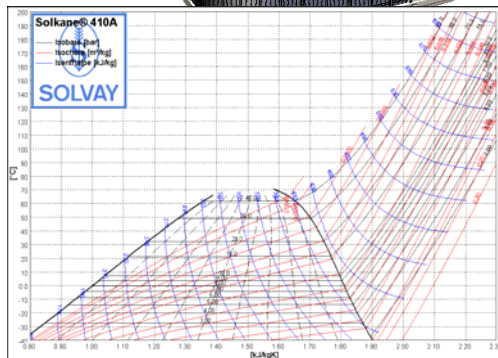


# Máquinas de Refrigeración



## Contenidos

### Clase 1

- Introducción
- Ciclo con 2 fuentes
- Ciclo reversible
- Ciclo inverso de Carnot
- Irreversibilidades externas
- Compresión en régimen seco
- Irreversibilidades internas

### Clase 2

- Refrigerantes
- Ciclos en cascada
- Compresión multi-etapa
- Absorción
- Sistemas con gas

# Introducción

Objetivo: *Transferir calor desde una temperatura baja hacia otra más elevada, por ejemplo para mantener una región del espacio a una temperatura inferior a la del ambiente.*

Aplicaciones:

- ✓ Aire acondicionado
- ✓ Conservación de alimentos
- ✓ Licuefacción de gases
- ✓ Producción de hielo



## Ciclo con dos fuentes

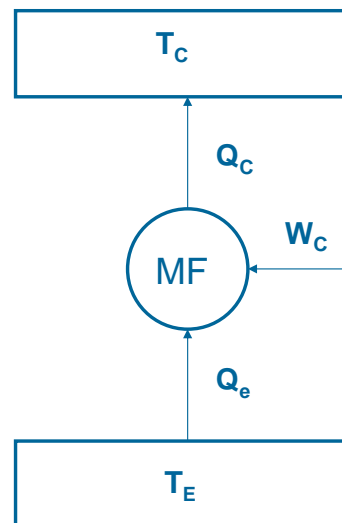
$$T_c > T_e$$

$$Q_c = Q_e + W_C$$

$$COP_{mf} = \frac{Q_e}{W_C} = \frac{Q_e}{Q_c - Q_e}$$

$$COP_{bc} = \frac{Q_c}{W_C} = \frac{Q_c}{Q_c - Q_e}$$

$$COP_{bc} - COP_{mf} = 1$$



## Ciclo reversible con dos fuentes

$$\Delta S_u = \Delta S_{fc} + \Delta S_{ff} + \Delta S_{mf} = 0$$

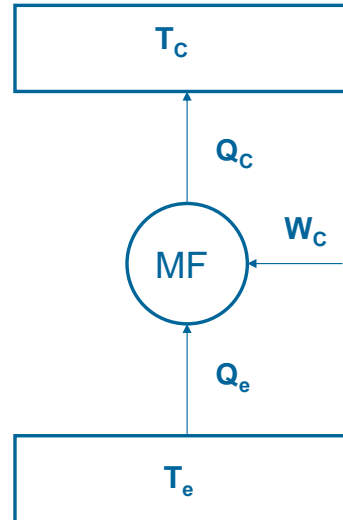
$$\Delta S_{mf} = 0 \quad \Delta S_{fc} = -\Delta S_{ff} = \Delta S$$

