



UC | Chile

Termodinámica (FIS1523)

Refrigeradores y bombas de calor

Felipe Isaule
felipe.isaule@uc.cl

Lunes 26 de Mayo de 2025

Resumen clase anterior

- Comenzamos a revisar la **2^{da} Ley de la Termodinámica**.
 - El **calor no fluye espontáneamente** desde cuerpos **fríos** a cuerpos **calientes**.
 - Es **imposible** que un **dispositivo** que opera en un **ciclo reciba calor** de un **solo depósito** y **produzca** una cantidad neta de **trabajo**.
- Definimos las **máquinas térmicas** y la **eficiencia**:

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

Clase 20: Refrigeradores y bombas de calor

- Refrigeradores y bombas de calor.
- Enunciado de Clausius.
- Procesos reversibles e irreversibles.

- Bibliografía recomendada:
 - Cengel (6-4, 6-5, 6-6).

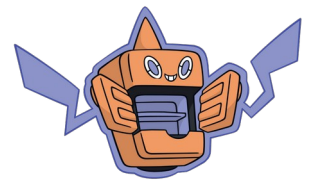
Clase 20: Refrigeradores y bombas de calor

- **Refrigeradores y bombas de calor.**
- Enunciado de Clausius.
- Procesos reversibles e irreversibles.

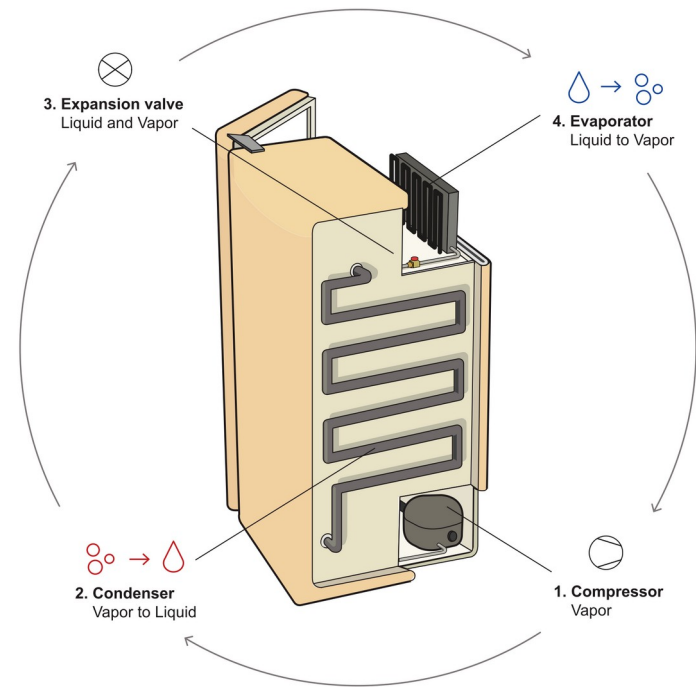
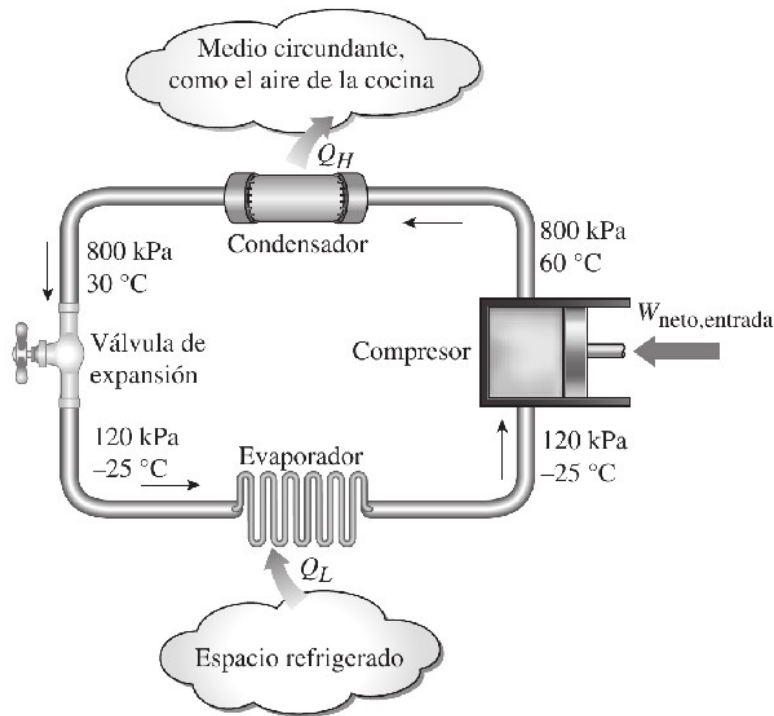
Refrigeradores y bombas de calor

- La **2^{da} Ley** dicta que el **calor** sólo **fluye** de manera **espontánea** desde medios **calientes a fríos**.
- Sin embargo, **sí es posible** hacer hacer **fluir el calor** desde medios **fríos a calientes** al **inyectar trabajo**.
- Lo anterior se realiza diseñando dispositivos especiales.

