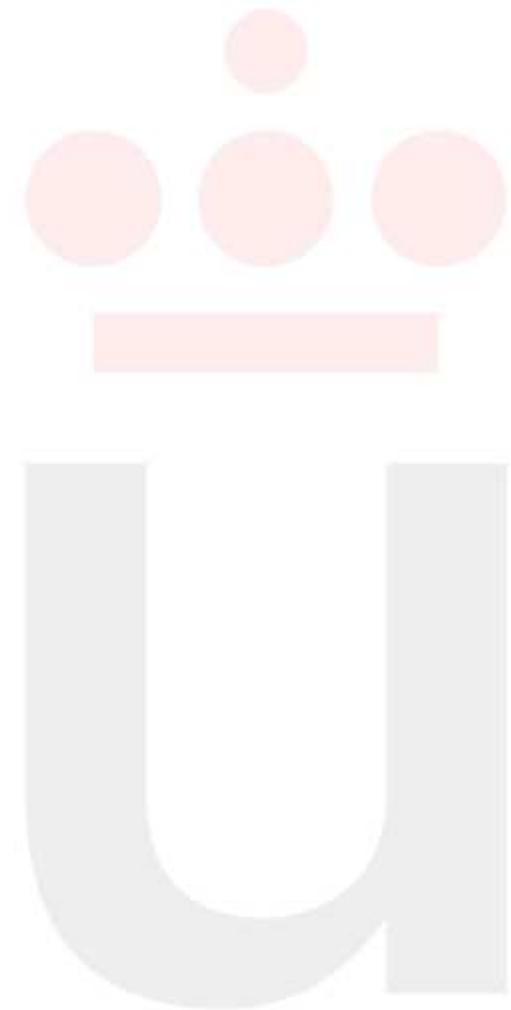


Bloque I: Termotecnia

Tema 4. Máquinas Térmicas III

1. Máquinas Frigoríficas
2. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor
3. Ciclo de refrigeración por absorción
4. Ciclo de refrigeración por compresión de gas



Tema 4. Ciclos de refrigeración

Máquinas frigoríficas

Fundamento

Transporta calor desde un recinto a baja temperatura (foco frío) al medio ambiente (foco caliente) a más temperatura.



Necesidad de realizar trabajo para invertir la tendencia natural (transporte calor desde foco caliente al frío)

Transporte de calor mediante un fluido denominado refrigerante

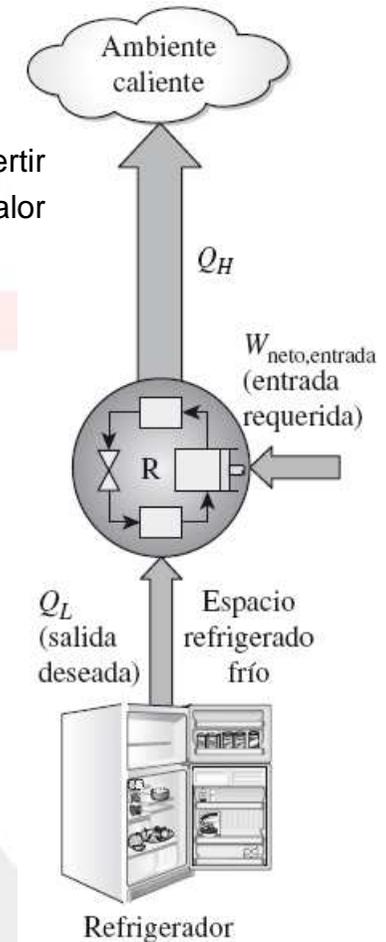
Dispositivos

- Refrigeradores: Mantener el espacio refrigerado a una temperatura baja al extraer calor de él. La descarga de calor a una medio de alta temperatura es una parte necesaria de la operación, no es el propósito.
- Bombas de Calor: Mantener un espacio calentado a alta temperatura.

$$COP_R = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{\text{Efecto de enfriamiento}}{\text{Entrada de trabajo}} = \frac{Q_L}{W_{\text{neto}}}$$

$$COP_R = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{\text{Efecto de calentamiento}}{\text{Entrada de trabajo}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto}}}$$

Coficiente de desempeño



Tema 4. Ciclos de refrigeración

Máquinas frigoríficas

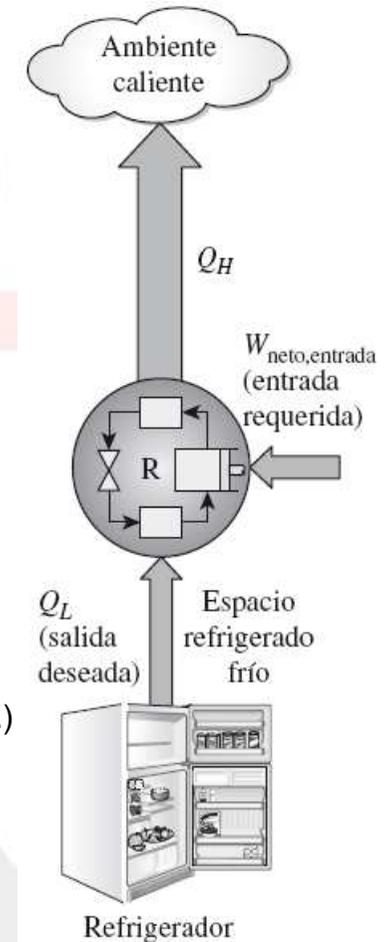
$$COP_R = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{\text{Efecto de enfriamiento}}{\text{Entrada de trabajo}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{neto}}$$

Clasificación

- Máquinas frigoríficas por compresión: Funcionan consumiendo energía mecánica. Es el inverso de una máquina térmica. Pueden utilizar como fluido refrigerante un vapor o un gas.
- Máquinas frigoríficas por absorción: Emplean dos fluidos, uno como absorbente del fluido refrigerante.