$$\Delta S_{fc} = \frac{Q_c}{T_c} \quad \Delta S_{ff} = \frac{-Q_e}{T_e}$$

$$Q_c = \Delta S \cdot T_c \quad Q_e = \Delta S \cdot T_e$$

$$COP_{mf} = \frac{Q_e}{Q_c - Q_e} = \frac{T_e}{T_c - T_e}$$

$$COP_{bc} = \frac{Q_c}{Q_c - Q_e} = \frac{T_c}{T_c - T_e}$$



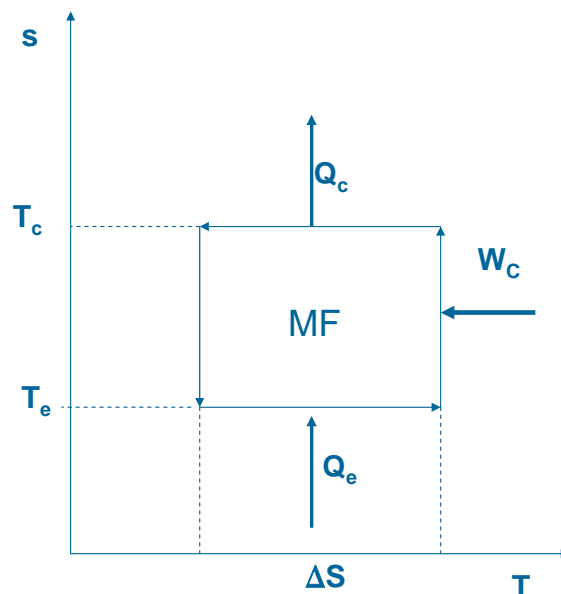
## Ciclo inverso de Carnot

$$Q_c = T_c \cdot \Delta S$$

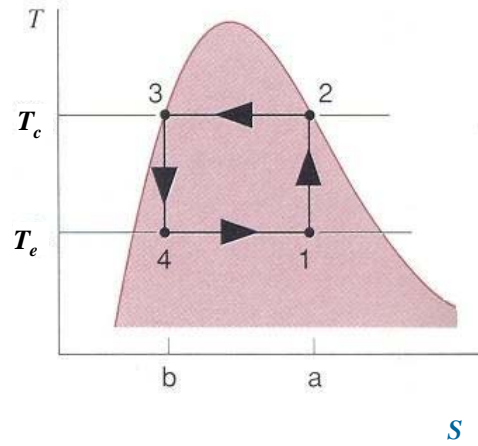
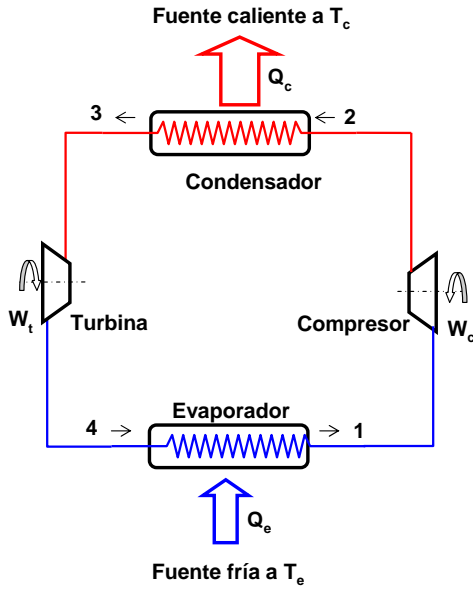
$$Q_e = T_e \cdot \Delta S$$

$$COP_{mf} = \frac{Q_e}{Q_c - Q_e} = \frac{T_e}{T_c - T_e}$$

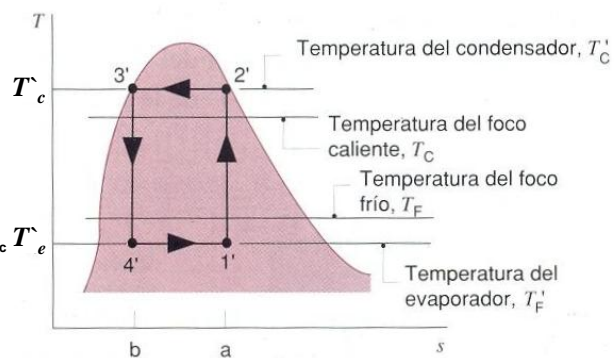
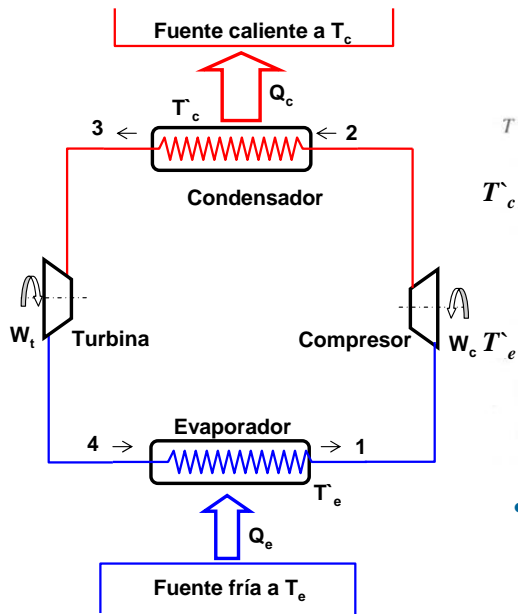
$$COP_{bc} = \frac{Q_c}{Q_c - Q_e} = \frac{T_c}{T_c - T_e}$$



## Ciclo de Carnot con vapor

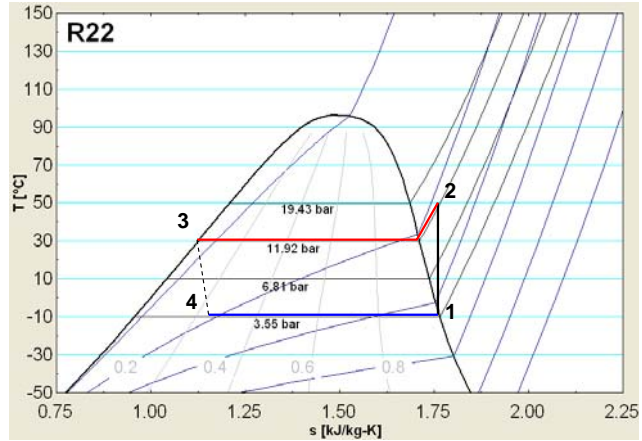
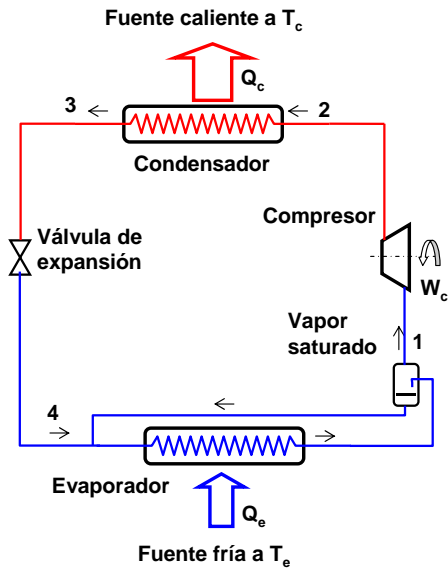