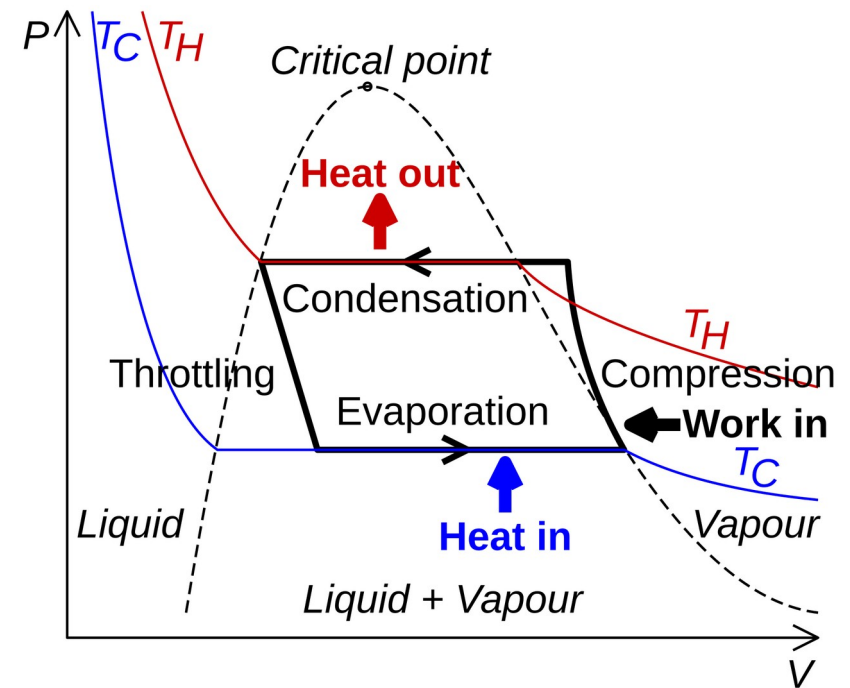
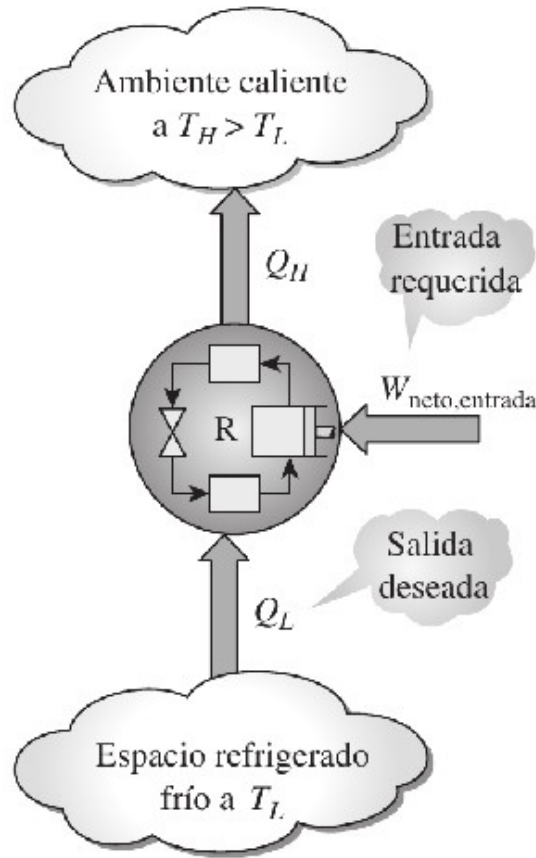
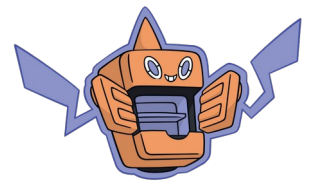
Refrigeradores



- Un ejemplo de una máquina que transfiere calor desde un medio frío a uno caliente es el **refrigerador**.
- Su objetivo es **eliminar calor** Q_L de un espacio frío.
- Los refrigeradores son dispositivos **cíclicos** que utilizan un **refrigerante** como fluido.



Refrigeradores



Ciclo de refrigeración

- En estricto rigor estos son **refrigeradores de compresión**. Otros tipos de refrigeradores también existen.

Coeficiente de desempeño

- La **eficiencia** de un **refrigerador** se expresa en términos del **coeficiente de desempeño** COP_R .

$$\text{COP}_R = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_L}{W_{\text{neto,entrada}}}.$$

- Al imponer **conservación de la energía**:

$$W_{\text{neto,entrada}} = Q_H - Q_L \longrightarrow \boxed{\text{COP}_R = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}}.$$

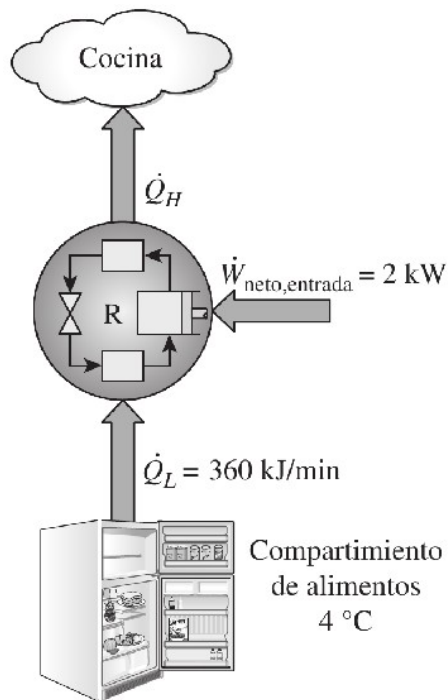
- Utilizando tasas:

$$\text{COP}_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{neto,entrada}}}.$$

- Notar que COP_R **puede ser mayor que uno**.

Ejemplo 1:

- El **compartimiento** para comida de un **refrigerador** se mantiene a **4 °C** al **extraer calor** de éste a una tasa de **360 kJ/min**. Si la **entrada de potencia** requerida al refrigerador es de **2 kW**, determine
 - El **coeficiente de desempeño** del refrigerador.
 - La **tasa de rechazo de calor** hacia la habitación que aloja al refrigerador.



