

Flujos en Torre de Enfriamiento

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

16 de Junio de 2021



- Objetivos de la Clase
- Torre de Enfriamiento
 - Balances al interior de una torre de enfriamiento
 - Variaciones de Temperatura en la torre de enfriamiento

Objetivos de la Clase

- Estimar la variación de la temperatura del aire y de su humedad a lo largo de la torre.
- Aprender una metodología para estimar los coeficientes de transferencia en forma experimental.

Diseño y operación de una torre de enfriamiento

Sea una torre de enfriamiento de agua que opera en contracorriente a presión atmosférica.

Se desconoce a , el área de Transf. de Materia y de Transf. de Calor.

El agua se enfría por Transf. de Calor y, el aire se humedece y calienta a medida que sube.

V' = flux de aire seco (kg aire seco/(m²h))

L = flux de agua (kg agua/(m²h))

T_G = temp. seno aire (T , bulbo seco)

T_L = temp. seno agua

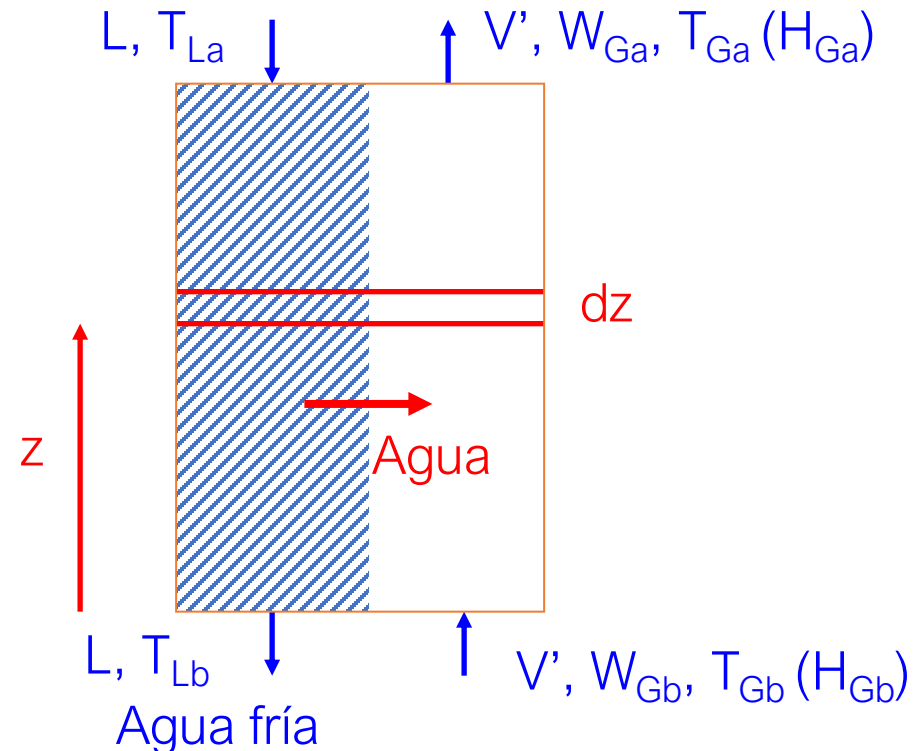
W = humedad aire (kg agua/kg aire seco)

H_G = entalpía de la mezcla aire/vapor agua
(kJ/kg aire seco)

a = área interfacial para Transf. de Calor y
Transf. de Materia por m³ de torre empacada
(m²/m³)

h = coef. Transf. de Calor (W/(m² K))

Agua caliente



Torre de Enfriamiento – Balance global de entalpía

En este sistema, la entalpía del aire es la suma de 3 términos: el calor sensible del vapor, el calor latente del líquido a T_0 y el calor sensible del gas libre de vapor. Por lo tanto,

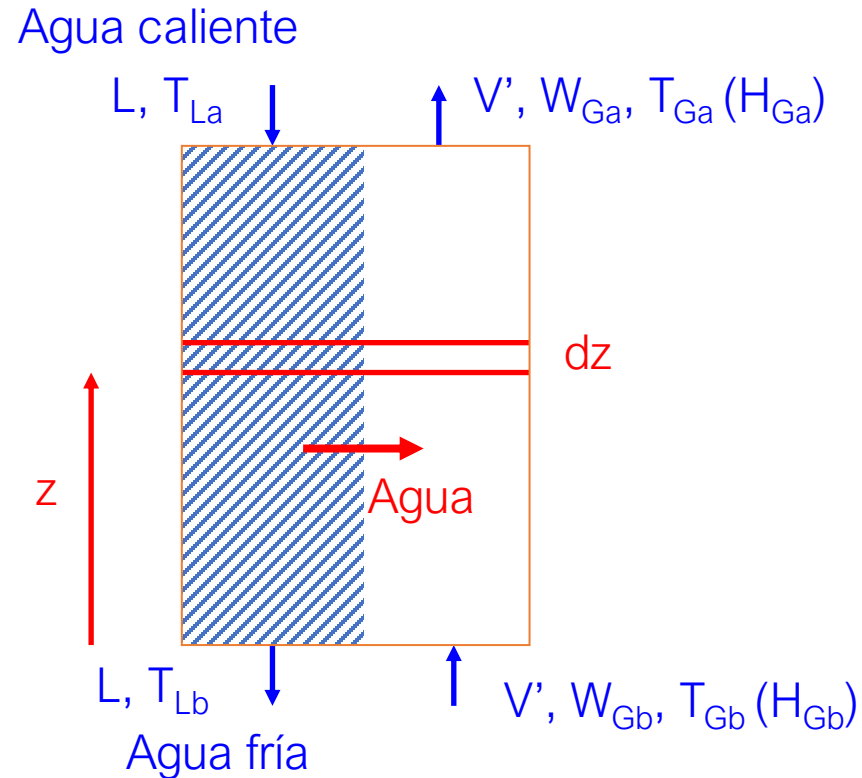
$$H_G = c_{p_{aire}}(T - T_0) + W\lambda_0 + c_{p_{agua}}W(T - T_0)$$

