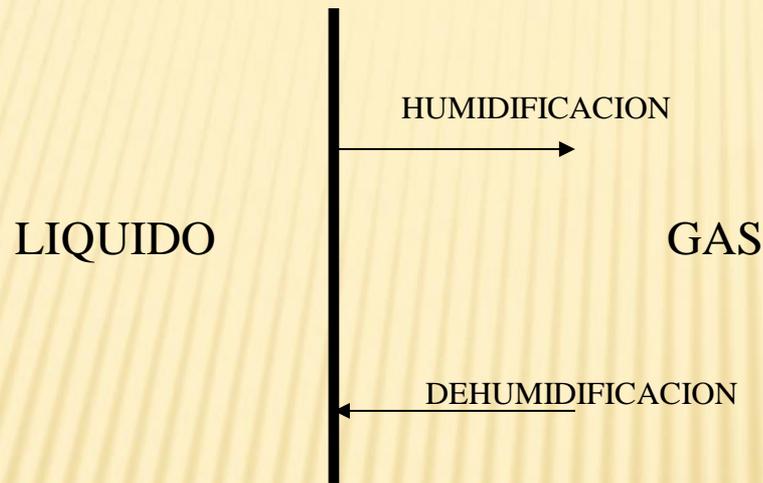


HUMIDIFICACIÓN Y DEHUMIDIFICACION

- OPERACIÓN DE TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR ENTRE UN LIQUIDO Y UN GAS PERMANENTE E INSOLUBLE EN EL PRIMERO



Bibliografía:

Operaciones Unitarias en Ing. Química: McCabe, Smith, Harriott (cap 19)

Operaciones de Separación en Ingeniería Química: Martínez de la Cuesta (cap 20 y 21)

Operaciones de transferencia de masa: Treybal (cap 7)

USOS

1- HUMIDIFICACIÓN: ENFRIAMIENTO DE AGUA Y OTROS LÍQUIDOS DE PROCESO

2- DEHUMIDIFICACIÓN: ACONDICIONAMIENTO DE AIRE, RECUPERACIÓN DE SOLVENTES, ENFRIAMIENTO DE GASES

PARTICULARIDADES

- 1- Incluyen dos fases y dos componentes
- 2- El proceso de transferencia se puede realizar a $T = \text{cte}$ (masa y calor)
- 3- Sin superficies impermeables de intercambio.
- 4- Rendimiento térmico uniforme
- 5- Simultaneidad de las transferencias.
- 6- Variación continua de la T_G y la T_L
- 7- Variación continua de la conc. del líquido en el gas.

$$\text{Humedad absoluta } H = \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}} = \frac{M_v (P_v)}{M_a (P - P_v)}$$

Para nuestro caso aire-vapor de agua

$$H = \frac{18 (P_v)}{29 (P - P_v)} = 0,62 \frac{(P_v)}{(P - P_v)}$$

$$\text{Humedad de saturación } H^* = 0,62 \frac{(P_{vs})}{(P - P_{vs})}$$

$$\text{Humedad relativa } \phi = P_v/P_{vs}$$

Grado de saturación

$$\psi = H/H^* = \frac{P_v (P - P_{vs})}{(P - P_v) P_{vs}} = \frac{P_v (P - P_{vs})}{P_{vs} (P - P_v)} = \phi \frac{(P - P_{vs})}{(P - P_v)}$$

Cdo P_v y P_{vs} son pequeños

$$P - P_{vs} \approx P \quad \text{y} \quad P - P_v \approx P \quad \rightarrow \quad \psi = \phi$$

Calor específico del aire húmedo $C_h = C_a + H C_v$

$$C_h = 0,24 + H \cdot 0,46 \text{ [kcal/kg aire seco } ^\circ\text{C]}$$

Entalpía del aire húmedo $i_h = i_a + i_v$

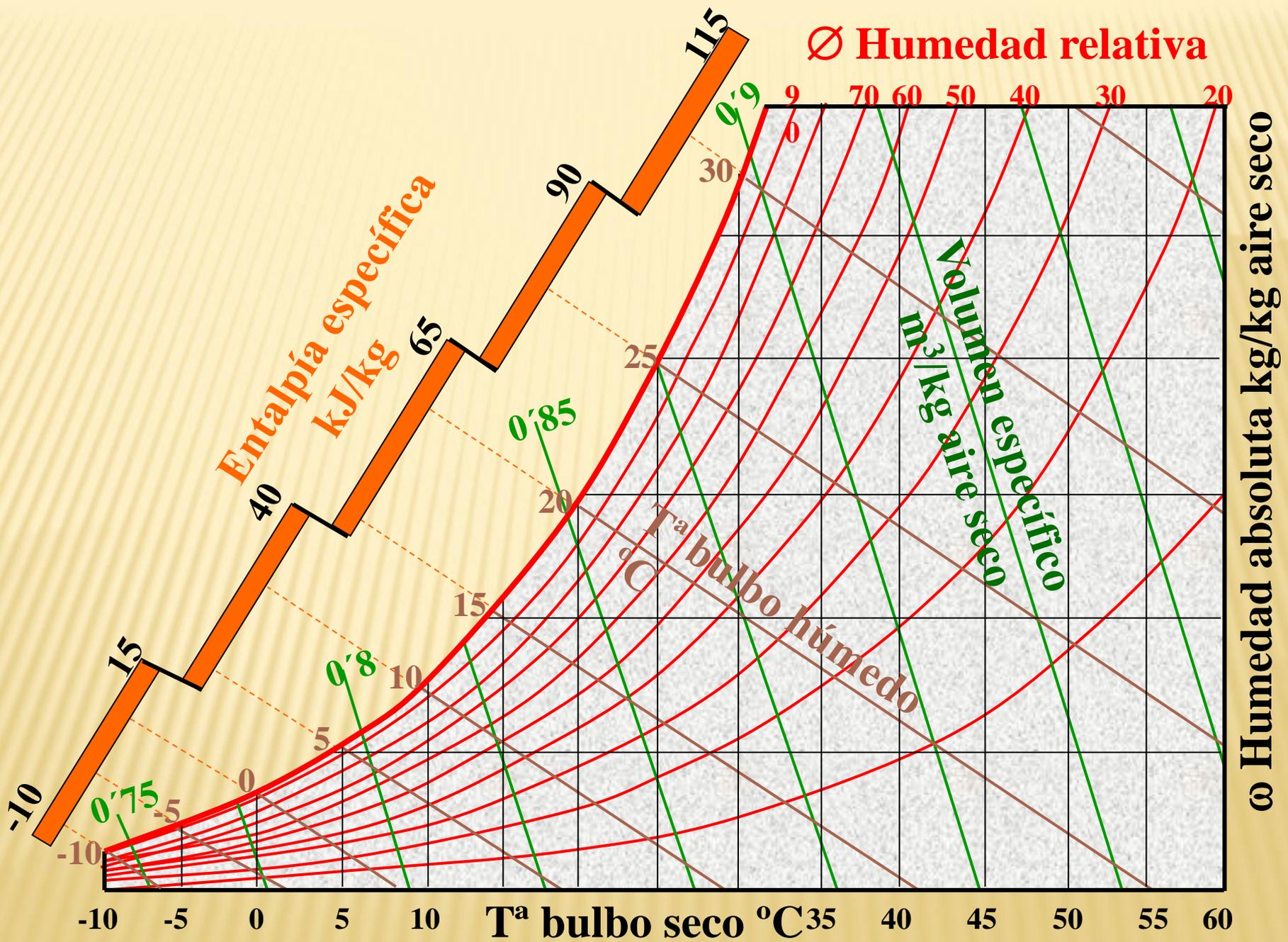
$$i = C_a \cdot t + H (\lambda_0 + C_v t)$$

