

**IER**

Curso Pre-Congreso ISES-ANES

Universidad del Caribe

31 de octubre al 2 de noviembre de 2013

Cancún, Quintana Roo, México



***Cálculo de una instalación frigorífica por absorción***

***$NH_3 - H_2O$***

***para la producción de hielo***

Isaac Pilatowsky Figueroa

Roberto Best y Brown

[ipf@cie.unam.mx](mailto:ipf@cie.unam.mx), [rbb@ier.unam.mx](mailto:rbb@ier.unam.mx)

Coordinación de Refrigeración y Bombas de Calor, Departamento de Sistemas Energéticos, Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México

# Sesión IV

Cálculo de una instalación  
frigorífica por absorción  
Amoniacaco - Agua

# *Requerimientos de enfriamiento*

- *Climatización de espacios*
- *Refrigeración y conservación de perecederos*
- *Refrigeración en procesos industriales*
- ***Producción de hielo***
- *Congelación*

# *Cálculo de la potencia de enfriamiento para producción de hielo*

## *Datos de entrada*

- *Masa del hielo a formar:  $M_H$*
- *Temperatura de diseño (por debajo de  $0^\circ\text{C}$ ),  
basada en la caída de temperatura debida al  
intercambio térmico:  $T_{DE}$*
- *Temperatura inicial del agua  $T_{IA}$*
- *Capacidad de producción,  $M_H$ /unidad de tiempo*

## *Cálculo de la potencia de enfriamiento para producción de hielo*

*A) Enfriamiento sensible ( $q_{si}$ ) de la temperatura inicial del agua  $T_{IA}$  a la temperatura de congelación  $T_C$  ( $0^\circ\text{C}$ ).*

$$q_{si} = m_a C_p (T_{IA} - T_C)$$

*B) Calor latente de solidificación  $q_S$  en donde  $\lambda$  es el calor de solidificación del agua a  $0^\circ\text{C}$ .*

$$q_S = m_a \lambda$$

## Cálculo de la potencia de enfriamiento para producción de hielo

d) *Enfriamiento sensible de la  $T_C$  a la temperatura de diseño de enfriamiento  $T_{DE}$ .*

$$q_{SE} = m_a C_p (T_C - T_{DE})$$

e) *Potencia total  $q_T$*

$$q_T = q_{si} + q_s + q_{se}$$

# *Cantidad de amoniaco necesaria para la producción de hielo*

- *Capacidad de enfriamiento*

*La energía específica  $q_{EE}$  de enfriamiento por unidad de masa de refrigerante, es equivalente a su calor de vaporización en  $\text{kJ}/\text{kg}$*

$$q_{EE} = h_{VTE} - h_{LTE}$$

*En donde  $h_{VTE}$  y  $h_{LTE}$  corresponden a las entalpías del vapor y la del líquido a la temperatura de evaporación  $T_E$ .*

# Cantidad de amoniaco necesaria para la producción de hielo

- *Durante el proceso de transportar el refrigerante líquido a las condiciones de condensación a las de evaporación a través de la válvula de expansión, este sufre un enfriamiento  $q_P$  en función de la diferencia de presiones, produciéndose una pérdida en la capacidad de enfriamiento la cual se le extrae al calor de vaporización.*

$$q_P = m_R \bar{C}_P (T_C - T_E)$$

*Todas las propiedades corresponden al amoniaco. En el caso del calor específico este es un promedio entre  $T_E$  y  $T_C$ .*

