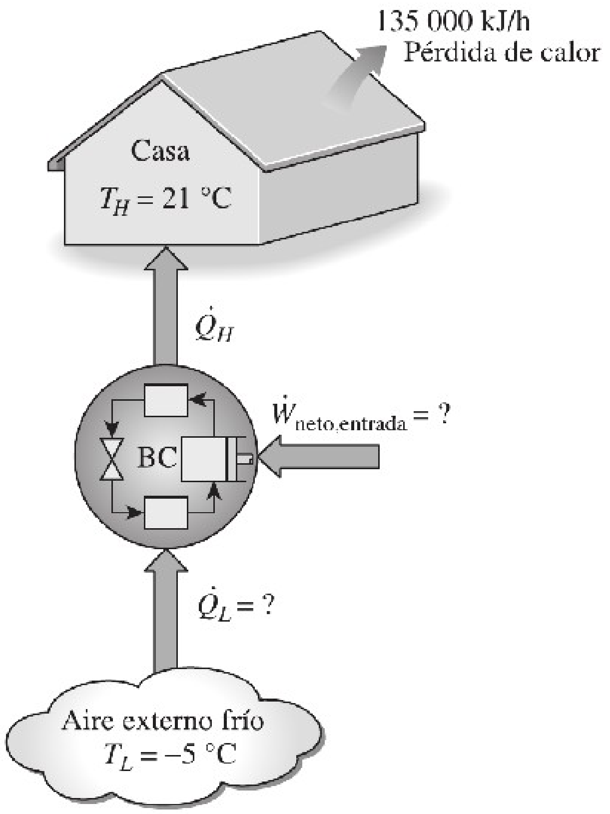
Ejemplo 2:

- Se utilizará una **bomba de calor** para calentar una casa durante el invierno. La casa se **mantiene** a **21 °C** todo el tiempo y se estima que **pierde calor** a razón de **135 000 kJ/h** cuando la **temperatura exterior** desciende a **-5 °C**. Determine la **potencia mínima requerida** para impulsar esta bomba de calor.



Ejemplo 2:

- Se utilizará una **bomba de calor** para calentar una casa durante el invierno. La casa se **mantiene** a **21 °C** todo el tiempo y se estima que **pierde calor** a razón de **135 000 kJ/h** cuando la **temperatura exterior** desciende a **-5 °C**. Determine la **potencia mínima requerida** para impulsar esta bomba de calor.



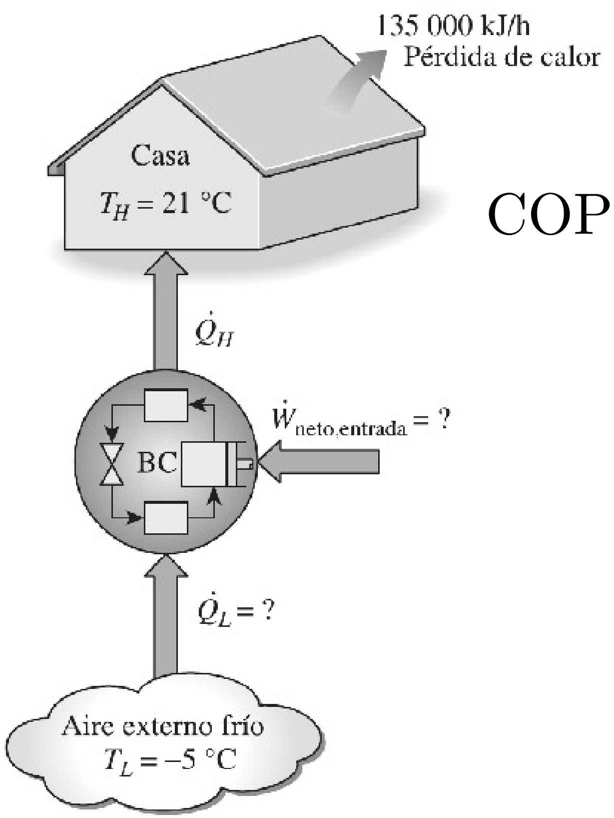
La **potencia mínima** requerida (caso límite) se obtiene al considerar una **bomba de Carnot**.

El coeficiente de desempeño:

$$\begin{aligned}\mathrm{COP_{HP}} &= \frac{1}{1 - T_L/T_H} \\ &= \frac{1}{1-(-5+273)\,{}^\circ\mathrm{K}/(21+273)\,{}^\circ\mathrm{K}} \\ &= 11.3\end{aligned}$$

Ejemplo 2:

- Se utilizará una **bomba de calor** para calentar una casa durante el invierno. La casa se **mantiene** a **21 °C** todo el tiempo y se estima que **pierde calor** a razón de **135 000 kJ/h** cuando la **temperatura exterior** desciende a **-5 °C**. Determine la **potencia mínima requerida** para impulsar esta bomba de calor.



Ahora utilizamos que el mismo coeficiente de desempeño es:

$$\mathrm{COP}_{\mathrm{HP}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{\text{neto,entrada}}} \longrightarrow \dot{W}_{\text{neto,entrada}} = \frac{\dot{Q}_H}{\mathrm{COP}_{\mathrm{HP}}}$$

$$= \frac{135000\ \mathrm{kJ/h}}{11.3}$$

$$\longrightarrow \boxed{\dot{W}_{\text{neto,entrada}} = 11947\ \mathrm{kJ/h} = 3.32\ \mathrm{kW}}$$

Ejemplo 3:

- Una **maquina térmica de Carnot recibe calor** de una **fuente** a **750 °K** y **bota calor** al **ambiente** a **300 °K**. El **trabajo** que sale **se usa** en **hacer funcionar** un **refrigerador de Carnot** que **saca calor** de un **espacio frío** a **-15 °C** a una **tasa** de **400 kJ/min** y **bota calor** en el mismo **ambiente** a **300 °K**. Calcule
  - La **tasa de calor suministrado** a la **maquina térmica**.
  - La **tasa de calor total** que va **al ambiente**.

