

Humidificación

Transferencia de Materia





- Mezcla de vapor y gas no condensable (GI)
- Transf de Q latente y sensible
- Transferencia de 1 solo componente
- Gas insoluble en líquido
- Calor latente relativamente constante
- $Le = 1$

- Humedad Molar $Y = \frac{y_v}{y_A} = \frac{n_v}{n_A} = \frac{P_v}{P_A} = \frac{P_v}{P_T - P_v}$

- Humedad Absoluta $Y' = \frac{m_v}{m_A} = \frac{Mr_v * n_v}{Mr_A * n_A} = \frac{kg_{agua}}{kg_{Aire}} = 0,62 * Y$

- Calor Húmedo: $C_s = Cp_{Aire} + Cp_{Vapor} * Y' \left(\frac{kJ}{kg AS ^\circ C} \right)$

- Entalpía Aire Húmedo: $H = Cs (t - t_0) + \lambda_0 * Y' \left(\frac{kJ}{kg AS ^\circ C} \right)$

- Condiciones de referencia:
Aire y Agua líquida a $t_0 = 0 ^\circ C$

- $Le \cong 1 = \frac{h_a}{k_y * Cs}$



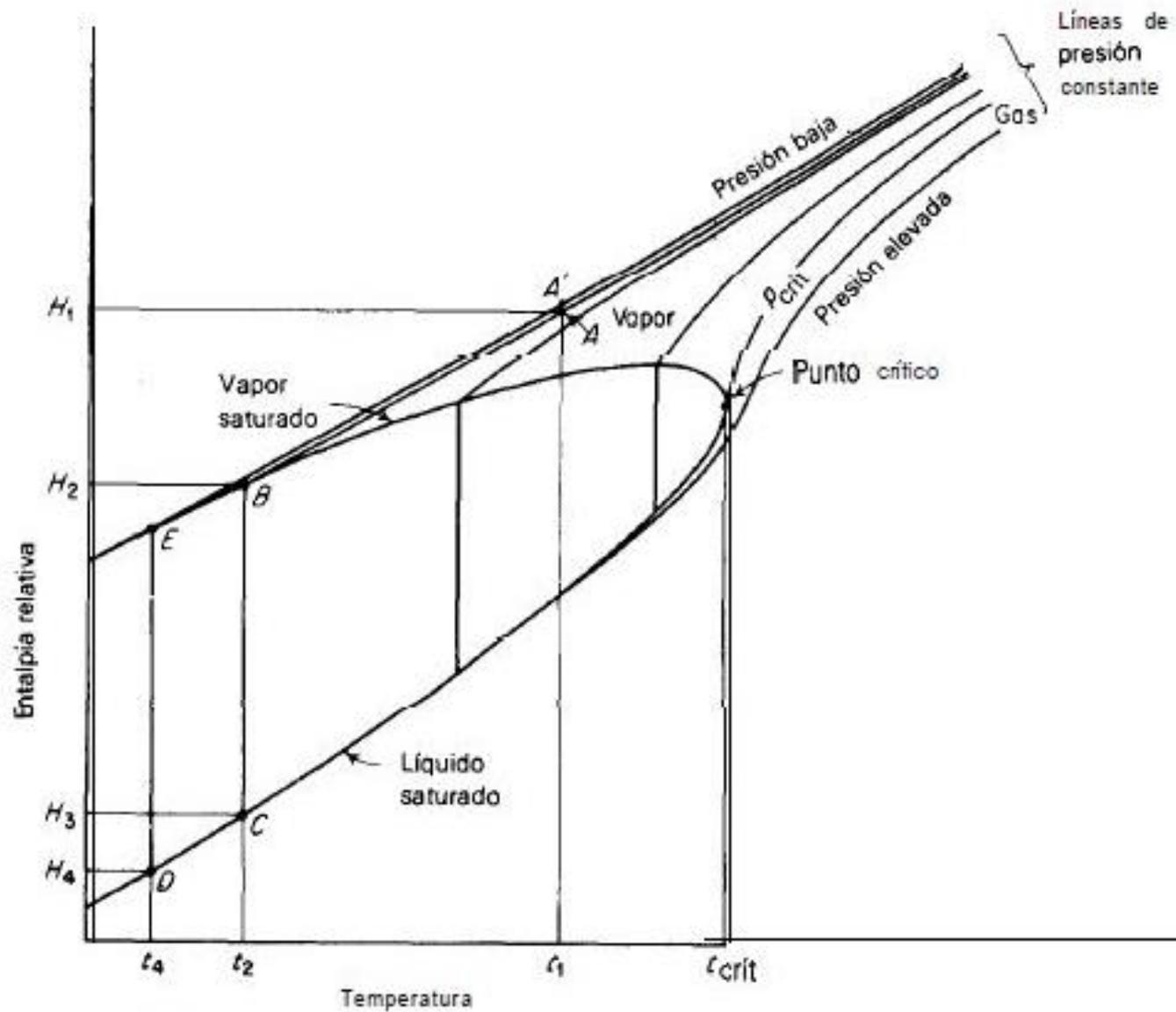


Diagrama Psicrométrico

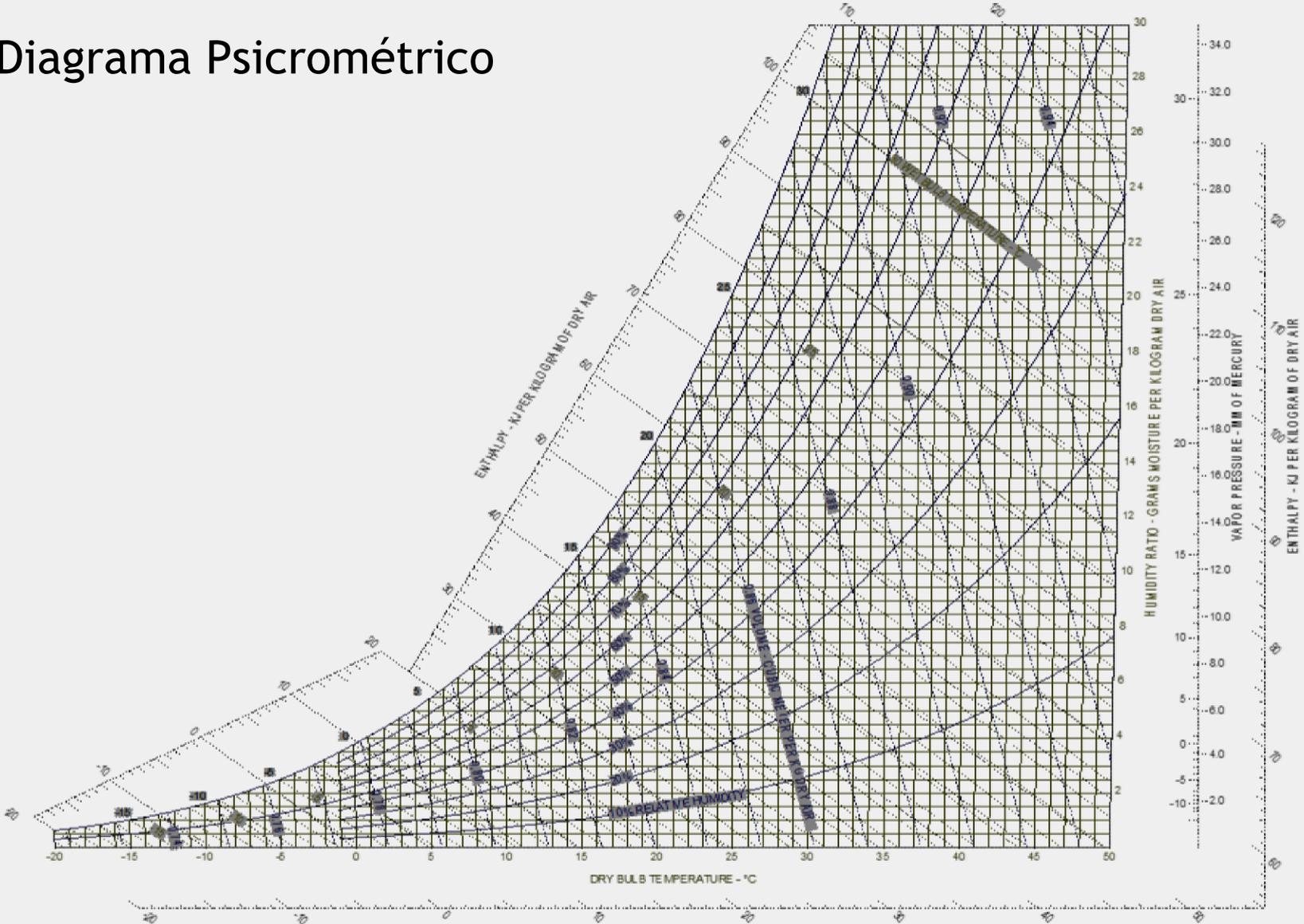


Diagrama Psicrométrico

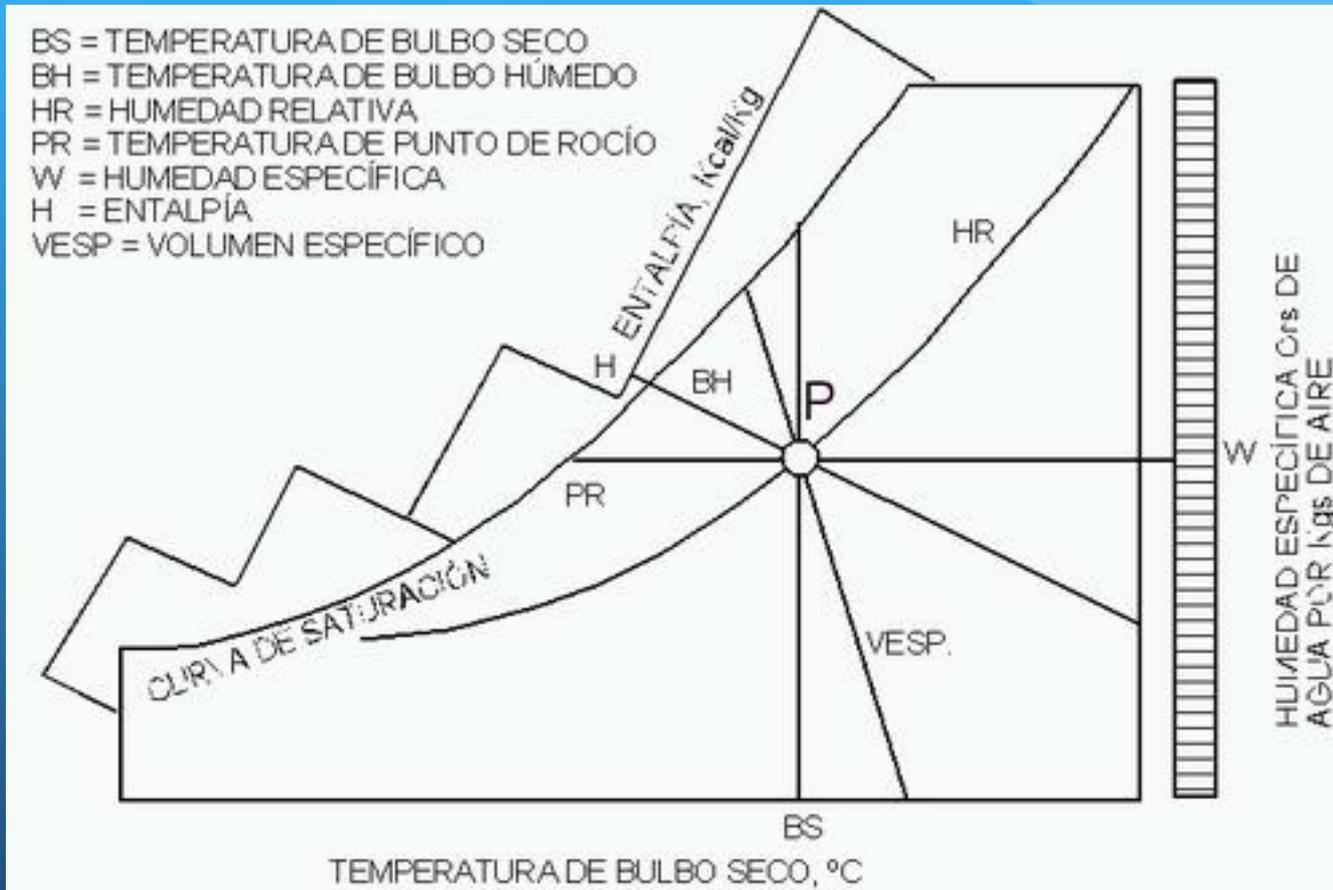
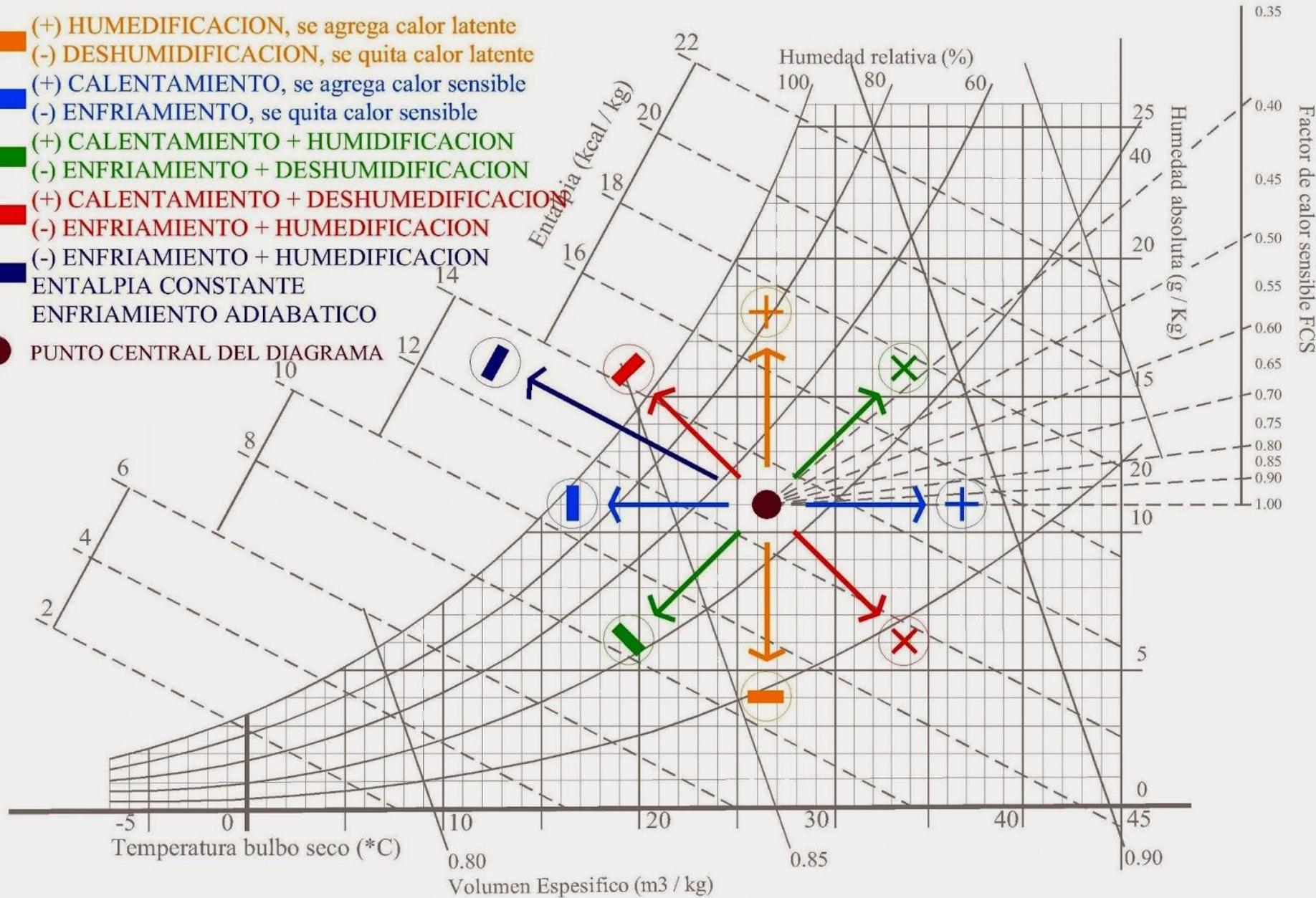