*La capacidad de enfriamiento disponible es:*

$$q_{EED} = (h_{VTE} - h_{LTE}) - q_P$$



## *Cantidad de amoníaco necesaria para la producción de hielo*

- *Una forma más directa de efectuar el cálculo de  $q_{EED}$  equivalente a  $h_{EED}$*

$$h_{EED} = h_{VTE} - h_{LTC}$$

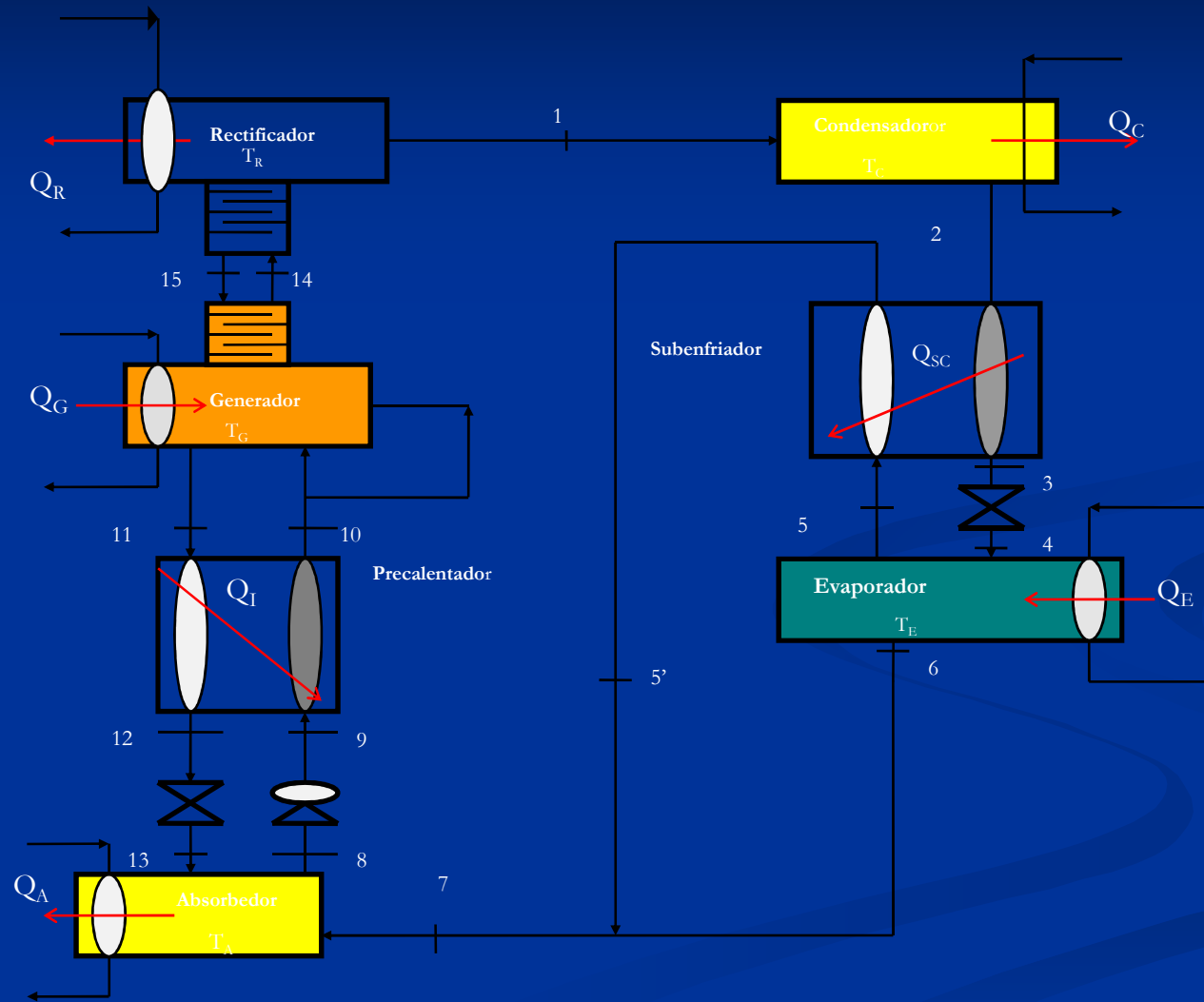
*Por lo tanto la cantidad de amoníaco en circulación a través del ciclo de refrigeración es, la potencia requerida para la formación de hielo entre la capacidad de vaporización del amoníaco por unidad de masa.*