Aplicaciones

- *Procesos químicos a baja T* (síntesis de amoníaco, separación de los componentes del aire, etc.)
- *Fabricación y conservación de alimentos.*
- *Acondicionamiento de aire.*



Tema 4. Ciclos de refrigeración

Ciclo Invertido de Carnot

Refrigerador de Carnot

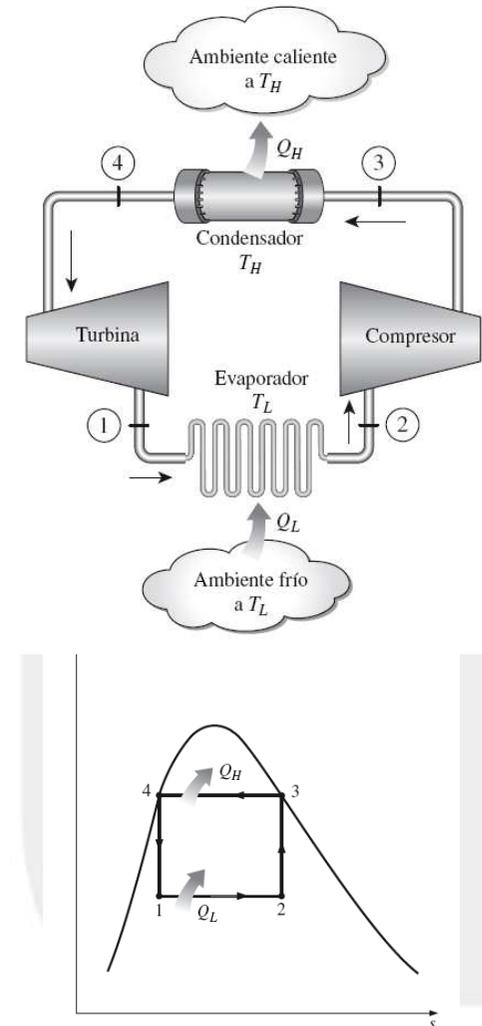
1-2 Absorción de calor isotérmica. Se realiza en un evaporador. El refrigerante absorbe calor (Q_L) a temperatura constante de una fuente de baja temperatura (T_L), evaporándose parcialmente.

2-3 Compresión isentrópica. Se realiza en un compresor donde se aporta un trabajo al fluido (W_{entrada}), por lo que aumenta su presión y temperatura desde la temperatura inferior (T_L) a una temperatura superior (T_H).

3-4 Rechazo de calor isotérmico. El fluido cede calor (Q_H) al foco caliente sin cambio de T . Tiene lugar en el condensador.

4-1 Expansión isentrópica. El fluido se expande en una turbina (disminuye su T y P) produciendo un trabajo (W_{salida}).

El refrigerante cambia de un estado de vapor saturado a un estado de líquido saturado en el condensador durante el proceso 3-4.



Tema 4. Ciclos de refrigeración

Ciclo Invertido de Carnot

Coeficiente de Operación

$$(q_{entrada} - q_{salida}) + (w_{entrada} - w_{salida}) = \Delta h = h_{entrada} - h_{salida}$$

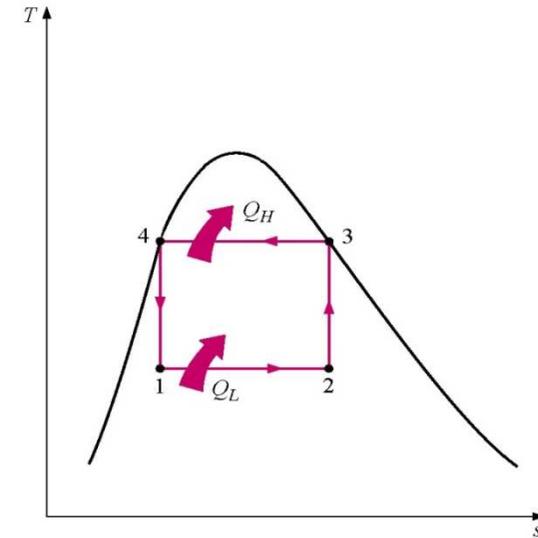
$$COP_{Carnot} = \frac{\text{Efecto de refrigerante}}{\text{Trabajo neto}} = \frac{Q_L}{W_T - W_C} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_T - \dot{W}_C}$$

$$\left(T_L = T_F \quad T_H = T_C \right)$$

$$COP_{Carnot} = \frac{T_F (s_1 - s_2)}{T_C (s_1 - s_4) - T_F (s_3 - s_2)} \quad \left(s_1 - s_4 = s_3 - s_2 \right)$$

$$COP_{Carnot} = \frac{T_F (s_1 - s_2)}{(T_C - T_F)(s_1 - s_4)} = \frac{T_F}{(T_C - T_F)} \Rightarrow COP_{Carnot} = \frac{1}{1 - T_F / T_C} \quad \text{MÁXIMO TEÓRICO}$$

El coeficiente de operación aumenta cuando la diferencia entre ambas temperaturas disminuye.



