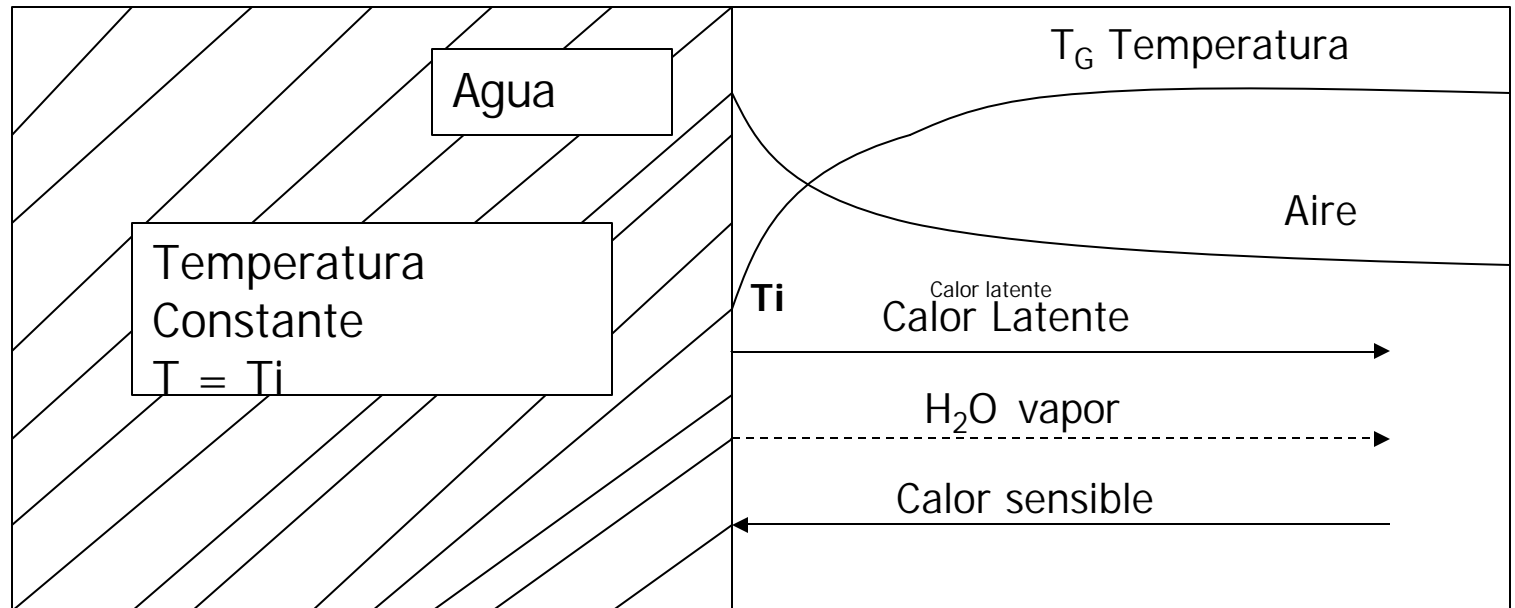


# MECANISMO DE INTERACCIÓN DEL AGUA Y DEL AIRE

- PERFILES

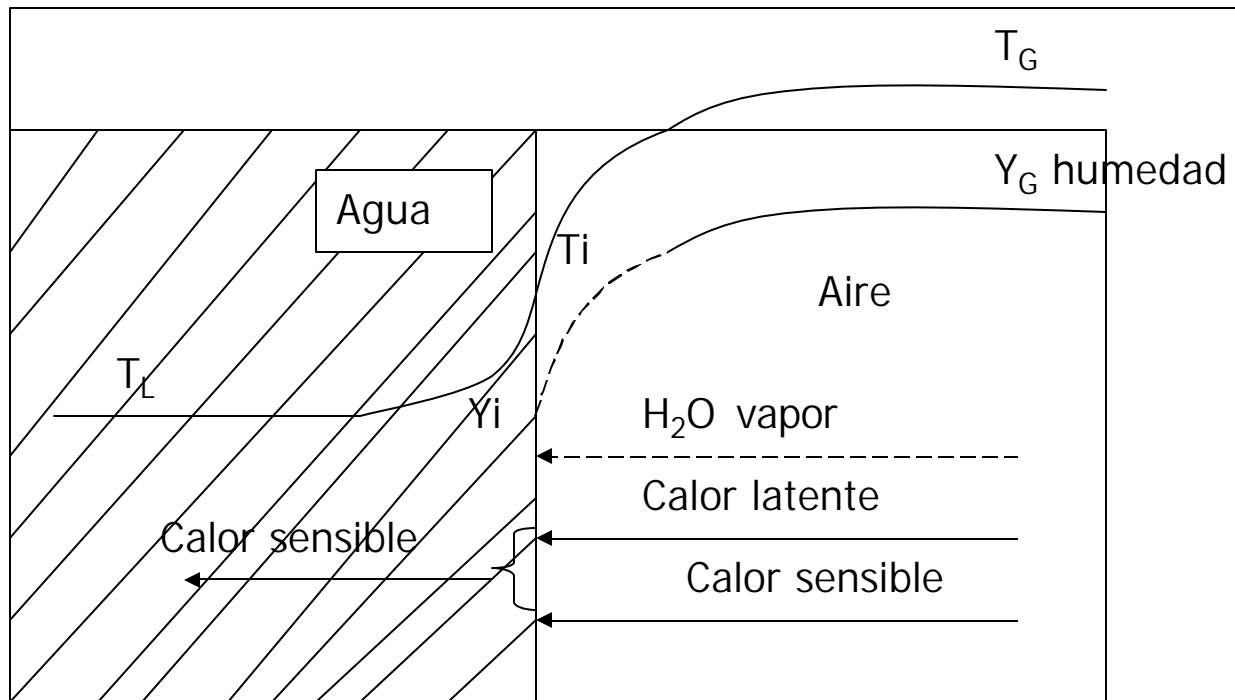
Condiciones en un humidificador adiabático. Temperatura constante del líquido