$$m_A / \text{tiempo} = \frac{q_T / \text{tiempo}}{h_{EED}}$$

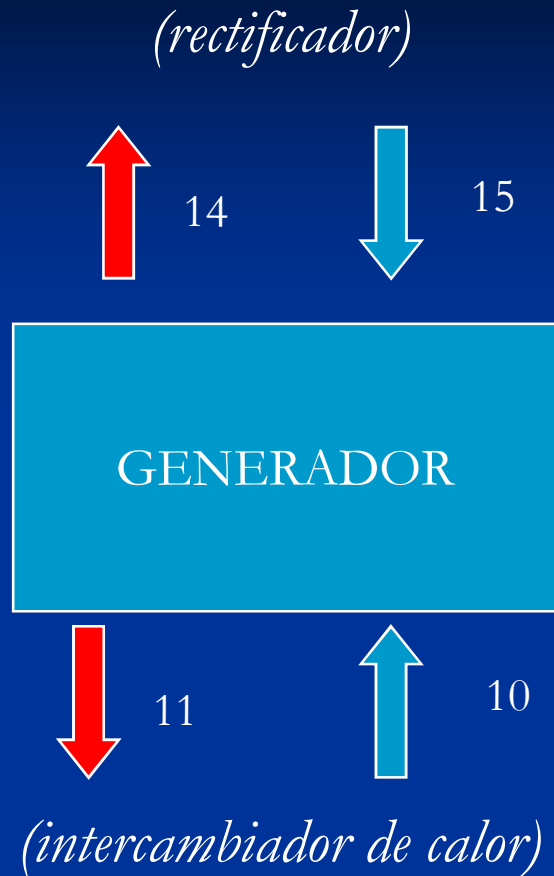
## *Ciclo termodinámico*

- *El ciclo de refrigeración por absorción puede ser con un funcionamiento intermitente o continuo y ser un ciclo básico a una etapa o múltiples etapas y contener o no intercambiadores de calor tanto para la recuperación de calor sensible o latente. En este caso se seleccionará un ciclo continuo a una etapa con intercambiadores de calor entre el generador y el absorbedor y entre el condensador y el evaporador, como el representado en la figura 1.*