$$i = (C_a + H C_v) t + H \lambda_0$$

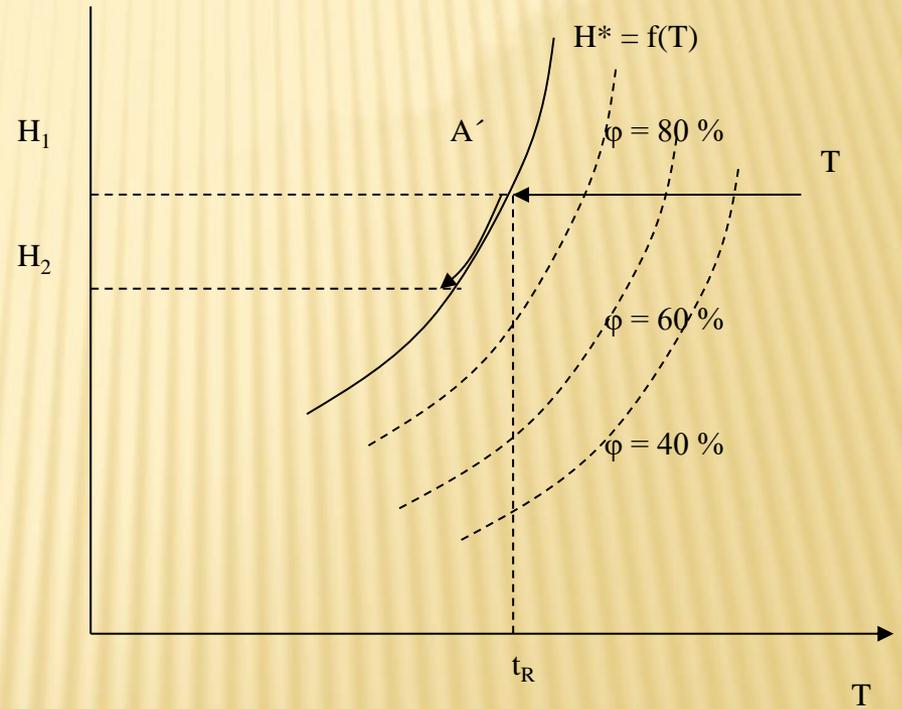
$$i = C_h t + H \lambda_0$$

λ_0 es el calor latente del agua a $0^\circ \text{C} = 595 \text{ kcal/kg}$

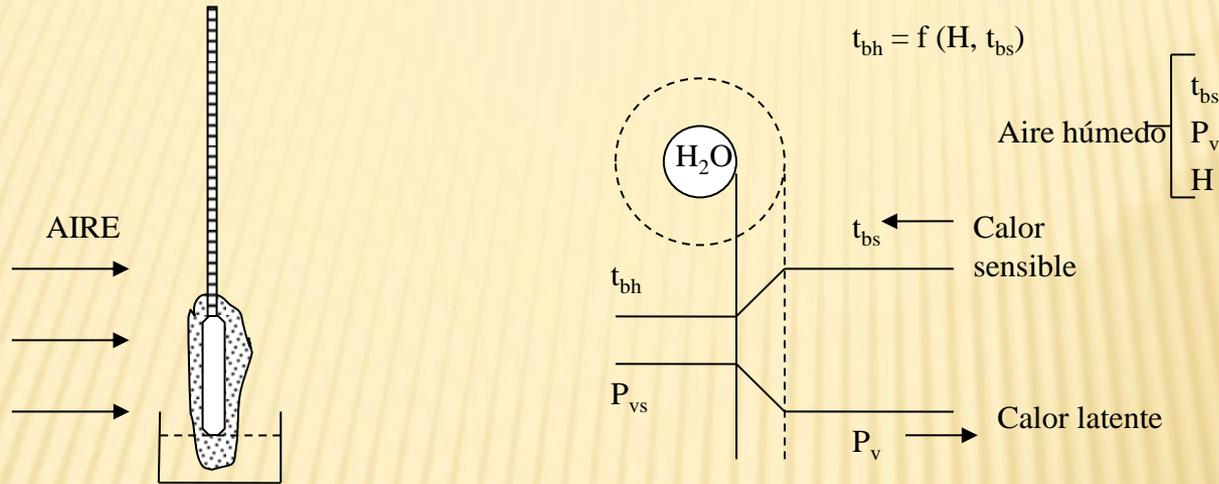
$$i = (0,24 + 0,46 H) \cdot t + 595 H \text{ Kcal/kg aire seco h)}$$



Temperatura de rocío (t_R)



Temperatura de bulbo húmedo



$Ca \lll q_L$ por lo que $Ca \approx 0$

$$N_v \text{ (moles/h.m}^2\text{)} = k (P_{vs} - P_v)$$

k = coeficiente de transferencia de materia,

$$q_L \text{ (kCal/h.m}^2\text{)} = N_v \text{ (moles/h.m}^2\text{)} \cdot M_v \text{ (kg/mol)} \cdot \lambda \text{ (kCal/kg)} = k \cdot M_v \cdot \lambda (P_{vs} - P_v)$$

Considerando que la presión de vapor P_v y la presión de vapor saturado P_{vs} son despreciables frente a P .

$P - P_v \approx P - P_{vs} \approx P$ a luego:

$$H = M_v/M_a \cdot (P_v/(P-P_v)) \rightarrow H \approx M_v/M_a \cdot (P_v/P_a) \rightarrow P_v = H \cdot M_a/M_v \cdot P_a \text{ y}$$

$$H^* = M_v/M_a \cdot (P_{vs}/(P-P_{vs})) \rightarrow H^* \approx M_v/M_a \cdot (P_{vs}/P_a) \rightarrow P_{vs} = H^* \cdot M_a/M_v \cdot P_a$$

De estas deducimos:

$$P_{vs}-P_v = M_a/M_v P_a (H_b - H) \text{ donde } H_b \text{ es la Humedad de saturación a la } t_b$$

El calor latente q_L queda expresado por:

$$q_L = k \cdot G \cdot M_a \cdot P_a \cdot (H_b-H) = K' \cdot G (H_b-H)$$

observemos que $K' = k M_a \cdot P_a$

$$K' = 29 k (P_a = 1 \text{ atm})$$

La ecuación de transferencia de calor será:

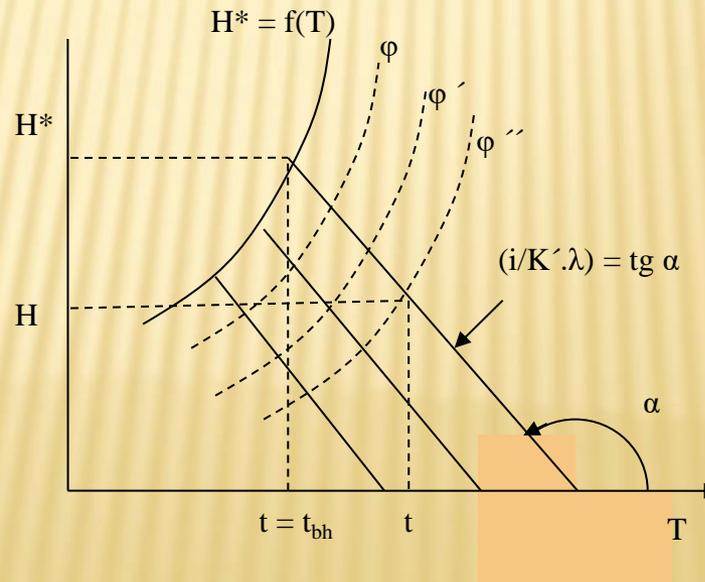
$$q_s = h (t - t_{bh}) \quad (h = \text{coef. Transferencia de calor}) \text{ en el equilibrio } q_L = q_s$$

$$\text{luego } Hb - H = - h/K' \lambda (t_{bh} - t)$$

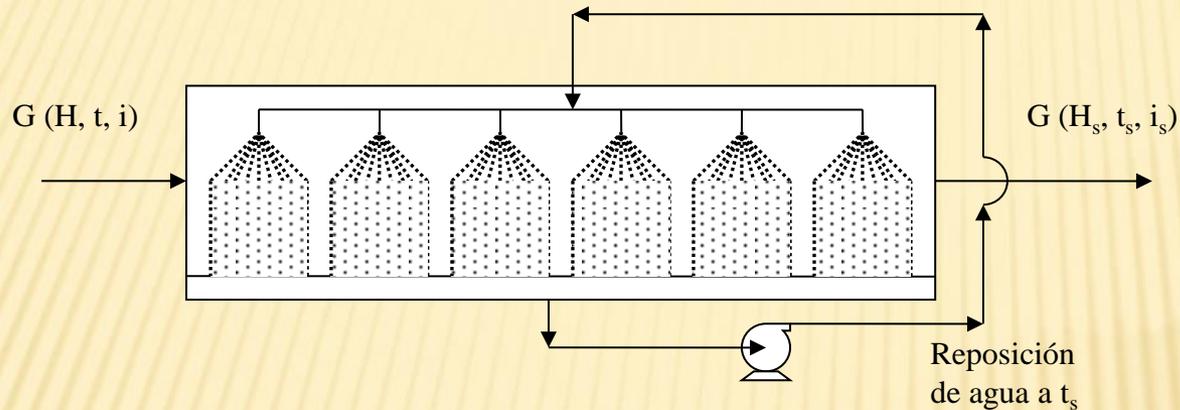
Esta ecuación es la que vincula la t_{bh} con las condiciones de ambiente. En el diagrama psicrométrico representan rectas que pasan por los puntos (H^*, t_{bh}) y (H, t) , su pendiente es :

$$- h/K' \lambda.$$

Se las conoce como líneas psicrométricas o isotermas de bulbo húmedo.



Temperatura de saturación adiabática



$$(H_s - H)/(t_s - t) = - C_h / \lambda \text{ (línea de saturación adiabática)}$$

Isoentálpicas

$$G \cdot i + L \cdot C_L t_s = G \cdot i_s \text{ saturación adiabática}$$

$$i + L \cdot C_L t_s / G = i_s$$

$$G \cdot i \gg L C_L t_s$$

$i \sim i_s$ luego las líneas de saturación adiabáticas son aproximadamente isoentálpicas

RELACION DE LEWIS

Es una relación entre la t_{bh} y la t_s .

$$(H_b - H)/(t_{bh} - t) = - h / (K' \lambda) \text{ (isoterma de bulbo húmedo)}$$

$$(H_s - H)/(t_s - t) = - C_h / \lambda \text{ (línea de saturación adiabática)}$$

Los valores h y K' son peliculares dependen en igual medida de las condiciones de flujo. Por ello se considera que h/K' es constante.