DIAGRAMA PSICROMETRICO

- (+) HUMEDIFICACION, se agrega calor latente
- (-) DESHUMIDIFICACION, se quita calor latente
- (+) CALENTAMIENTO, se agrega calor sensible
- (-) ENFRIAMIENTO, se quita calor sensible
- (+) CALENTAMIENTO + HUMEDIFICACION
- (-) ENFRIAMIENTO + DESHUMIDIFICACION
- (+) CALENTAMIENTO + DESHUMEDIFICACION
- (-) ENFRIAMIENTO + HUMEDIFICACION
- (-) ENFRIAMIENTO + HUMEDIFICACION
- ENTALPIA CONSTANTE
- ENFRIAMIENTO ADIABATICO
- PUNTO CENTRAL DEL DIAGRAMA



OPERACIONES GAS-LÍQUIDO

El contacto directo de un gas con un líquido puro puede tener uno de los siguientes fines:

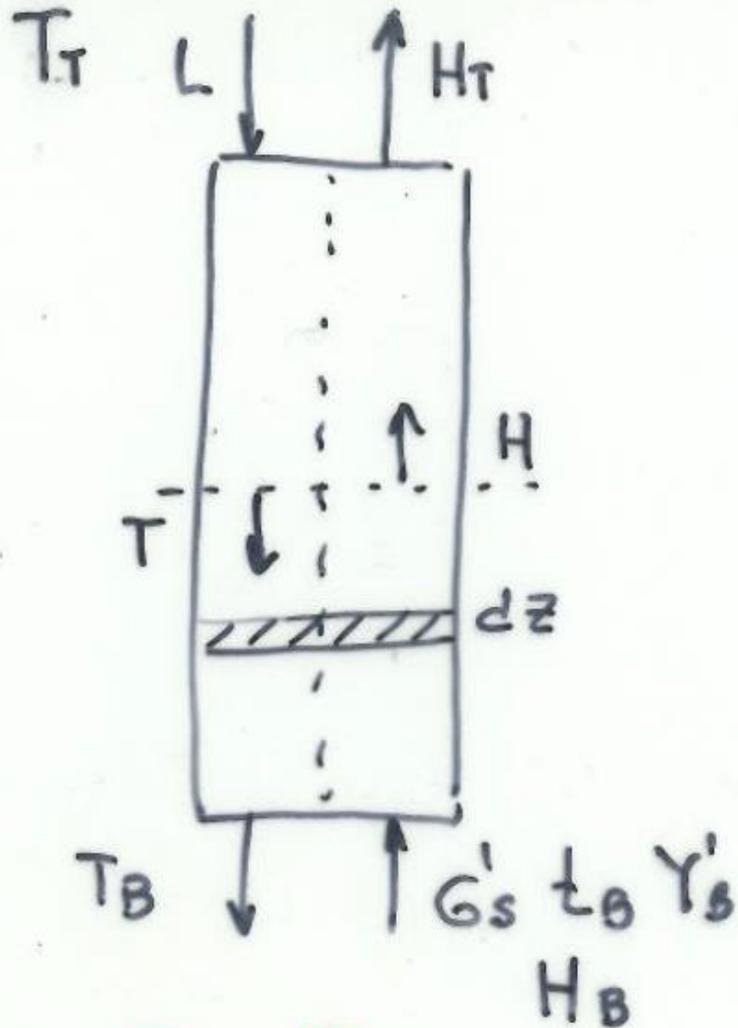
1. Operaciones adiabáticas

- a) *Enfriamiento de un líquido.* El enfriamiento sucede por la transferencia de calor sensible y también por evaporación. La aplicación principal es el enfriamiento de agua por contacto con el aire atmosférico (enfriamiento de agua).
- b) *Enfriamiento de un gas caliente.* El contacto directo proporciona un intercambio de calor no problemático, que es muy efectivo, en caso de que no importe la presencia de una pequeña cantidad de vapor del líquido.
- c) *Humidificación de un gas.* Ésta puede utilizarse, por ejemplo, para controlar el contenido de humedad del aire para el secado.
- d) *Deshumidificación de un gas.* El contacto de una mezcla templada de vapor-gas con un líquido frío produce la condensación del vapor. Se puede aplicar en aire acondicionado, recuperación de vapores de disolventes a partir de gases utilizados para el secado y similares.

2. Operaciones no adiabáticas

- a) *Enfriamiento por evaporación.* Un líquido o un gas dentro de un tubo se enfría con un flujo de agua en forma de película en la superficie externa del tubo; a su vez, esta última se enfría por contacto directo con aire.
- b) *Deshumidificación de un gas.* Una mezcla de gas-vapor se pone en contacto con tubos refrigerantes y el vapor se condensa en los tubos.

Enfriamiento de Agua



$T_B < T_T$
 $H_T > H_B$

$$G'_s (H - H_B) = L c_L (T - T_B)$$

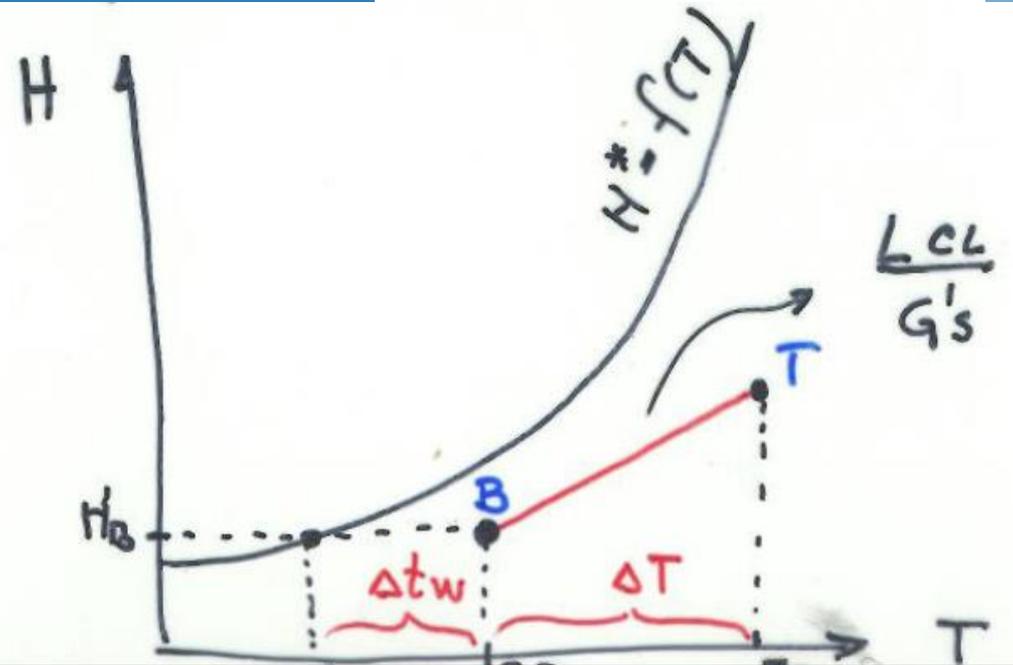
Hipótesis:

$$L = \text{cte}$$

(ΔL 1 al 3%)

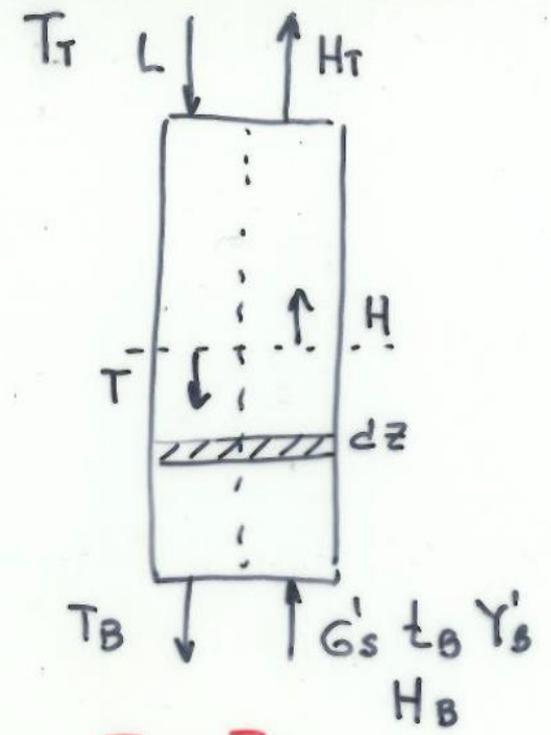
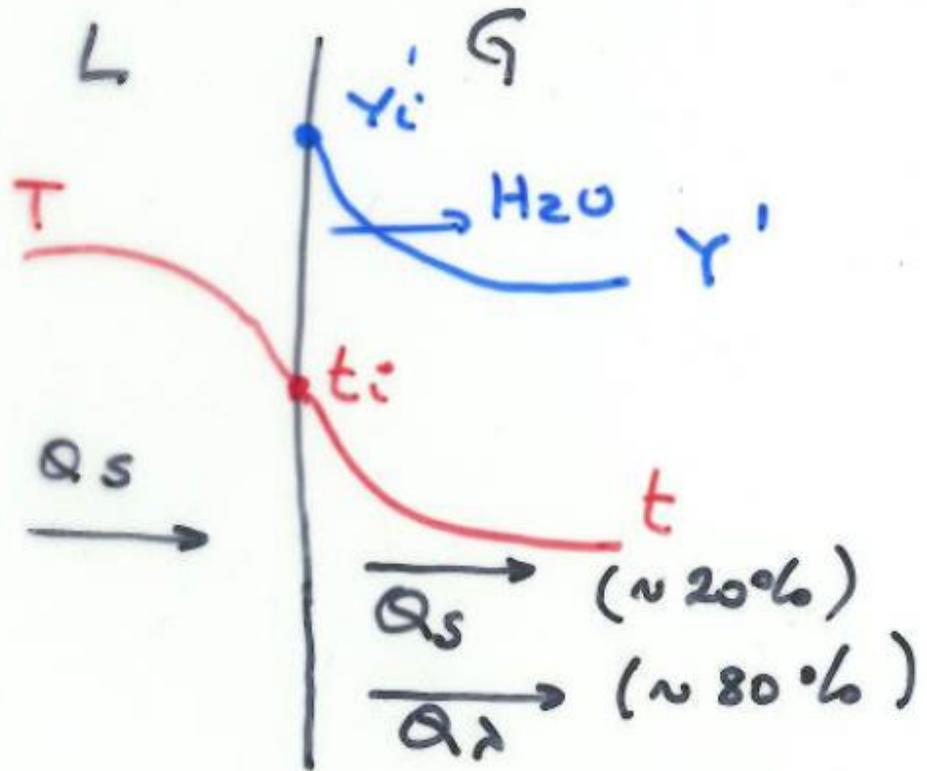
$$\lambda, c_s, c_L \neq f(t)$$