# *Ciclo de refrigeración por absorción continuo a una etapa con intercambiadores de calor*



# GENERADOR

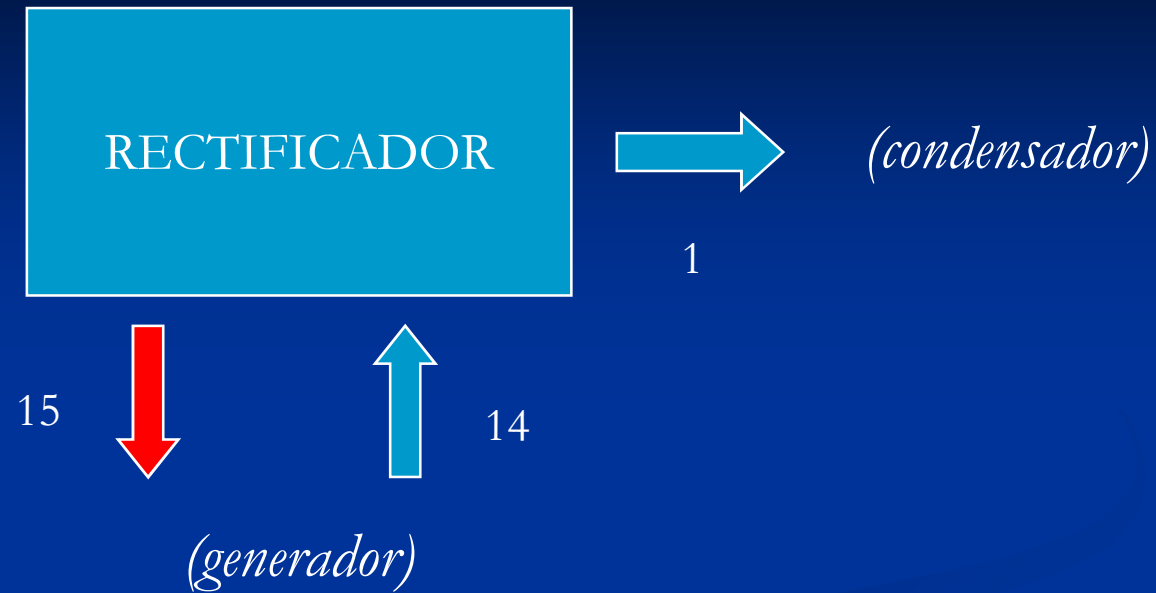


$$m_{10} + m_{15} = m_{14} + m_{11}$$

$$m_{10}X_{10} + m_{15}X_{15} = m_{14}X_{14} + m_{11}X_{11}$$

$$Q_G = \dot{m}_{14}h_{14} + \dot{m}_{11}h_{11} - \dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_{15}h_{15}$$

## RECTIFICADOR

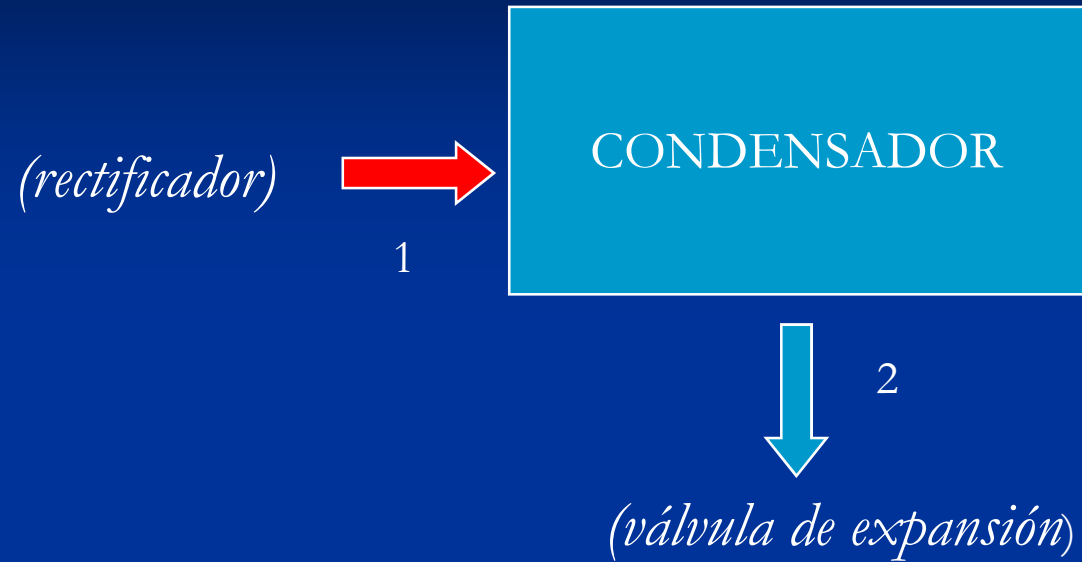


$$\dot{m}_{14} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{15}$$

$$\dot{m}_{14} X_{14} = \dot{m}_1 X_1 + \dot{m}_{15} X_{15}$$

$$Q_R = \dot{m}_{14} h_{14} - \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{15} h_{15}$$

# CONDENSADOR



$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

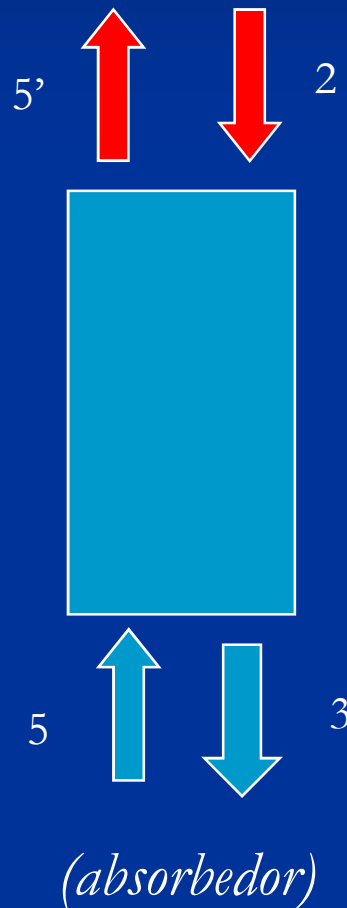
$$\dot{m}_1 X_1 = \dot{m}_2 X_2$$

$$Q_C = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2$$

## INTERCAMBIADOR DE CALOR LÍQUIDO-VAPOR

(absorbedor)

