

Torre de enfriamiento

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

10 de Junio de 2021



- Objetivos de la Clase
- Torre de Enfriamiento
 - ¿Qué es una torre de enfriamiento?
 - Tipos de Rellenos
 - Tipos de Configuraciones
 - Balances al interior de una torre de enfriamiento

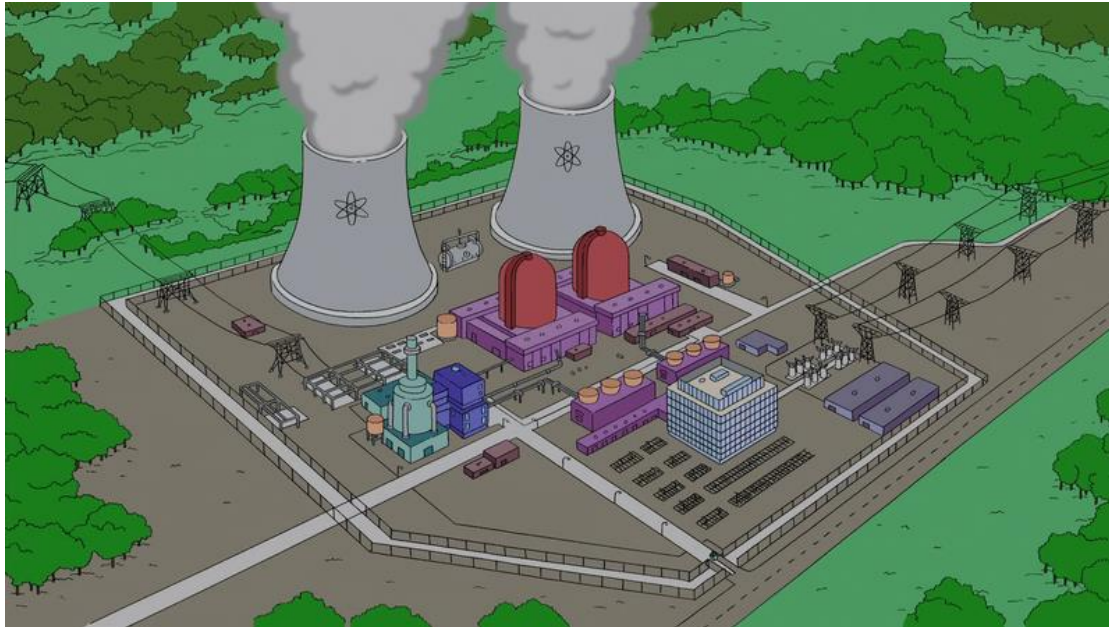
Objetivos de la Clase

- Conocer un equipo muy utilizado en la industria: la torre de enfriamiento.
- Realizar los balances globales relevantes en una torre de enfriamiento.
- Estimar la altura de un torre de enfriamiento.