$$Le = \frac{h_a}{k_y c_s} = 1$$



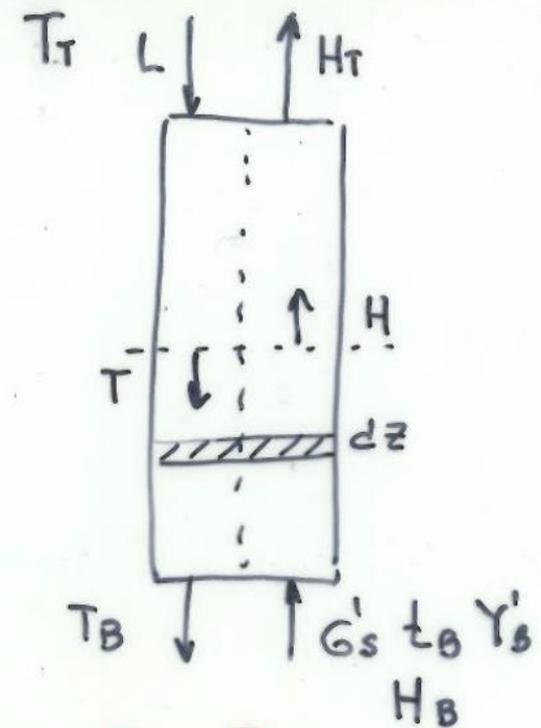
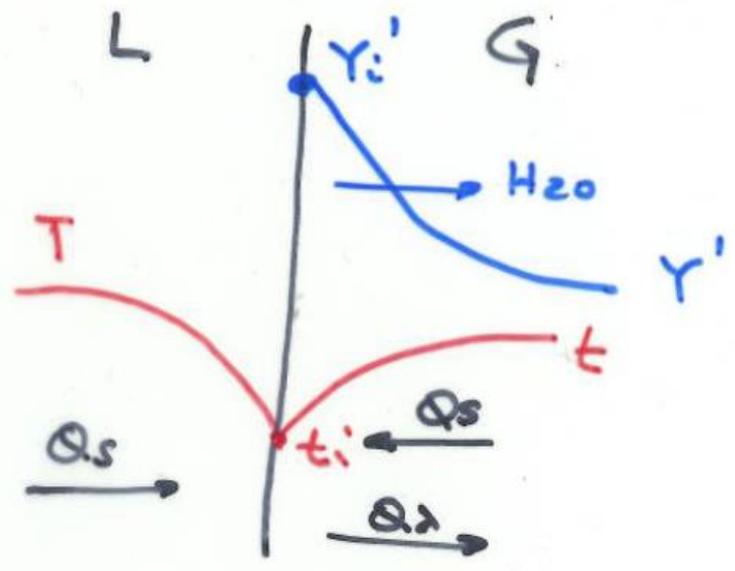
Perfiles

Parte superior de la torre

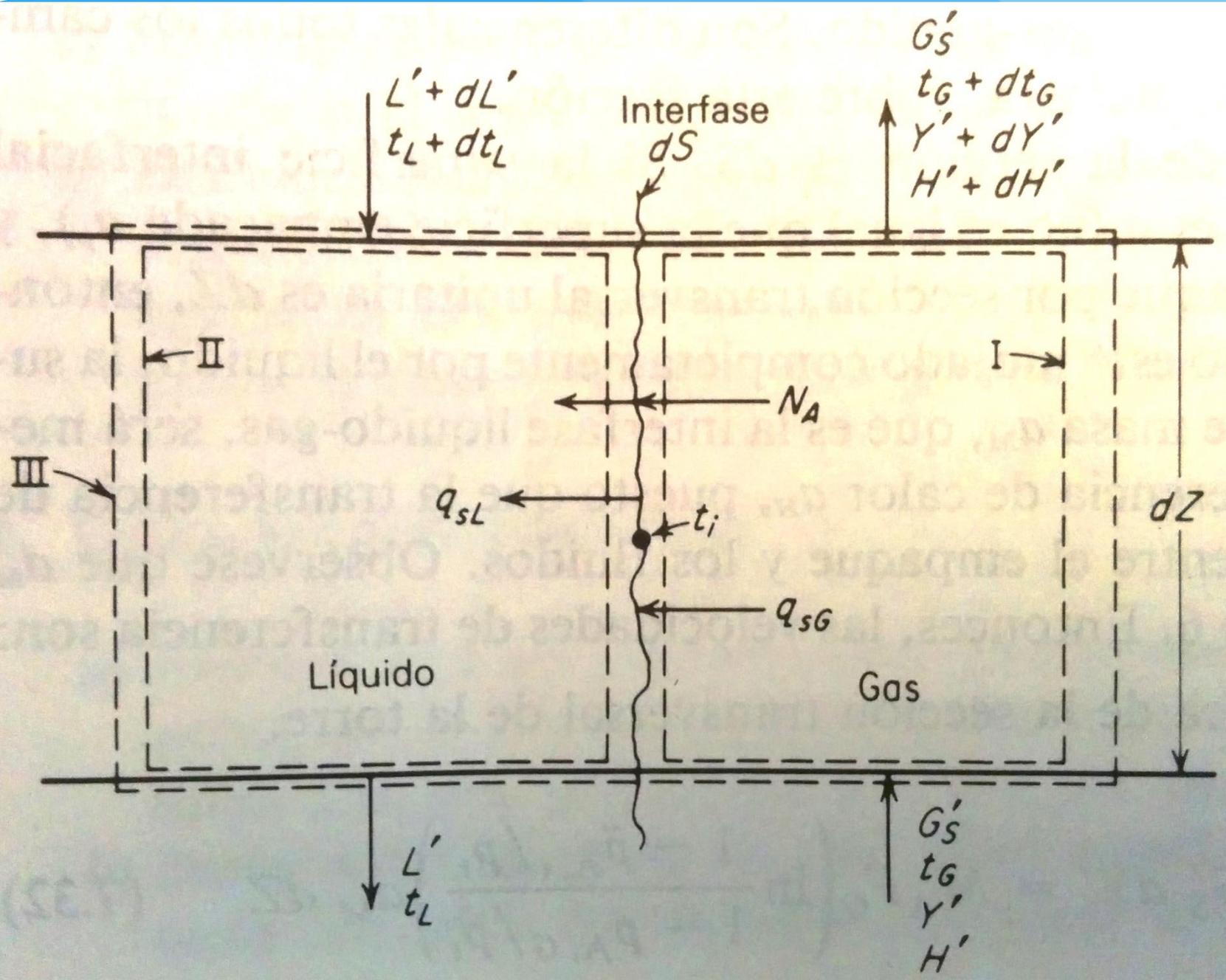


$T_B < T_T$
 $H_T > H_B$

Fouling Tower



$T_B < T_T$
 $H_T > H_B$



En un dZ :

$$dQ = L c_L dT = G'_s dH =$$

$$= \left[\underbrace{h_g a (t_i - t) dV}_{dQ_s} + \underbrace{k_y a \lambda (Y_i - Y') dV}_{dQ_\lambda} \right] \text{ unal gas}$$

con $Le = 1$

$$h_g = k_y c_s$$

$$\lambda \approx \lambda_0 \neq f(t)$$

$$c_s \neq f(t)$$

$$L c_L dT_L = G'_s dH = k_y a dV [c_s (t_i - t) + \lambda (Y_i - Y')] \\ = k_y a dV (H_i - H)$$

$$\frac{k_y a}{L} \int_0^V dV = \int_{T_B}^{T_T} \frac{c_L dT}{H_i - H} = C = \frac{k_y a V}{L} = \frac{k_y a S_o Z}{L}$$

↓
característica requerida.

$$\frac{k_y a}{G's} \int_0^V dV = \int_{H_B}^{H_T} \frac{dH}{H_i - H} = \frac{k_y a V}{G's} = \frac{k_y a S_o Z}{G's}$$

$$Z = \frac{G's}{k_y a S_o} \int_{H_B}^{H_T} \frac{dH}{H_i - H} = HTG \quad NTG$$



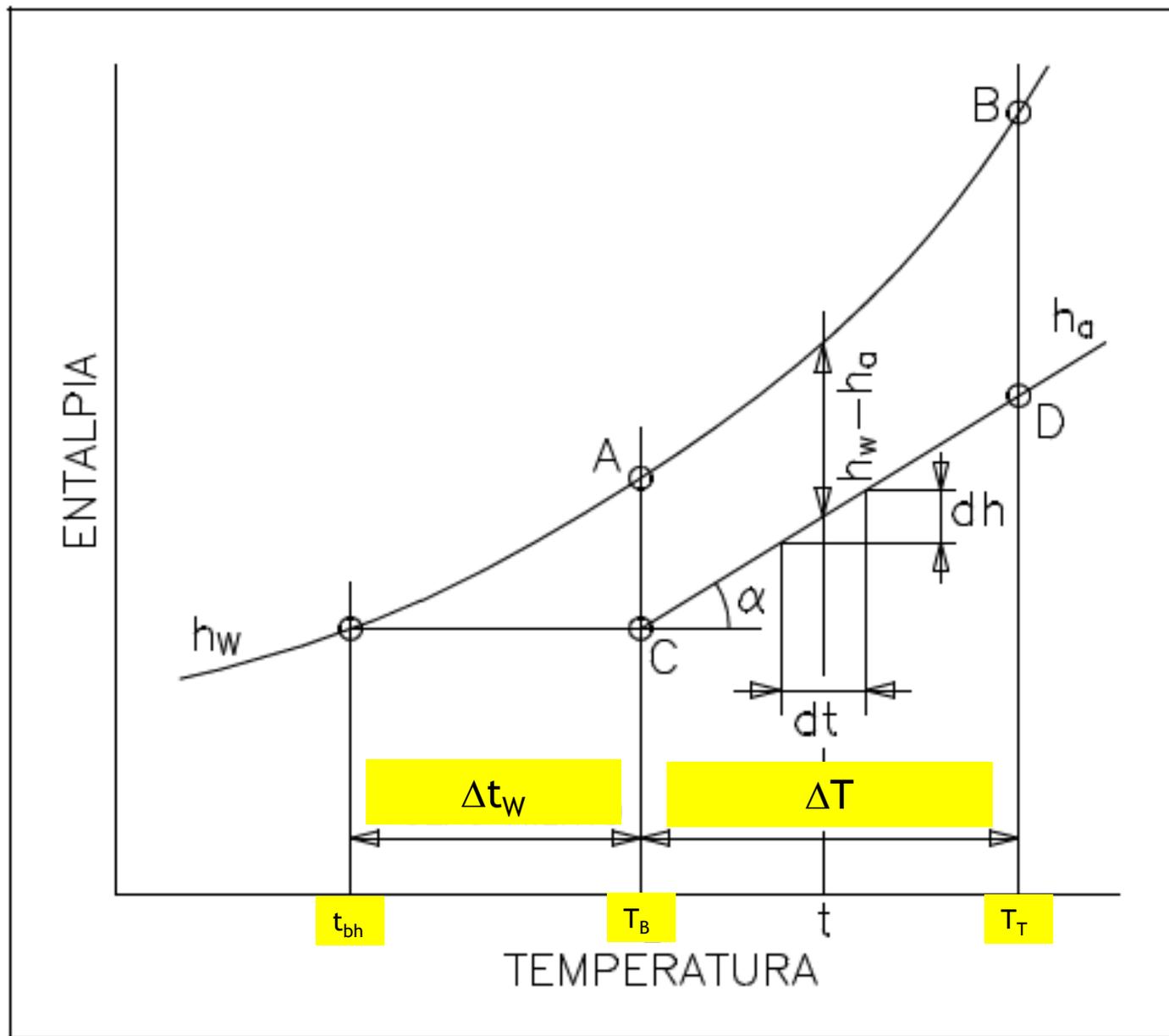
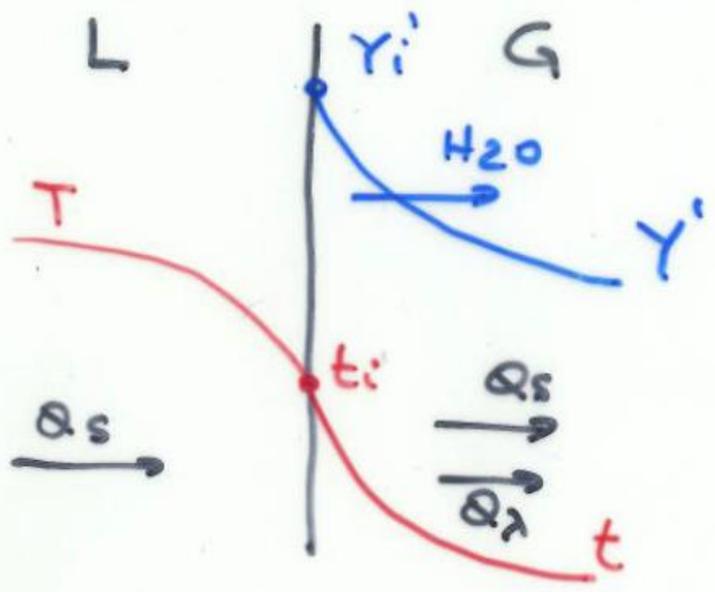