Ejemplo 1:

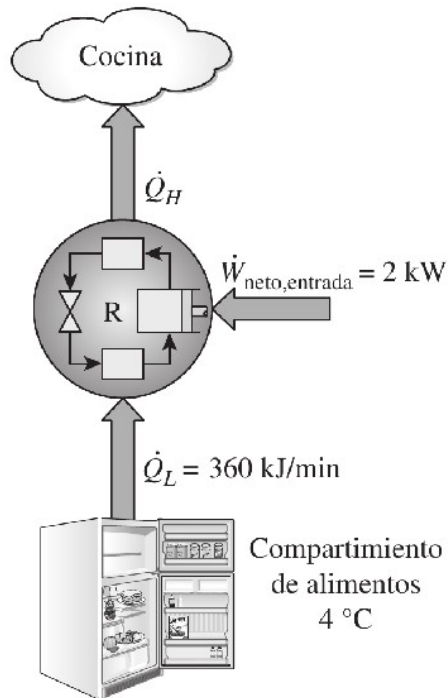
- El **compartimiento** para comida de un **refrigerador** se mantiene a **4 °C** al **extraer calor** de éste a una tasa de **360 kJ/min**. Si la **entrada de potencia** requerida al refrigerador es de **2 kW**, determine
 - El **coeficiente de desempeño** del refrigerador.

El coeficiente de desempeño:

$$\begin{aligned}\text{COP}_R &= \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{neto,entrada}}} = \frac{360 \text{ kJ/min}}{2 \text{ kW}} \\ &= \frac{\frac{360}{60} \text{ kJ/s}}{2 \text{ kJ/s}}\end{aligned}$$

→

$$\boxed{\text{COP}_R = 3}$$

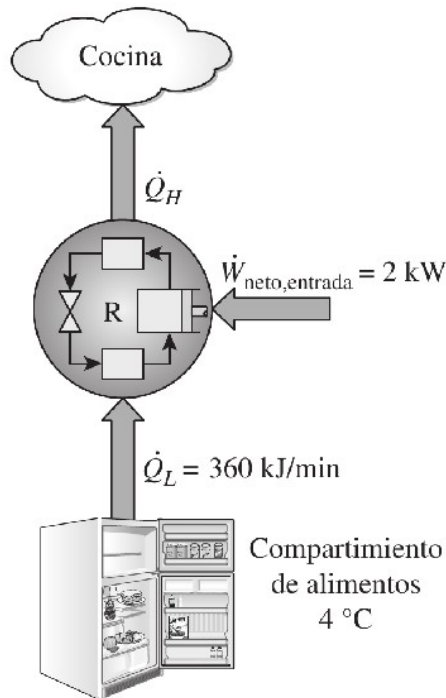


Ejemplo 1:

- El **compartimiento** para comida de un **refrigerador** se mantiene a **4 °C** al **extraer calor** de éste a una tasa de **360 kJ/min**. Si la **entrada de potencia** requerida al refrigerador es de **2 kW**, determine
- La **tasa de rechazo de calor** hacia la habitación que aloja al refrigerador.

Por conservación de la energía:

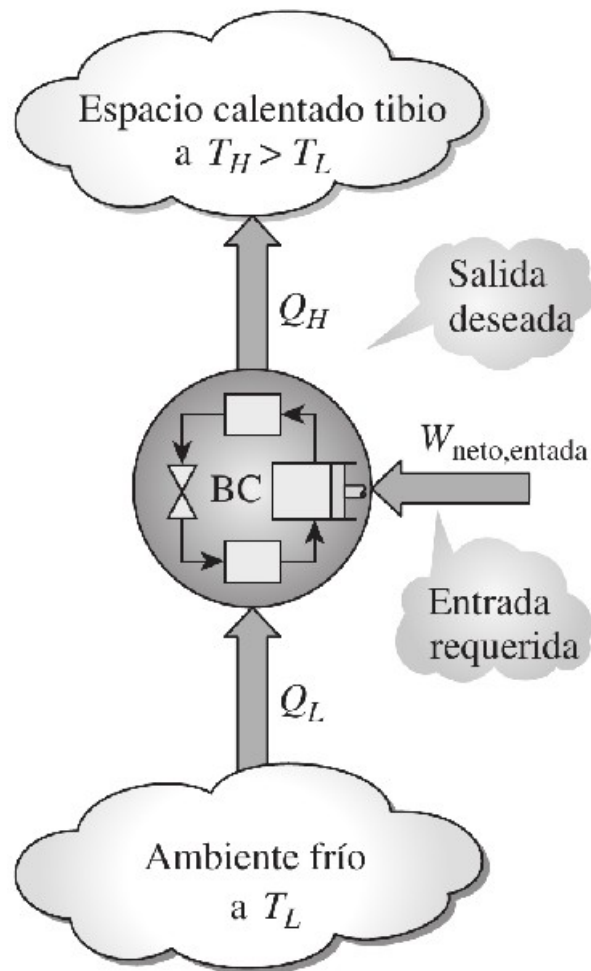
$$\dot{W}_{\text{neto,entrada}} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \quad \longrightarrow \quad \dot{Q}_H = \dot{W}_{\text{neto,entrada}} + \dot{Q}_L$$
$$= 2 \text{ kW} + \frac{360}{60} \text{ kW}$$



$$\longrightarrow \quad \dot{Q}_H = 8 \text{ kW} = 480 \text{ kJ/min}$$

Bombas de calor

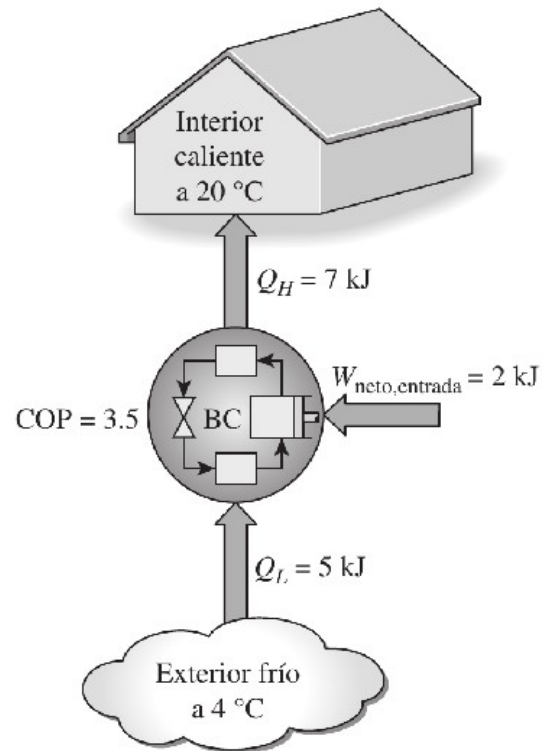
- Otro dispositivo que **transfiere calor desde un medio de baja temperatura a otro de alta** es la **bomba de calor**.