Pero, sabemos que el calor húmedo es:

$$C_s = c_{p_{aire}} + Wc_{p_{agua}}$$

Combinando ambas expresiones obtenemos que:

$$H_G = C_s(T - T_0) + W\lambda_0$$



Combinando ambas expresiones obtenemos que:

$$H_G = C_s(T - T_0) + W\lambda_0$$

Ahora si hacemos el balance de energía en la envolvente completa (línea segmentada negra):

$$V'H_b + Lc_L(T_{La} - T_0) = V'H_a + Lc_L(T_{Lb} - T_0)$$

$$V'(H_b - H_a) = Lc_L(T_{Lb} - T_{La})$$

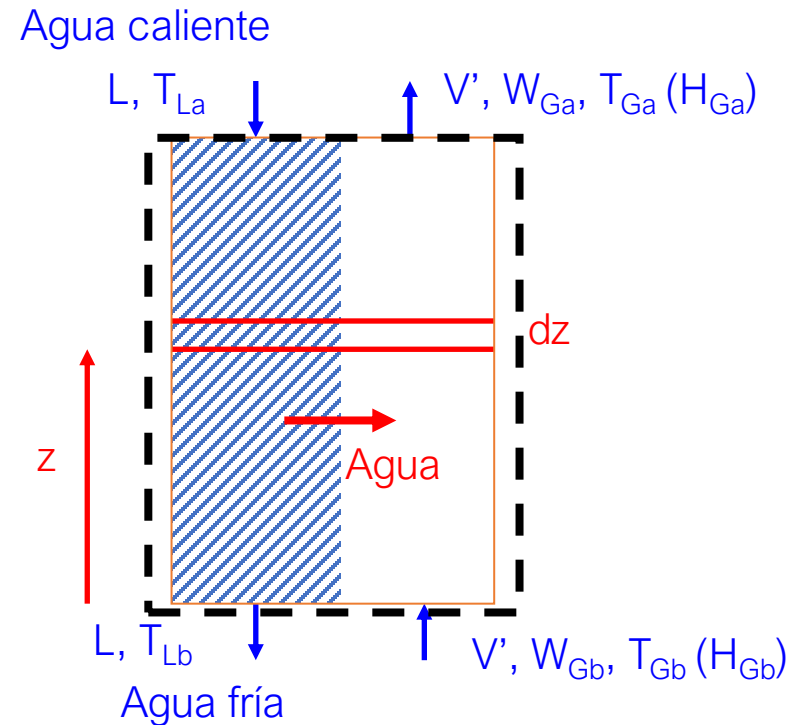
Haciendo un reordenamiento de la expresión anterior:

$$H_b = \frac{Lc_L}{V'}(T_{Lb} - T_{La}) + H_a \quad \rightarrow \quad H(T_L) = \frac{Lc_L}{V'}(T_L - T_{Lb}) + H_b$$

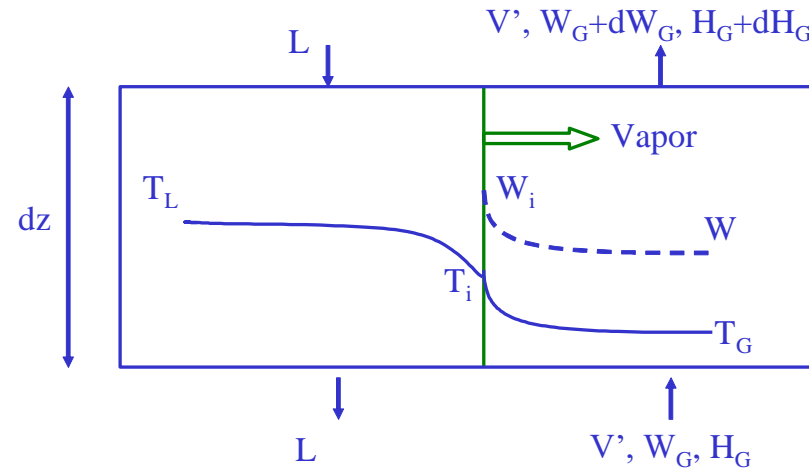
Ecuación de una línea recta con pendiente Lc_L/V' (L.O.: relaciona corrientes que se cruzan!)

Consideraciones:

- V' es cte. (inerte)
- L es prácticamente cte.