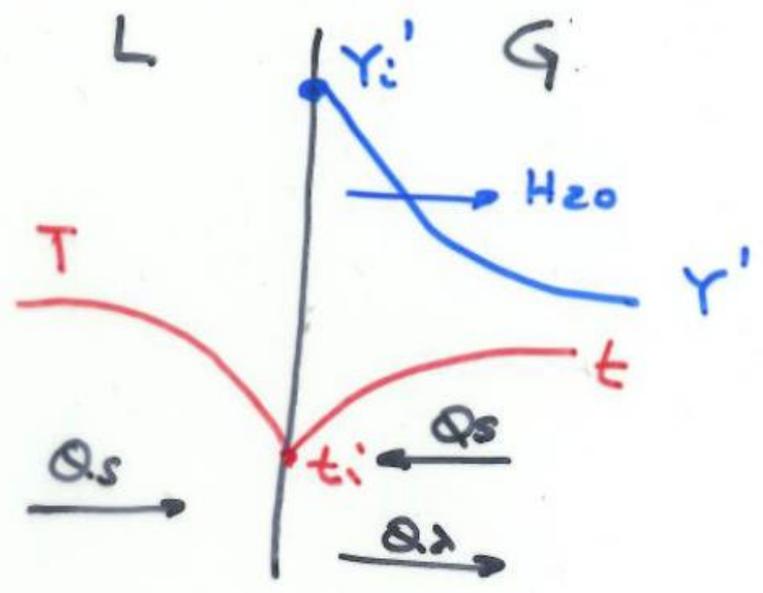
Figura 8: Diagrama entálpico

Perfiles T, t ; Y'

Tope Torre



Fondo Torre



El agua puede enfriarse a $T < t_w$ a la del aire siempre que $T > t_w$

Para el diseño de los tonos de enfriamiento se calcula la C_R (característica requerida) para \neq valores de G

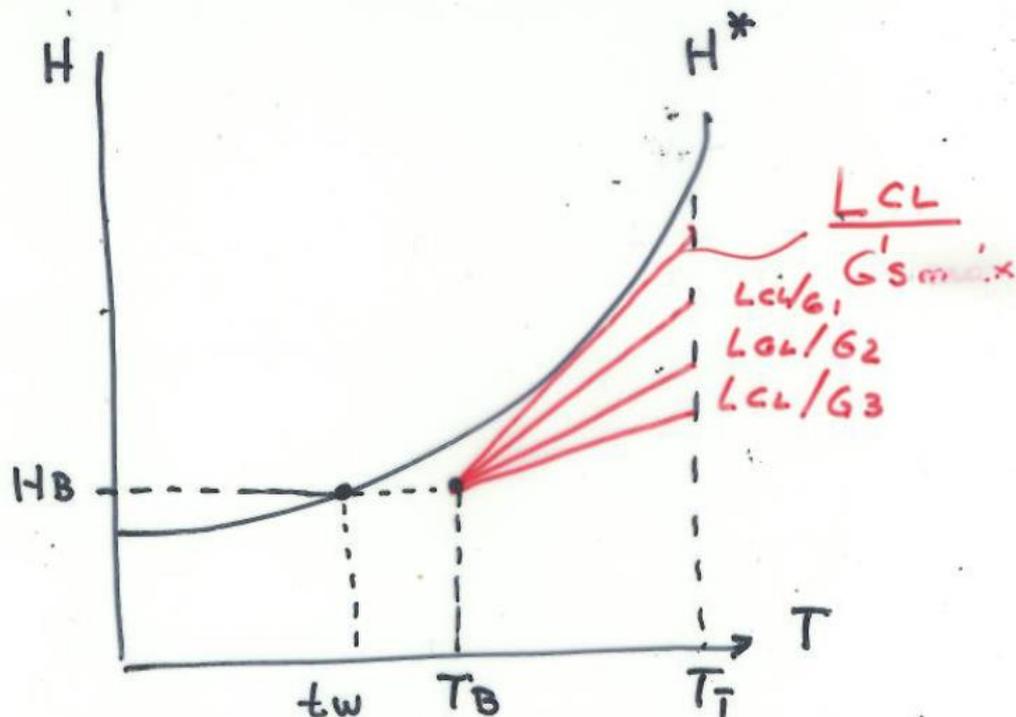
Los fabricantes entregan C_D (característica disponible) de sus rellenos también en función de L y G .

$L \rightarrow$ dato

$\Delta T \rightarrow$ dato

$H_B \rightarrow$ dato

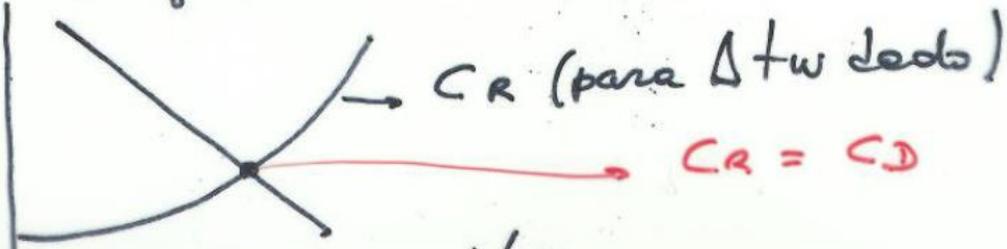
En realidad T_B
= define con ΔT_w



$$C_D = \frac{k_y a V}{L}$$

$$C_R = \int_{T_B}^{T_L} \frac{C_L dT}{H_i - H}$$

C_D según relleno



Determinación de H_i

$$dQ = L c_L dT = G'_s dH =$$

$$= \left[\underbrace{h_g a (t_i - t) dV}_{dQ_s} + \underbrace{k_y a \lambda (Y_i - Y') dV}_{dQ_\lambda} \right] \text{ en el gas}$$

H_i ?

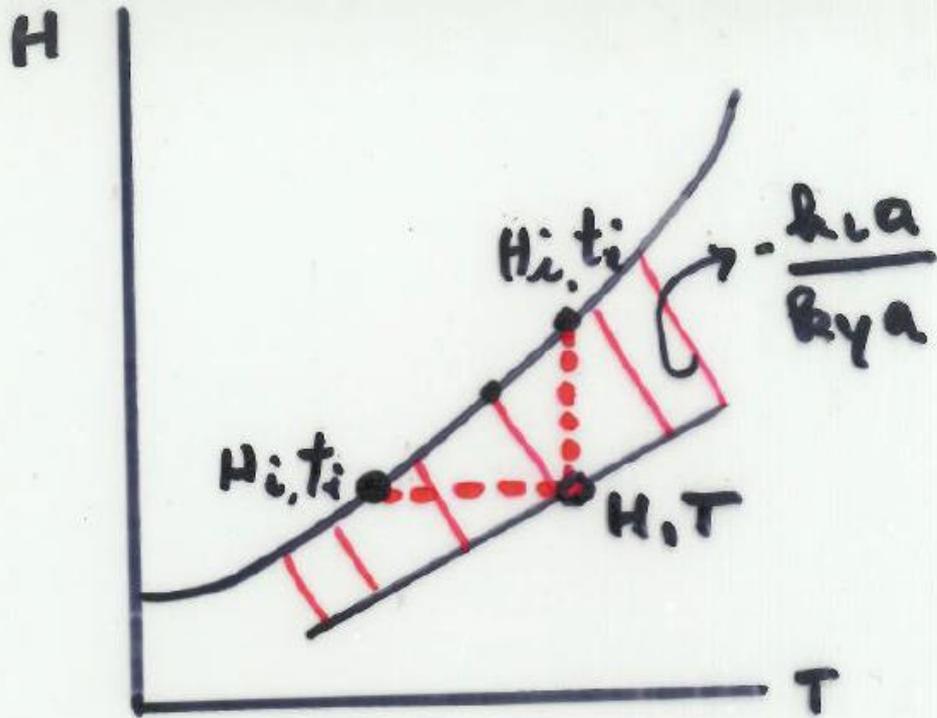
$$L c_L dT = h_L a (T - t_i) dV =$$

$$= k_y a (H_i - H) dV$$

$$\frac{H_i - H}{T} = - \frac{h_L a}{k_y a}$$

en L
en G





gotas:

$$\frac{h_{ia}}{h_{ya} c_L} : 1,3 - 5$$

Película:

$$\frac{h_{ia}}{h_{ya} c_L} : 10 - 160$$

$$h_L \rightarrow 0 \quad \frac{1}{h_L} \rightarrow \infty$$

$$t_i = t_w \quad (H_i - H) = 0$$

$$h_L \rightarrow \infty \quad \frac{1}{h_L} \rightarrow 0$$

$$t_i = T \quad H_i = H_s = H_T^*$$

$$(H_i - H) = (H^* - H) = \text{máx.}$$

Método de Mickley: Evolución del aire

H vs. t

$$H = c_s(t - t_0) + \lambda_0 Y'$$

$$dQ = G'_s dH = h_Y a (H_i - H) dV$$

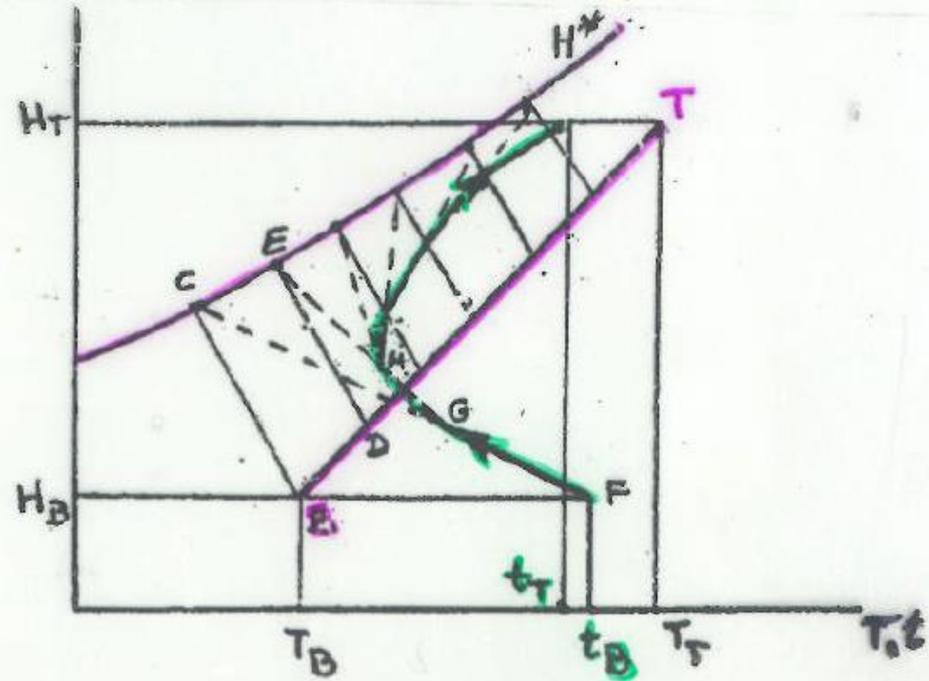
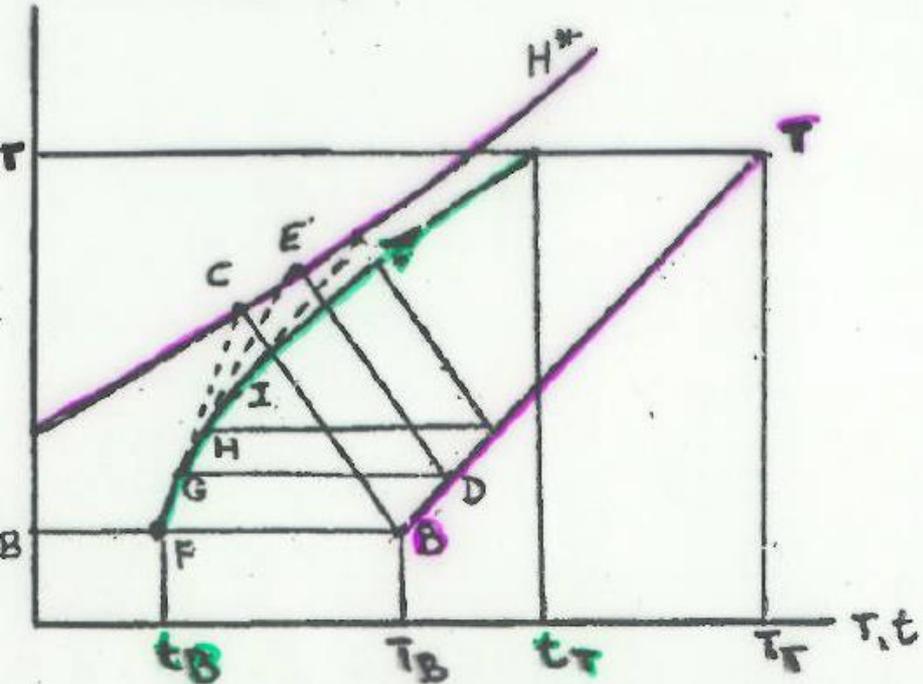
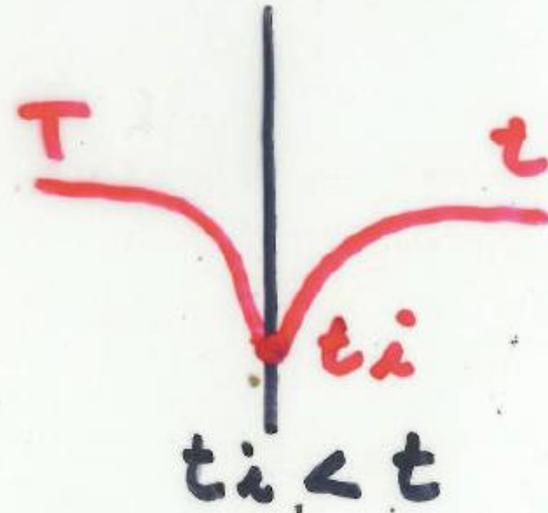
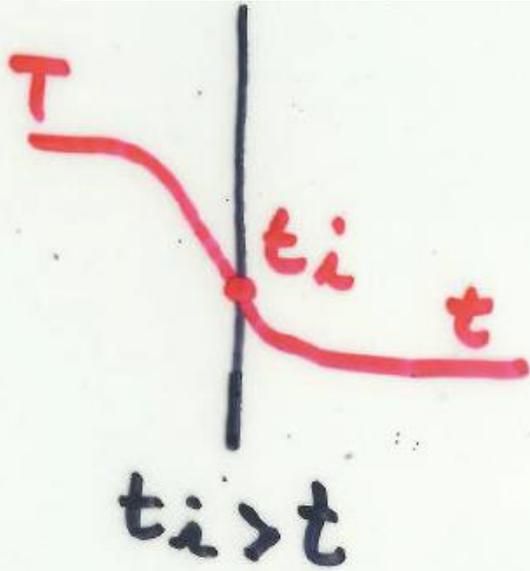
$$dQ_s = G'_s c_s dt = h a (t_i - t) dV$$

$$\frac{dH}{c_s dt} = \frac{h_Y a}{h a} \frac{H_i - H}{t_i - t}$$

$$Le = \frac{h}{h_Y c_s} = 1$$

$$\therefore \frac{dH}{dt} = \frac{H_i - H}{t_i - t}$$

en el gas



Método de Mickley - Utilidades

1.- Determinación de Coeficientes

- ✓ Suponer h_{La} / k_{ya} → realizar la evolución hasta obtener t_T .
- ✓ Calcular k_{ya}

$$\int_{H_B}^{H_T} \frac{dH}{H_i \cdot H} = \frac{k_{ya} V}{G'_3} \Rightarrow k_{ya}$$