- A grandes rasgos, una bomba de calor funciona igual que un refrigerador.
- Ambos buscan **descargar calor**.
- La diferencia es el objetivo:
 - Un **refrigerador** busca **mantener frío** un espacio.
 - Una **bomba de calor** busca **mantener un espacio calentado**.

Bombas de calor

- Una bomba de calor se puede entender como un refrigerador que tiene su puerta abierta hacia el frío exterior.



Bombas de calor

- Una bomba de calor suele ser más eficiente que otras formas de calefacción.
- Sin embargo, su **instalación** es más **costosa**.



Coeficiente de desempeño

- La medida de **desempeño** de una **bomba de calor** también se expresa en términos del **coeficiente de desempeño** COP_{HP} :

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto,entrada}}}.$$

En los refrigeradores se utiliza Q_L

- Al imponer **conservación de la energía**:

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

- Utilizando tasas:

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

- Se tiene que:

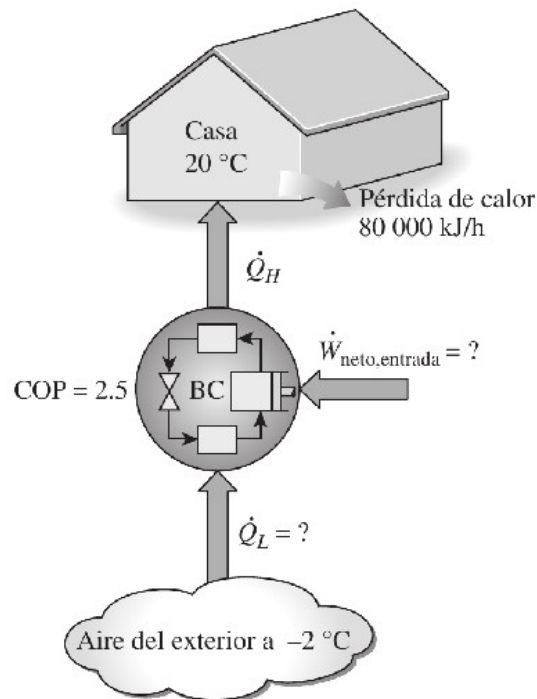
$$\text{COP}_{\text{HP}} = \text{COP}_{\text{R}} + 1.$$

Coeficiente de desempeño

- La mayoría de bombas de calor tienen coeficientes de desempeño entre un rango de 2 y 3.
- Una bomba de calor que **utiliza el aire** como **exterior** se denomina **bomba de calor de fuente de aire**.
- Estas no son apropiadas en climas muy helados ya que no son eficientes bajo la temperatura de congelación.
- Una alternativa son las **bombas de calor de fuente de tierra**, las que utilizan el **suelo** como **exterior**.

Ejemplo 2:

- Se utiliza una **bomba de calor** para satisfacer los requerimientos de calefacción de una casa y **mantenerla a 20 °C**. Se estima que la casa **pierde calor** a una **tasa de 80000 kJ/h** en un día en el que la **temperatura del aire exterior desciende a 2 °C**. Si la bomba de calor en estas condiciones tiene un **COP de 2.5**, determine
 - La **potencia consumida** por la bomba de calor.
 - La **tasa** a la que se **extrae calor** del aire frío exterior.

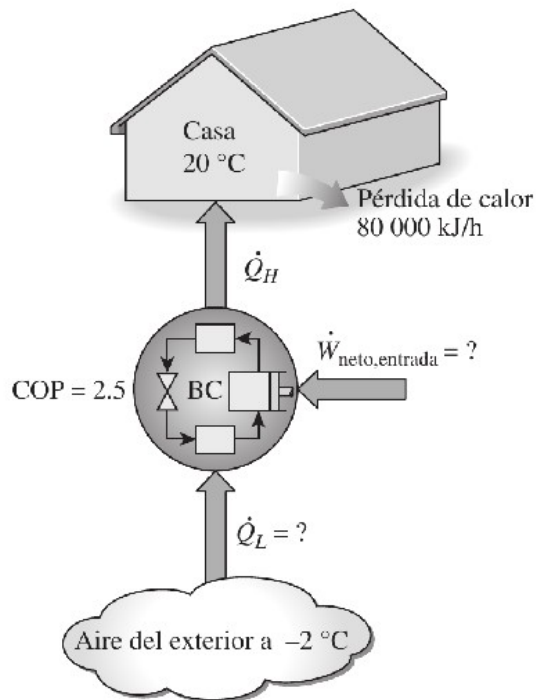


Ejemplo 2:

- Se utiliza una **bomba de calor** para satisfacer los requerimientos de calefacción de una casa y **mantenerla a 20 °C**. Se estima que la casa **pierde calor** a una **tasa de 80000 kJ/h** en un día en el que la **temperatura del aire exterior desciende a 2 °C**. Si la bomba de calor en estas condiciones tiene un **COP** de **2.5**, determine
 - La **potencia consumida** por la bomba de calor.