Tema 4. Ciclos de refrigeración

Ciclo Invertido de Carnot

Dificultades de aplicación del ciclo de Carnot

- Es difícil detener la evaporación: Se suele obtener mezcla líquido-vapor que puede averiar el compresor (2-3).



Requiere un compresor que opere con dos fases.

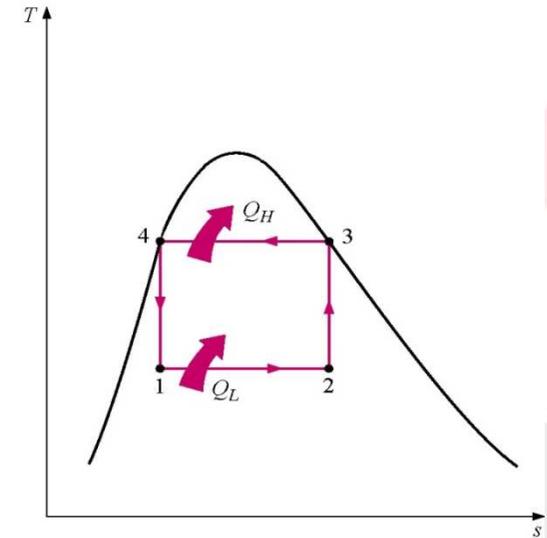
Vaporización total del refrigerante en el evaporador para que la compresión sea de una mezcla seca.

- Expansión de un líquido (etapa 4-1): Se produce muy poco trabajo. Alto contenido de humedad.



Sustitución la turbina por una válvula de expansión

Aparentemente, los problemas indicados se resolverían operando con un el ciclo invertido de Carnot fuera de la región de saturación. En este caso, resultaría imposible mantener las condiciones isotérmicas para los procesos de intercambio de calor.



Tema 4. Ciclos de refrigeración

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor

- Refrigeradores
- Sistemas de acondicionamiento de aire
- Bombas de calor

1-2 Compresión isentrópica del refrigerante en un compresor.

El refrigerante entra como vapor saturado y se comprime hasta la presión del condensador. La temperatura aumenta hasta un valor superior a la del medio circundante.

2-3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

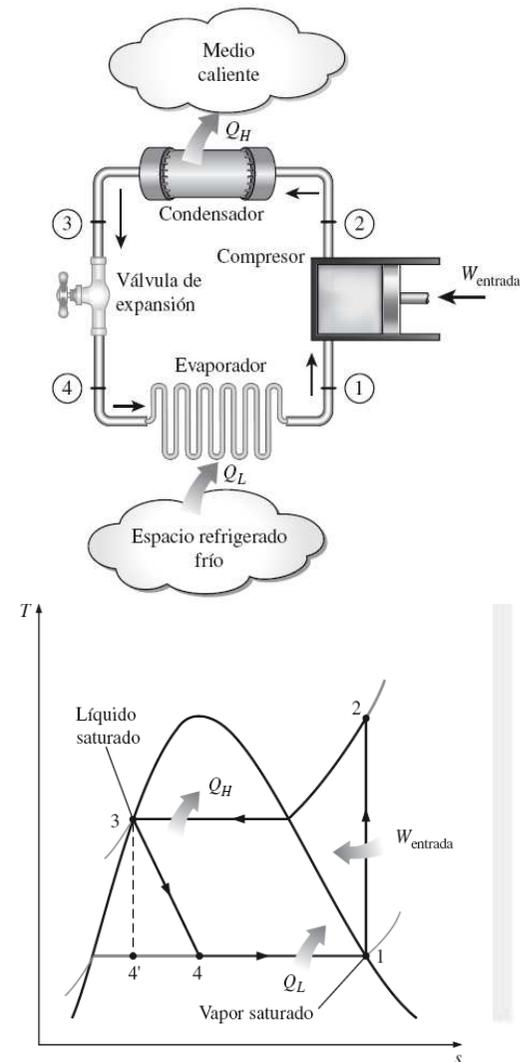
Condensación y enfriamiento del refrigerante. El fluido entra como vapor sobrecalentado y sale como líquido saturado.

3-4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión.

Expansión isoentálpica en la válvula. El líquido saturado se hace pasar por una válvula o tubo capilar hasta estrangularlo a la presión del evaporador. La temperatura del refrigerante disminuye hasta un valor inferior a la del espacio refrigerado.