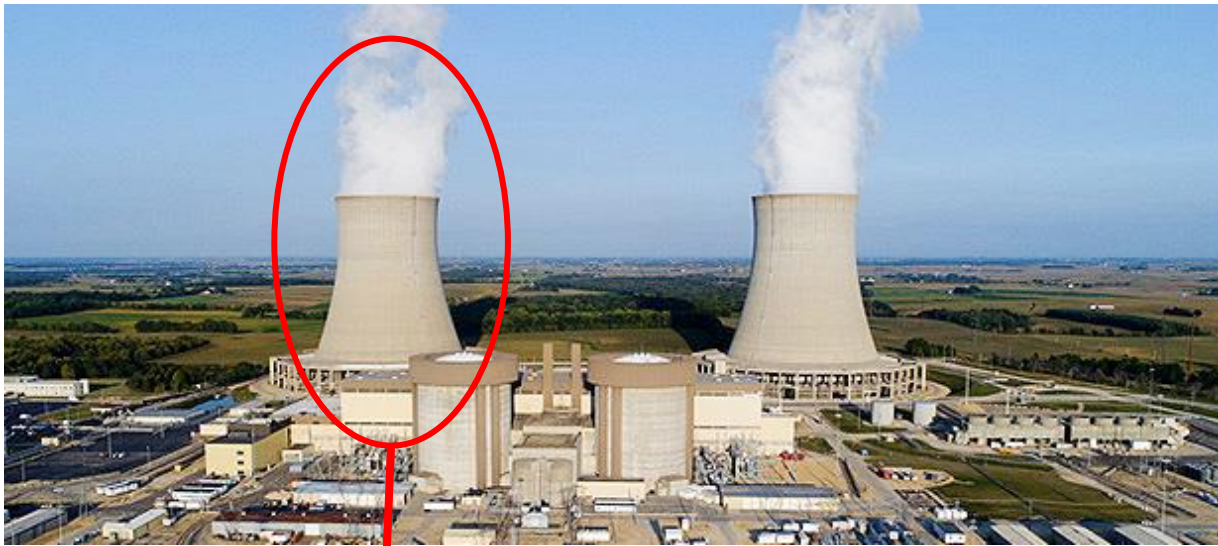
Torre de enfriamiento

Una torre de enfriamiento es una operación unitaria que permite disminuir la temperatura de un cuerpo de agua utilizando un gas que se enfrenta a este líquido caliente.

Las torres más grandes tienden a ser parecidas a grandes chimeneas hacia arriba.



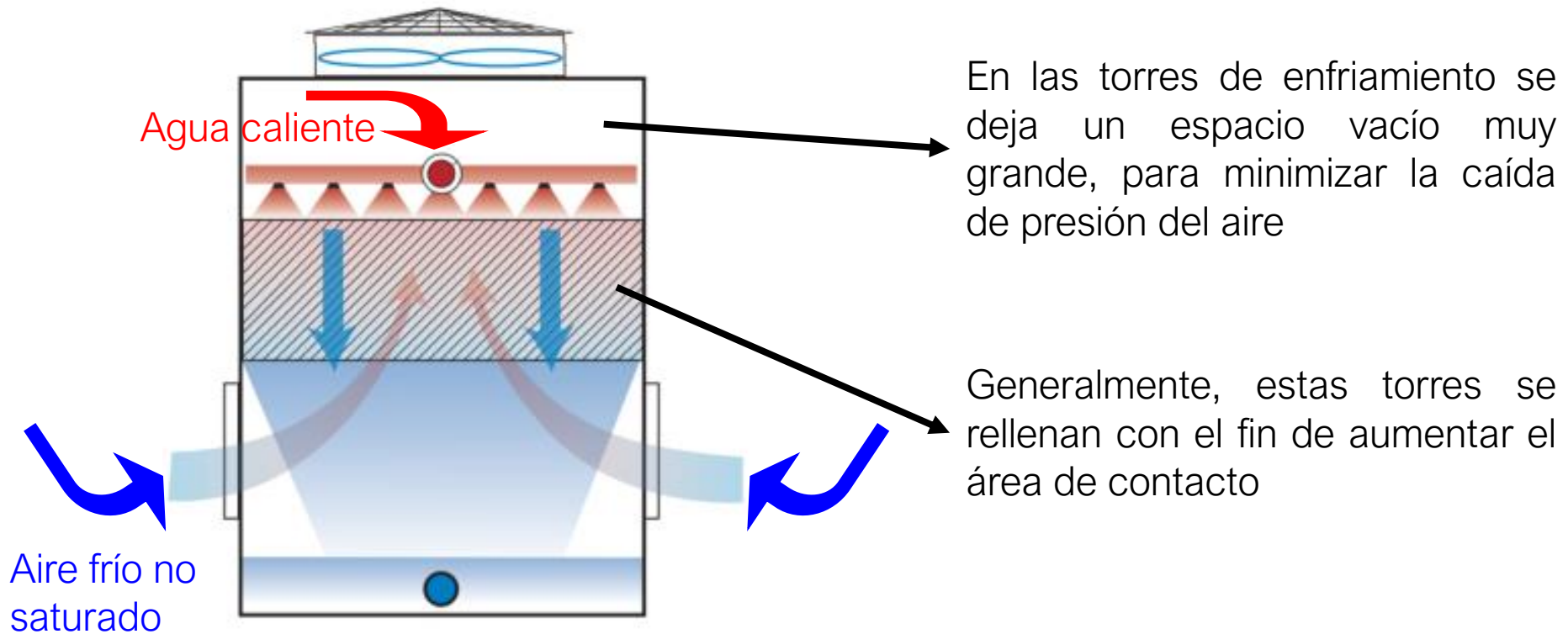
Si bien las plantas nucleares tienen torres de enfriamiento, el gas expulsado es aire con vapor de agua, por lo que el humo es blanco en la gran mayoría de casos



Torre de enfriamiento



Torre de enfriamiento



El agua caliente se contacta con aire más frío no saturado y parte del líquido se evapora, disminuyendo su temperatura.