(condensador)



*efectividad*

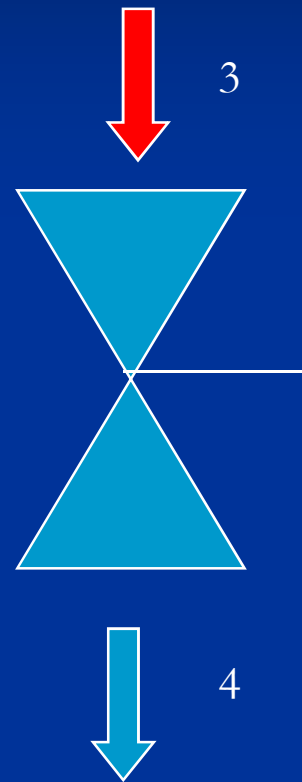
$$\eta_{ILV} = \frac{h_5 - h_{5'}}{h_5 - h_{5'-2}}$$

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{5'} h_{5'}$$

$$Q_{ILV} = \dot{m}_r (h_2 - h_3) = \dot{m}_5 (h_{5'} - h_5)$$

# VÁLVULA DE EXPANSIÓN

*(condensador)*



$$h_3 = h_4$$

*(evaporador)*



# EVAPORADOR

*(intercambiador  
de calor,  
líquido-vapor)*

*(Válvula de expansión)*

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6$$



EVAPORADOR

$$\dot{m}_4 X_4 = \dot{m}_5 X_5 + \dot{m}_6 X_6$$

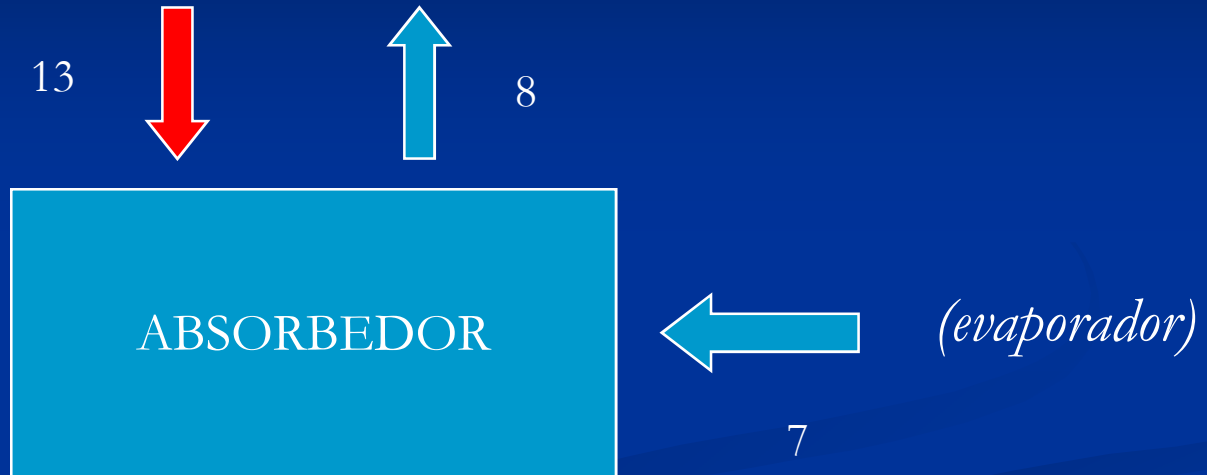
$$Q_E = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_4 h_4$$