Utilizamos el coeficiente de desempeño:

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{\text{neto,entrada}}} \longrightarrow \dot{W}_{\text{neto,entrada}} = \frac{\dot{Q}_H}{\text{COP}_{\text{HP}}} = \frac{80000 \text{ kJ/h}}{2.5}$$

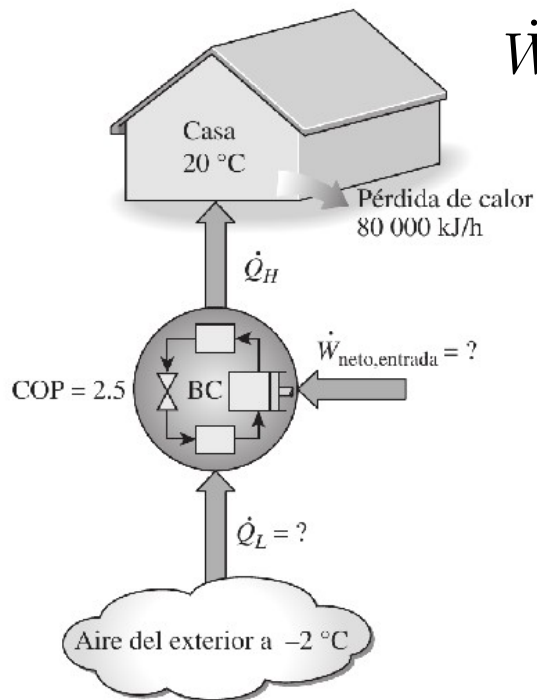


$$\longrightarrow \dot{W}_{\text{neto,entrada}} = 32000 \text{ kJ/h} = 8.9 \text{ kW}$$

Ejemplo 2:

- Se utiliza una **bomba de calor** para satisfacer los requerimientos de calefacción de una casa y **mantenerla a 20 °C**. Se estima que la casa **pierde calor** a una **tasa de 80000 kJ/h** en un día en el que la **temperatura del aire exterior desciende a 2 °C**. Si la bomba de calor en estas condiciones tiene un **COP de 2.5**, determine
 - La **tasa** a la que se **extrae calor** del aire frío **exterior**.

Por conservación de la energía:



$$\begin{aligned}\dot{W}_{\text{neto, entrada}} &= \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \quad \longrightarrow \quad \dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W}_{\text{neto, entrada}} \\ &= (80 - 32) \times 10^3 \text{ kJ/h}\end{aligned}$$

$$\longrightarrow \quad \dot{Q}_L = 48000 \text{ kJ/h} \approx 13 \text{ kW}$$

Aire acondicionado



- Un **espacio** se puede **mantener a baja temperatura** al simplemente **invertir una bomba de calor**.
- Esto usualmente lo llamamos **aire acondicionado**, que es básicamente un refrigerador para un espacio grande.

Ejemplo 3:

- Cuando un hombre regresa a su **casa bien sellada** en un día de verano, encuentra que su casa está a **35 °C**. Enciende el **acondicionador de aire**, que **enfría** toda la casa **a 20 °C** en **30 minutos**. Si el **COP_R** del sistema de acondicionamiento de aire es **2.8**, determine la **potencia** que toma el acondicionador de aire. Suponga que toda la **masa** dentro de la casa equivale a **800 kg de aire** para el cual **$c_v = 0.72 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$** y **$c_p = 1.0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$** .

Ejemplo 3:

- Cuando un hombre regresa a su **casa bien sellada** en un día de verano, encuentra que su casa está a **35 °C**. Enciende el **acondicionador de aire**, que **enfría** toda la casa a **20 °C** en **30 minutos**. Si el **COP_R** del sistema de acondicionamiento de aire es **2.8**, determine la **potencia** que toma el acondicionador de aire. Suponga que toda la **masa** dentro de la casa equivale a **800 kg de aire** para el cual **$c_v = 0.72 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$** y **$c_p = 1.0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$** .

Debido a que la casa está sellada, podemos asumir que el volumen es constante.

Entonces, el calor que se debe sacar de la casa:

$$c_V = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_V$$

$$\begin{aligned} \longrightarrow Q_L &= (mc_V \Delta T)_{\text{casa}} \\ &= 800 \text{ kg } 0.72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} (35 - 20) ^\circ\text{C} \\ &= 8640 \text{ kJ} \end{aligned}$$

La tasa de calor extraído:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_L &= \frac{Q_L}{\Delta t} = \frac{8640 \text{ kJ}}{30 \times 60 \text{ s}} \\ &= 4.8 \text{ kW} \end{aligned}$$

Finalmente, utilizando el coeficiente de desempeño:

$$\dot{W}_{\text{neto,entrada}} = \frac{\dot{Q}_L}{\text{COP}_R} = \frac{4.8 \text{ kW}}{2.8}$$

$$\longrightarrow \boxed{\dot{W}_{\text{neto,entrada}} = 1.714 \text{ kW}}$$

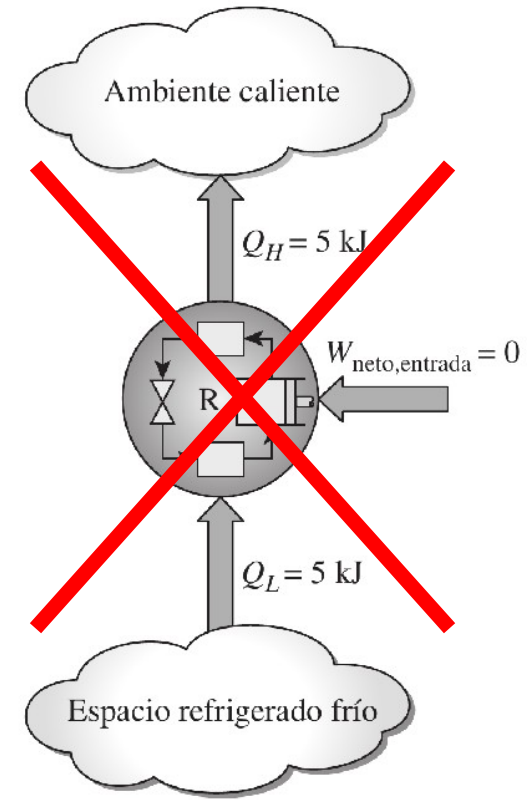
Clase 20: Refrigeradores y bombas de calor

- Refrigeradores y bombas de calor.
- **Enunciado de Clausius.**
- Procesos reversibles e irreversibles.