## Irreversibilidades en flujos de Q



- Diferencia finita de temperaturas

## Compresión en régimen seco



- Se desprecian la variación de energía cinética y potencial
- Balances de energía en los componentes

## Compresión en régimen seco

$$q = \Delta h + w_c$$

$$q_e = |h_1 - h_4|$$

$$w_c = |h_2 - h_1|$$

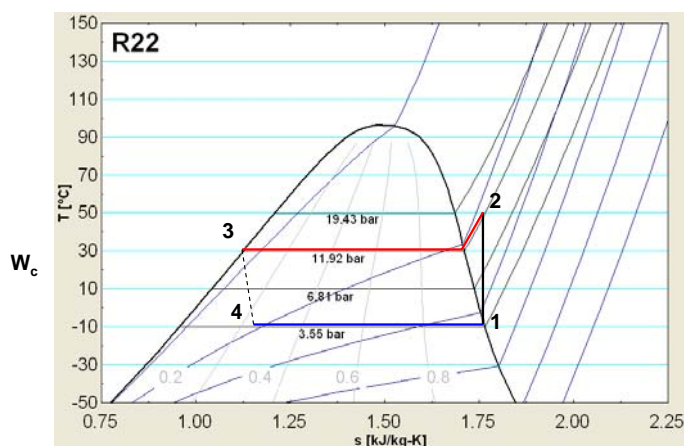
$$q_c = |h_3 - h_2|$$

$$h_4 = h_3$$

$$COP_{mf} = \frac{Q_e}{W_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

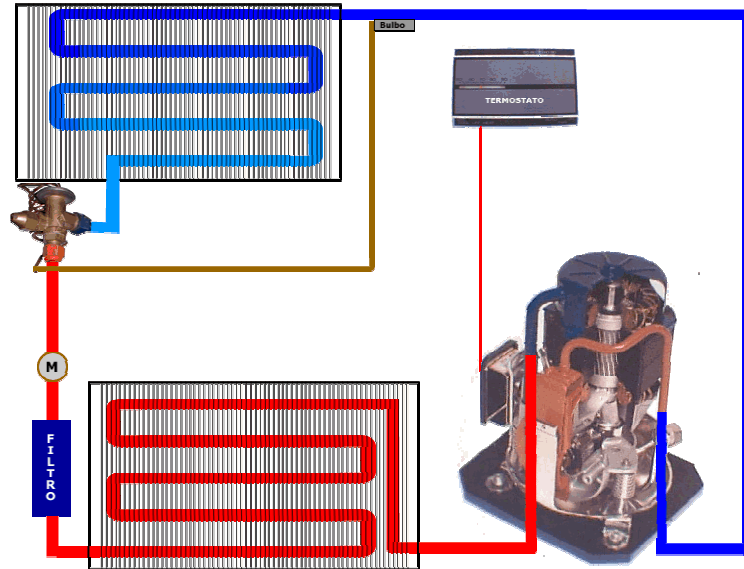
$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{h_1 - h_4}$$

$$\dot{W}_c = (h_2 - h_1) \cdot \dot{m}$$



- Se desprecian la variación de energía cinética y potencial
- Balances de energía en los componentes

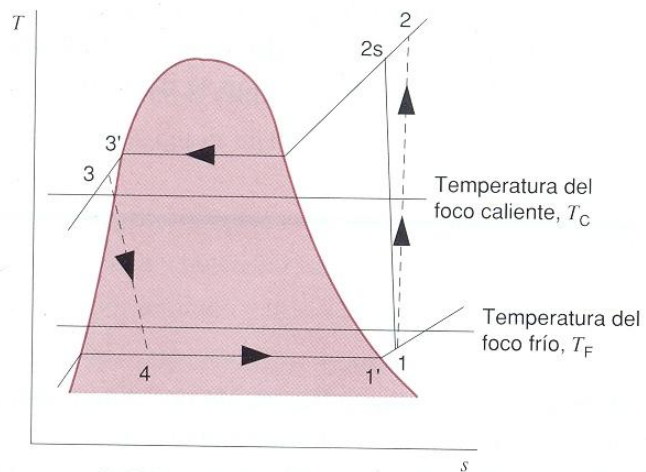
## Animación de la instalación



## Irreversibilidad en el compresor

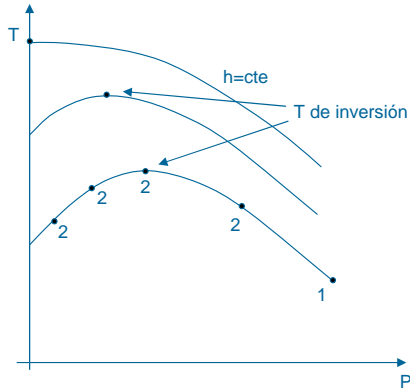
$$\eta_{is} = \frac{\Delta h_{ideal}}{\Delta h_{real}}$$