Ecuaciones de Transf. de Calor y Transf. de Masa @ dz



Transferencia de calor desde seno líquido a la interfase:

$$ALdH_L = h_L a(T_L - T_i)Adz$$

$$Lc_L dT_L = h_L a(T_L - T_i)dz \quad (1)$$

Transferencia de masa desde interfase hacia seno gas:

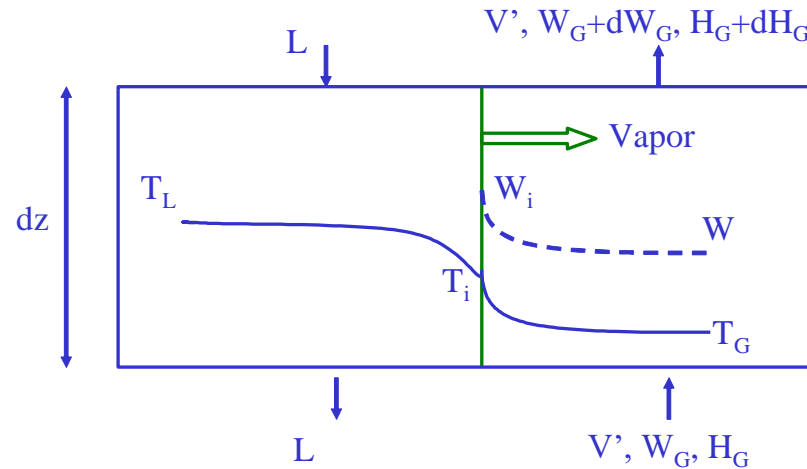
$$AV'dW = k_G aPM_{aire}(W_i - W_G)Adz \quad (2)$$

Pero sabemos que la diferencia de entalpía en el gas es:

$$H_G = C_s(T - T_0) + W\lambda_0$$

$$dH_G = C_s dT + \lambda_0 dW$$

Ecuaciones de Transf. de Calor y Transf. de Masa @ dz



Transferencia de calor desde seno líquido a la interfase:

$$ALdH_L = h_L a(T_L - T_i)Adz$$

$$Lc_L dT_L = h_L a(T_L - T_i)dz \quad (1)$$

Transferencia de masa desde interfase hacia seno gas:

$$AV'dW = k_G aPM_{aire}(W_i - W_G)Adz \quad (2)$$

Transferencia de calor (acoplamiento de ambas ecuaciones):

$$ALdH_L = AV'dH_G = \lambda_0 k_G aPM_{aire}(W_i - W_G)Adz + h_G a(T_i - T_G)Adz \quad (3)$$

Transferencia de calor (acoplamiento de ambas ecuaciones):

$$ALdH_L = AV'dH_G = \lambda_0 k_G a PM_{aire} (W_i - W_G) Adz + h_G a (T_i - T_G) Adz \quad (3)$$

$$V'dH_G = [\lambda_0 k_G a PM_{aire} (W_i - W_G) + h_G a (T_i - T_G)] dz$$

Si consideramos que rige Lewis $\rightarrow C_S = h_G / (PM_{aire} k_G) \therefore h_G = C_S PM_{aire} k_G$

$$V'dH_G = [\lambda_0 k_G a PM_{aire} (W_i - W_G) + C_S PM_{aire} k_G a (T_i - T_G)] dz$$

$$V'dH_G = k_G a PM_{aire} [\lambda_0 W_i + C_S T_i - (\lambda_0 W_G + C_S T_G)] dz$$

$$\Downarrow + C_S T_0 - C_S T_0$$

$$V'dH_G = k_G a PM_{aire} [H_i - H_G] dz \quad (4)$$

Reordenando se obtiene:

$$\frac{dH_G}{(H_i - H_G)} = \frac{k_G a PM_{aire}}{V'} dz \quad (5)$$

$$\frac{dH_G}{(H_i - H_G)} = \frac{k_G a P M_{aire}}{V'} dz \quad (5)$$

Y la altura de la torre se calcula como:

$$\int_{H_b}^{H_a} \frac{dH_G}{(H_i - H_G)} = \frac{k_G P M_{aire} a}{V'} Z_T$$

La entalpía como fuerza motriz

Problema: NO tenemos relación entre H_i y H_G para evaluar la integral.

Pero:

De (1):

$$Lc_L dT_L = h_L a(T_L - T_i) dz$$

De (4):