- ✓ Calcular h_{La}

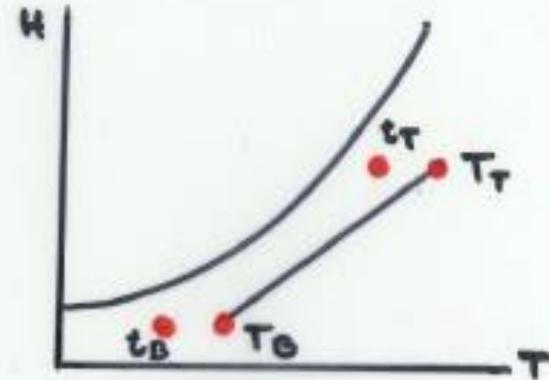
$$de - \frac{h_{La}}{k_{ya}} \Rightarrow h_{La}$$

- ✓ Con $Le = 1$ Obtengo h_g

$$de Le = \frac{h}{k_{ya} c_s} \Rightarrow h$$

Datos:

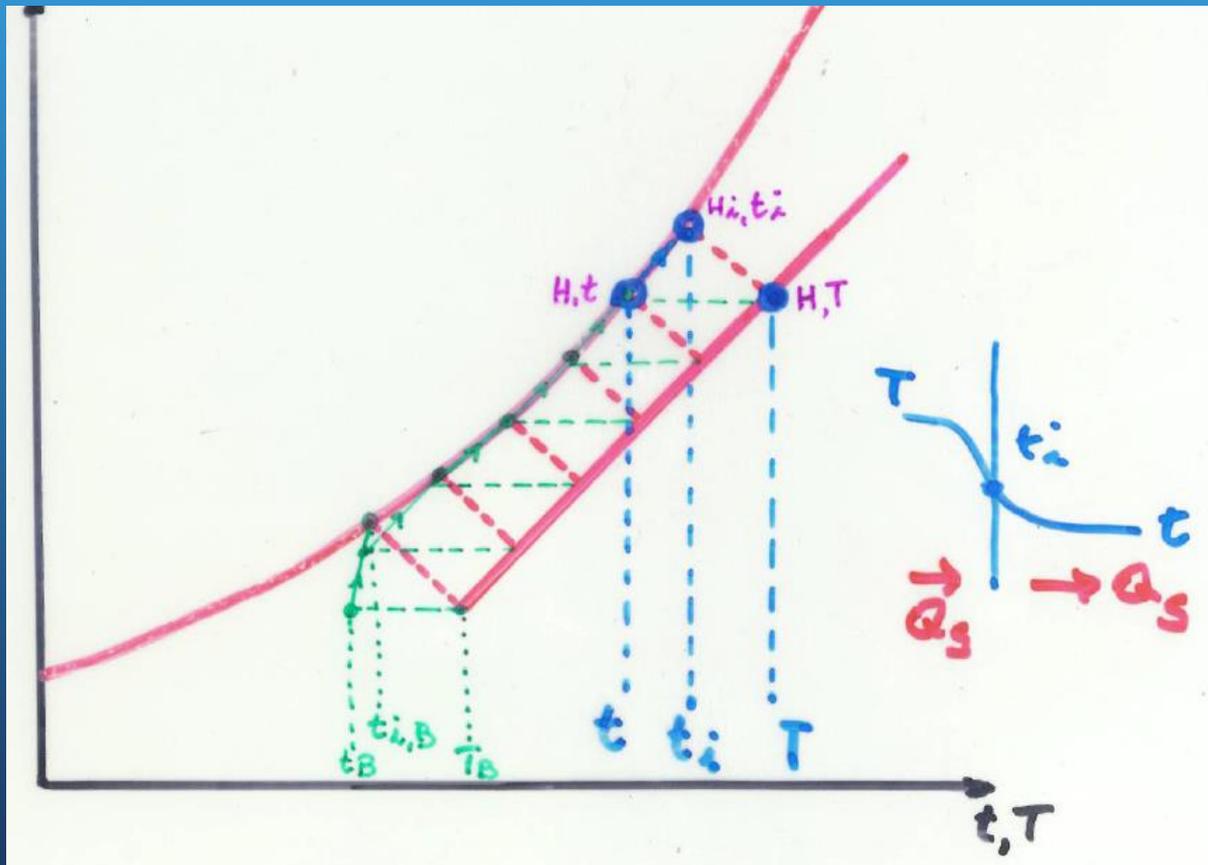
V
G'₃
L
T_r T_B
t_r t_B
t_w



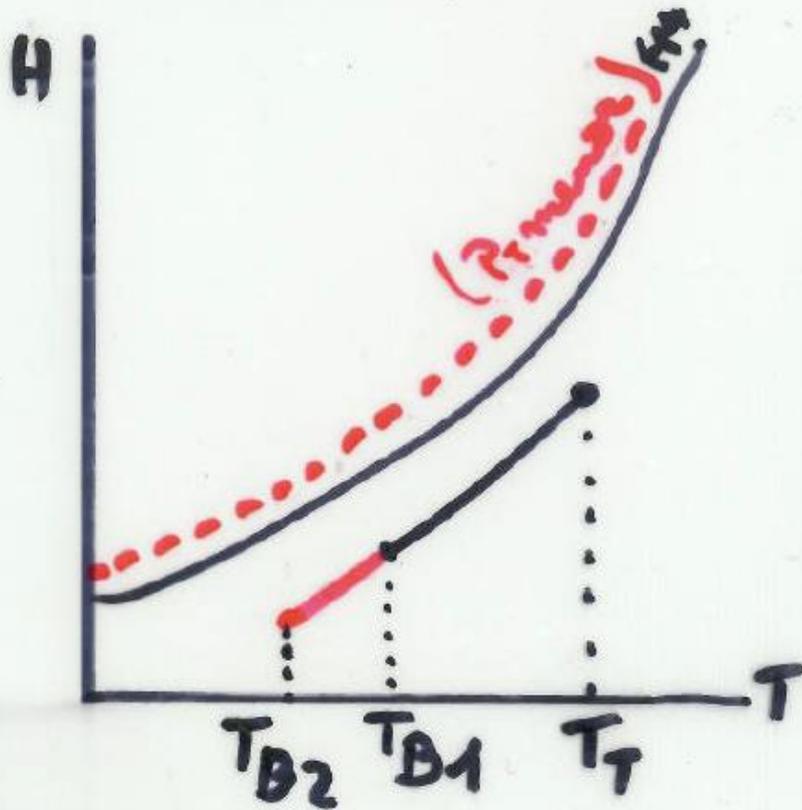
2.- Cálculo Reposición de Agua (Make Up)

$$H_T = c_g (t_T - t_0) + \lambda_0 Y_T' \Rightarrow Y_T'$$
$$L = G'_s (Y_T' - Y_0) \approx G'_s Y_T'^*$$