Como las corrientes que se contactan están a **distinta temperatura** son importantes tanto la Transferencia de Calor como la Transferencia de Materia

Relleno de la Torre de enfriamiento

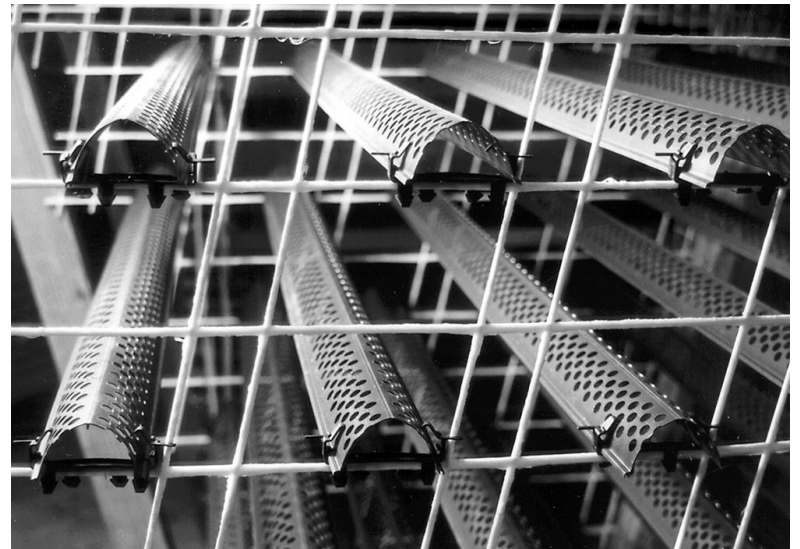
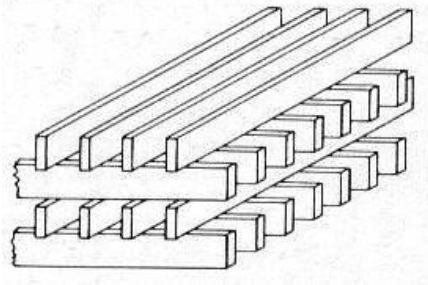
Una parte fundamental de la torre de enfriamiento es el relleno, ya que aumenta el área de contacto y aumenta el tiempo de contacto entre el aire y el agua, lo cual termina impactando en la eficiencia de la torre.

Estos rellenos, en el caso de las torres de enfriamiento, si consideramos los dos tipos más comunes encontramos:

Relleno de Tipo Splash: Interrumpen el desplazamiento vertical del agua, haciendo que el agua caiga en cascada a través de las barras de relleno.

Estos sistemas se caracterizan por tener una baja caída de presión, sin embargo, este sistema es sensible al ordenamiento del relleno.

Originalmente estos rellenos eran de madera (pino, cipres, secoya), pero hoy en día son de PVC



Relleno de la Torre de enfriamiento

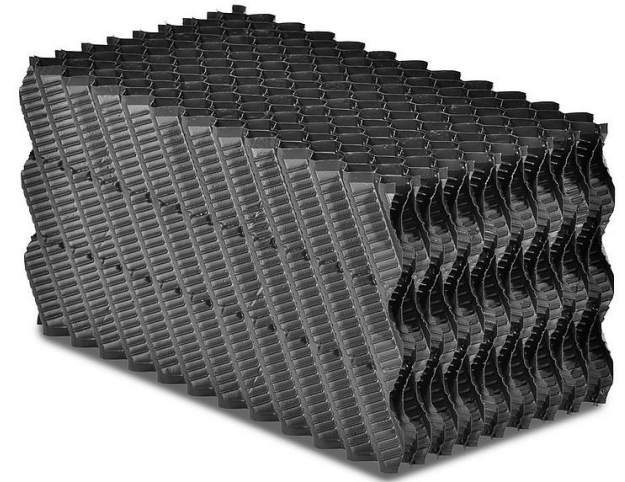
Una parte fundamental de la torre de enfriamiento es el relleno, ya que aumenta el área de contacto y aumenta el tiempo de contacto entre el aire y el agua, lo cual termina impactando en la eficiencia de la torre.

Estos rellenos, en el caso de las torres de enfriamiento, si consideramos los dos tipos más comunes encontramos:

Relleno de Tipo Film: Causa que el agua se distribuya en una fina película (film) fluyendo por la superficie del relleno maximizando el área de transferencia entre el aire y el agua.