$$V' dH_G = k_G a P M_{aire} [H_i - H_G] dz$$

Como en el sistema hay equilibrio (1) = (4), es decir, $Lc_L dT_L = V' dH_G$

$$\therefore -\frac{h_L}{k_G P M_{aire}} = \frac{H_i - H_G}{T_i - T_L}$$

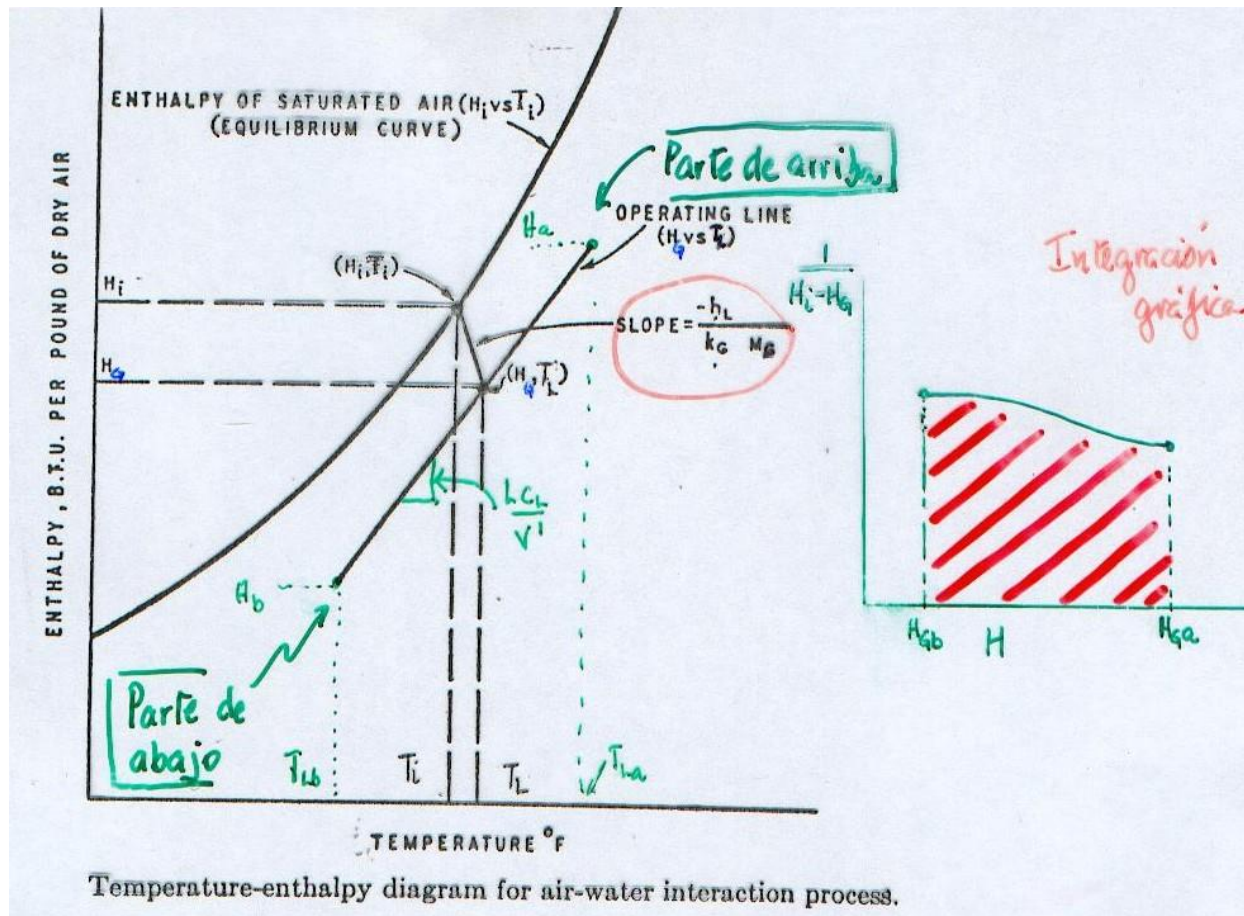
Relación entre H_i y H_G

Recta que une (H_i, T_i) con (H_G, T_L) y tiene pendiente $-h_L/k_G P M_{aire}$

Obtención de Z_T a partir de L.O. y L.E.

$$-\frac{h_L}{k_G PM_{aire}} = \frac{H_i - H_G}{T_i - T_L}$$

$$\int_{H_b}^{H_a} \frac{dH_G}{(H_i - H_G)} = \frac{k_G PM_{aire} a}{V'} Z_T$$



Ejemplo

Se desea enfriar agua desde $T_{LA} = 43.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $T_{L1} = 29.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en una torre de enfriamiento de agua empacada trabajando a contracorriente, con un flujo de gas de $G = 1.356\text{ kg de aire seco}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ y una velocidad de flujo de agua de $L = 1.356\text{ kg de agua}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$. El aire de entrada ingresa a $29.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una temperatura de bulbo húmedo de $23.9\text{ }^{\circ}\text{C}$. El coeficiente de transferencia de masa $k_G a$ tiene un valor estimado de $1.207 \times 10^{-7}\text{ kgmol}/(\text{s}\cdot\text{m}^3\cdot\text{Pa})$ y $h_L a/(k_G \cdot a \cdot PM_B)$ es de $4.187 \times 10^3\text{ J}/(\text{kg K})$.

Calcule la altura z de la torre empacada. La torre opera a presión atmosférica (101.3 kPa).

Datos del Equilibrio Fisicoquímico de la mezcla aire-agua a 1 atm

$T_L\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	$H_i\text{ (kJ/kg)}$
15.6	43.68
26.7	84
29.4	97
32.2	112.1
35	128.9

$T_L\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	$H_i\text{ (kJ/kg)}$
37.8	148.2
40.6	172.1
43.3	197.2
46.1	224.5
60	461.5

Ejemplo

Datos del Equilibrio Fisicoquímico de la mezcla aire-agua a 1 atm

T_L (°C)	H_i (kJ/kg)	T_L (°C)	H_i (kJ/kg)
15.6	43.68	37.8	148.2
26.7	84	40.6	172.1
29.4	97	43.3	197.2
32.2	112.1	46.1	224.5
35	128.9	60	461.5

Con esta información se calibró un polinomio para conocer la entalpía en función de la temperatura:

$$H_{EFQ}(T_L) = 6.608 \cdot 10^{-5} T_L^4 - 0.006 T_L^3 + 0.2925 T_L^2 - 3.19 T_L + 41.21 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Con esto es posible conocer la entalpía de la interfaz, teniendo la temperatura de la interfaz mediante las líneas de enlace que caracterizan el equilibrio fisicoquímico con la corriente líquida de la línea de operación.