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



# Proceso de expansión

- Estrangulamiento adiabático: isoentálpico

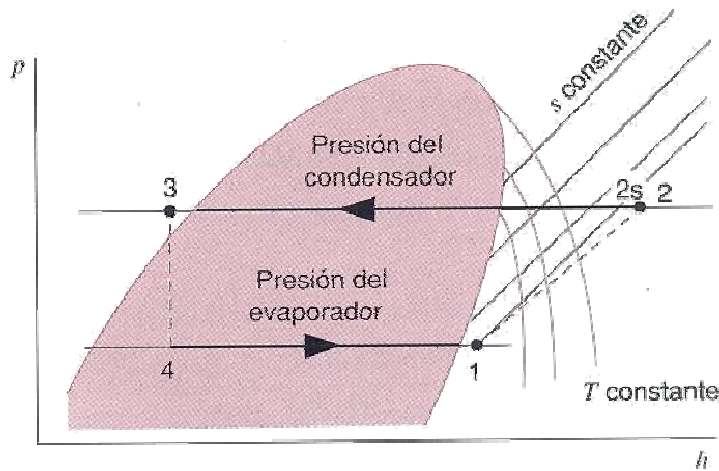


Coefficiente de Joule Thomson

$$\mu_j = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_h$$

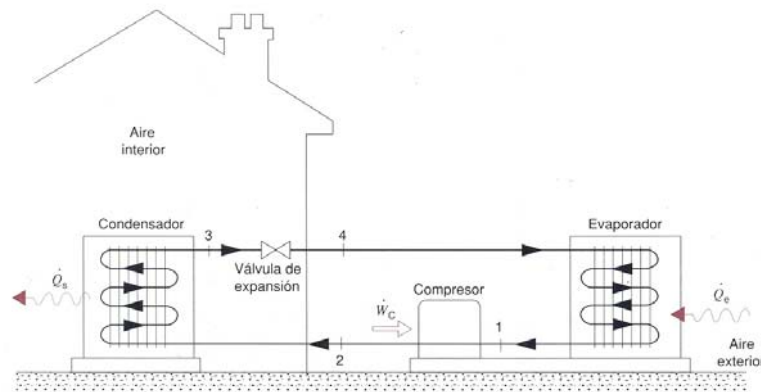
## Diagrama p-h

- Frecuentemente utilizado en refrigeración

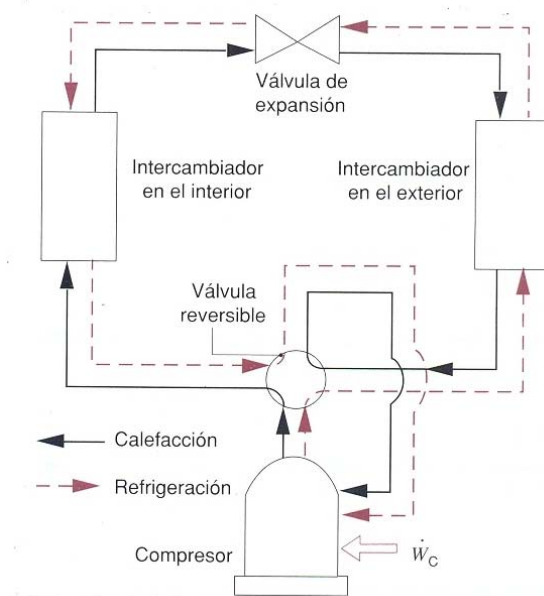


# Bombas de calor por compresión

- Objetivo: Calefacción
- Componentes similares a refrigeración
- Eficiencia superior a la unidad



# Bombas de calor invertible





# Refrigerantes

Características:

- $P_e > 1\text{Bar}$   $P_c < 20\text{Bar}$
- Entalpía de vaporización alta
- No toxico
- Estable químicamente
- No corrosivo
- Bajo Coste
- No inflamable

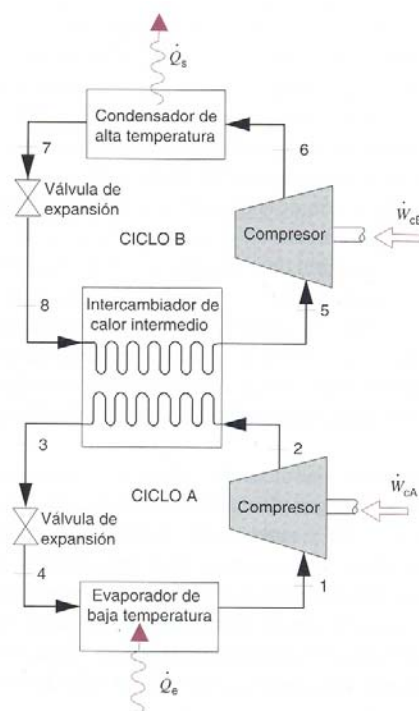


Fluidos:

- Amoniac,  $\text{NH}_3$
- Agua
- Clorofluorocarbonados (CFC)
- R-11, R-12, R-22
- Hidrofluorocarbonados (HFC)
- R-134a, R-410a

## Ciclos en cascada

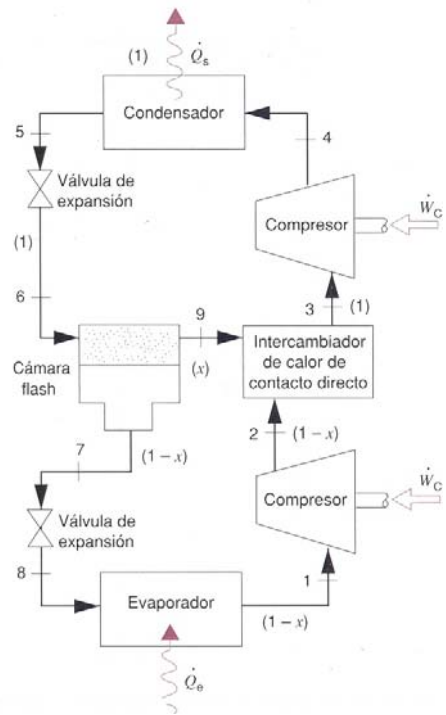
- Diferentes refrigerantes en cada ciclo
- Relaciones presión – temperatura de los refrigerante adecuadas.
- Temperaturas de  $-25$  a  $-75^\circ\text{C}$



$$E_f = \frac{Q_e}{W_{cA} + W_{cB}}$$

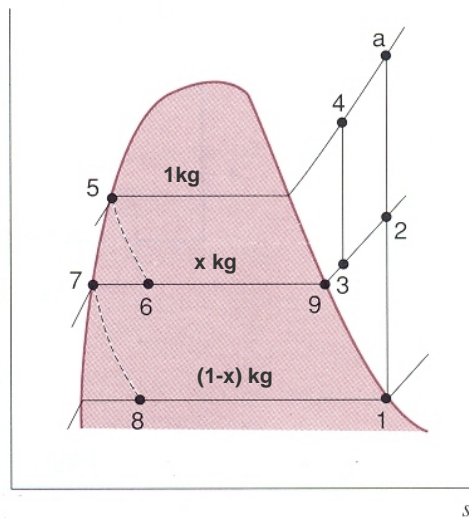
# Compresión multietapa

- Menor consumo de energía en el compresor.
- Refrigeración intermedia mediante un intercambiador de mezcla.
- Reducción de irreversibilidad externa en el condensador

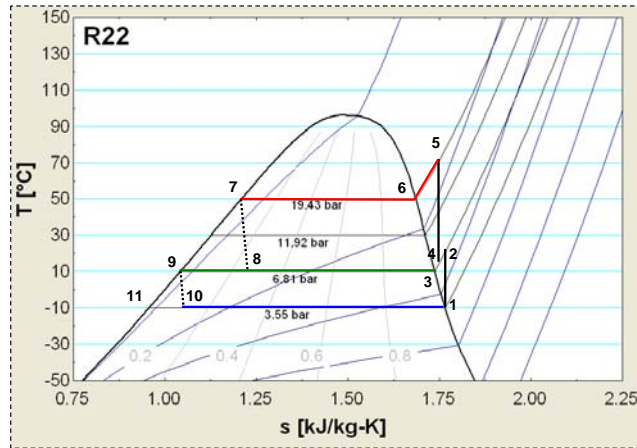
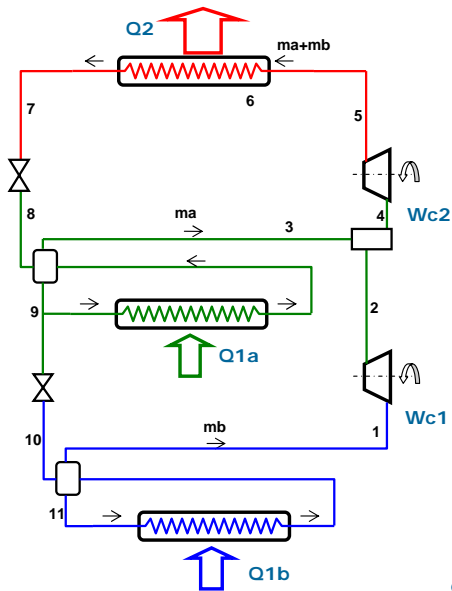