Al usar estos rellenos, la altura del mismo es sólo de unos cuantos pies, es decir, una pequeña fracción de la altura total de la torre debido a que no es fácil asegurar una adecuada distribución del agua al inicio de la torre

Estos rellenos son parecidos a los utilizando en los intercambiadores de calor de placas planas

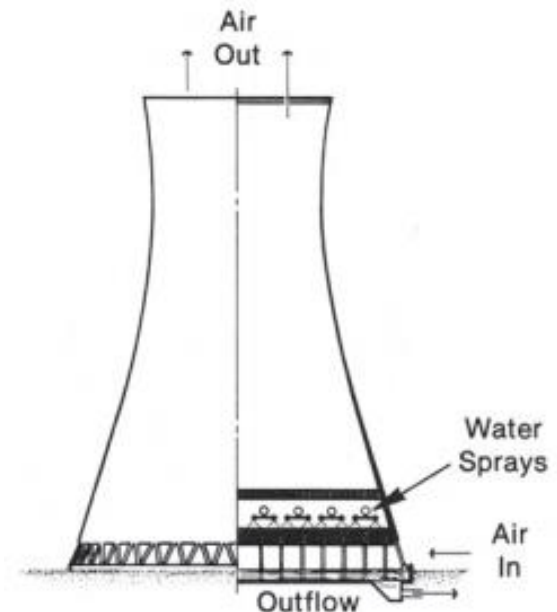
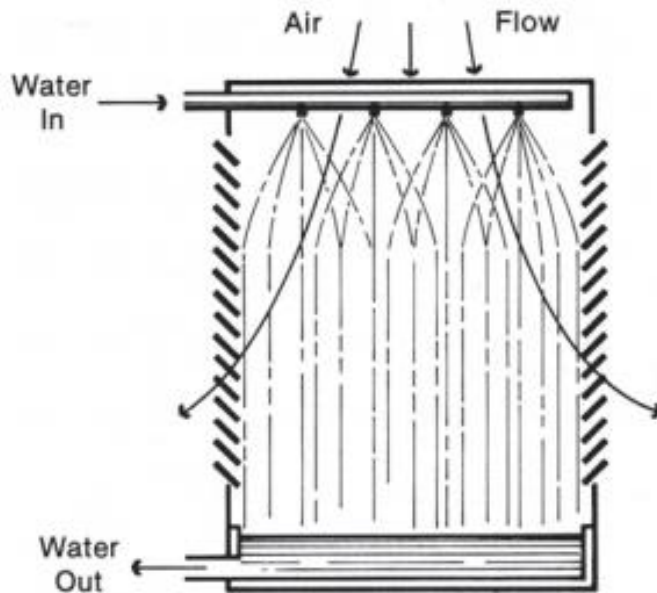


Torre de enfriamiento – Configuraciones

Según la necesidad se han diseñado varias configuraciones de la torre de enfriamiento.

Sin embargo, estas diferentes configuraciones se pueden englobar en 3 tipos:

Torres Atmosféricas: No tienen un dispositivo mecánico para crear una corriente de aire, por lo tanto el aire circula por la columna debido a la diferencia de presión entre el aire frío y caliente que se forma en el sistema.

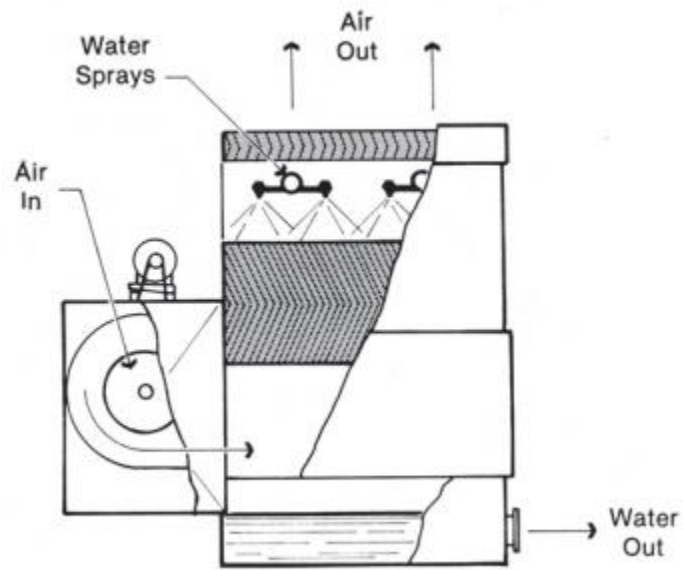


Torre de enfriamiento – Configuraciones

Según la necesidad se han diseñado varias configuraciones de la torre de enfriamiento.