A partir de una tabla psicrométrica, obtenemos la humedad del aire a la entrada a partir de su temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo: $W_A = 0.0165$. Con esto, podemos calcular la entalpía específica de la corriente de aire a la entrada usando la formula del calor húmedo

$$H_b = C_s(T - T_0) + \lambda_0 W$$

Usando como referencia $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$H_b = \left(1.005 + 1.88(0.0165) \frac{J}{^{\circ}\text{C } g \text{ aire seco}} \right) \left(\frac{1000 \text{ g aire seco}}{1 \text{ kg aire seco}} \right) (29.4 - 0) \\ + \left(2.501 \cdot 10^6 \frac{J}{kg \text{ de agua}} \right) \left(0.0165 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ de aire seco}} \right)$$

$$H_b = 71725 \frac{J}{kg} = 71.725 \frac{kJ}{kg}$$

Conociendo las condiciones del aire a la salida, podemos plantear la línea de operación.

$$H(T_L) = \frac{Lc_L}{V'} (T_L - T_{Lb}) + H_b$$

Reemplazando para T_{La} se encuentra la entalpía de la corriente de aire a la salida de la torre, H_a :

$$H_a = \frac{1.356 \cdot \left(4.187 \cdot 10^3 \frac{J}{kg K} \right) \left(\frac{1 kJ}{1000 J} \right)}{1.356} (43.3 - 29.4) + 71.725 \frac{kJ}{kg}$$

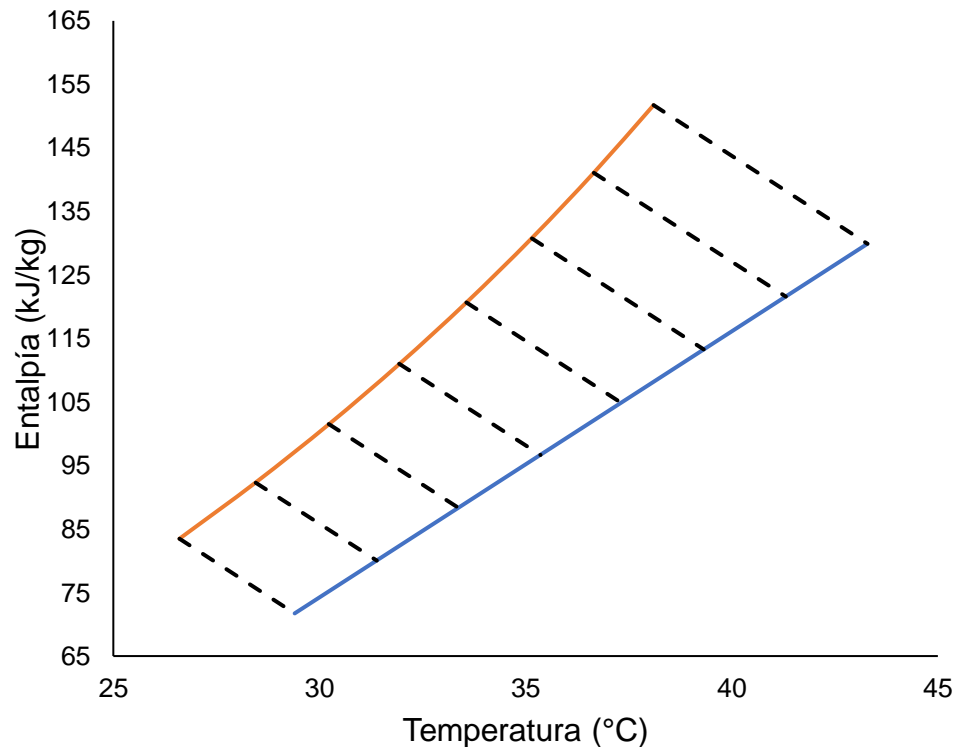
$$H_a = 129.92 \frac{kJ}{kg}$$

Ahora, es necesario encontrar las temperaturas y entalpías en la interfaz del gas. Para esto, es necesario conocer la **curva de equilibrio fisicoquímico entalpía-temperatura de la mezcla gaseosa** y la pendiente de las líneas de enlace.

Para este problema en particular, se entrega la pendiente de la ecuación en el enunciado:

$$-\frac{h_L a}{k_G a P M_{aire}} = -4.187 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} = \frac{H_i - H_G}{T_i - T_L}$$

Con ello, podemos graficar, por ejemplo, 8 líneas de enlace entre la línea de operación y la línea de equilibrio fisicoquímico



Para calcular la altura de la torre de absorción, se utilizan estos 8 puntos para calcular la integral numéricamente según la siguiente aproximación:

$$\int_{H_b}^{H_a} \frac{dH_G}{H_i - H_G} \approx \sum_{i=1}^N \left(\frac{H_b - H_a}{N} \right) \cdot \left(\frac{1}{H_i(H_G^i) - H_G^i} \right)$$

En primer lugar, calculamos el largo de la partición:

$$\Delta H_G = \frac{H_a - H_b}{N} = \frac{129.92 - 71.725}{8} = 7.2749$$

Luego, encontramos los valores de la función:

$$f_i(H_G) = \frac{1}{H_i(H_G^i) - H_G^i}$$

H_G	H_i	$f_i(H_G)$
71.7250	83.4601	0.0852
80.0397	92.3314	0.0814
88.3539	101.5079	0.0760
96.6680	110.9804	0.0699
104.8922	120.6343	0.0635
113.2964	130.7845	0.0572
121.6106	141.1025	0.0513
129.9248	151.6877	0.0459

Finalmente, el número de unidades de transferencia:

$$NTU_G = \int_{H_b=71.725}^{H_a=129.92} \frac{dH_G}{H_i - H_G} \approx \sum_{i=1}^8 \Delta H_G \cdot f_i(H_G^i) = 3.858$$

Finalmente, la altura de la torre de enfriamiento se calcula de manera directa:

$$Z_T = \frac{V'}{k_G a P M_{aire}} \cdot NTU_G = \frac{1.356 \left(\frac{kg}{s \cdot m^2} \right)}{\left(1.207 \cdot 10^{-7} \frac{kmol}{s \cdot m^3 \cdot Pa} \right) \left(29 \frac{kg}{kmol} \right) (101300 Pa)} \cdot (3.858)$$

$$Z_T = 14.753 \text{ m}$$

Temperatura y humedad de la corriente de aire en la torre

El procedimiento anterior NO proporciona información sobre los cambios de T_G de la mezcla aire/agua a lo largo de la columna.