2^{da} Ley: Enunciado de Clausius

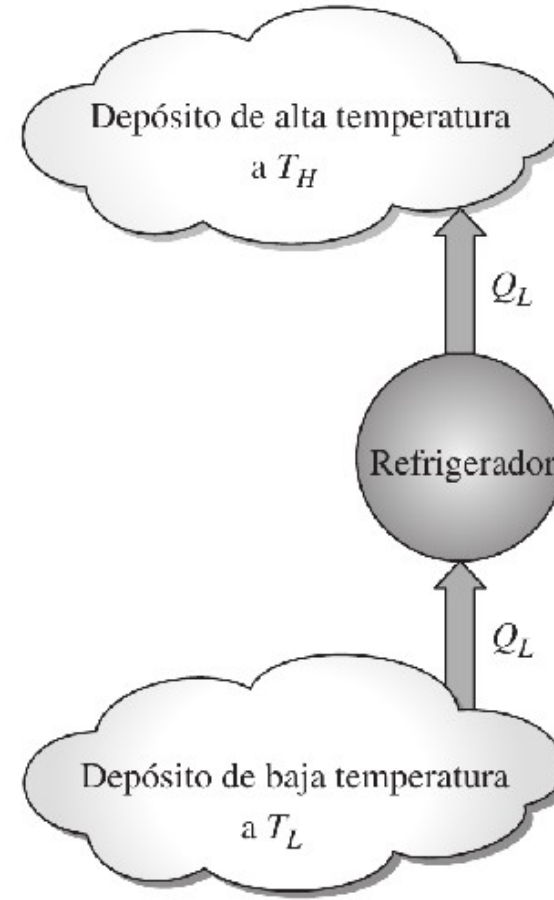
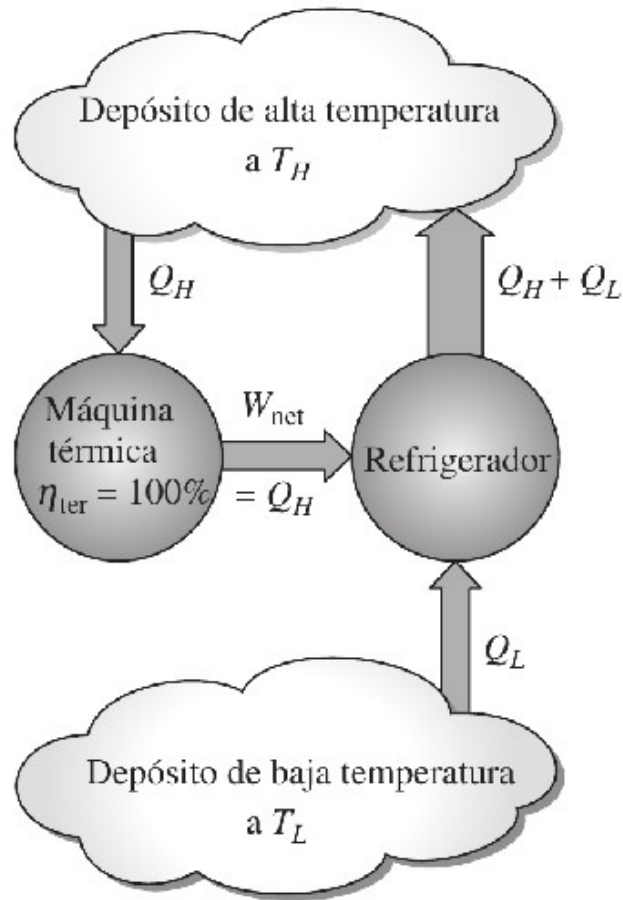
Es **imposible** construir un **dispositivo** que opere en un **ciclo** sin que produzca ningún **otro efecto** que la **transferencia de calor** de un cuerpo de **menor temperatura** a otro de **mayor temperatura**.

- Es decir, es **imposible** construir un **refrigerador** sin **fuentes de energía externa**.



2^{da} Ley: Enunciado de Clausius

- El enunciado de Clausius es equivalente al postulado de Kelvin-Planck.