Sin embargo, estas diferentes configuraciones se pueden englobar en 3 tipos:

Torres de Flujo Mecánico: Cuentan con 1 o más ventiladores para generar el flujo de aire. Por lo que su eficiencia es relativamente estable y por tanto, los efectos atmosféricos no afectan fuertemente el funcionamiento.



Tiro Forzado



Tiro inducido

Torre de enfriamiento – Configuraciones

Según la necesidad se han diseñado varias configuraciones de la torre de enfriamiento.

Sin embargo, estas diferentes configuraciones se pueden englobar en 3 tipos:

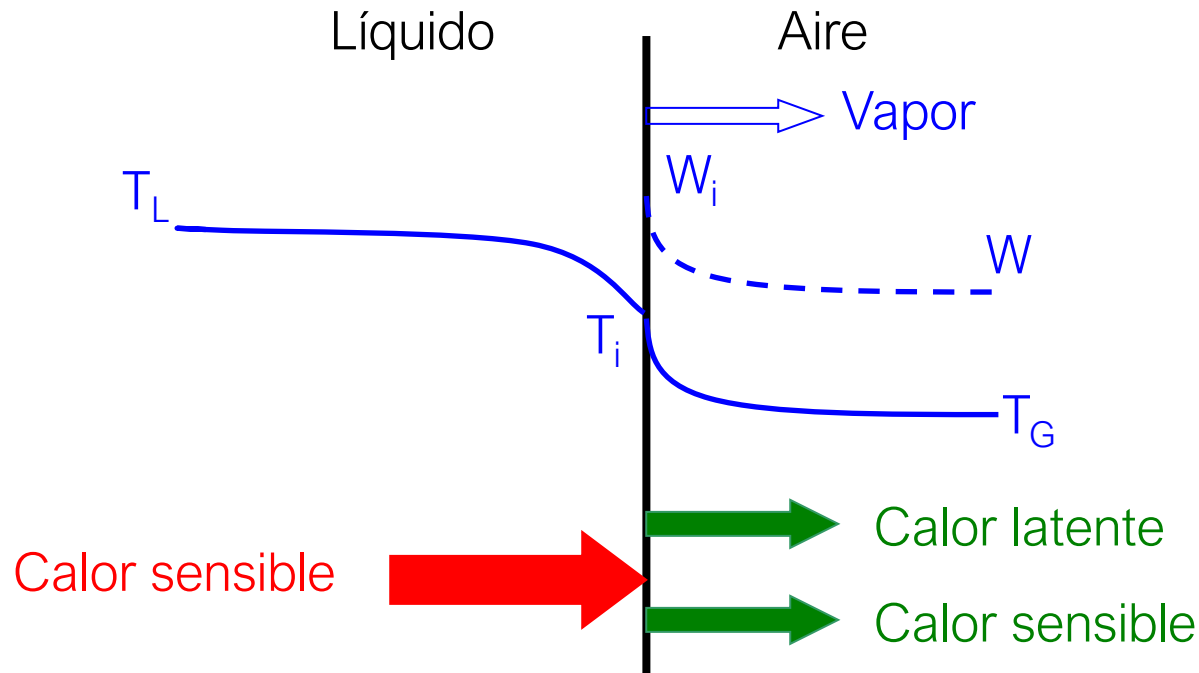
Torres de Flujo Híbrido: Estos sistemas parecen ser equipos de flujo natural de aire pero al interior cuentan con ventiladores que asisten al movimiento natural del flujo de aire



¿Qué está ocurriendo en la torre?

A medida que el agua va descendiendo por la torre la temperatura de esta agua va cambiando, es decir, existe un flujo de calor que genera un gradiente de temperatura en el agua.