Si esta información es de interés se puede obtener a partir de la ecuación (3):

$$AV'dH_G = \lambda_0 k_G a P M_{aire} (W_i - W_G) Adz + h_G a (T_i - T_G) Adz$$

Pero:

$$dH_G = d[C_S(T_G - T_0) + w\lambda_0] = C_S dT_G + \lambda_0 dW$$

$$AV'[C_S dT_G + \lambda_0 dW] = \lambda_0 k_G a P M_{aire} (W_i - W_G) Adz + h_G a (T_i - T_G) Adz$$



Efecto $\uparrow T$



Efecto Evap



Efecto Evap



Efecto $\uparrow T$

$$AV'[C_S dT_G + \lambda_0 dW] = \lambda_0 k_G a P M_{aire} (W_i - W_G) Adz + h_G a (T_i - T_G) Adz$$

Efecto $\uparrow T$

Efecto Evap

Efecto Evap

Efecto $\uparrow T$

$$V' C_S dT_G = h_G a (T_i - T_G) dz \quad (6)$$

Además sabemos que:

$$V' dH_G = k_G a P M_{aire} [H_i - H_G] dz \quad (4)$$

Dividiendo (4) por (6) se obtiene:

$$\frac{dH_G}{dT_G} = \frac{k_G P M_{aire}}{h_G} C_S \left(\frac{H_i - H_G}{T_i - T_G} \right)$$

$$\frac{dH_G}{dT_G} = \left(\frac{H_i - H_G}{T_i - T_G} \right)$$

Esta ecuación establece que el cambio de entalpía de una mezcla aire/vapor de agua con su temperatura es la pendiente de una línea que une los puntos (H_G, T_G) y (H_i, T_i)

Definición Gráfica

Datos: puntos 1,3 y 8

Procedimiento:

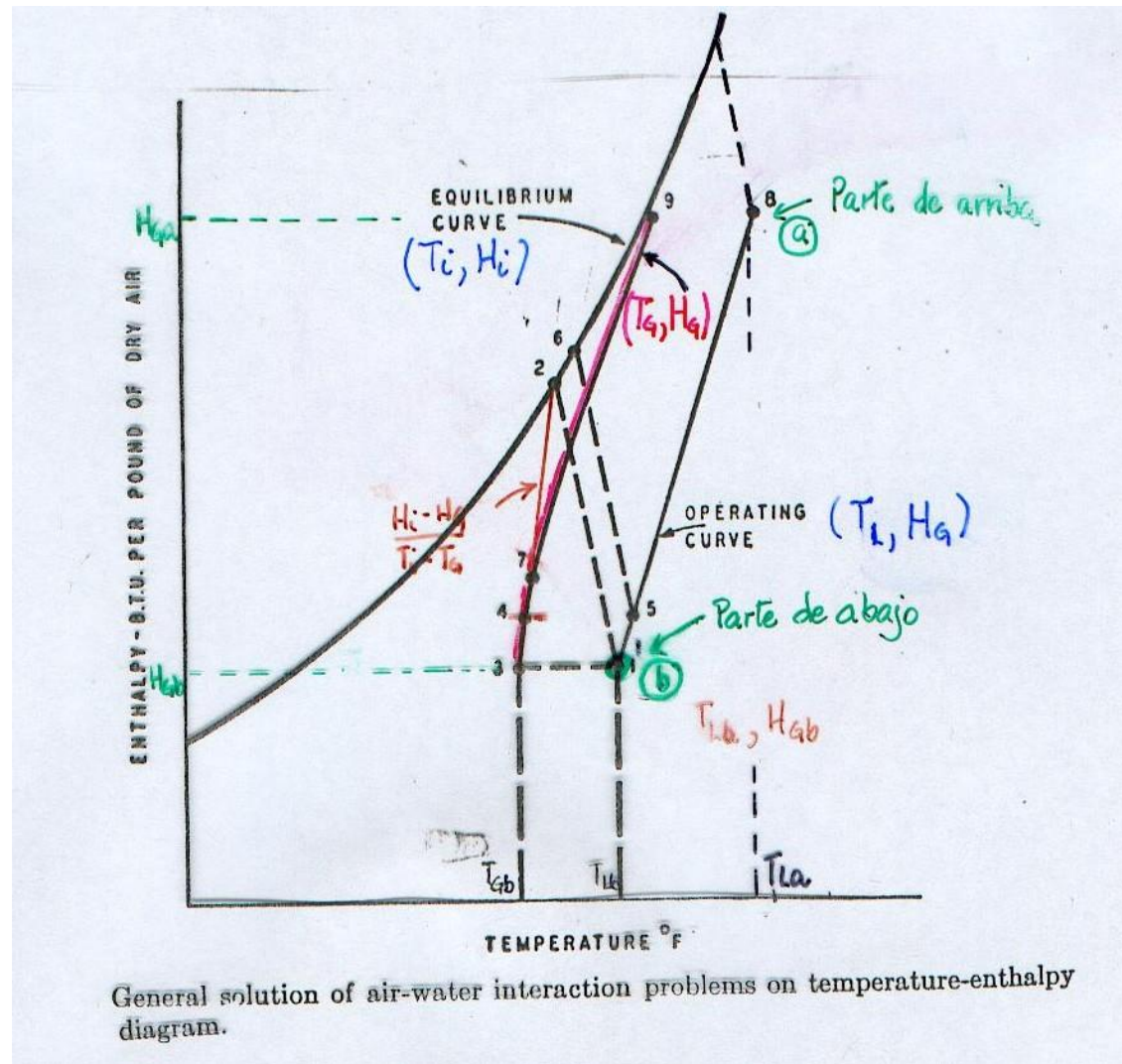
Pto. 1 con $-h_L/k_G PM_{aire}$ se obtiene el pto. H_i, T_i (pto. 2)