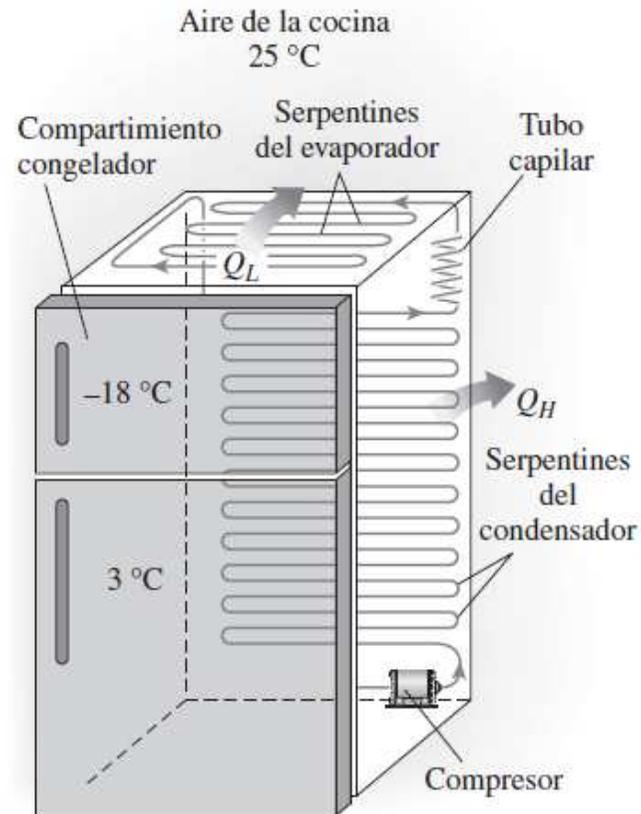
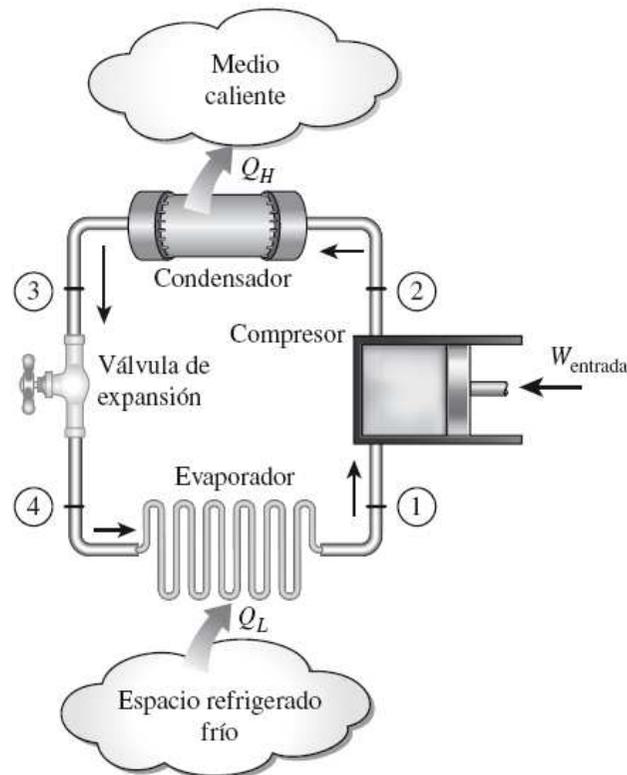
4-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador.

Evaporación del refrigerante a presión constante. Entra como vapor húmedo de baja calidad y al absorber calor sale como vapor saturado.



Tema 4. Ciclos de refrigeración

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor



Refrigerador doméstico común

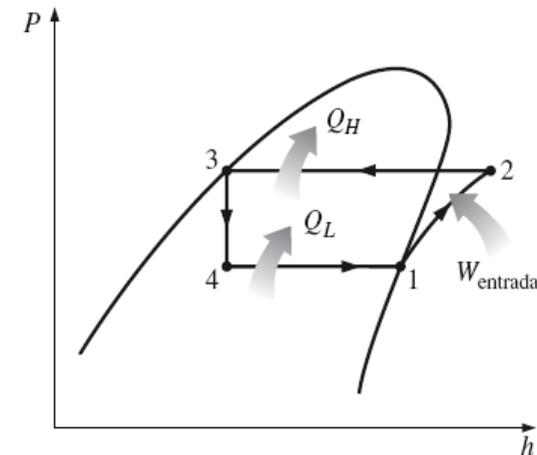
Tema 4. Ciclos de refrigeración

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor

El COP de un refrigerador mejora entre 2 y 4 % por cada °C que eleva la temperatura de evaporación o que disminuye la temperatura de condensación.

$$(q_{\text{entrada}} - q_{\text{salida}}) + (w_{\text{entrada}} - w_{\text{salida}}) = \Delta h = h_{\text{entrada}} - h_{\text{salida}}$$

$$COP_R = \frac{q_L}{w_{\text{neto, entrada}}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$



Refrigerantes más comunes: derivados halogenados de hidrocarburos (CFCs, HCFCs, etc.)