Para el sistema particular aire-agua: $h/K' = 0,26$

$$C_h = 0,24 + 0,46 H$$

$$\text{Para } H = 0,0435 \quad C_h = 0,26$$

$$h/K' = C_h$$

Pero difieren considerablemente a humedades y temperaturas elevadas (que raramente se dan en los problemas reales). Luego en el sistema aire –agua

$$h/K' \approx C_h \rightarrow h/(K'C_h) = \text{Le} \quad (\text{Le} = \text{N}^\circ \text{ de Lewis})$$

para el sistema **aire-agua** **Le =1**

En este caso la t_{bh} resulta igual a t_s y las líneas psicrométricas coinciden con las de saturación adiabática.

El número de Lewis para otros sistemas no es igual a 1. Varía entre $1,3 < \text{Le} < 2,5$.

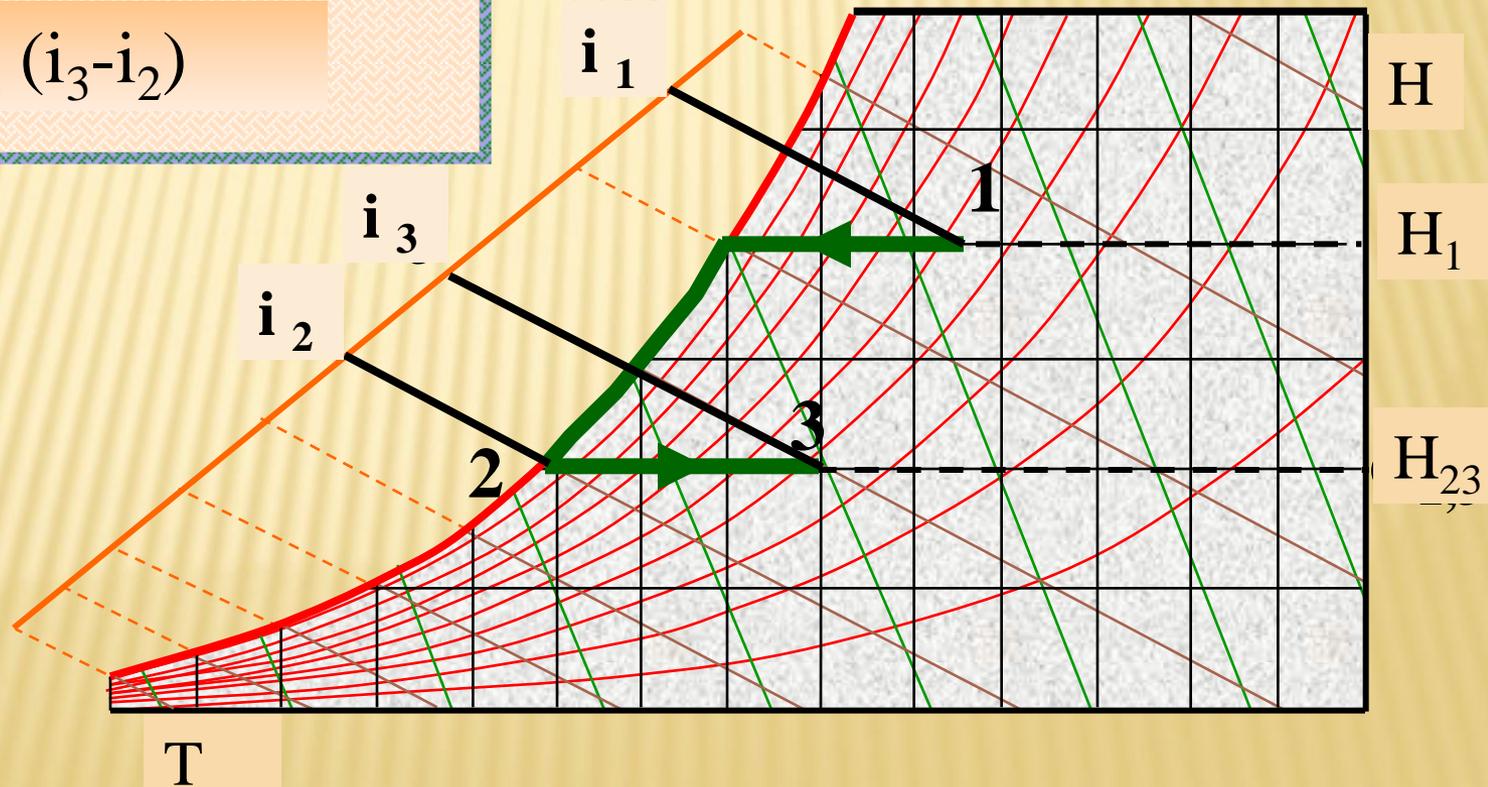
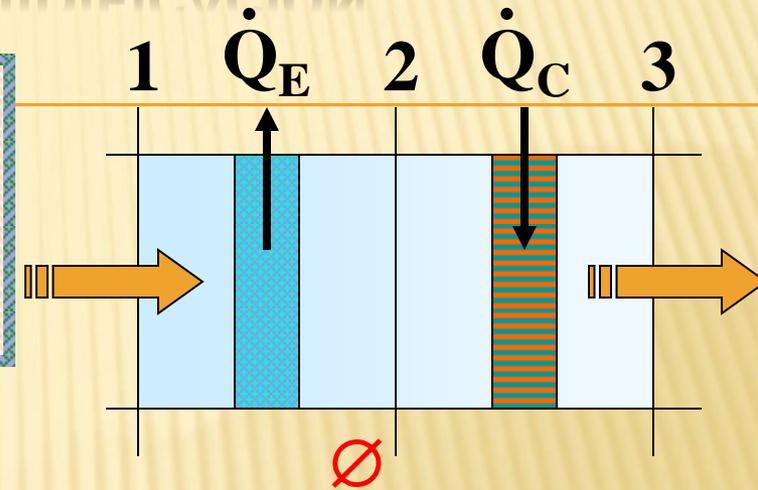
ENFRIAMIENTO CON DESHUMIDIFICACIÓN