*(absorbedor)*

## ABSORBEDOR

*(intercambiador líquido-líquido/ válvula de expansión)*

*(bomba/ intercambiador líquido-líquido)*



$$\dot{m}_8 = \dot{m}_7 + \dot{m}_{13}$$

$$\dot{m}_8 X_8 = \dot{m}_7 X_7 + \dot{m}_{13} X_{13}$$

$$Q_A = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_8 h_8$$

## VÁLVULA DE EXPANSIÓN

*(intercambiador  
de calor,  
líquido-líquido)*



$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13}$$

$$X_{12} = X_{13}$$

$$h_{12} = h_{13}$$

*(Absorbedor)*

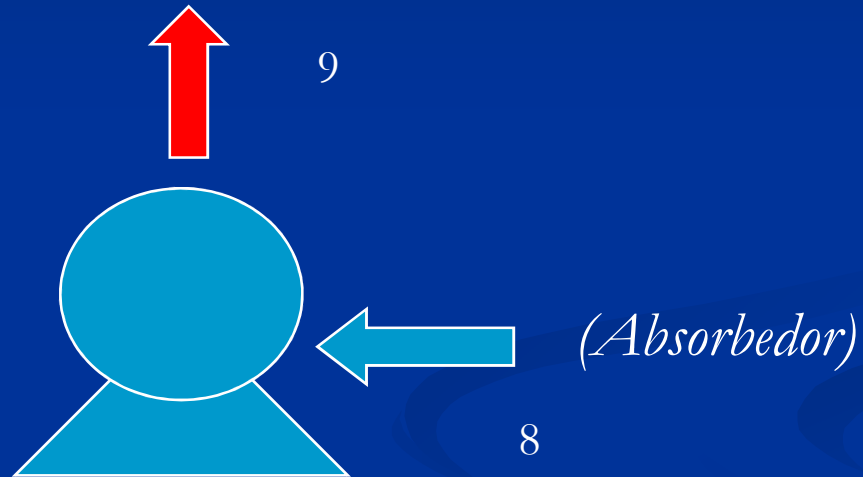
## BOMBA

*(intercambiador  
de calor,  
líquido-líquido/  
generador)*

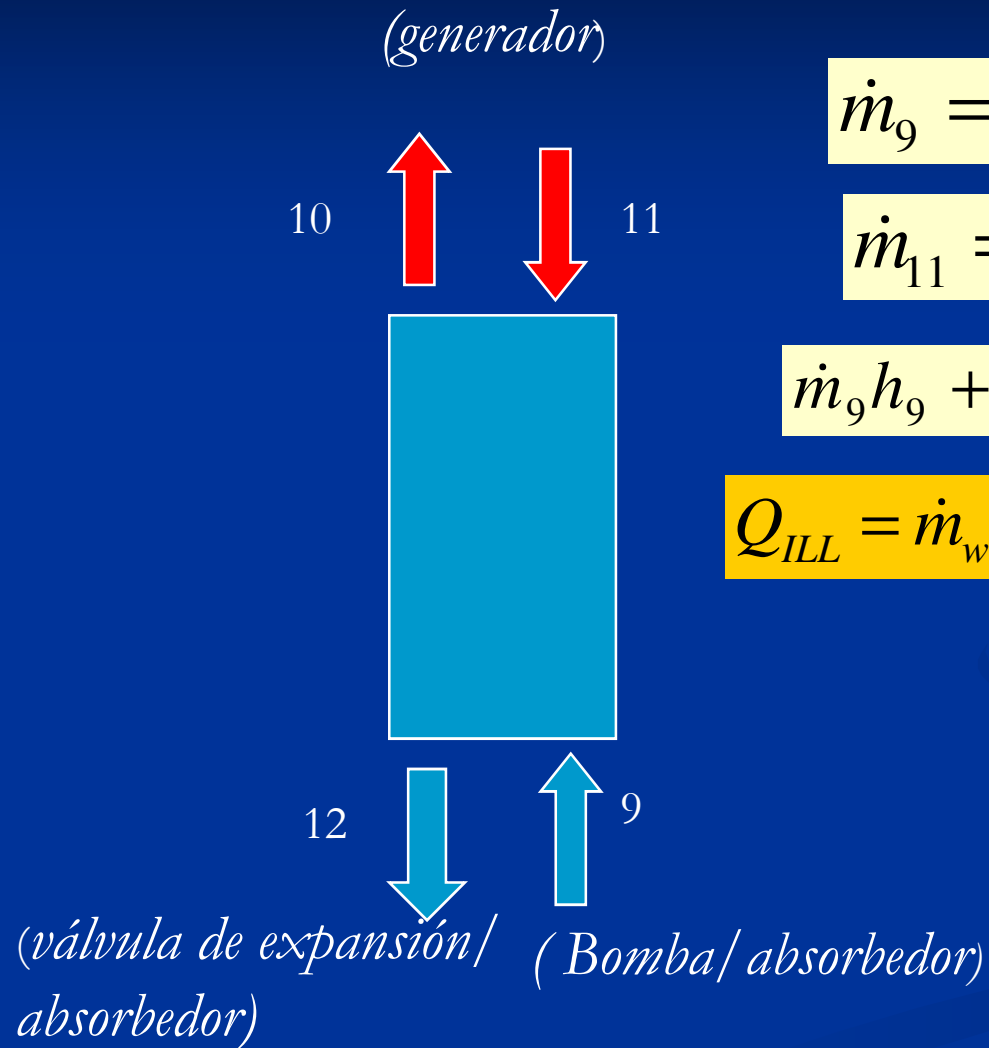
$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$$