- ✓ La selección del refrigerante se realiza en base a su relación temperatura-presión de saturación en el rango de aplicación. En general, es conveniente no trabajar con presiones excesivamente bajas en el evaporador ni excesivamente altas en el condensador.
- ✓ Deben ser estables, no tóxicos, ni inflamables, ni corrosivos

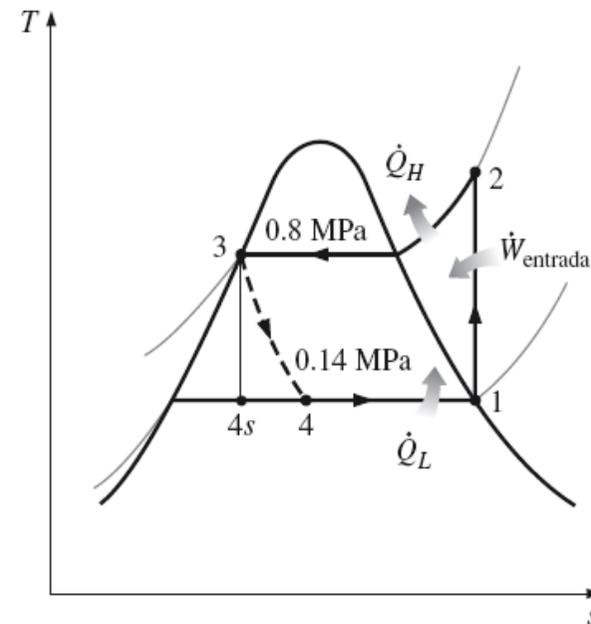
Tema 4. Ciclos de refrigeración

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor

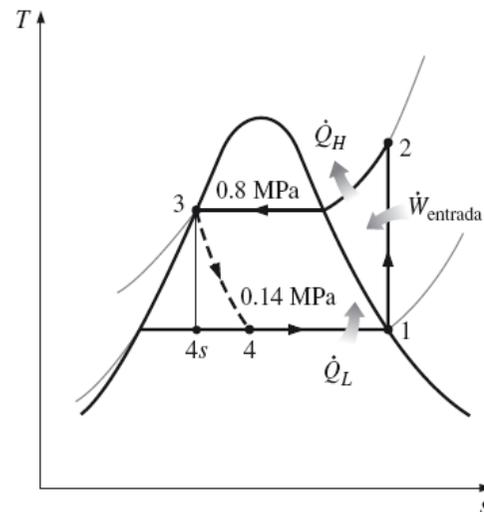
Problema (Ejemplo 11-1)

En un refrigerador se utiliza refrigerante 134a como fluido de trabajo, y opera en un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor entre 0.14 y 0.8 MPa. Si el flujo másico del refrigerante es de 0.05 kg/s, determine:

- la tasa de eliminación de calor del espacio refrigerado
- la entrada de potencia al compresor.
- la tasa de rechazo de calor al ambiente
- el COP del refrigerador.



Tema 4. Ciclos de refrigeración



Problema (Ejemplo 11-1)

$$\begin{aligned} P_1 = 0.14 \text{ MPa} &\longrightarrow h_1 = h_g \text{ a } 0.14 \text{ MPa} = 239.16 \text{ kJ/kg} \\ & s_1 = s_g \text{ a } 0.14 \text{ MPa} = 0.94456 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ P_2 = 0.8 \text{ MPa} \left. \begin{array}{l} s_2 = s_1 \end{array} \right\} & h_2 = 275.39 \text{ kJ/kg} \\ P_3 = 0.8 \text{ MPa} &\longrightarrow h_3 = h_f \text{ a } 0.8 \text{ MPa} = 95.47 \text{ kJ/kg} \\ h_4 \cong h_3 \text{ (estrangulamiento)} &\longrightarrow h_4 = 95.47 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

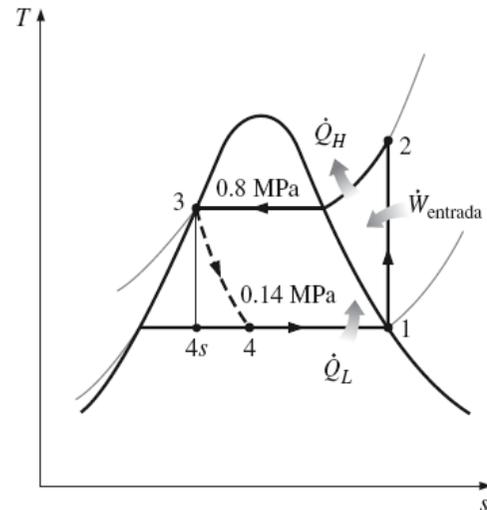
a) La tasa de eliminación de calor del espacio refrigerado y la entrada de potencia al compresor se determinan por sus definiciones:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4) = (0.05 \text{ kg/s})[(239.16 - 95.47) \text{ kJ/kg}] = 7.18 \text{ kW}$$

y

$$\dot{W}_{\text{entrada}} = \dot{m}(h_2 - h_1) = (0.05 \text{ kg/s})[(275.39 - 239.16) \text{ kJ/kg}] = 1.81 \text{ kW}$$