# Compresión multietapa

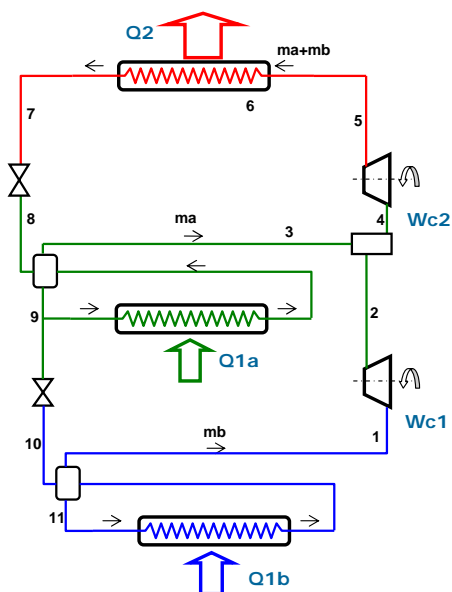
- 5 y 7 líquido saturado
  - 1 y 9 vapor saturado
  - $h_5 = h_6$  y  $h_7 = h_8$
  - Trabajo mínimo =>
- $$P_i = (P_c \cdot P_e)^{0.5}$$
- Título de 6:  
 $x \cdot (h_9 - h_7) = h_6 - h_7$
  - Bal. Energía CM  
 $x \cdot h_9 + (1-x) \cdot h_2 = h_3$



## Doble evaporador y doble compresor



## Doble evaporador y doble compresor



$$Q1b + mb \cdot h_{10} = mb \cdot h_1$$

$$Q1a + (ma + mb) \cdot h_8 = ma \cdot h_3 + mb \cdot h_9$$

$$Wc1 = mb \cdot (h_2 - h_1)$$

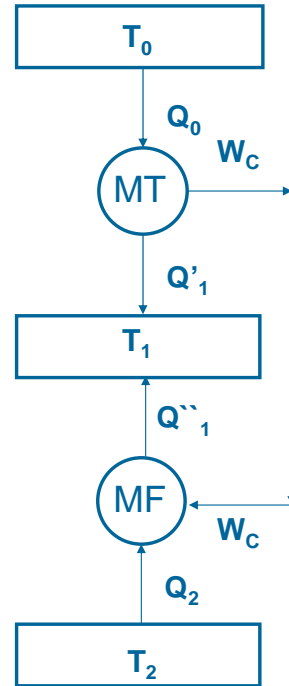
$$Wc2 = (ma + mb) \cdot (h_5 - h_4)$$

$$ma \cdot h_3 + mb \cdot h_2 = (ma + mb) \cdot h_4$$

## Ciclo con tres fuentes

$$E_f = \frac{Q_2}{Q_0}$$

$$E_c = \frac{Q'_1 + Q''_1}{Q_0}$$



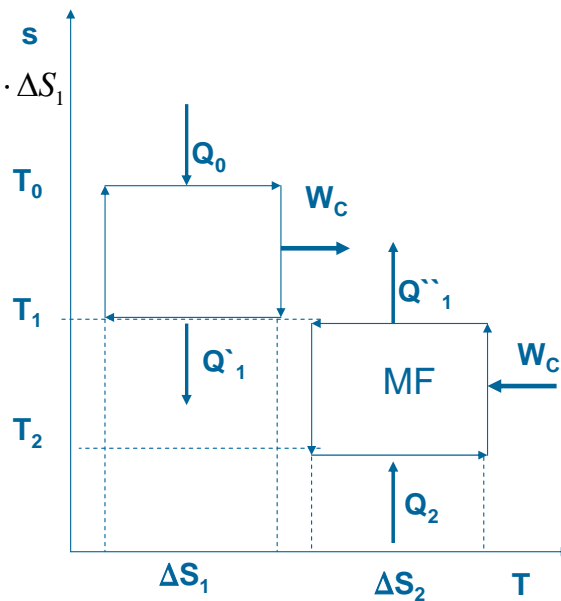
## Ciclo reversible con tres fuentes

$$|W_c| = (T_1 - T_2) \cdot \Delta S_2 = (T_0 - T_1) \cdot \Delta S_1$$

$$\frac{\Delta S_2}{\Delta S_1} = \frac{(T_0 - T_1)}{(T_1 - T_2)}$$

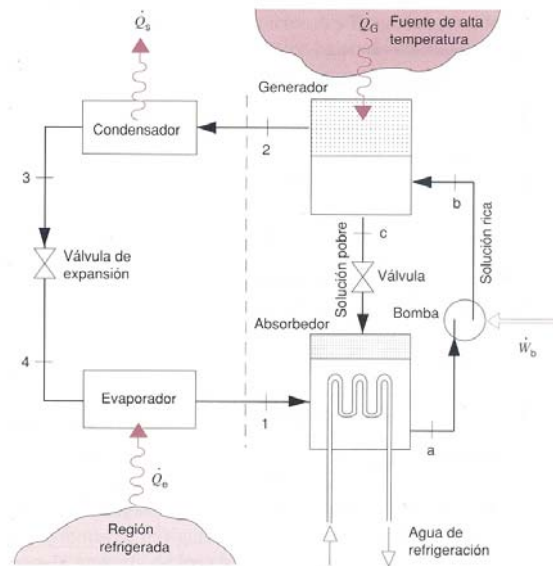
$$E_f = \frac{Q_2}{Q_0} = \frac{T_2 \cdot \Delta S_2}{T_0 \cdot \Delta S_1}$$