1-2 Deshumidificación

$$Q_e = m_{as} (i_1 - i_2) - m_{as} (H_1 - H_2) i_{f2}$$

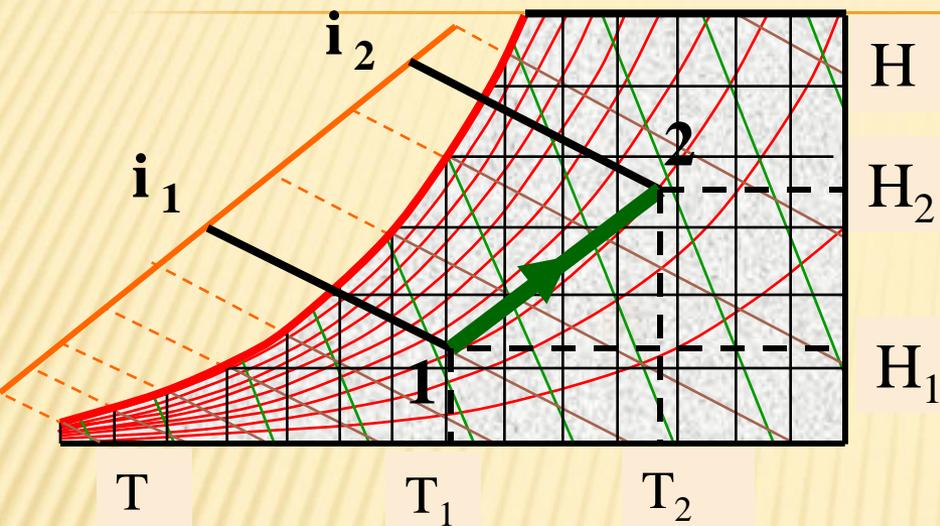
2-3 Calentamiento

$$Q_c = m_{as} (i_3 - i_2)$$

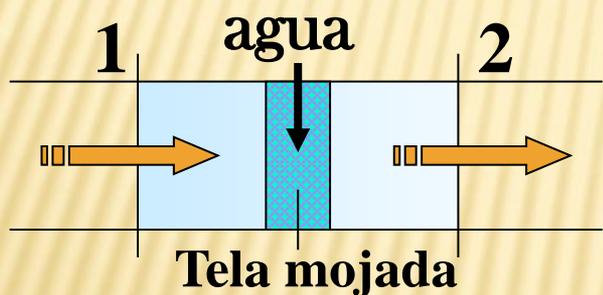
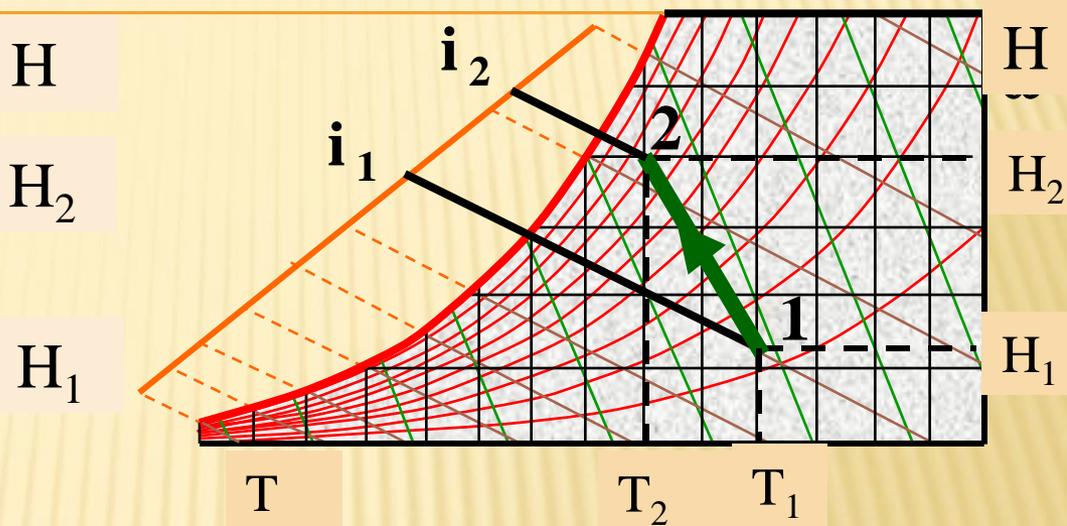