Tema 4. Ciclos de refrigeración



Problema (Ejemplo 11-1)

b) La tasa de rechazo de calor del refrigerante al ambiente es

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_3) = (0.05 \text{ kg/s})[(275.39 - 95.47) \text{ kJ/kg}] = 9.0 \text{ kW}$$

También puede ser determinado de

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_{\text{entrada}} = 7.18 + 1.81 = 8.99 \text{ kW}$$

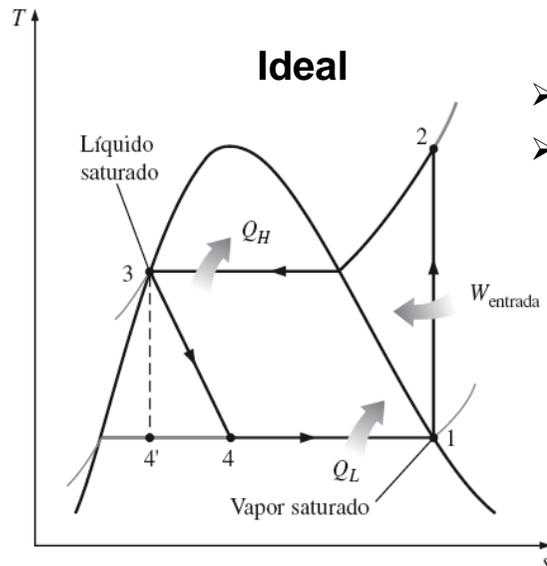
c) El coeficiente de desempeño del refrigerador es

$$\text{COP}_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{entrada}}} = \frac{7.18 \text{ kW}}{1.81 \text{ kW}} = 3.97$$

Es decir, este refrigerador elimina 4 unidades de energía térmica del espacio refrigerado por cada unidad de energía eléctrica que consume.

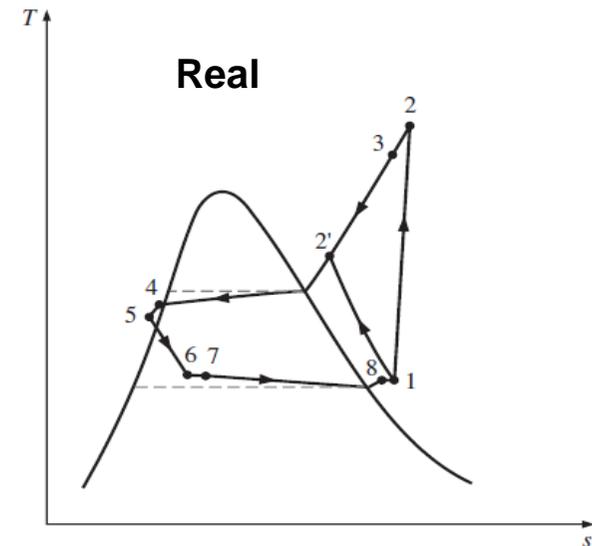
Tema 4. Ciclos de refrigeración

El ciclo real de refrigeración por compresión de vapor



Irreversibilidades y Pérdidas

- Fricción del fluido (pérdidas de carga)
- Transferencias de calor con los alrededores