De manera análoga el aire a medida que asciende también cambia de temperatura (aumenta su temperatura)



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

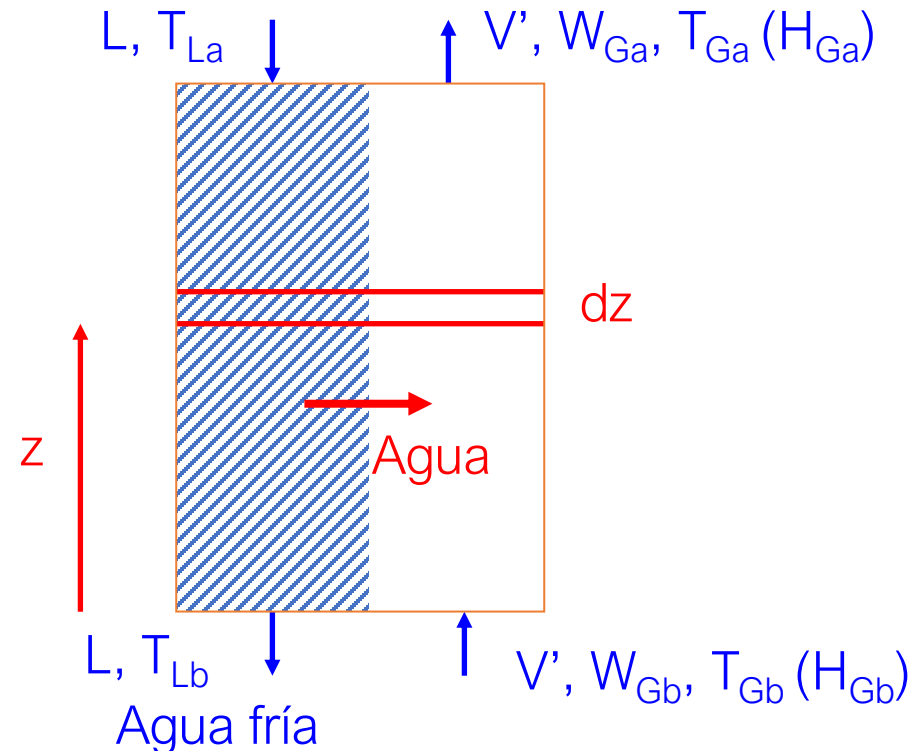
W = humedad aire (kg agua/kg aire seco)

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,

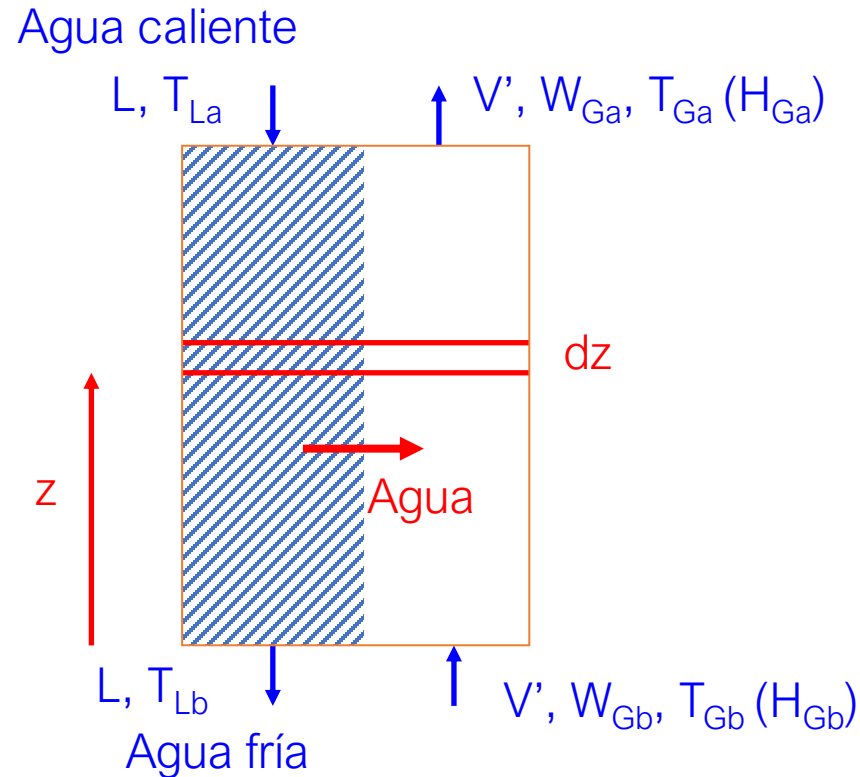
$$H_G = c_{p_{aire}}(T - T_0) + W\lambda_0 + c_{p_{agua}}W(T - T_0)$$

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):