$$-\frac{h_L}{k_G PM_{aire}} = \frac{H_i - H_G}{T_i - T_L}$$

Se une con H_{Gb} (3 con 2)

$$\frac{dH_G}{dT_G} = \left(\frac{H_i - H_G}{T_i - T_G} \right)$$

Se define trazo 3-4 y se determina 5. Luego se repite el proceso.



Determinación de coeficientes de Transferencia (experimental)

Datos: $Z, T_{La}, T_{Lb}, T_{Ga}, T_{Gb}, W_a, W_b, H_a, H_b$

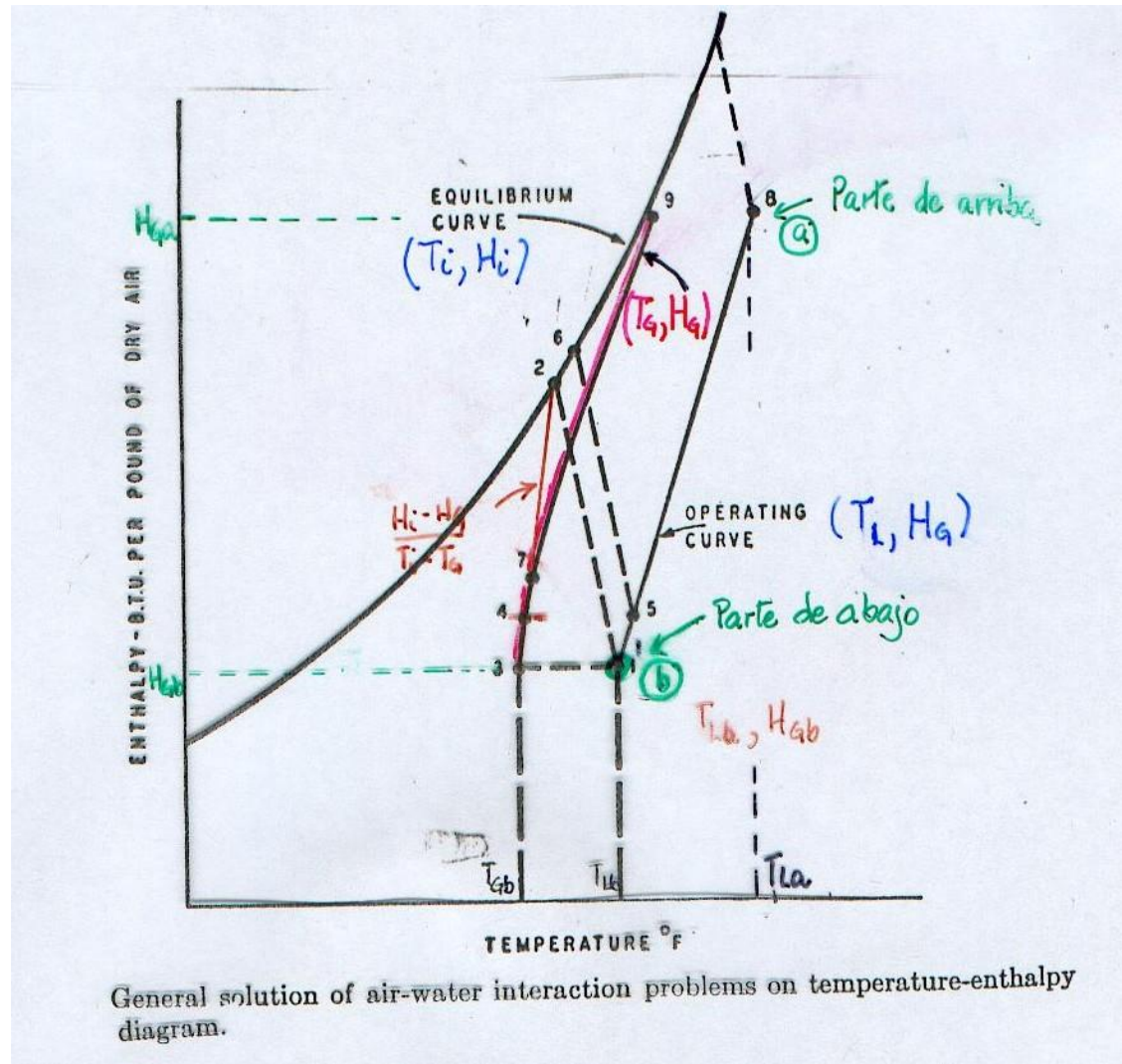
i.e., puntos 1,3, 8 y 9 conocidos

Procedimiento:

1. Pto. 1, se asume $-\frac{h_L}{k_G \cdot PM_{aire}}$
(1era iteración) \rightarrow Curva (T_G , H_G) pasa por 9?
2. Se repite procedimiento hasta que calce
3. Se determinan $H_i - H_G \rightarrow$ grafica
 $\int \rightarrow k_G a$

$$\frac{dH_G}{dT_G} = \left(\frac{H_i - H_G}{T_i - T_G} \right)$$

4. De $C_s = h_G / PM_{\text{aire}} k_G \rightarrow h_{Ga}$



Operación de la Torre de Enfriamiento en Climas Fríos

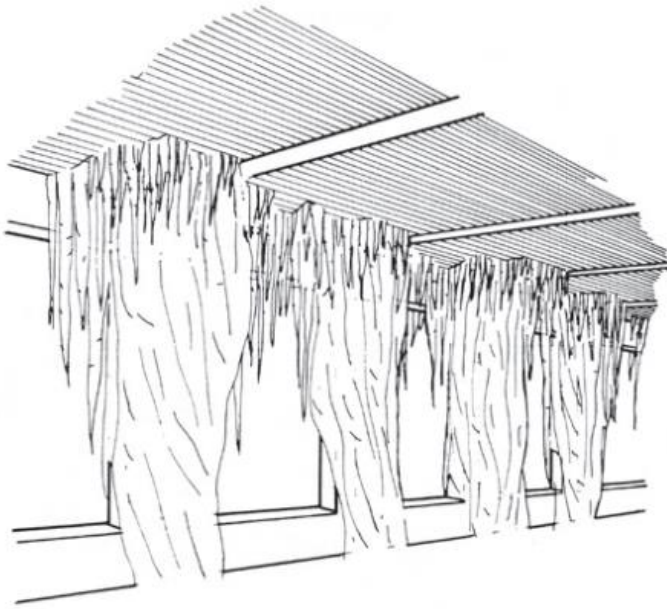


Figure 42a — “Unacceptable” counterflow ice.

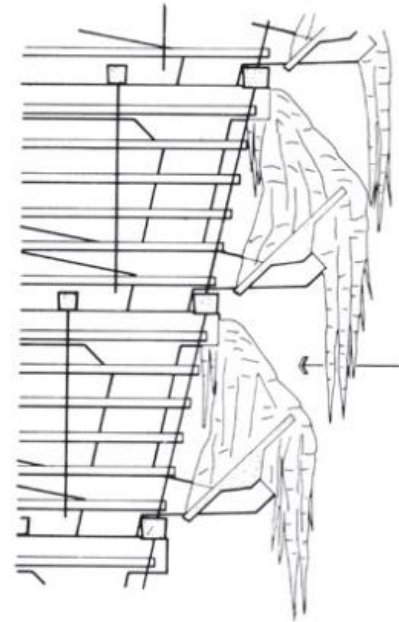


Figure 42b — “Unacceptable” crossflow ice.

Operación de la Torre de Enfriamiento en Climas Fríos

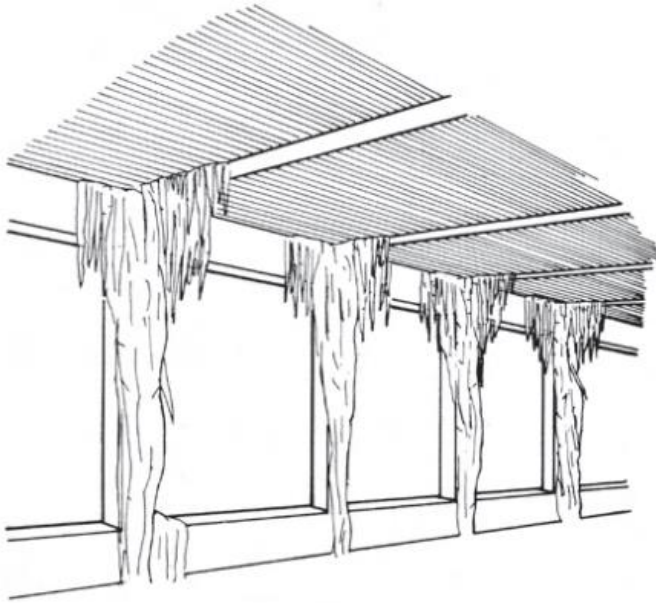


Figure 41a — “Acceptable” counterflow ice.

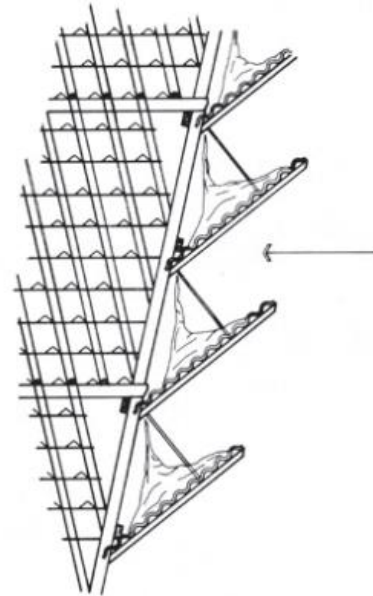


Figure 41b — “Acceptable” crossflow ice.

- Estimar la variación de la temperatura del aire y de su humedad a lo largo de la torre.
- Aprender una metodología para estimar los coeficientes de transferencia en forma experimental.

Flujos en Torre de Enfriamiento

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

16 de Junio de 2021