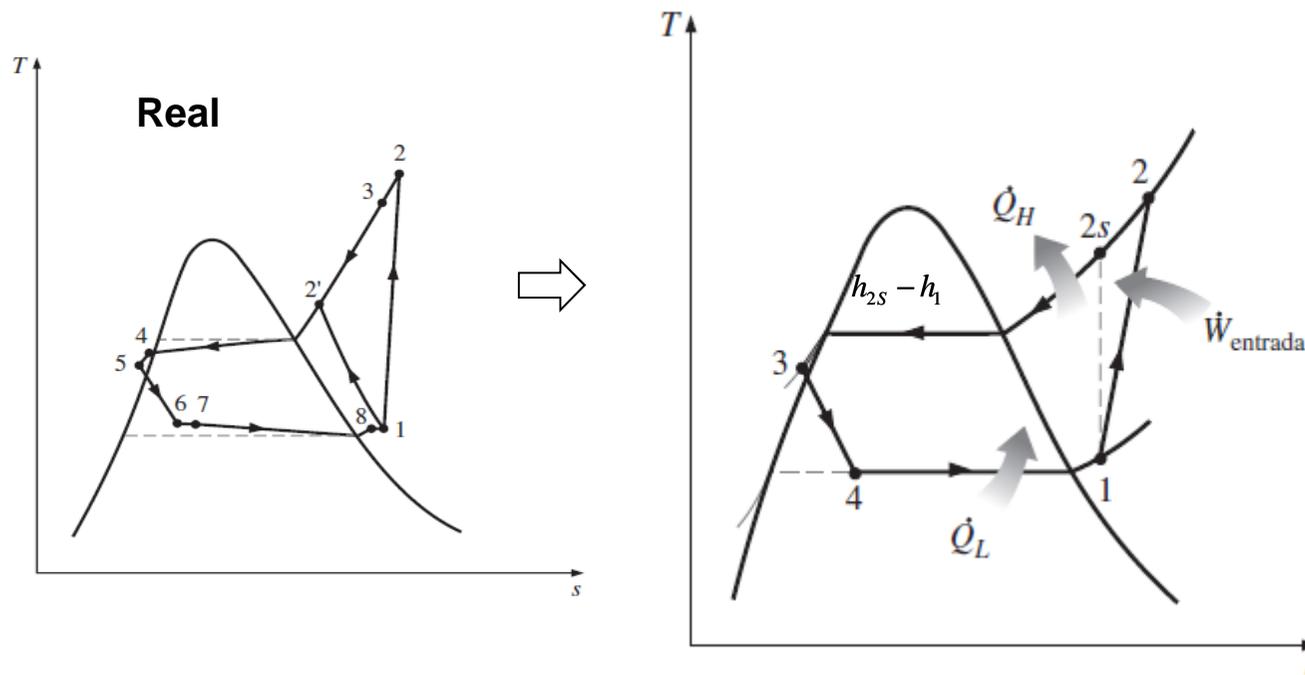


- El refrigerante sale del evaporador como vapor saturado.
- El proceso de compresión (1-2) es isentrópico.
- El refrigerante sale del condensador como líquido saturado.

- Sobrecalentamos el refrigerante y aseguramos su total evaporación.
- Reducción de la línea de conexión entre Evaporador y Compresor.
- El proceso de compresión (1-2') requiere menor entrada de trabajo.
- Subenfriamiento del refrigerante y aseguramos su total condensación.

Tema 4. Ciclos de refrigeración

El ciclo real de refrigeración por compresión de vapor



$$\eta_C = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{neto}}}$$

Tema 4. Ciclos de refrigeración

Modificaciones al ciclo de refrigeración por compresión de vapor

Dificultades de aplicación del ciclo ideal de refrigeración

- Algunas aplicaciones industriales requieren temperaturas moderadamente bajas, y el intervalo de temperatura que involucran es demasiado grande para que un ciclo simple de refrigeración por compresión de vapor resulte práctico.
- Un gran intervalo de temperatura significa también un gran nivel de presión en el ciclo y un pobre desempeño en un compresor recíprocante.



Ciclos de refrigeración por etapas.

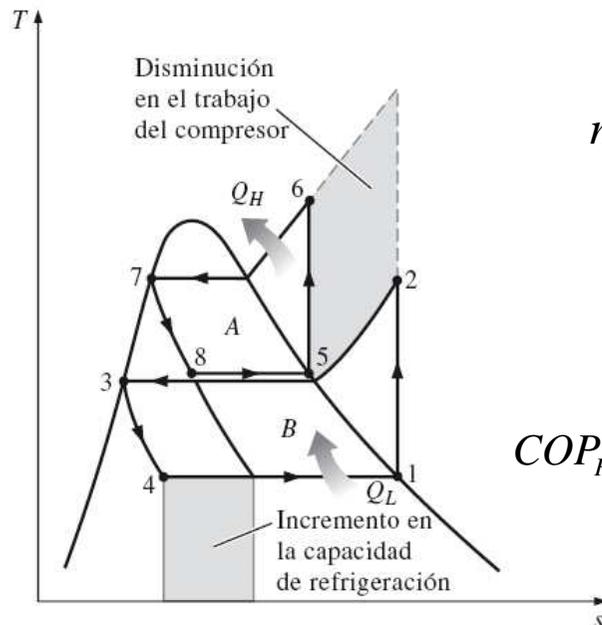
Ciclos de refrigeración en cascada.

Tema 4. Ciclos de refrigeración

Sistema innovadores de refrigeración por compresión de vapor

Ciclos de refrigeración en cascada de dos etapas

Ambos ciclos de se conectan mediante un intercambiador de calor aislado térmicamente.

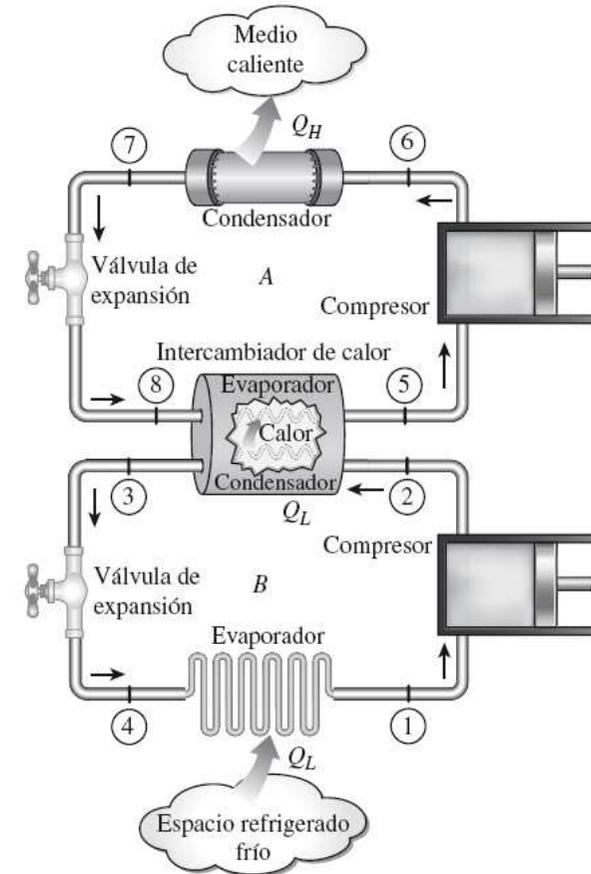


$$\dot{q}_{A,entrada} = \dot{q}_{B,salida}$$

$$\dot{m}_A (h_5 - h_8) = \dot{m}_B (h_2 - h_3)$$

$$COP_{R,cascada} = \frac{\dot{q}_L}{\dot{W}_{neto,entrada}}$$

$$COP_{R,cascada} = \frac{\dot{m}_B (h_1 - h_4)}{\dot{m}_A (h_6 - h_5) + \dot{m}_B (h_2 - h_1)}$$