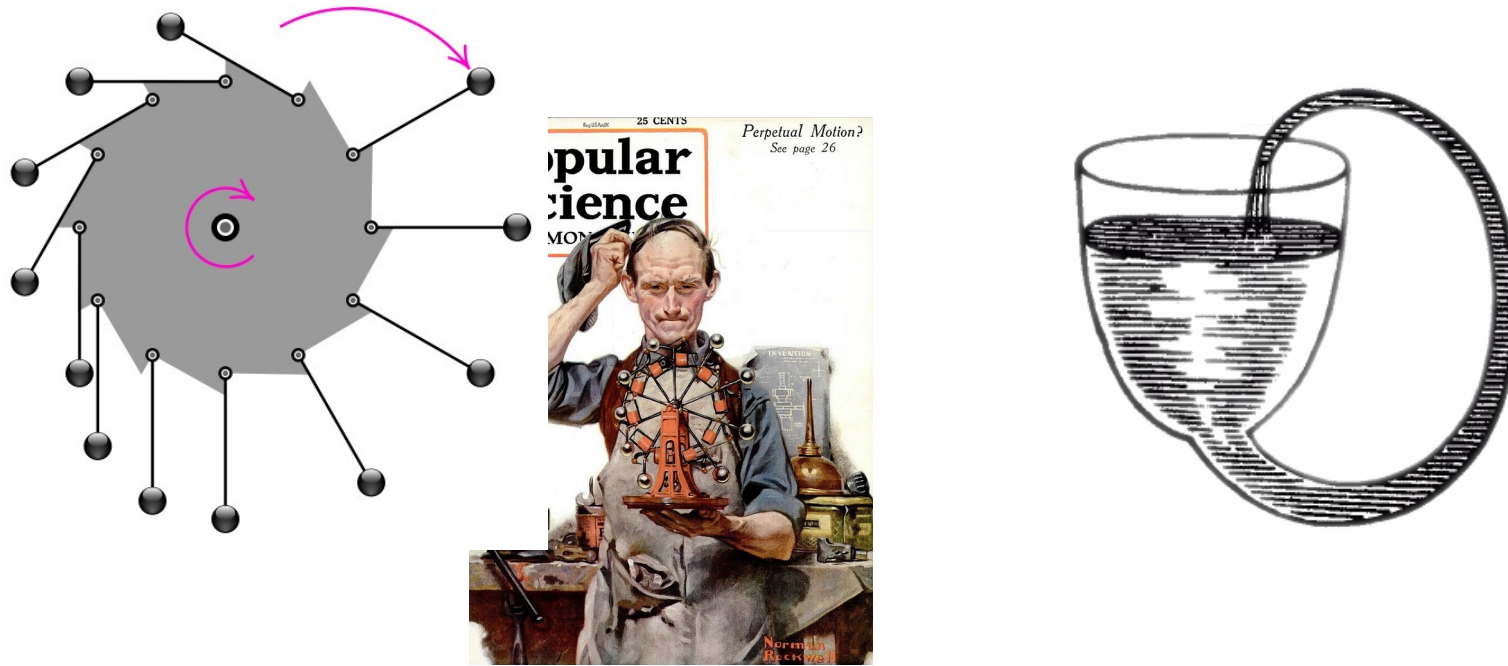


Máquinas de movimiento perpetuo

- Cualquier **dispositivo** que **viola** alguna de las dos **leyes** de la **Termodinámica** se llama **máquina de movimiento perpetuo**.
- **No se sabe** de alguna **máquina de este tipo** que **haya funcionado**.
 - Máq. de mov. perpetuo de **primera clase**: Viola la **1^{ra} Ley**.
 - Máq. de mov. perpetuo de **segunda clase**: Viola la **2^{da} Ley**.
- Una máquina de movimiento perpetuo es **imposible** con las **leyes actuales de la física**.

Máquinas de movimiento perpetuo

- Se han **propuesto muchas máquinas** de mov. perpetuo.



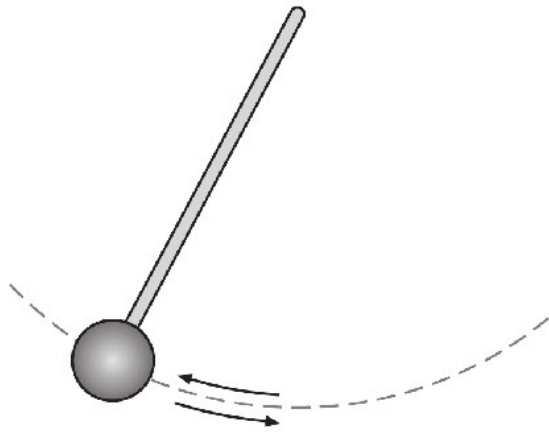
- En la **actualidad** siguen **apareciendo nuevas propuestas**.
- Es importante **no caer en estas propuestas**. A veces pueden parecer convincentes, pero siempre tienen alguna falla que puede ser difícil de encontrar.

Clase 20: Refrigeradores y bombas de calor

- Refrigeradores y bombas de calor.
- Enunciado de Clausius.
- **Procesos reversibles e irreversibles.**

Procesos reversibles e irreversibles

- Un **proceso reversible** se define como un **proceso** que se puede **invertir sin dejar** ningún **rastro** en los **alrededores**.
- Es decir, el **sistema** y los **alrededores vuelven** a sus **estados iniciales** una vez **finalizado** el **proceso inverso**.



a) Péndulo sin fricción



b) Expansión y compresión de un gas en cuasiequilibrio

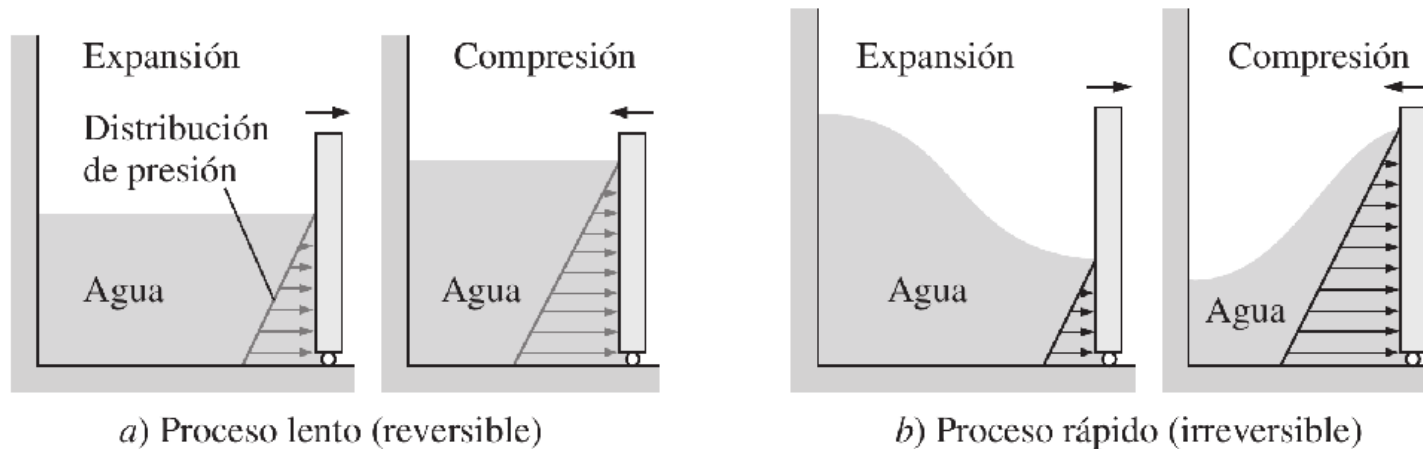
- Los **procesos** que **no son reversibles** se denominan **procesos irreversibles**.