HUMIDIFICACIÓN

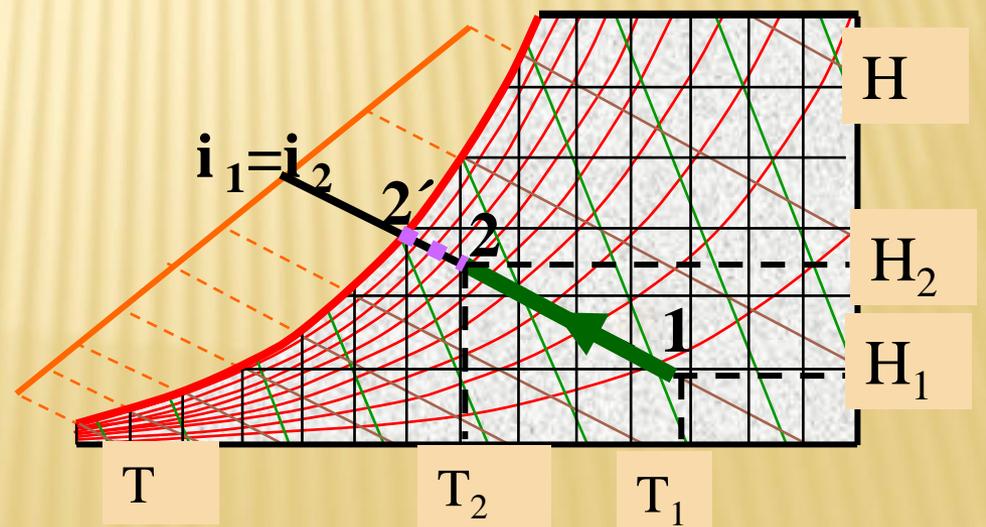
Adición de vapor



Inyección de agua líquida



Enfriamiento evaporativo

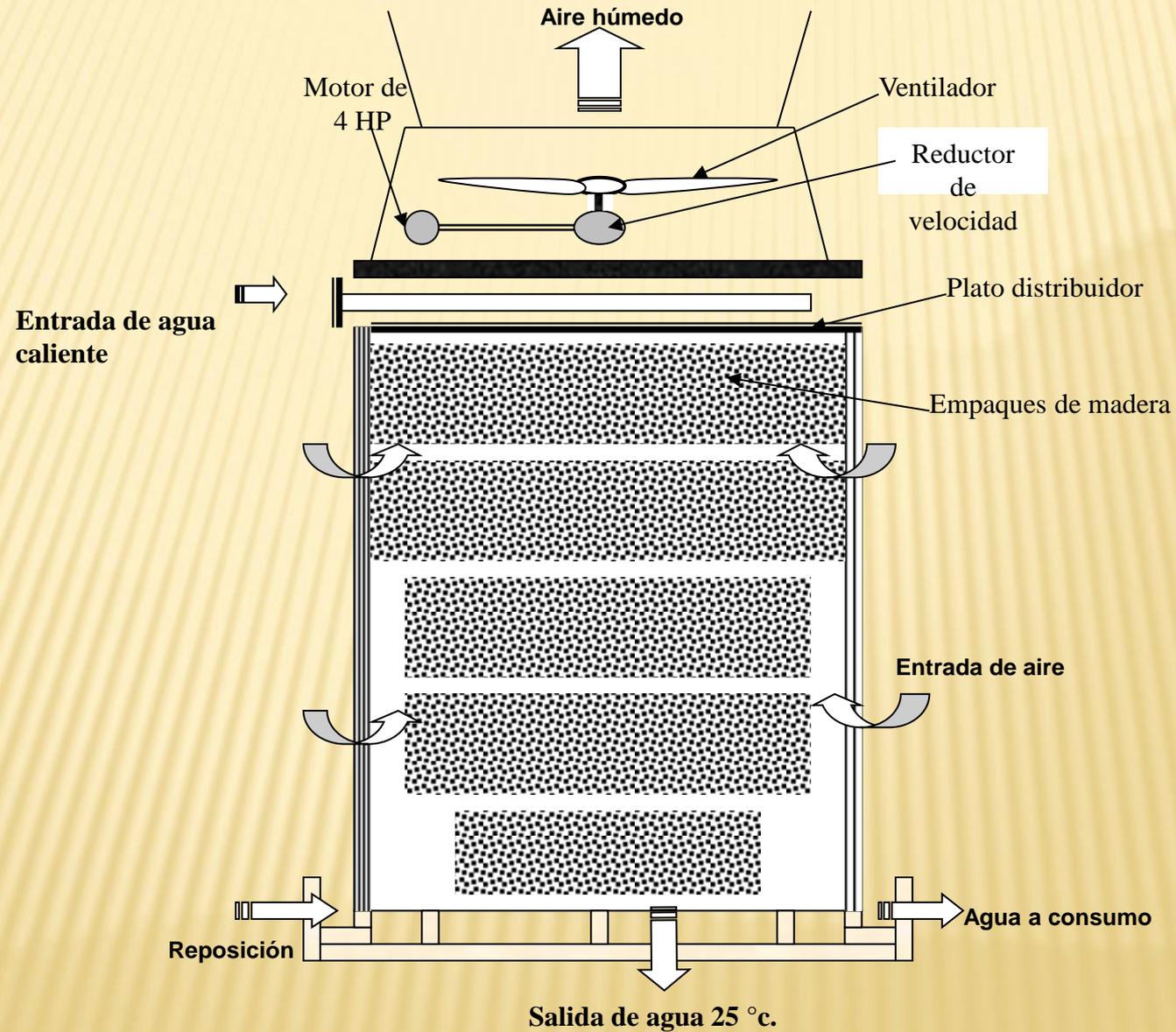


$$i_1 + (H_2 - H_1) i_f = i_2$$

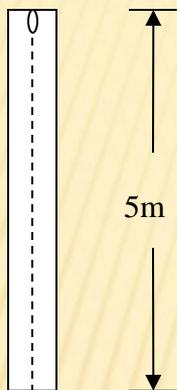
$$i_1 \gg (H_2 - H_1) i_f$$

$$i_1 \approx i_2$$

Torre de enfriamiento



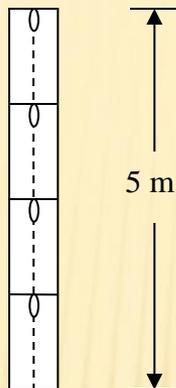
Alimentación 1 gota/seg



Descarga 1 gota/seg

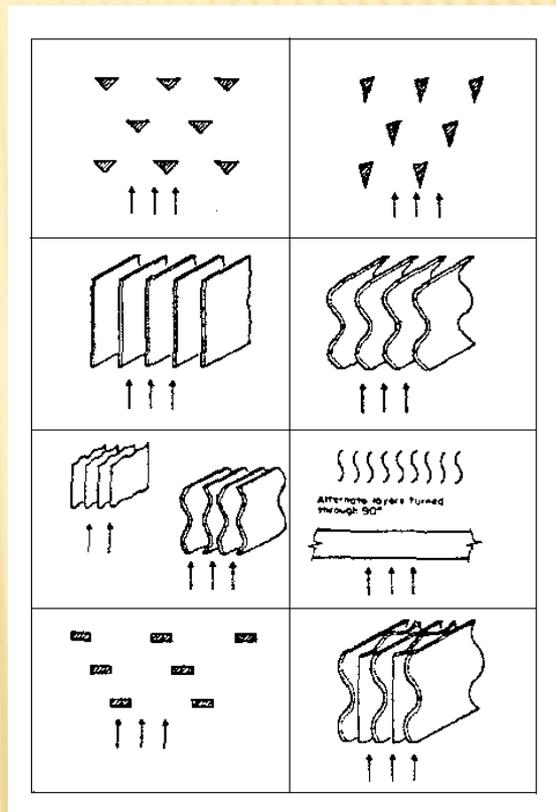
Torre de caída libre

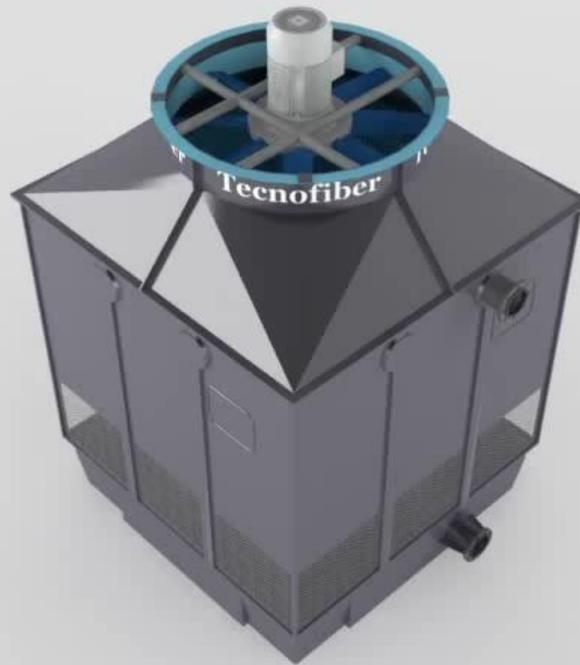
Alimentación 1 gota/seg



Descarga 1 gota/seg

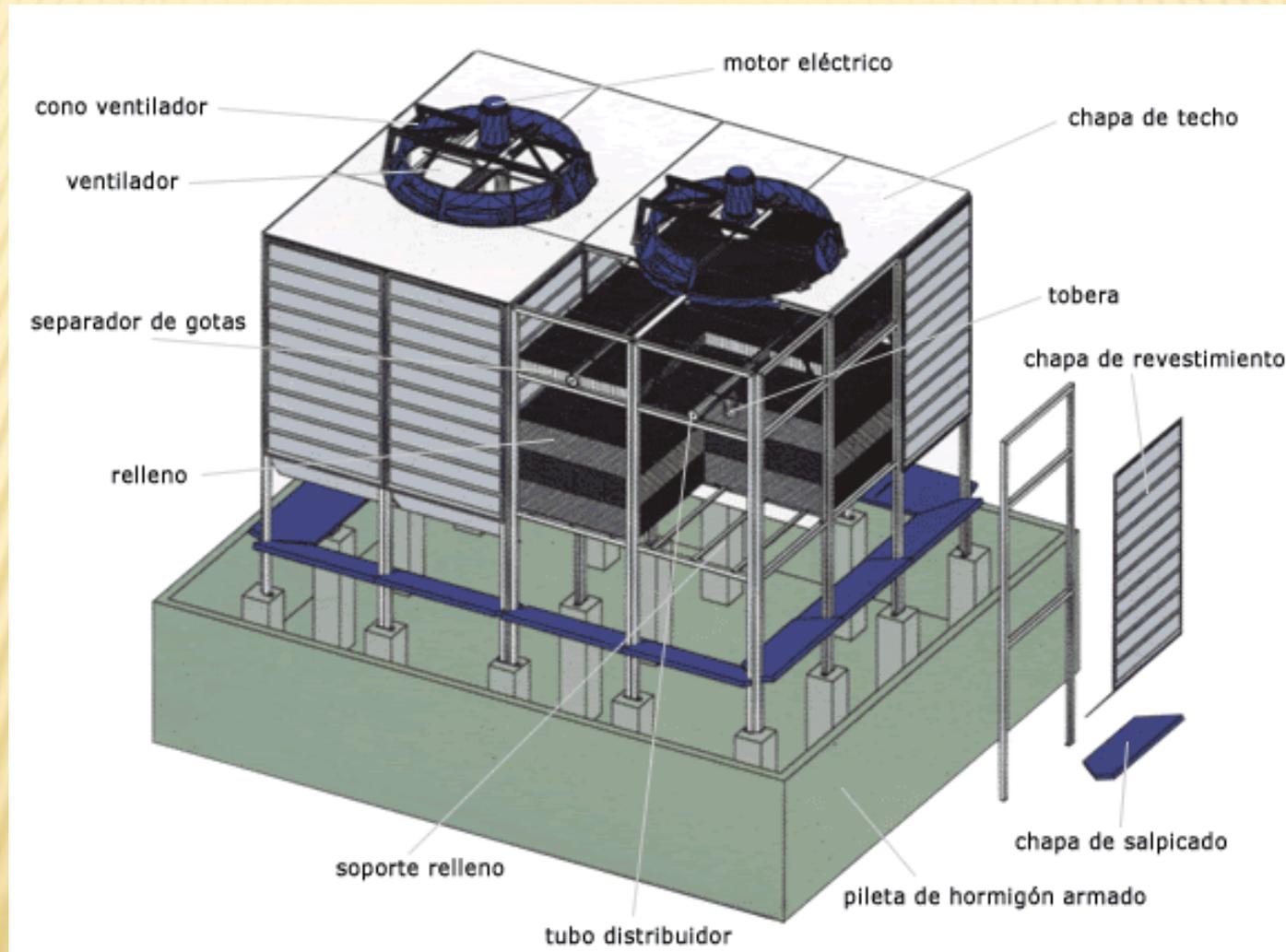
Torre de caída interrumpida





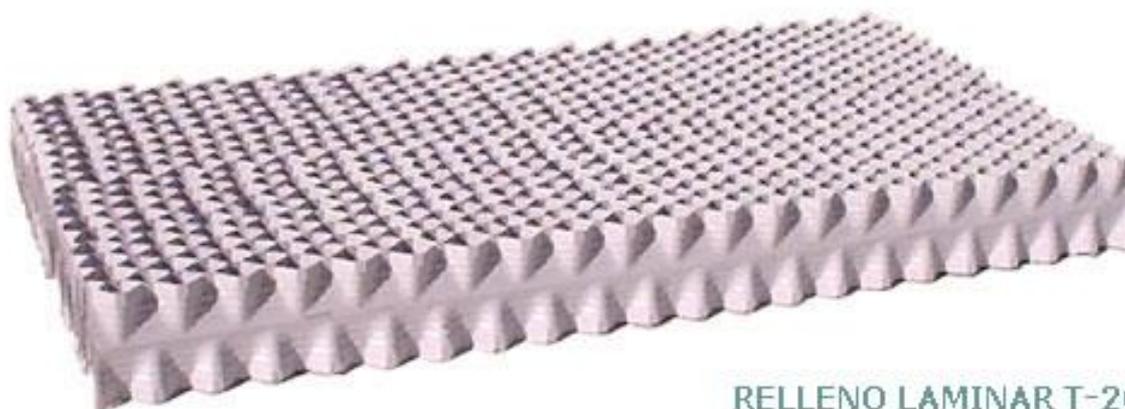
INGC[®]
INGENIERIA Y CAPACITACION

Torre modular

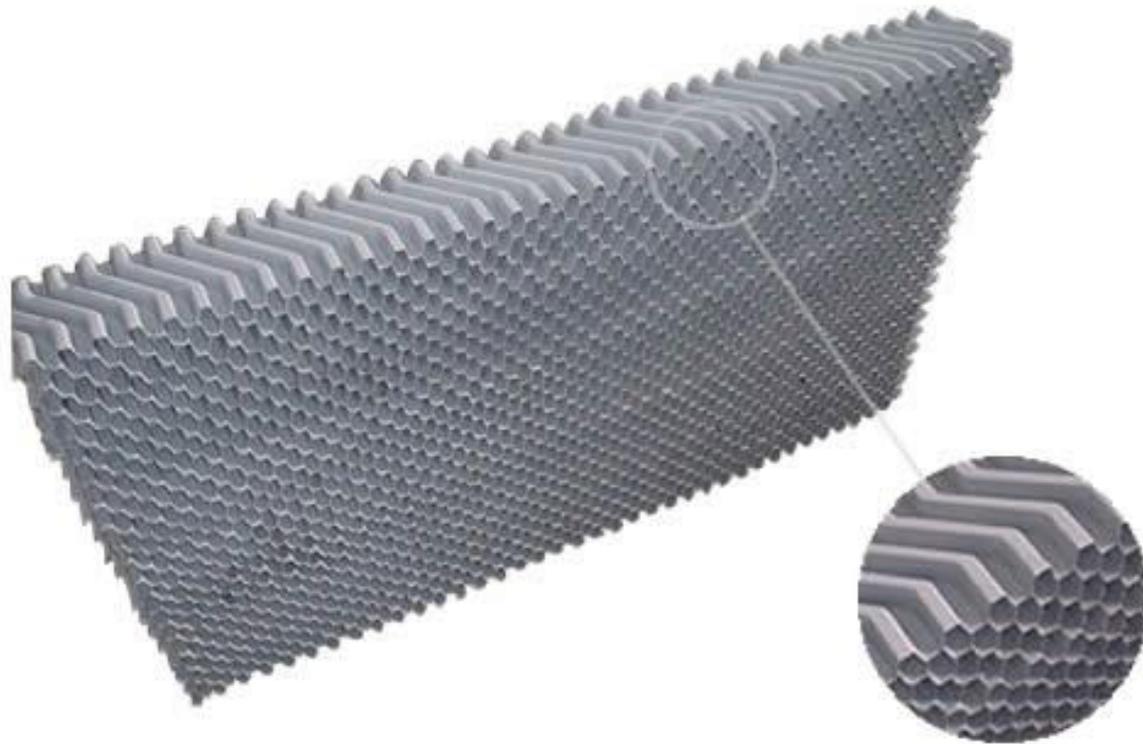




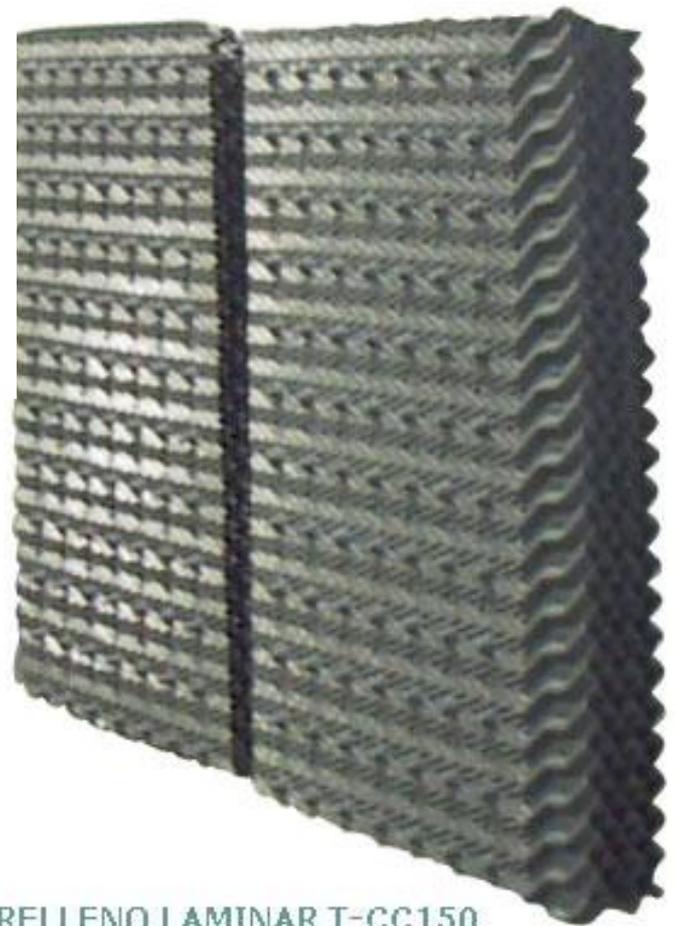
RELLENO LAMINAR T-12