$$X_8 = X_9$$

$$h_8 = h_9$$



## INTERCAMBIADOR LÍQUIDO-LÍQUIDO



$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_S$$

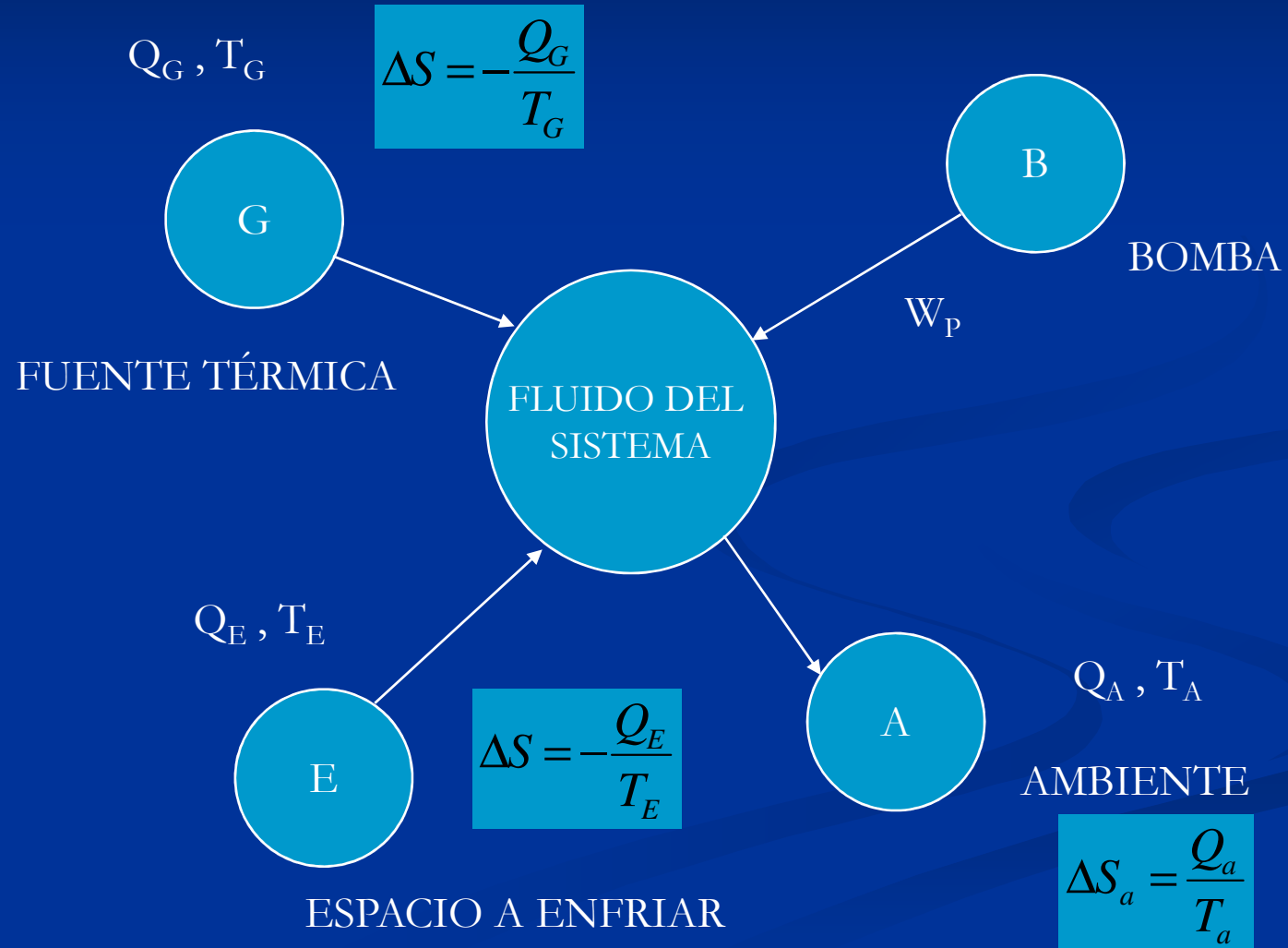
$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_w$$