Procesos reversibles e irreversibles

- Notar que **es posible volver al estado inicial** tanto en procesos **reversibles** como **irreversibles**.
- La **diferencia** es si se produce o no un cambio en los **alrededores**.
- Los **procesos reversibles** en realidad no ocurren en la naturaleza, sólo **son idealizaciones** de procesos reales.
- Sin embargo, son **fáciles de analizar** y pueden ser buenas **aproximaciones** de **procesos reales**.

Procesos reversibles e irreversibles

- Si un **proceso real** ocurre **muy lentamente**, tal que el sistema siempre está muy **cerca** de un **estado de equilibrio**, el proceso se puede **aproximar** como **reversible**.



- Los **procesos reversibles** entregan el **máximo** o **consumen** el **mínimo** de **trabajo** dependiendo del objetivo de la máquina.
- Por lo tanto, pueden ser considerados como **límites teóricos** para los irreversibles correspondientes. Es decir, están relacionados con el concepto de **eficiencia**.

Irreversibilidades

- Los **factores** que **causan** que un proceso sea **irreversible** se llaman irreversibilidades:
 - Fricción.
 - Expansión libre.
 - Mezclado de dos fluidos.
 - Resistencia eléctrica.
 - Deformación inelástica de sólidos.
 - Reacciones químicas.

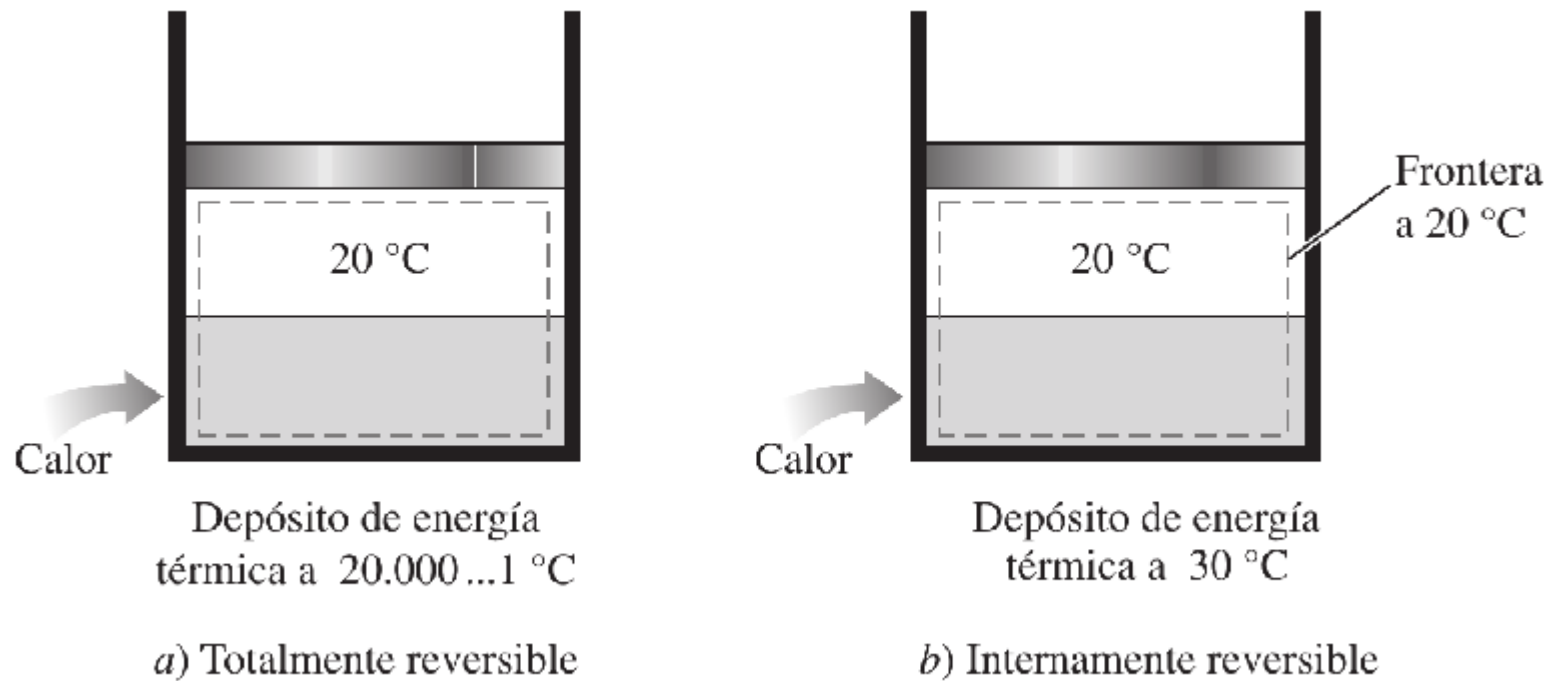


La fricción hace que un proceso sea irreversible.

Procesos reversibles e irreversibles

- **Proceso internamente reversible:**
 - **No ocurren irreversibilidades dentro de las fronteras del sistema** durante el proceso.
 - Es decir, las **trayectorias de ida y vuelta son idénticas**. Ej: Proceso de cuasiequilibrio.
- **Proceso externamente reversible:**
 - **No ocurren irreversibilidades fuera de las fronteras del sistema** durante el proceso.
 - Ej: Transferencia de calor entre un sistema y depósito.
- **Proceso totalmente reversible:**
 - **No ocurren irreversibilidades** ni dentro ni fuera del sistema.

Procesos reversibles e irreversibles



- Ambos procesos son internamente reversibles (procesos isotérmicos con misma trayectoria de ida y vuelta).
- Sin embargo, el proceso a) es también externamente reversible ya que el cambio de temperatura del depósito es infinitesimal.

Conclusiones

- Revisamos los **refrigeradores y bombas de calor**.
- Postulamos el **enunciado de Clausius** de la 2^{da} Ley de la Termodinámica.
- Definimos los **procesos reversibles e irreversibles**.
- Próxima clase:
 - Ciclo de Carnot.