RELLENO LAMINAR T-20



SEPARADOR DE GOTAS LAMINAR Z-130



RELLENO LAMINAR T-CC150

CLASIFICACIÓN DE TORRES DE AGUA DE ENFRIAMIENTO.

Circulación del aire

- a) Atmosféricas Estanque de rocío (Spray Ponds)
 Hiperbólicas de tiro natural

- b) Tipo Mecánico Tiro forzado
 Tiro inducido

Tipo de flujo de aire:

- a) Contra flujo
- b) Flujo Cruzado Sencillo Perpendicular
 Doble Paralelo

Tipo de empaque:

- a) Con relleno Salpiqueo Perpendicular al flujo del aire
 Película Paralelo al flujo de aire
- b) Sin relleno

CLASIFICACIÓN DE TORRES DE AGUA DE ENFRIAMIENTO.

Tipo de enfriamiento:

- a) Evaporativas
- b) Secas
- c) Húmedo-secas

Forma:

- a) Rectilíneas
- b) Redondas
- c) Hiperbólicas
- d) Octogonales

Tipo de fabricación:

- a) Montadas en fábrica (paquete)
- b) Montadas en campo

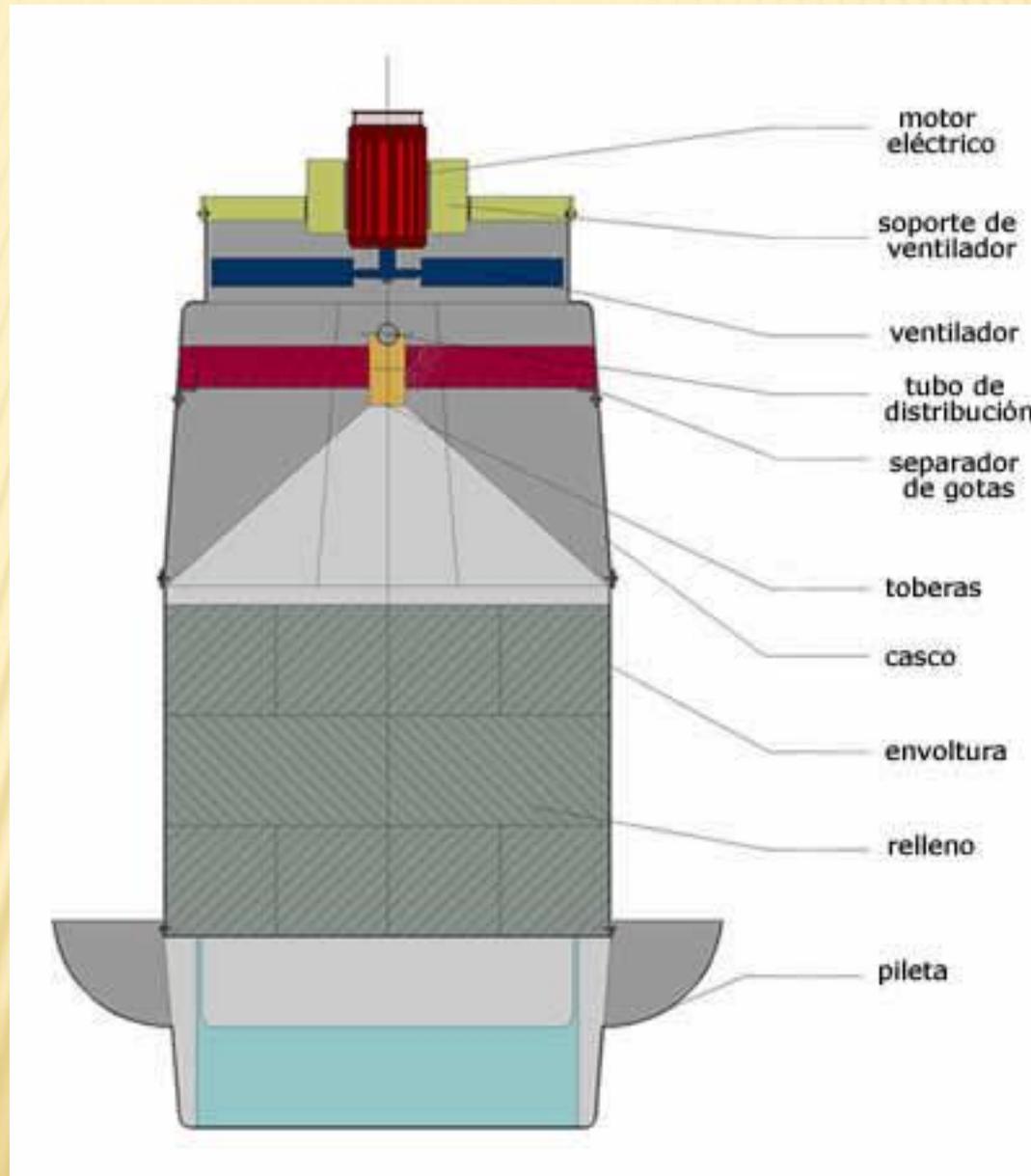
Por el tipo de estructura:

- Madera
- Concreto
- Fibra de vidrio
- Metálicas

Torre modular



Torre compacta



Torre compacta



Tiro natural



Otros tipos de torres



Torre circular

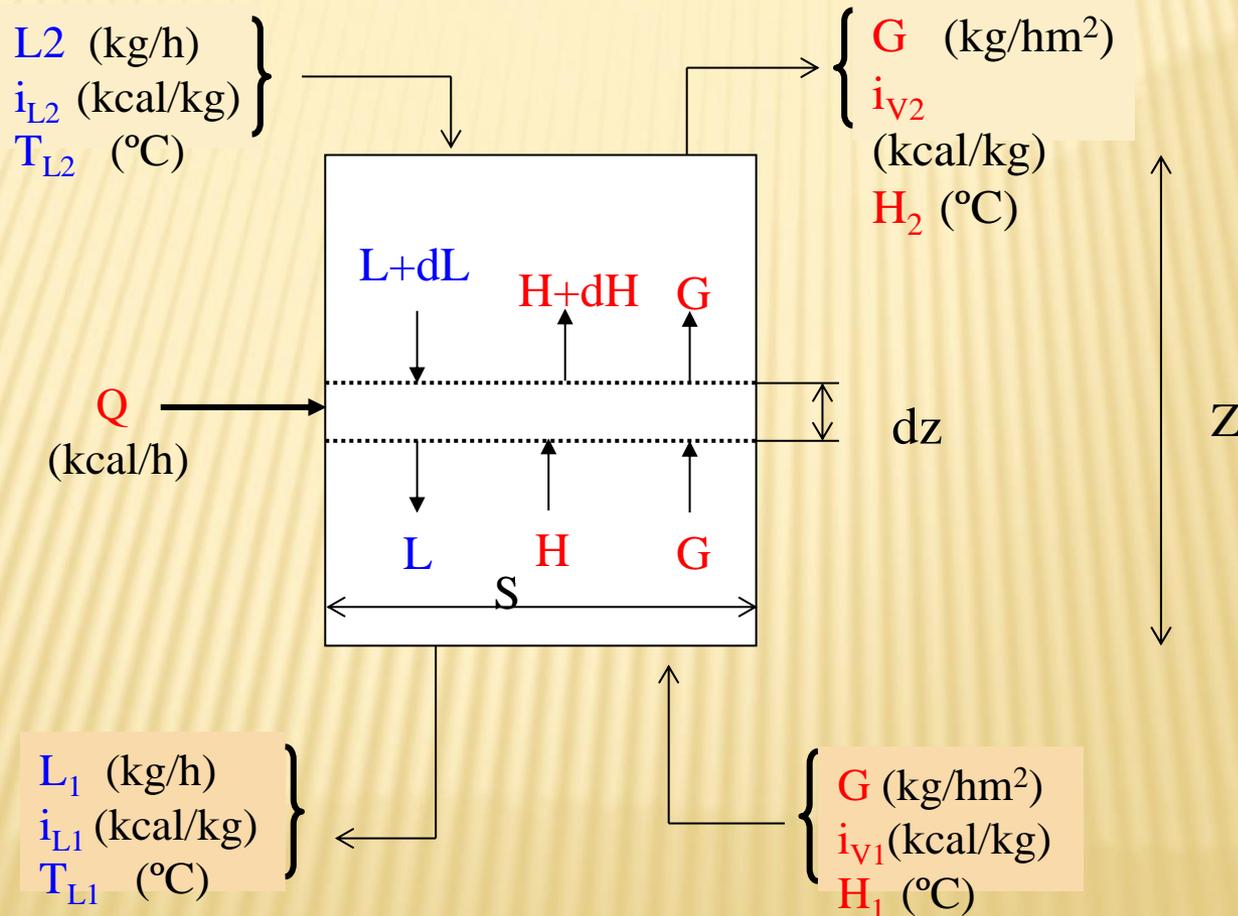
Otros tipos de torres



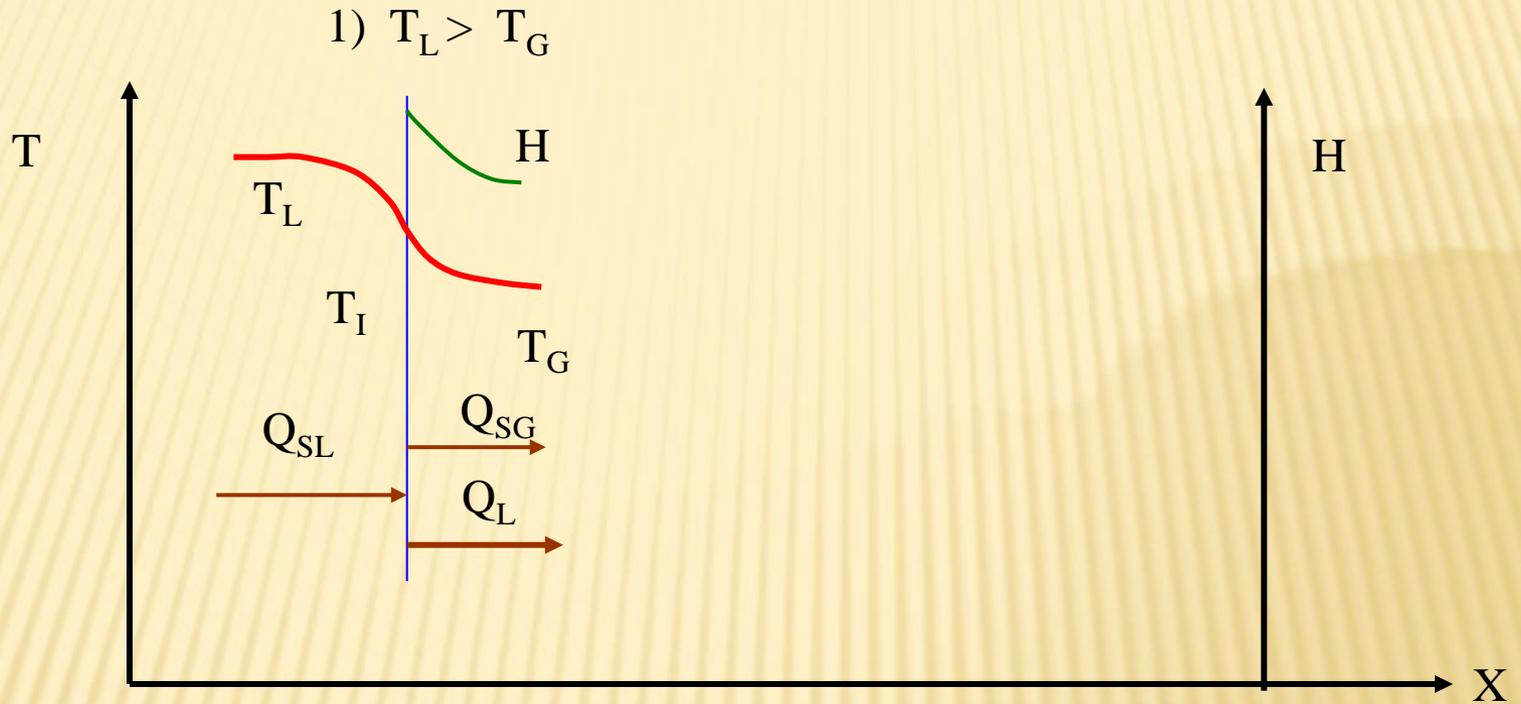
Tipo cascada

Ecuaciones de Diseño

- .Balances de materia
- .Balances de energía
- .Relaciones de equilibrio.

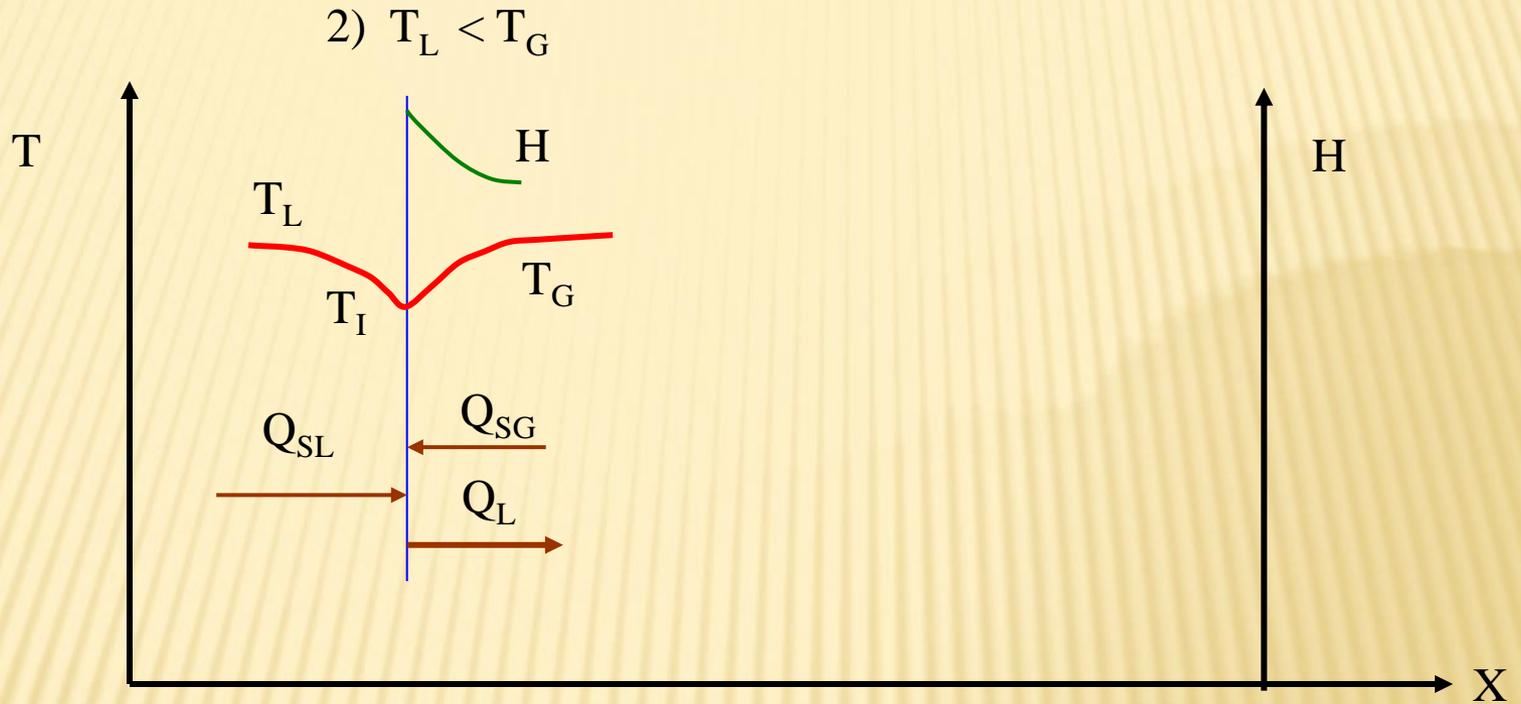


CABEZA DE TORRE



<p>LÍQUIDO (T_L)</p> <p>$L C_L dt_L = h_L a_L (T_L - T_i) S dz$</p>	<p>→</p>	<p>GAS (T_G)</p> <p>$G C_V dT_V = h_C a_V (T_i - T_G) S dz$</p>
<p>→</p>		<p>←</p>
<p>→</p>		<p>$G \lambda_0 dH = \lambda_0 k_y a_M (H_i - H) S dz$</p>
<p>→</p>		<p>←</p>