$$E_f = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{T_0 - T_1}{T_0}$$



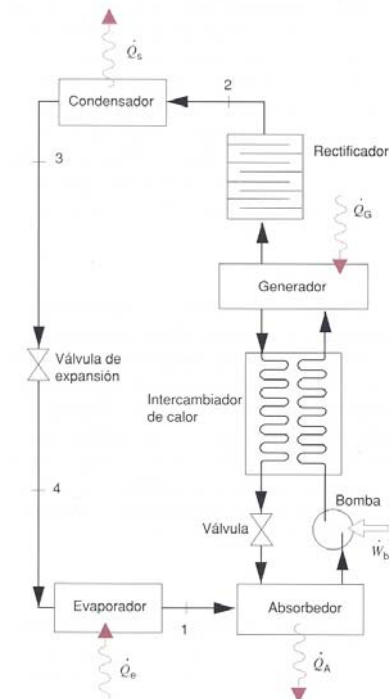
## Refrigeración por absorción

- Menor consumo de trabajo en la bomba.
- Permiten utilizar energías alternativas o calor residual.
- Refrigeración  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{C}$
- Aire acondicionado  $\text{H}_2\text{O}/\text{BrLi}$



## Absorción: $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$

- Intercambiador de calor para precalentar la solución.
- Rectificador: evita la formación de hielo en válvula y evaporador.
- $T_g = 100^\circ\text{C}$
- $T_c = 45^\circ\text{C}$
- $T_e = -8^\circ\text{C}$



# Sistemas con gas: Ciclo Brayton

- No existe cambio de fase.
- Aplicaciones: bajas temperaturas
- (-150°C) y aviación.

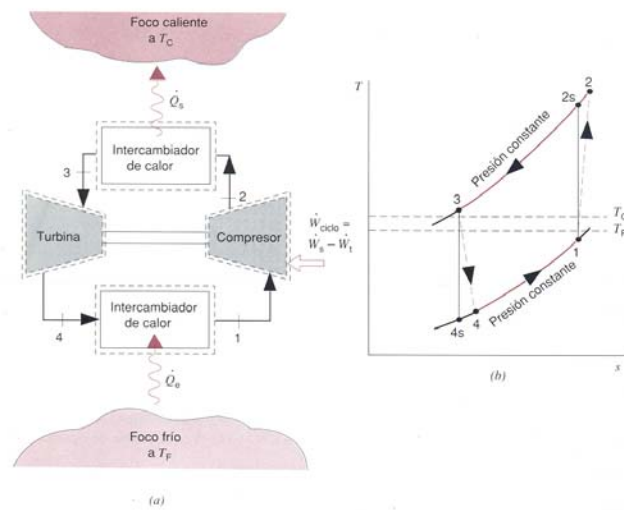
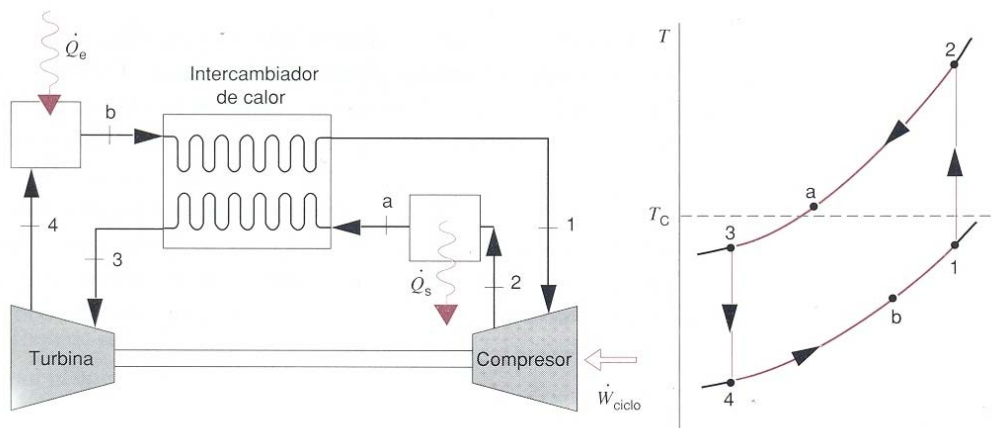


FIGURA 10.12 Ciclo Brayton de refrigeración.

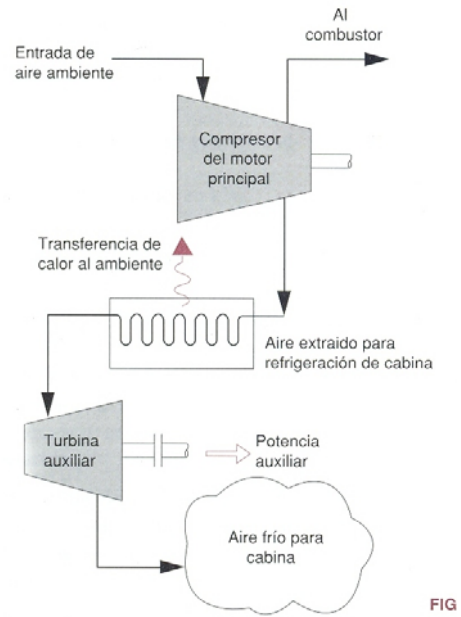
# Ciclo Brayton

- Intercambiador de calor regenerativo.
- Se obtienen temperaturas menores.