Ejemplo 3:

- Una **maquina térmica de Carnot recibe calor** de una **fuente** a **750 °K** y **bota calor** al **ambiente** a **300 °K**. El **trabajo** que sale **se usa** en **hacer funcionar** un **refrigerador de Carnot** que **saca calor** de un **espacio frío** a **-15 °C** a una **tasa** de **400 kJ/min** y **bota calor** en el mismo **ambiente** a **300 °K**. Calcule
  - La **tasa de calor suministrado** a la **maquina térmica**.

Primero calculemos el coef. de desempeño del **refrigerador**:

$$\mathrm{COP_R} = \frac{1}{\frac{T_{H,\mathrm{R}}}{T_{L,\mathrm{R}}} - 1} = \frac{1}{\frac{300}{-15+273} - 1} = 6.14$$

Ahora podemos calcular la **potencia suministrada** al **refrigerador**:

$$\mathrm{COP_R} = \frac{\dot{Q}_{L,\mathrm{R}}}{\dot{W}_{\mathrm{entrada,R}}} \longrightarrow \dot{W}_{\mathrm{entrada,R}} = \frac{\dot{Q}_{L,\mathrm{R}}}{\mathrm{COP_R}} = \frac{400\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{min}}}{6.14}$$

$$\longrightarrow \dot{W}_{\mathrm{entrada,R}} = 65.15\ \mathrm{kJ/min} = 1.09\ \mathrm{kW}$$

Ejemplo 3:

- Una **maquina térmica de Carnot recibe calor** de una **fuente** a **750 °K** y **bota calor** al **ambiente** a **300 °K**. El **trabajo** que sale **se usa** en **hacer funcionar** un **refrigerador de Carnot** que **saca calor** de un **espacio frío** a **-15 °C** a una **tasa** de **400 kJ/min** y **bota calor** en el mismo **ambiente** a **300 °K**. Calcule
  - La **tasa de calor suministrado** a la **maquina térmica**.

Por otra parte, la eficiencia de la **máquina térmica**:

$$\eta_{\mathrm{MT}} = 1 - \frac{T_{L,\mathrm{MT}}}{T_{H,\mathrm{MT}}}$$

$$= 1 - \frac{300}{750}$$

$$= 0.6$$

La potencia de salida de la máquina térmica es igual a la de entrada del refrigerador:

$$\dot{W}_{\mathrm{entrada,R}} = \dot{W}_{\mathrm{salida,MT}} = 65.15 \ \mathrm{kJ/min}$$

Ahora podemos despejar el calor suminstrado a la **máquina térmica**:

$$\eta_{\mathrm{MT}} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{salida,MT}}}{\dot{Q}_{H,\mathrm{MT}}} \quad \longrightarrow \quad \dot{Q}_{H,\mathrm{MT}} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{salida,MT}}}{\eta_{\mathrm{MT}}}$$

$$= \frac{65.15 \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{min}}}{0.6}$$

$$\longrightarrow \quad \boxed{\dot{Q}_{H,\mathrm{MT}} = 108.6 \ \mathrm{kJ/min} = 1.8 \ \mathrm{kW}}$$

Ejemplo 3:

- Una **maquina térmica de Carnot recibe calor** de una **fuente** a **750 °K** y **bota calor** al **ambiente** a **300 °K**. El **trabajo** que sale **se usa** en **hacer funcionar** un **refrigerador de Carnot** que **saca calor** de un **espacio frío** a **-15 °C** a una **tasa** de **400 kJ/min** y **bota calor** en el mismo **ambiente** a **300 °K**. Calcule
  - La **tasa de calor total** que va **al ambiente**.

La tasa de calor que va al ambiente desde la **máquina térmica**:

$$\dot{Q}_{L,\mathrm{MT}} = \dot{Q}_{H,\mathrm{MT}} - \dot{W}_{\mathrm{salida,MT}}$$

$$= (108.6 - 65.15)\ \mathrm{kJ/min}$$

$$= 43.5\ \mathrm{kJ/min}$$

La tasa de calor que va al ambiente desde el **refrigerador**:

$$\dot{Q}_{H,\mathrm{R}} = \dot{Q}_{L,\mathrm{R}} + \dot{W}_{\mathrm{entrada,R}}$$

$$= (400 + 65.15)\ \mathrm{kJ/min}$$

$$= 465.15\ \mathrm{kJ/min}$$

La tasa total:

$$\dot{Q}_{\mathrm{total}} = \dot{Q}_{L,\mathrm{MT}} + \dot{Q}_{H,\mathrm{R}}$$

$$\longrightarrow \boxed{\dot{Q}_{\mathrm{total}} = 508.65\ \mathrm{kJ/min} = 51\ \mathrm{kW}}$$

Conclusiones

- Revisamos el **ciclo de Carnot**.
- Postulamos los **principios de Carnot**.
- Vimos la **escala termodinámica de la temperatura**, la que nos permite fijar **límites teóricos** a la **eficiencia** y **desempeño** en término de **temperaturas**.
- Próxima clase:
  - Entropía.