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

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

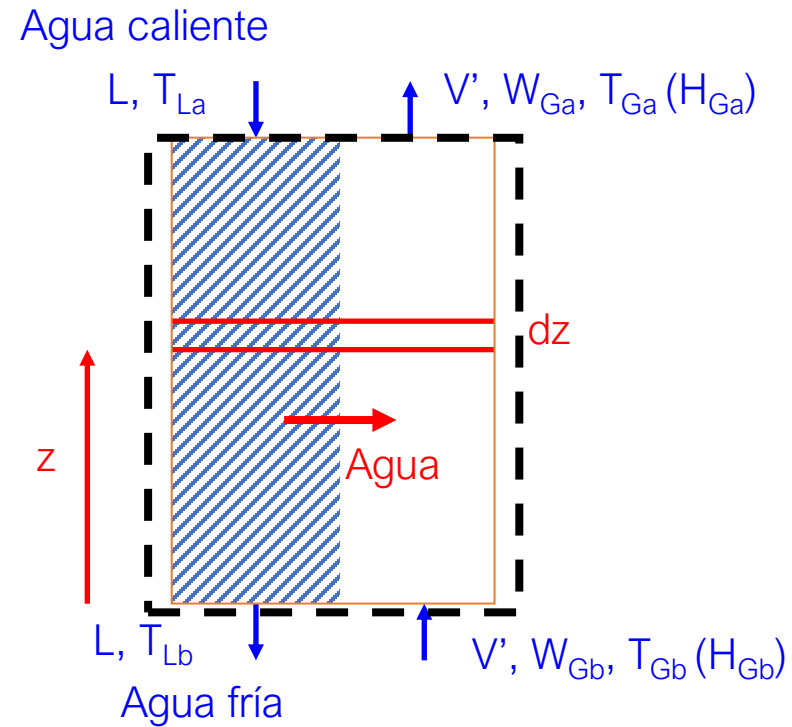
Haciendo un reordenamiento de la expresión anterior:

$$H_b = \left(\frac{Lc_L}{V'} \right) (T_{Lb} - T_{La}) + H_a$$

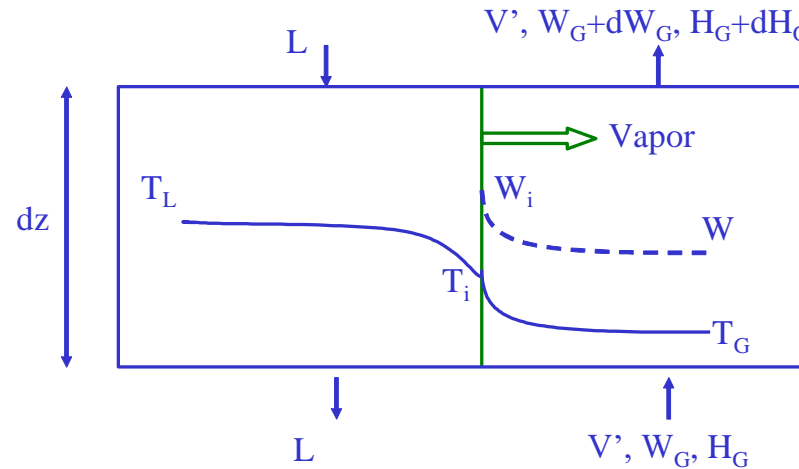
Ecuación de una línea recta con pendiente Lc_L/V' (L.O.: relaciona corrientes que se cruzan!)

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:

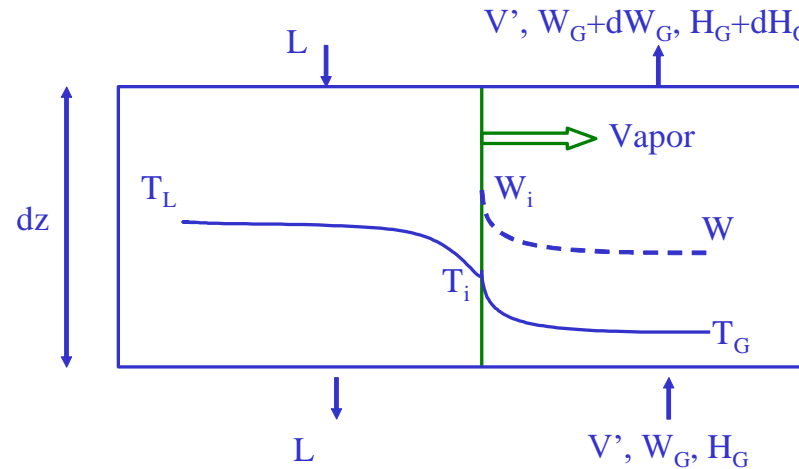
$$AV'dW = k_G aPM_{aire}(W_i - W_G)Adz \quad (2)$$