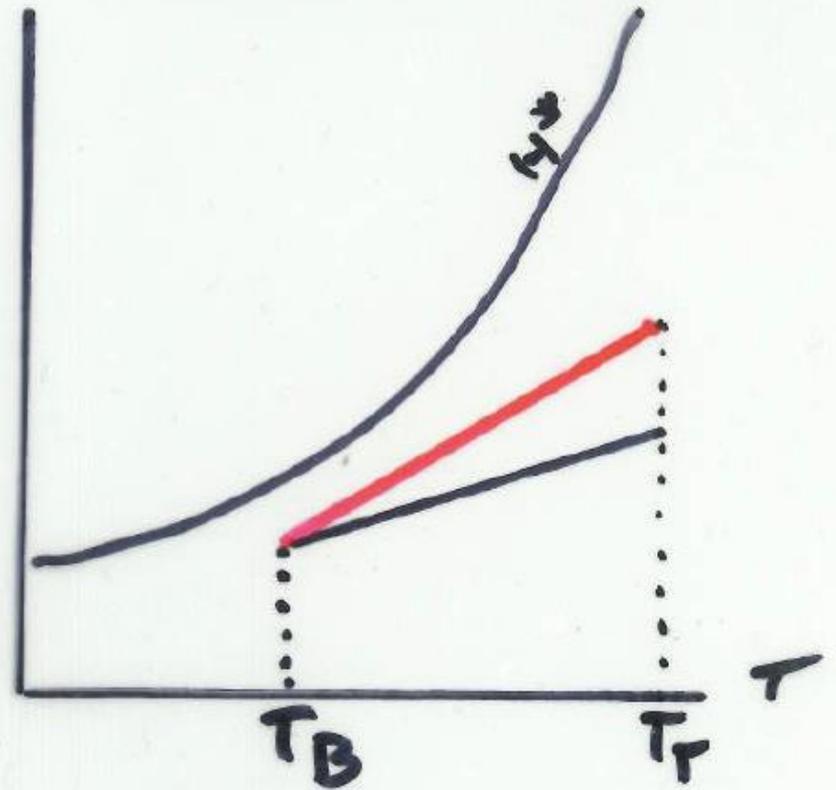
3.- Formación de Niebla



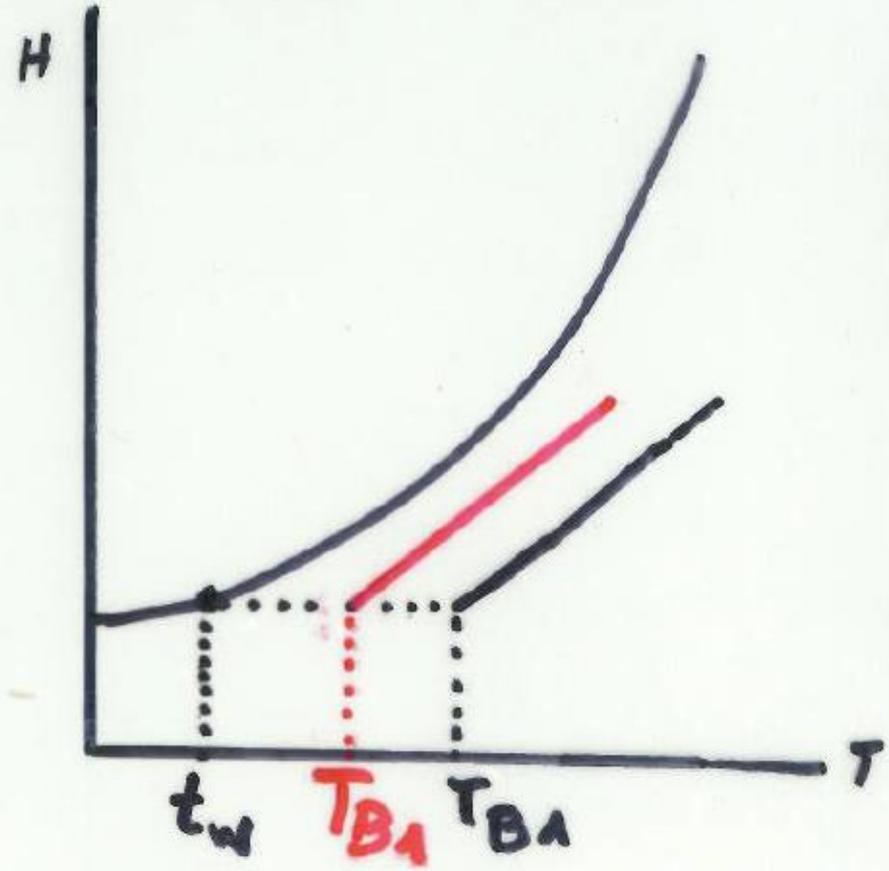
$$\Delta T_2 > \Delta T_1$$



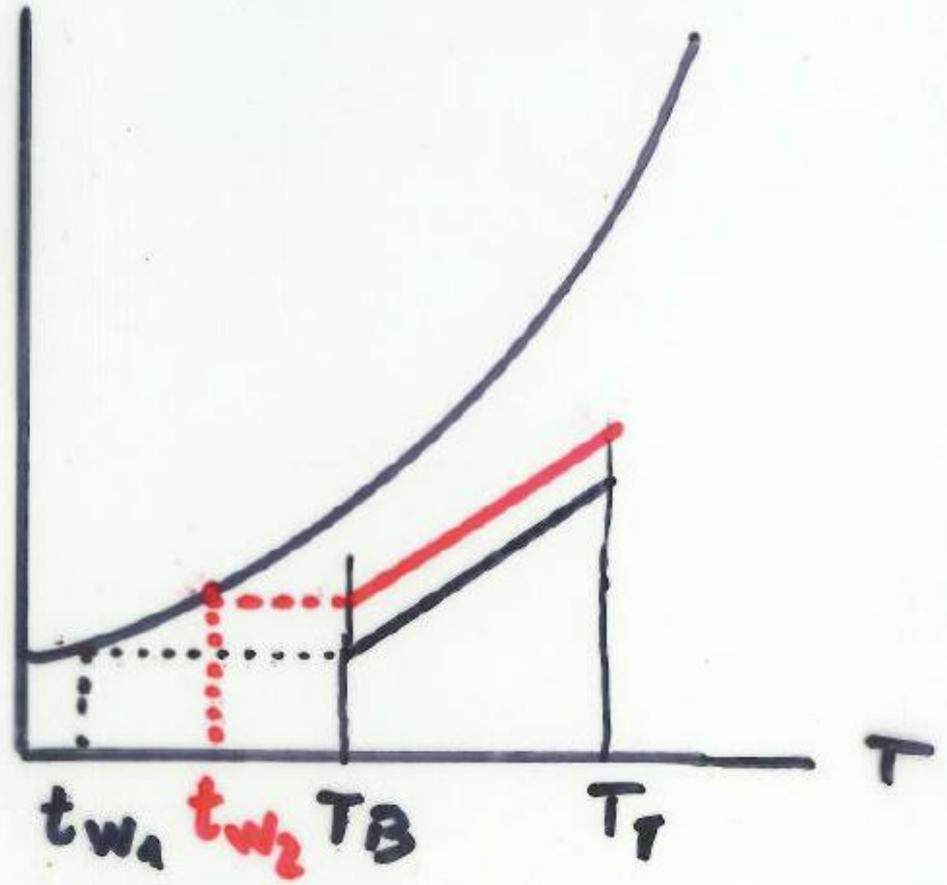
$$(L/G_s)_2 > (L/G_s)_1$$



$$\Delta t_{w2} < \Delta t_{w1}$$

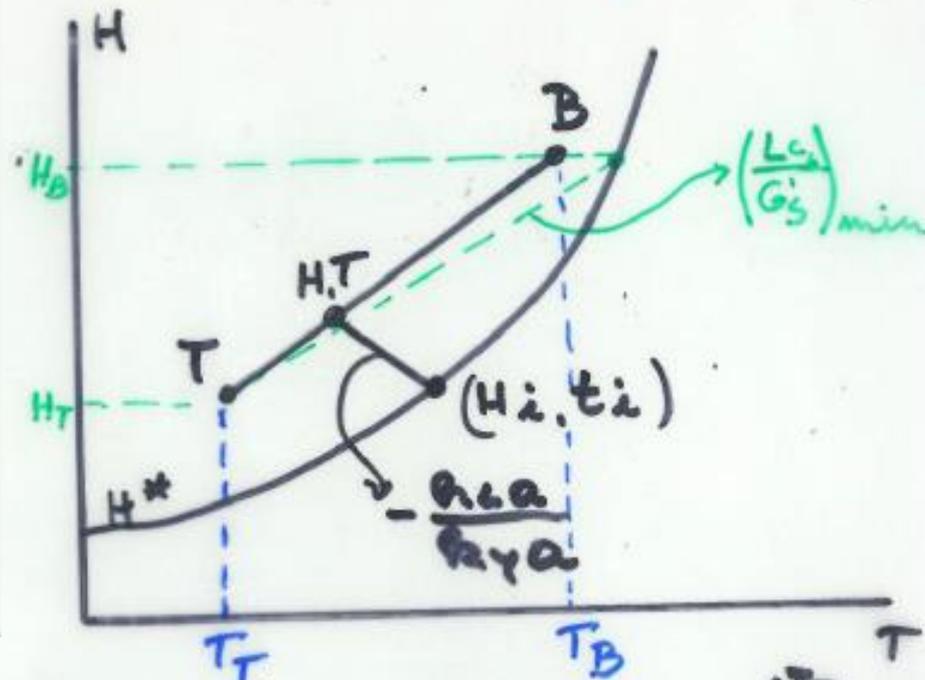


$$t_{w2} > t_{w1}$$



Deshumidificación

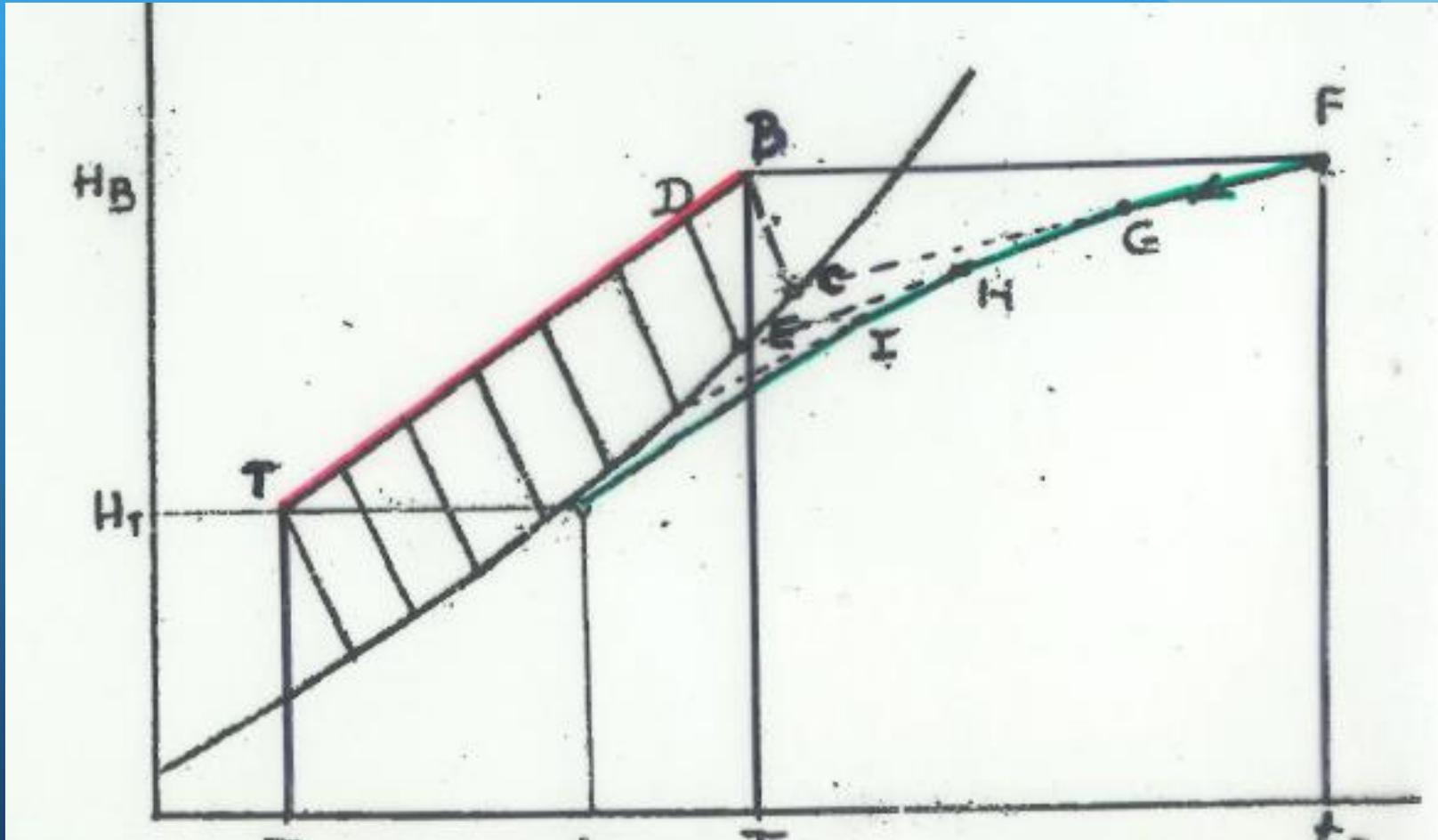
$$dQ = k_y a (H - H_i) dV$$



$$\int_{H_T}^{H_B} \frac{dH}{H - H_i} = \frac{k_y a}{G'_s} V$$

$$\frac{k_y a}{L} V = \int_{T_T}^{T_B} \frac{c_p dT}{H - H_i}$$

Deshumidificación



Equipos

- Atmosféricas

- Tiro Natural (Δt_w 10 - 16 °C)

- Tiro Mecánico



Internos

- Contracorriente

- Corrientes cruzadas

- Cocorriente

- Rellenos al azar

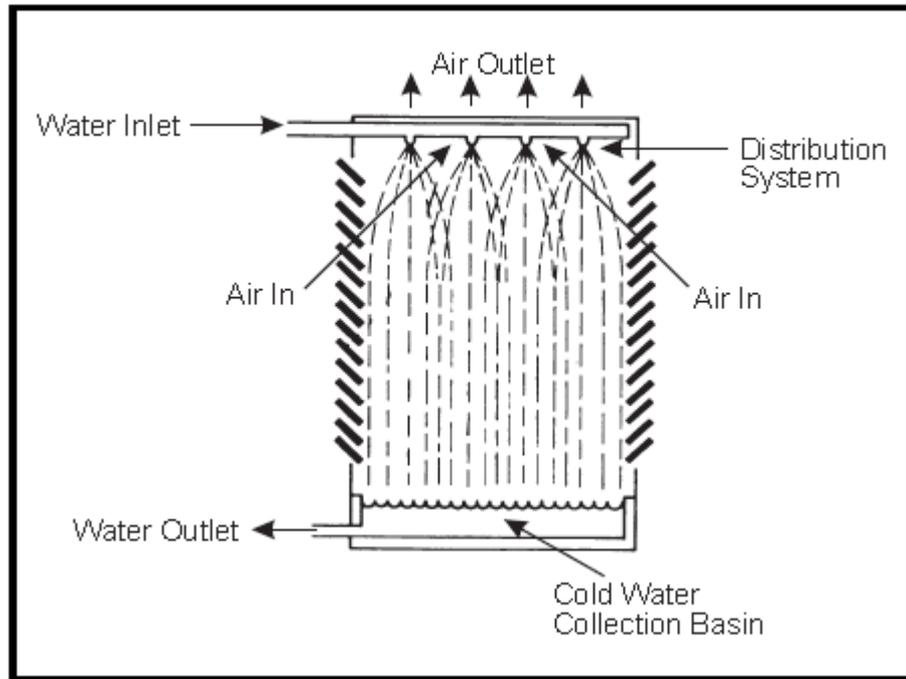
- Plataformas

- Spray

- Serpentine

Atmosférica

Atmospheric Spray Tower

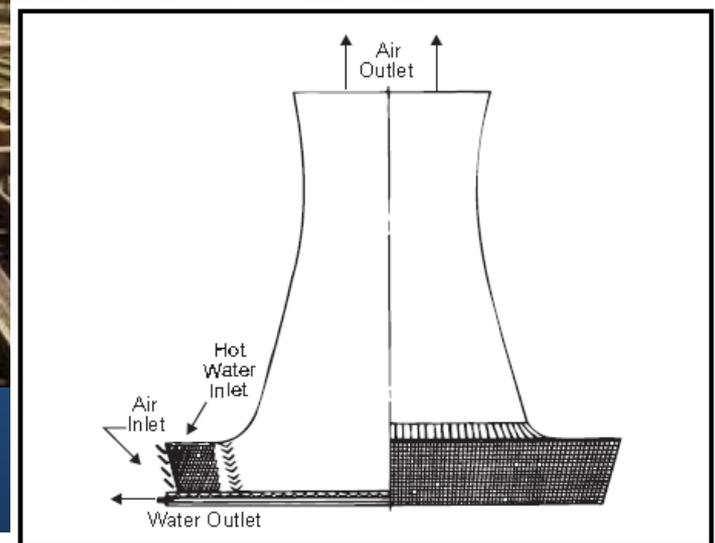
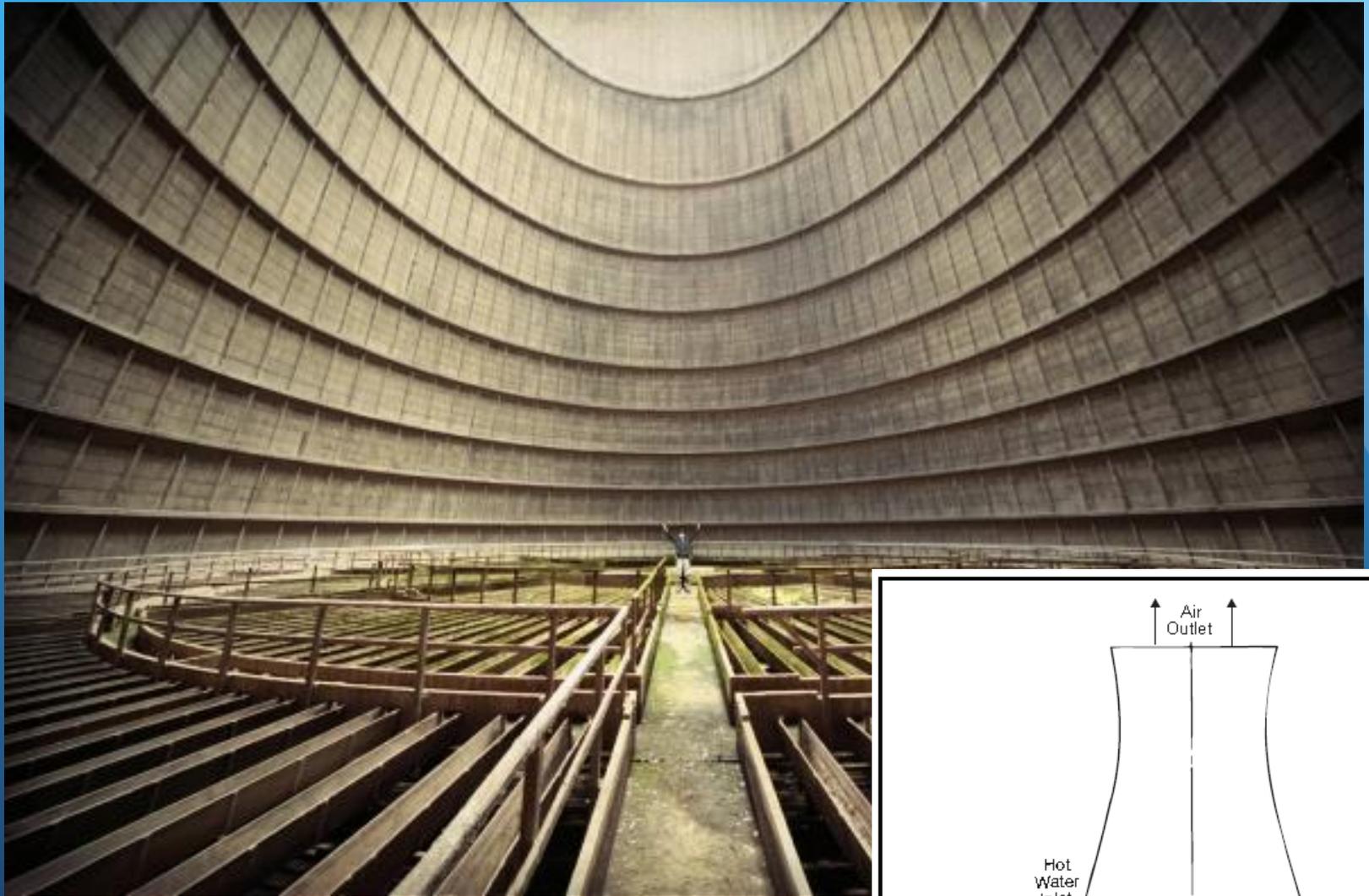