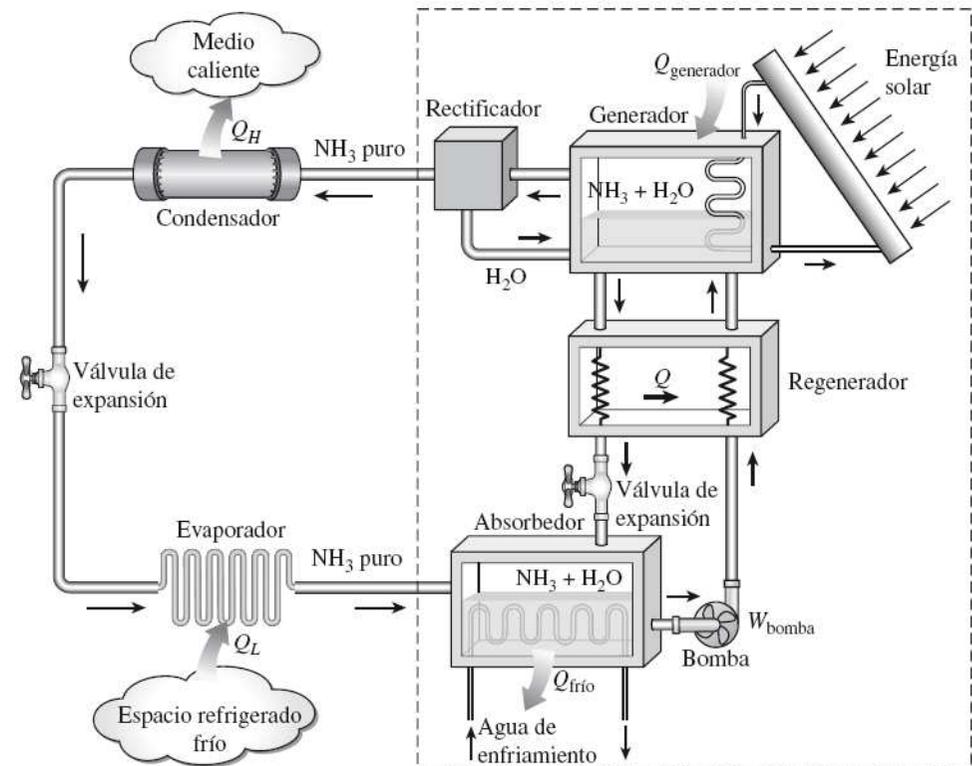
Tema 4. Ciclos de refrigeración

El ciclo de refrigeración por absorción

Absorción de un refrigerante por un medio de transporte.

- Se comprime un líquido: Absorción del refrigerante vapor sobre un líquido.
- Compresión de un líquido (menor coste de compresión).
- Necesidad de un sistema de separación absorbente-refrigerante antes del condensador. Se requiere aporte de calor (coste energético)

Refrigerante	Disolvente (absorbente)
Amoníaco	Agua
Agua	Bromuro de litio

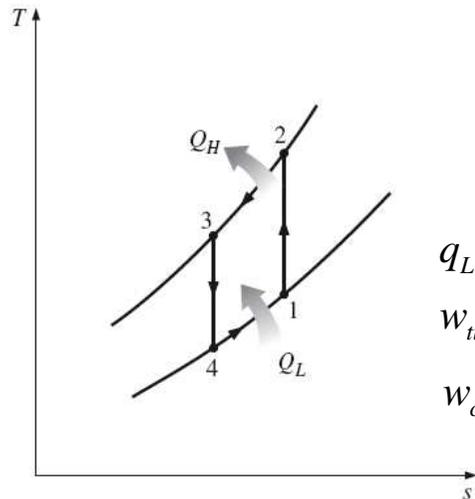


Tema 4. Ciclos de refrigeración

El ciclo de refrigeración de gas: Ciclo Brayton Invertido

- El refrigerante (aire) sigue el ciclo Brayton invertido
- El agente refrigerante NO cambia de estado durante el recorrido del ciclo.
- Se utilizan en sistemas donde se deben conseguir temperaturas muy bajas.

$$COP_R = \frac{q_L}{W_{neto,entrada}} = \frac{q_L}{W_{compresor,entrada} - W_{turbina,salida}}$$



$$q_L = h_1 - h_4$$

$$W_{turbina,salida} = h_3 - h_4$$

$$W_{compresor,salida} = h_2 - h_1$$