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, $Lc_L dT_L = V' dH_G$

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

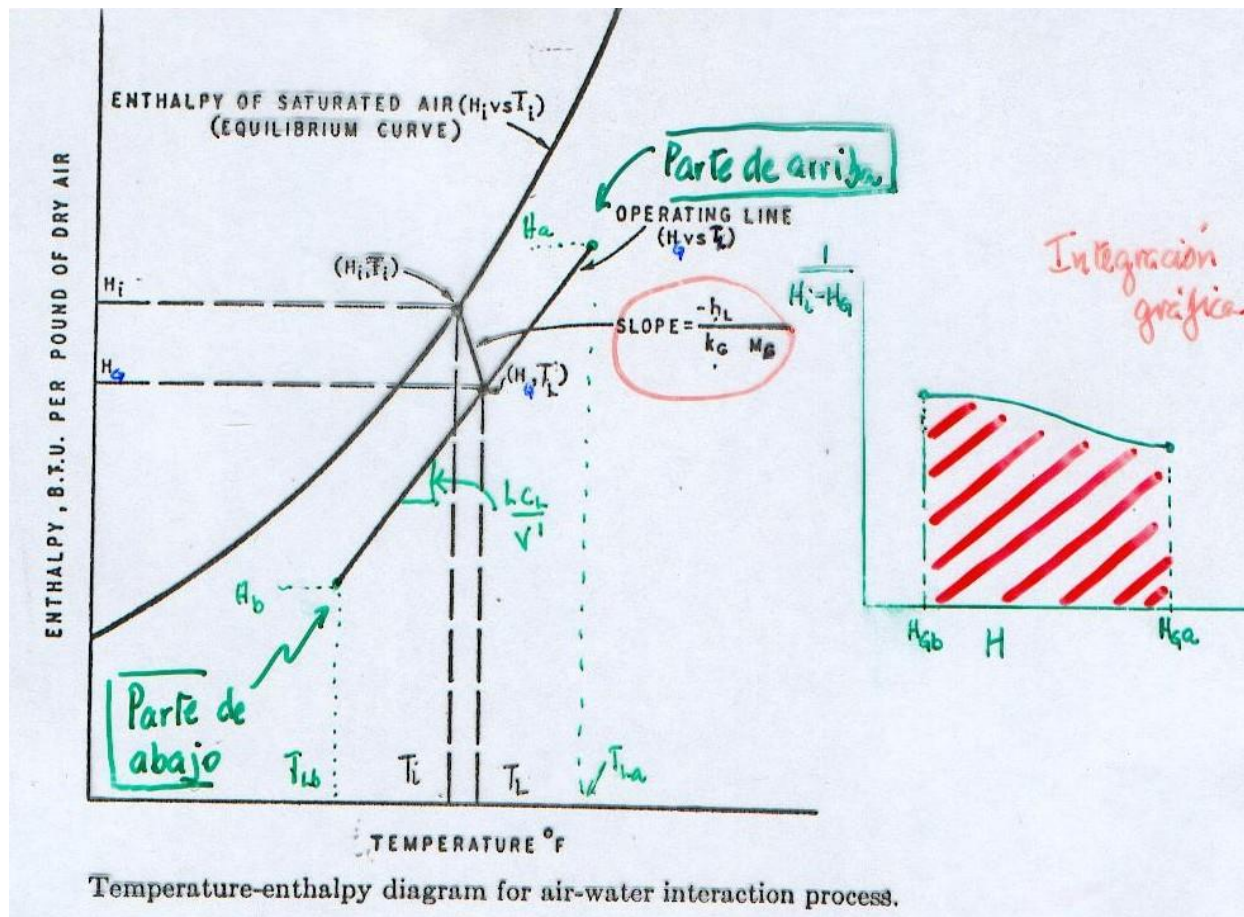
Relación entre H_i y H_G

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.

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

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



- Conocer un equipo muy utilizado en la industria: la torre de enfriamiento.
- Realizar los balances globales relevantes en una torre de enfriamiento.
- Estimar la altura de un torre de enfriamiento.

Torre de enfriamiento

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

10 de Junio de 2021