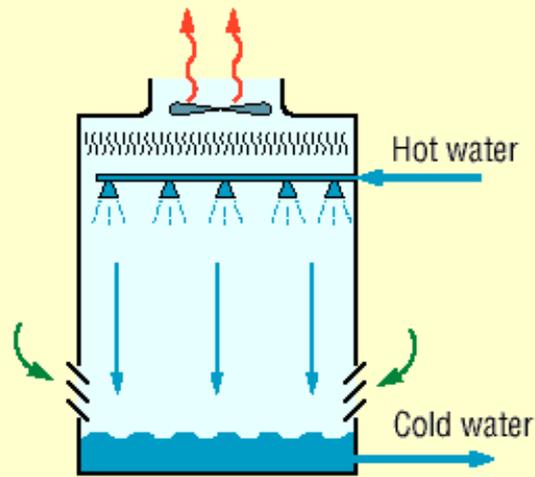
Tiro Natural



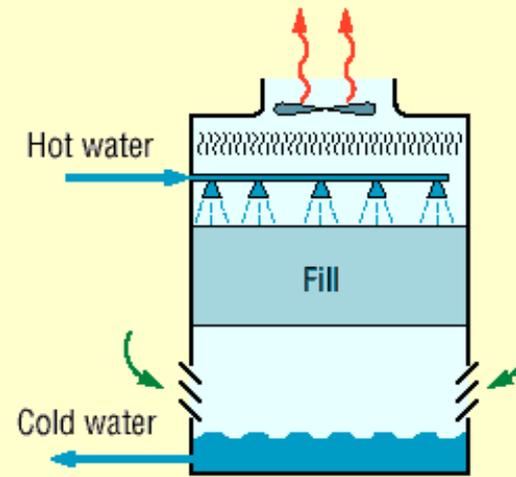
- ❖ Tiro natural
- ❖ Relleno estructurado



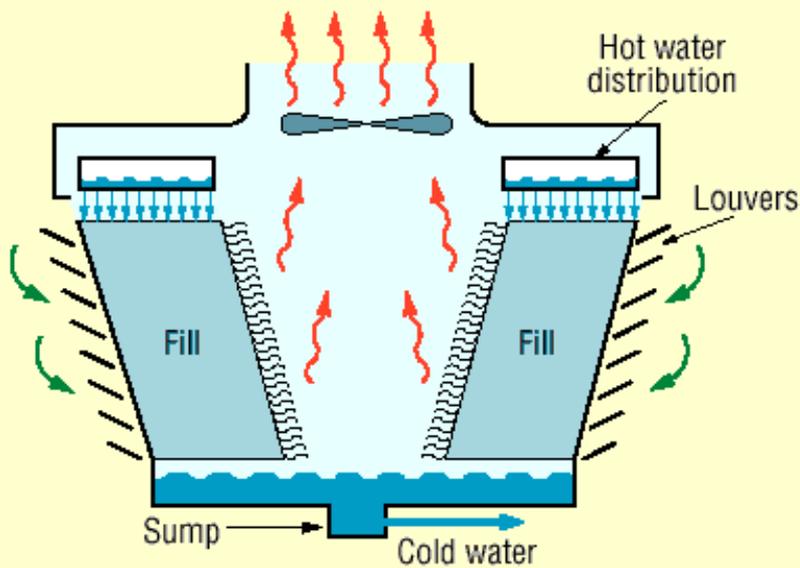




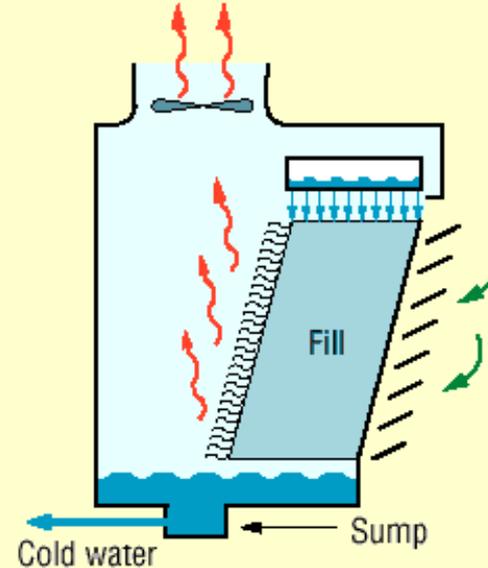
Induced draft counterflow tower



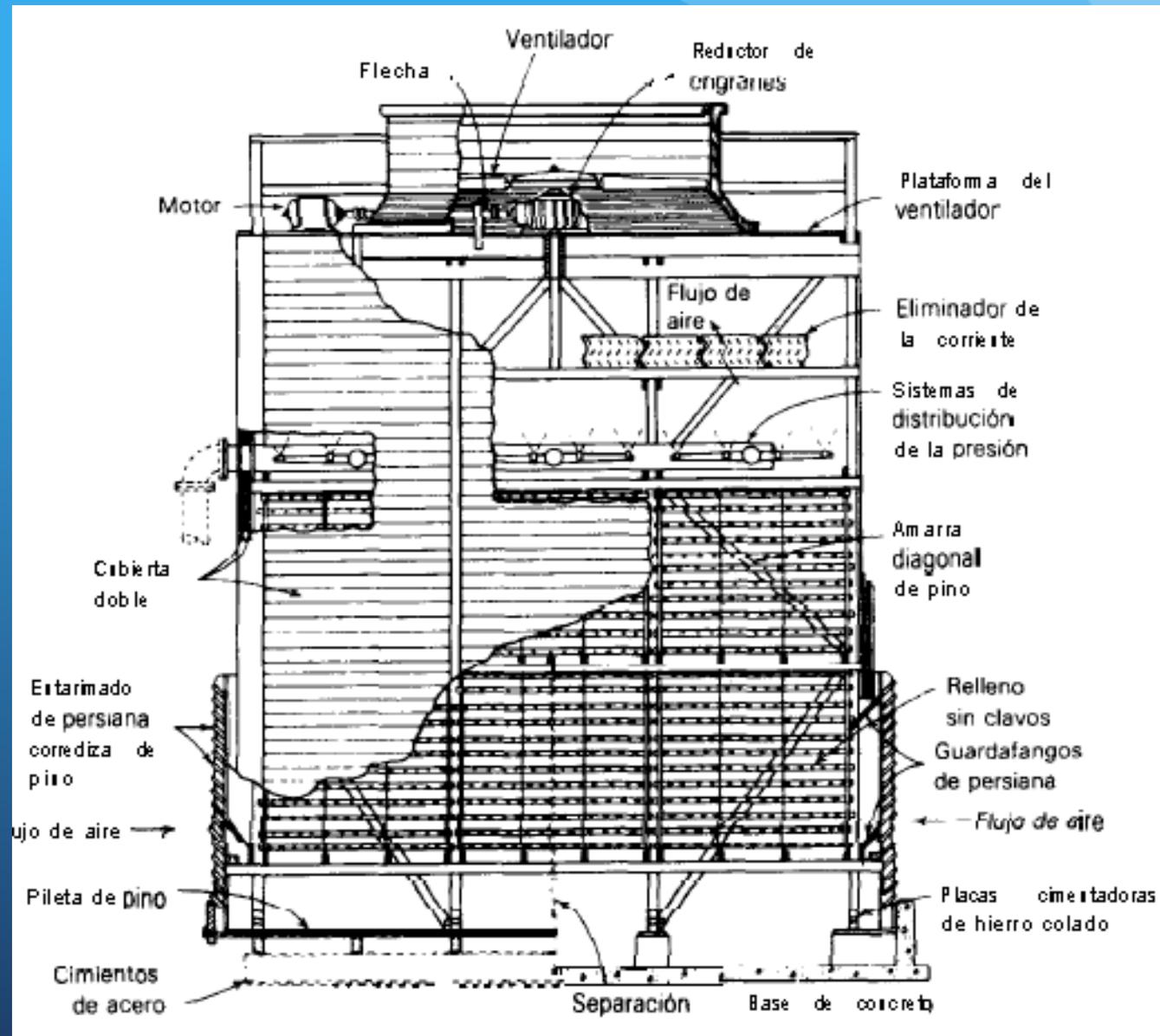
Induced draft counterflow tower with fill