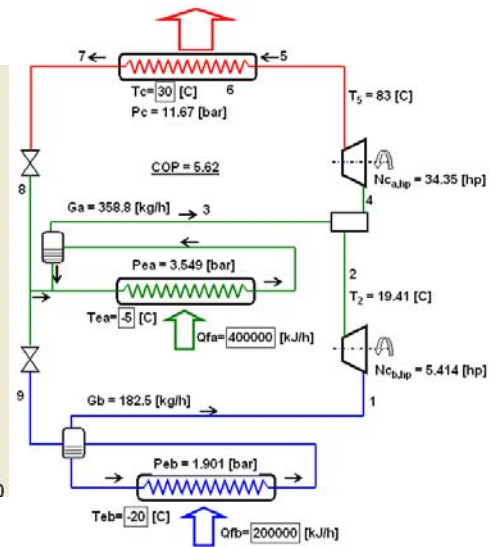
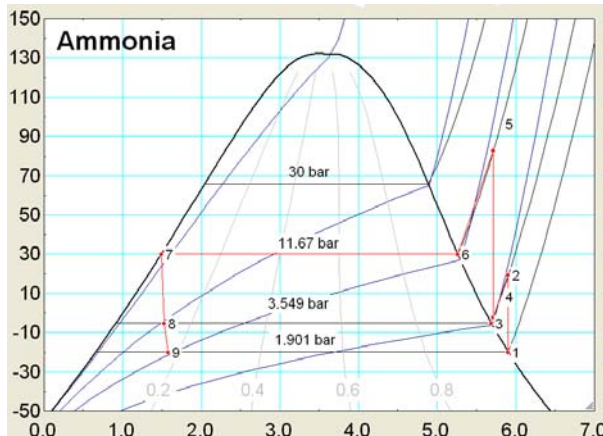
# Ciclo Brayton para aviación

- Tamaño y peso reducido.
- Se necesitan menos intercambiadores de calor.

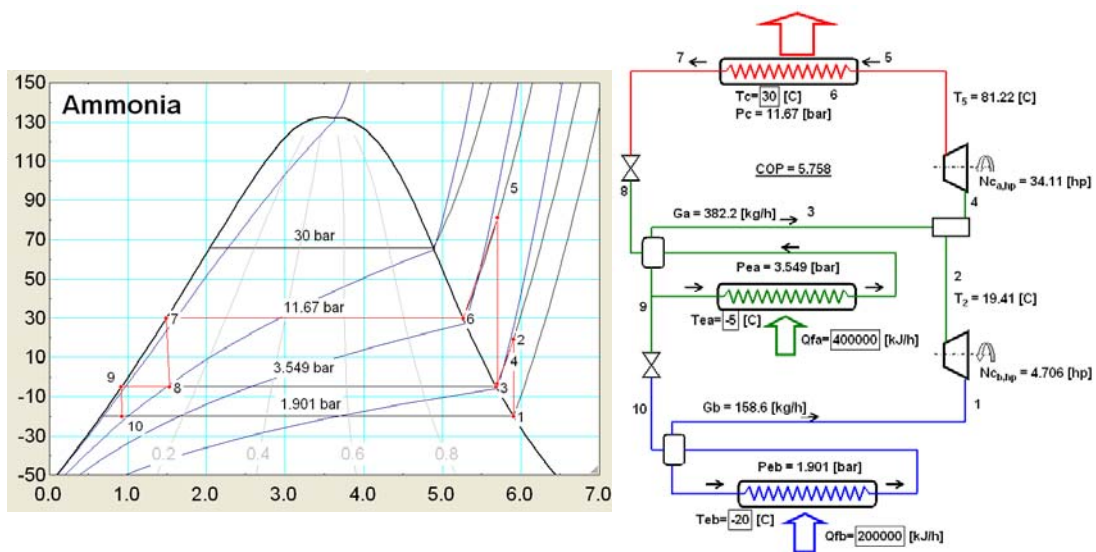


FIG

## Problema 4



## Problema 4-b



## Bibliografía

- Termodinámica Técnica, C. A. Garcia, 1987, Ed. Alsina.
- Fundamentos de Termodinámica Técnica, M.J. Moran y H.N. Shapiro, 1996, Ed. Reverté
- Termodinámica, K. Wark, D.E. Richards, 2001, Ed. McGraw - HILL



## Ciclos de motores a gas

- Ciclos: Regenerativos, Otto, Diesel y Brayton.
- Teoría: Termodinámica Técnica de Garcia C. pag 101 a 103 y pag. 265 a 282.
- Problemas: Problemas de Termodinámica Técnica de Garcia C. pag. 301 a 308.