FONDO DE TORRE



<p>LÍQUIDO (T_L)</p> <p>$L C_L dt_L = h_L a_L (T_L - T_i) S dz$</p>			<p>GAS (T_G)</p> <p>$G C_V dT_V = h_C a_V (T_i - T_G) S dz$</p> <p>$G \lambda_0 dH = \lambda_0 k_y a_M (H_i - H) S dz$</p>
---	--	--	---

APLICACIÓN AL CALCULO: INTEGRACION FORMULAS BÁSICAS

Balance de masa

Para una altura dz $GdH = dL$

Para toda la torre $G(H_2-H_1) = L_2 - L_1$

Balance de entalpía

Si $q = 0$ (sistema adiabático) : $G(i_{V1} - i_{V2}) = L_1 i_{L1} - L_2 i_{L2}$

Para la fase líquida : $d(L i_L) = L c_L dT_L = h_L a_L dz (T_L - T_i)S$

Para la fase gas : $G di_v = G c_h dT_v + G \lambda_o dH$ (1)

Calor sensible $G c_h dT_v = h_G a_H (T_i - T_v) S dz$ (2)

Calor latente $G \lambda_o dH = \lambda_o k_y a_M (H_i - H) S dz$ (3)

Llevamos (2) y (3) a (1), reagrupando, introduciendo la relación de Lewis ($h/(K' C_h) = 1$) y considerando iguales las áreas unitarias específicas:

$$(G/S) di_v = k_y a [(c_h T_i + \lambda_o H_i) - (c_h T_v + \lambda_o H)] dz$$

Despejando dz:

$$dz = G/S k_y a * di_v / (i_i - i_v)$$

integrando se llega a la ED

$$z = \int dz = \frac{G}{S k_y a} \int \frac{di_v}{i_i - i_v} = (HTU) * (NTU) \quad \text{Ec. Merkel}$$

Para hacerlo en forma gráfica, necesitamos la curva de equilibrio y la recta de operación. La primera es experimental y la segunda se obtiene teniendo en cuenta que:

1- Se desprecia el cambio de L con la altura.

2- Tomando la entalpía del agua como: $i_x = C_p (t_x - t_o)$

3- Tomando T_o la temperatura de referencia para cuantificar la entalpía, se tiene:

$$G \cdot di = L C_p dT$$

$$di = L/G C_p dT$$

Integrando la ecuación anterior:

$$i_1 - i_2 = L/G \cdot C_p (T_1 - T_2)$$

Teniendo en cuenta que C_p para el caso del agua es 1:

$$i_2 - i_1 = L/G (T_1 - T_2)$$

La ecuación anterior representa la línea de operación que marca las condiciones en el seno del gas. La integral

$$\int \frac{dT}{(i' - i)} = K.a. G/L$$

representa la superficie entre la recta de operación y la curva de equilibrio

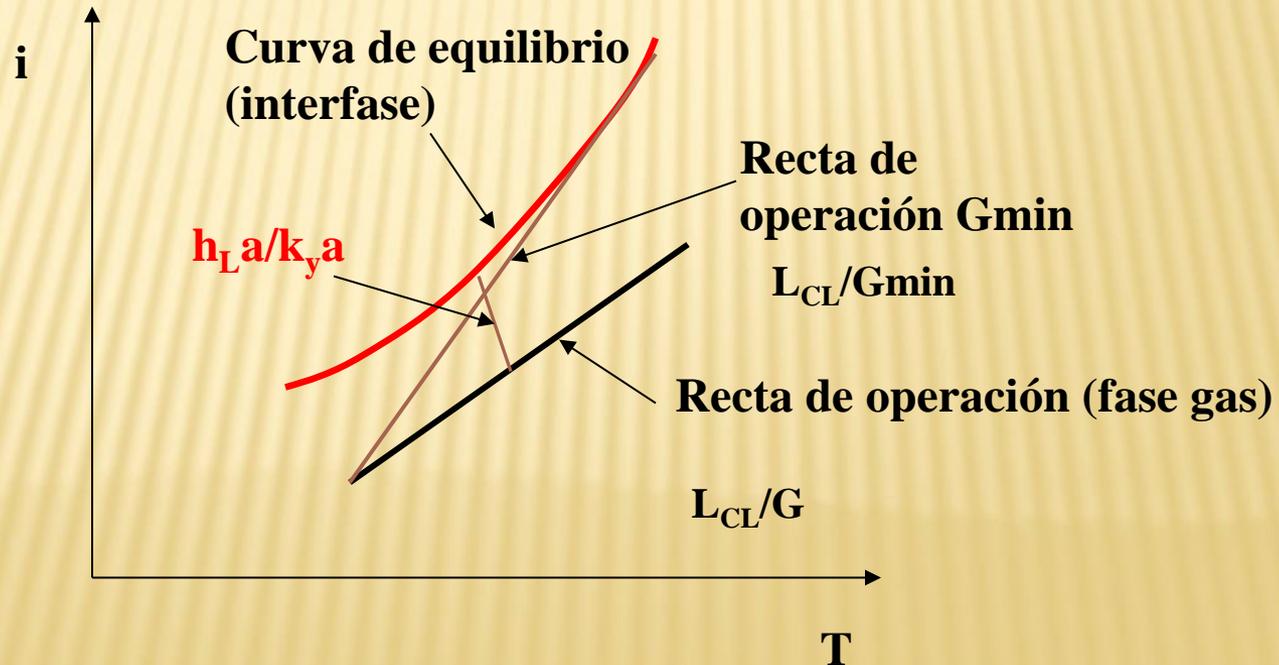
Fuerza directriz

de la expresión : $G di_v = d(L i_L)$

y la relación : $d(L i_L) = L c_L dT_L = h_L a_L dz (T_L - T_i)S$

Se llega a : $(G/S) di_v = a k_y (i_i - i_v) dz = h_L a_L dz (T_L - T_i)$

$$-h_L a / k_y a = (i_v - i_i) / (T_L - T_i)$$



Coeficientes h y K

Normalmente lo da el fabricante de la torre, pero si está este dato se puede proceder experimentalmente o mediante fórmulas. En general el fabricante da el coeficiente global y no los coeficientes perliculares

Método 1: según la experiencia en EEUU el coeficiente $h_L a/k_y a = \text{tg } 145^\circ$

Método 2: realizar la determinación experimental mediante un ensayo de humidificación adiabática y otro de deshumidificación no adiabático en la misma torre. En esta combinación se pueden sacar los coeficientes peliculares

Método 3: determinar experimentalmente el coeficiente global por el método de Mickley

Método 4: usar expresiones experimentales para k' , h_c y h_L

$$k' = 0,034 G^{0,82} L_h^{0,12} e^{(0,82Tm-37Hm)}$$

$$h_c = 0,034 \text{ sm} G^{0,82} L_h^{0,12} e^{(0,05Tm-37Hm)}$$

$$h_L = 1,73 \cdot 10^{-6} G^{1,8} Lh e^{(53Hm-0,09Tm)}$$

$$1650 \leq G \leq 11600 \quad : \quad 76,8 \leq Lh \leq 577$$

$$20 \leq Tm \leq 24 \quad : \quad 0,009 \leq Hm \leq 0,017$$

$$k'a = 1,25 G^{0,82} \left(\frac{L_m}{S}\right)^{0,12} e^{(0,05Tm-37Hm)}$$

$$h_c a = 1,25 G^{0,82} \left(\frac{L_m}{S}\right)^{0,12} e^{(0,05Tm-37Hm)}$$

$$h_L a = 1,4 \cdot 10^{-6} G^{1,8} \frac{L_m}{S} e^{(53Hm-0,09Tm)}$$

$$5700 \leq G \leq 15100 \quad : \quad 6800 \leq Lm/S \leq 9500$$