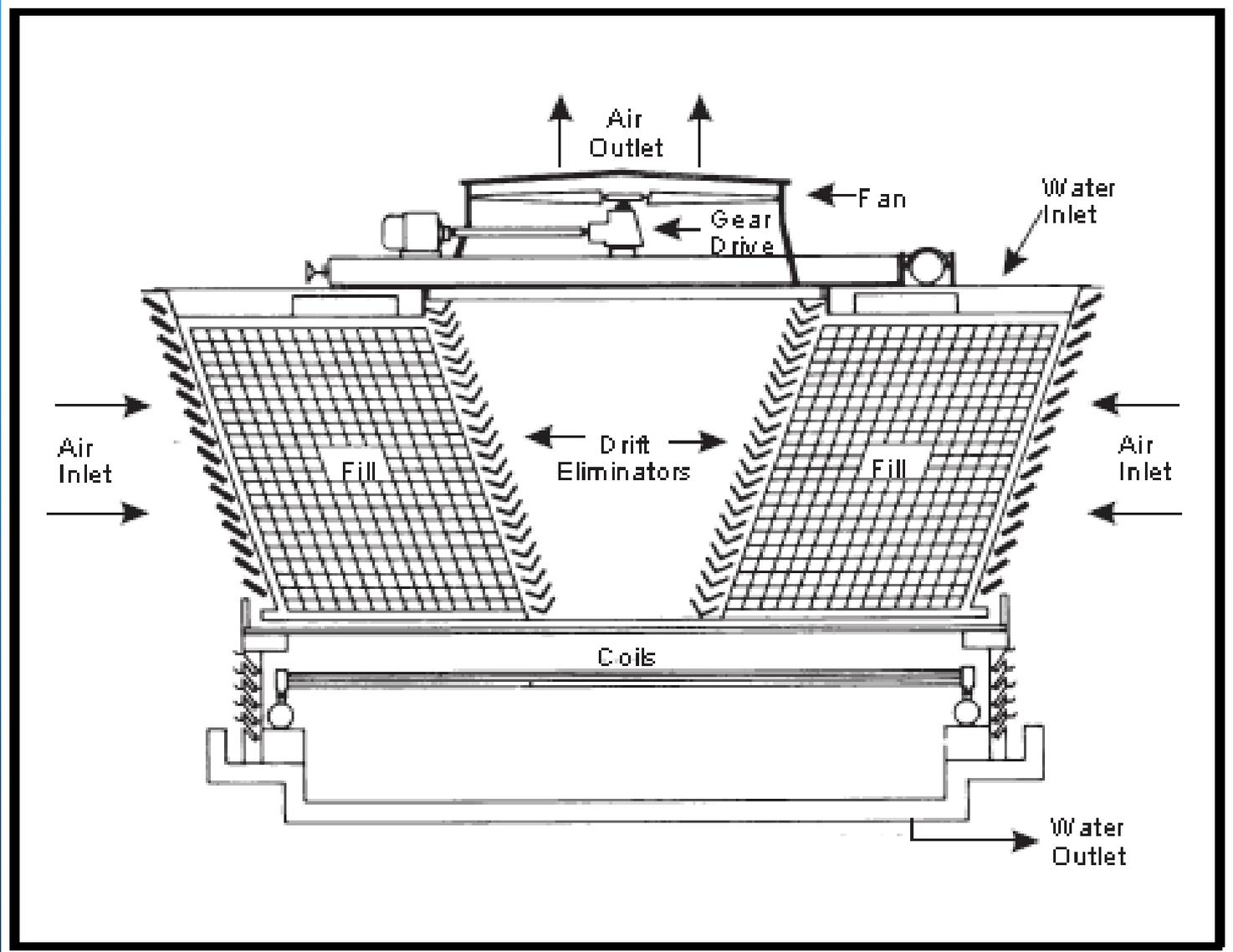


Induced draft, double-flow crossflow tower



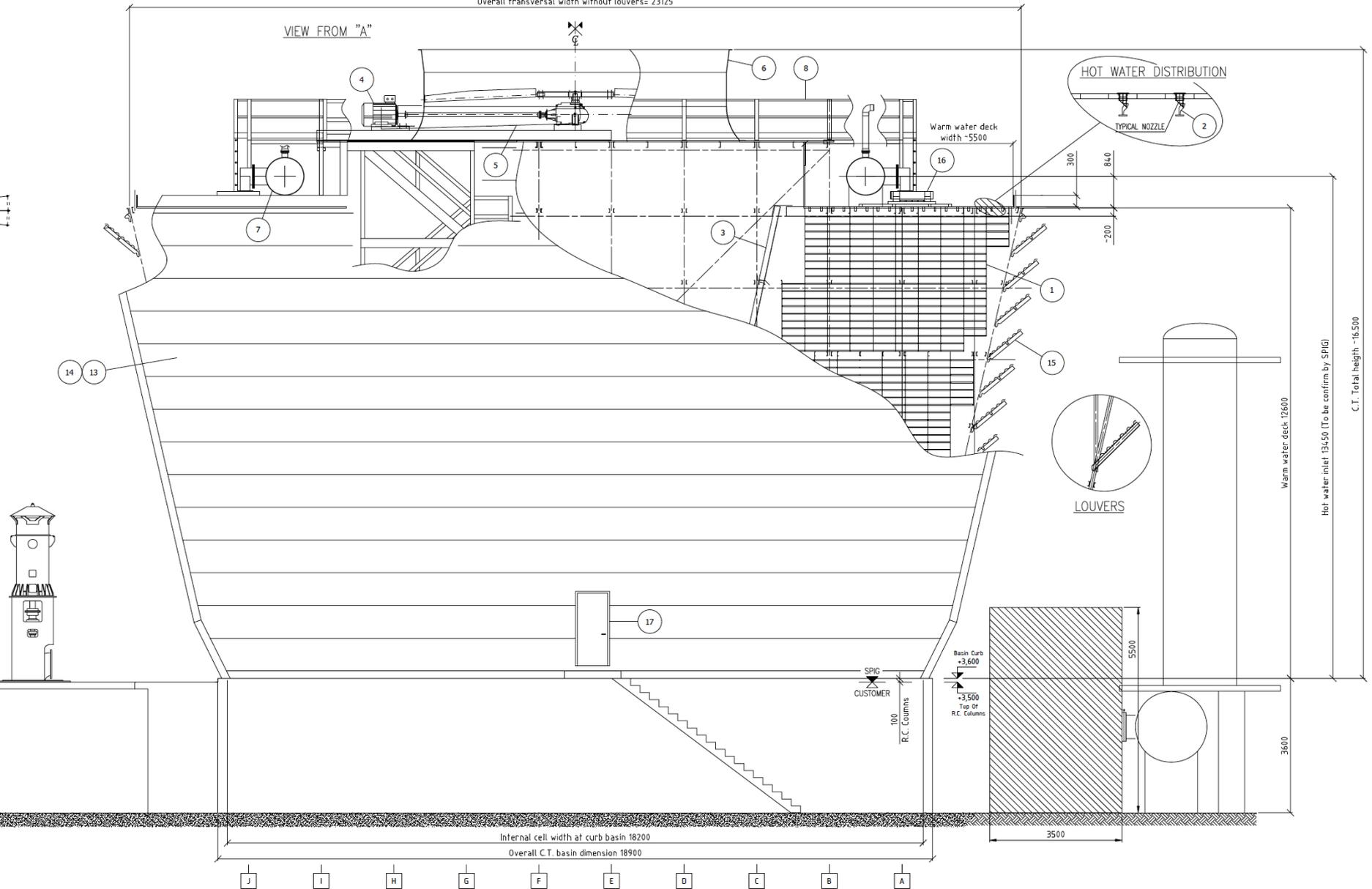
Induced draft, single-flow crossflow tower

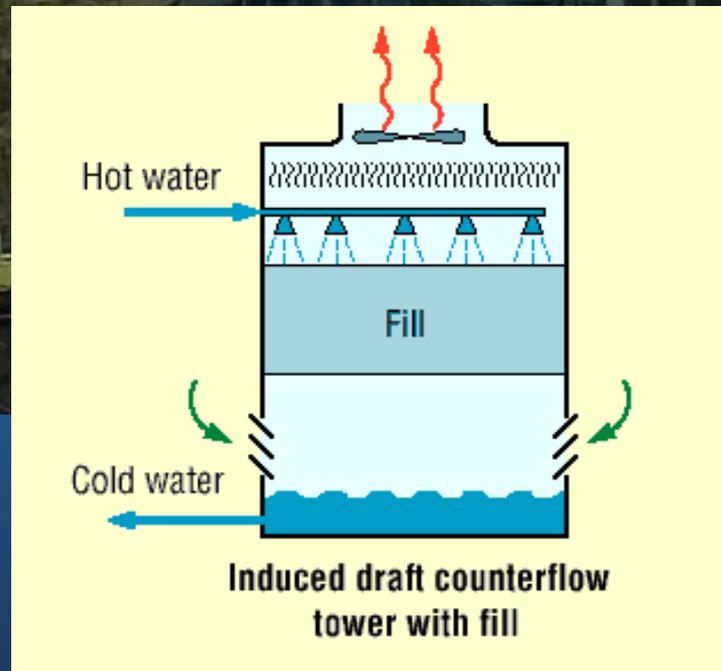
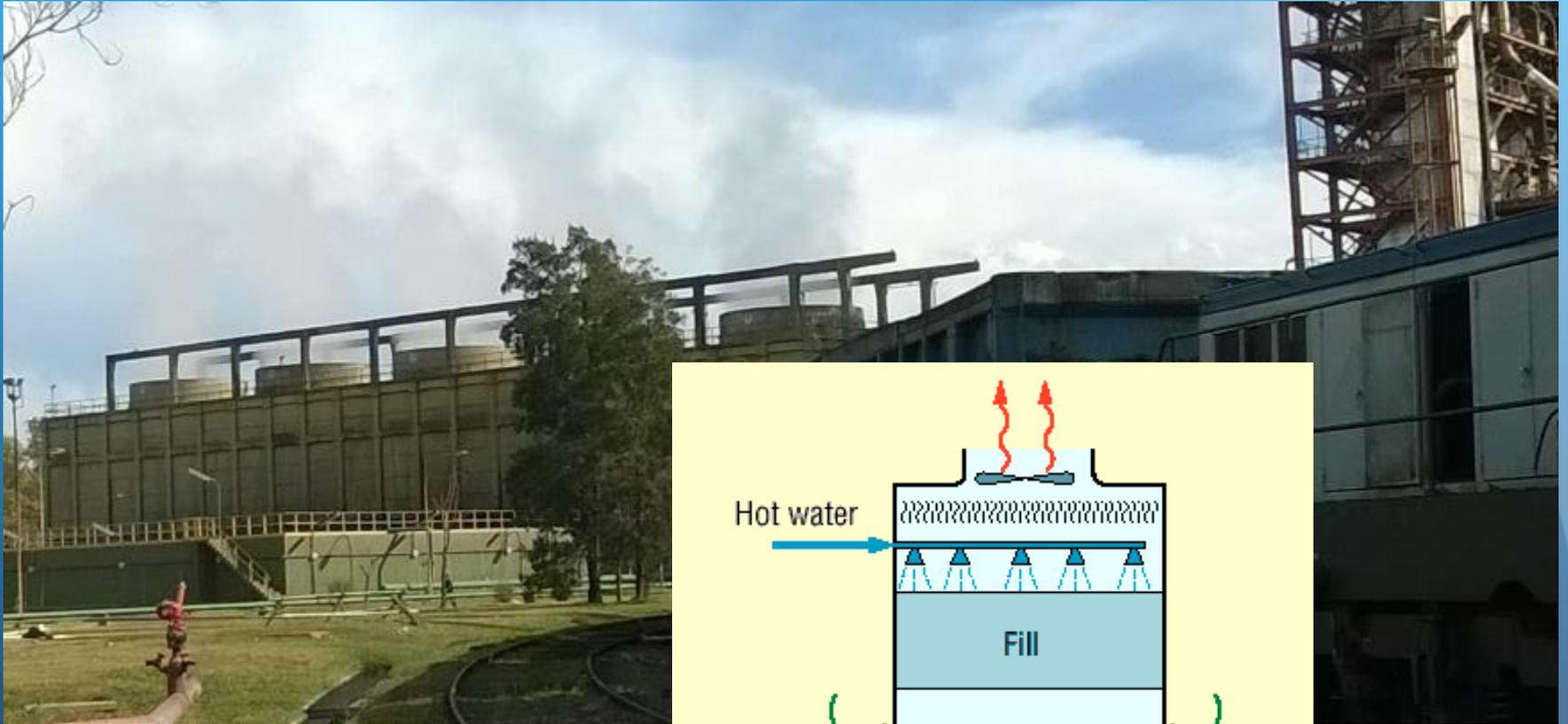




Overall transversal width without louvers= 23125

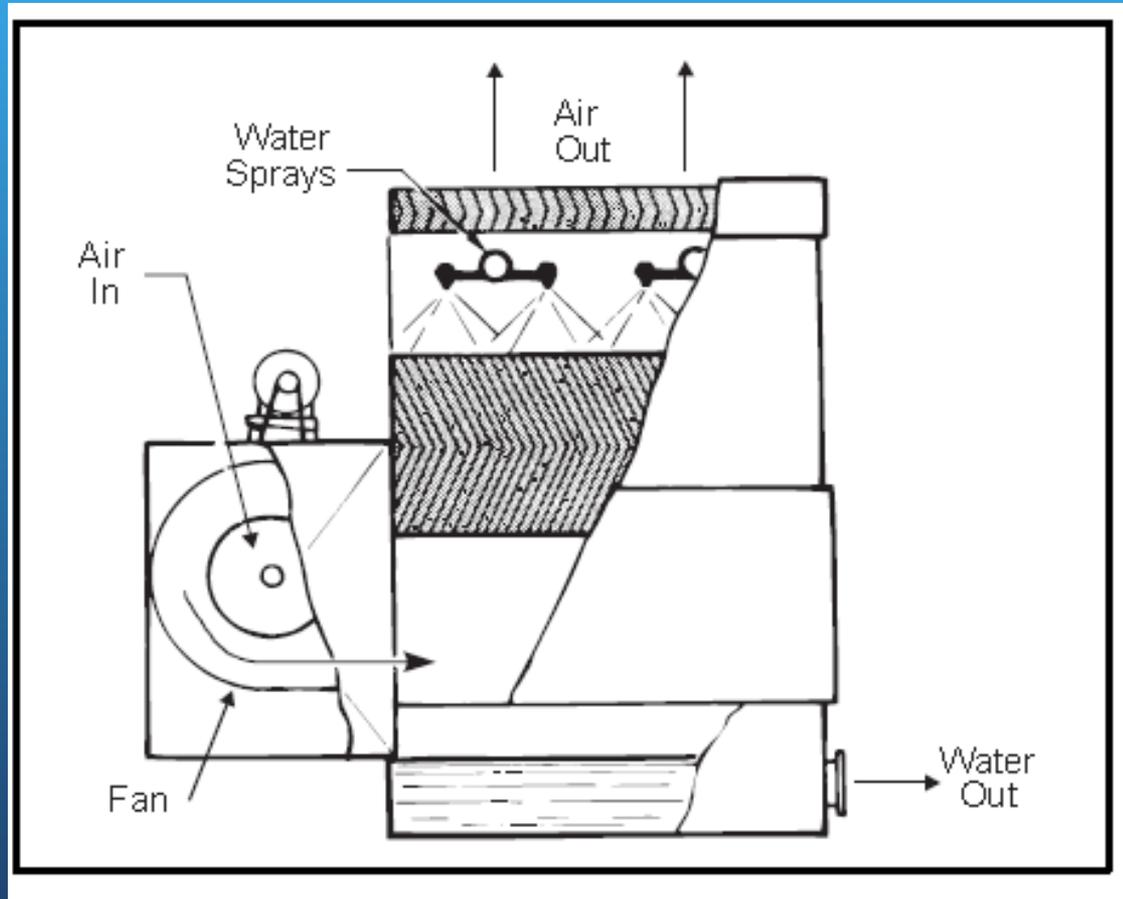
VIEW FROM "A"





[Link](#)

❖ Tiro Forzado (Mecánico)



Torres de Enfriamiento - Tiro Forzado vs Tiro Inducido

	Tiro Mecánico	Tiro Natural
Ubicación	Distante de otros procesos (Ruido - aire húmedo y niebla)	a 1,5 d de otras áreas
Materiales	Madera - Metal - cemento Deben resistir sismo, viento, v. braccias	Láminas delgadas de cemento (armazón pretensado) La forma colabora con la resistencia

❖ Pérdidas por arrastre a la salida del equipo

Spray ponds	1.0 to 5.0%
Atmospheric-draft towers	0.3 to 1.0%
Mechanical-draft towers	0.1 to 0.3%

Torres de Enfriamiento - Tiro Mecánico vs Tiro Natural

Inversión inicial	+ barata	+ cara
Costos operativos	altos	Bajos
Recirculación/ niebla	Puede ser un problema	NO - son muy altas
Aplicaciones	Capacidades pequeñas Poco espacio condiciones menos favorable $\Delta tw = 2^\circ / 5^\circ C$	Grandes Capacidades Zonas favorables $\Delta tw = 10^\circ / 16^\circ C$