$$\dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{12} h_{12}$$

$$Q_{ILL} = \dot{m}_w (h_{11} - h_{12}) = \dot{m}_S (h_{10} - h_9)$$

$$\eta_{ILL} = \frac{h_{11} - h_{12}}{h_{11} - h_{12-9}}$$

# Rendimiento térmico



*Calor disipado al ambiente*

$$Q_a + Q_c$$

*Calor absorbido*

$$Q_G + Q_E + W_P$$

$$\Delta S = \Delta S_G + \Delta S_E + \Delta S_E \geq 0 = -\frac{Q_G}{T_G} - \frac{Q_E}{T_E} + \frac{Q_E}{T_E} \geq 0$$

$$\frac{Q_G (T_G - T_a)}{T_G} \leq \frac{Q_E (T_a - T_E)}{T_E} - W_P$$

*Si*

$$W_P \cong 0$$

$$COP = \frac{Q_E}{Q_G} \leq \frac{T_E (T_G - T_a)}{T_G (T_a - T_E)}$$

$$COP_{\max} = \frac{(T_G - T_a)}{T_G} \cdot \frac{T_E}{(T_a - T_E)}$$

# Eficiencia termodinámica

$$COP = \frac{Q_E}{Q_G + W_P}$$

$$COP_{RE} = \frac{Q_E}{Q_G + W_P} = \frac{h_6 - h_4}{h_{14} + (F_R - 1)h_{11} - h_{10} - (F_R)h_{15} + W_P}$$

$$F_R = \frac{m_A}{m_{RE}}$$

$$F_R = \frac{X_{RE} - X_D}{X_C - X_D}$$



## *Solvente en circulación*

*La cantidad específica del solvente circulando en relación a una unidad de masa de vapor de refrigerante, en el caso de la cantidad de solución concentrada, llevada por la bomba de la solución del absorbedor al generador, está representada por la relación:*

$$f = \frac{X_V - X_{SD}}{X_{SC} - X_{SD}}$$

*La cantidad específica de la solución saliendo del generador por unidad de refrigerante evaporado, correspondiendo a la solución diluida regresando al absorbedor a través de la válvula de expansión de la solución, está dada por:*

$$f - 1 = \frac{X_V - X_{SC}}{X_{SC} - X_{SD}}$$

# Diagrama entalpia-concentración para el sistema amoniaco-agua

Mezclas de vapores



Mezclas líquidas



Mezclas sólidas