# MECANISMO DE INTERACCIÓN DEL AGUA Y DEL AIRE

- PERFILES

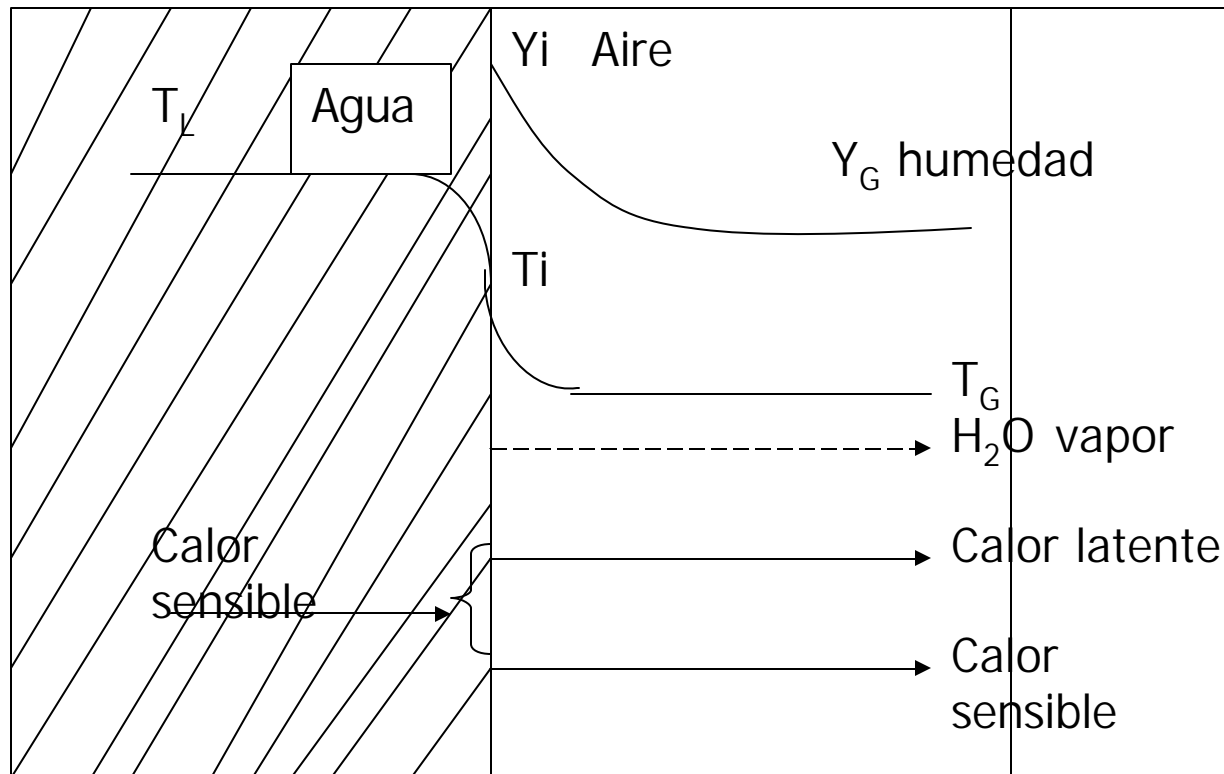
Condiciones en un deshumidificador



# MECANISMO DE INTERACCIÓN DEL AGUA Y DEL AIRE

- PERFILES

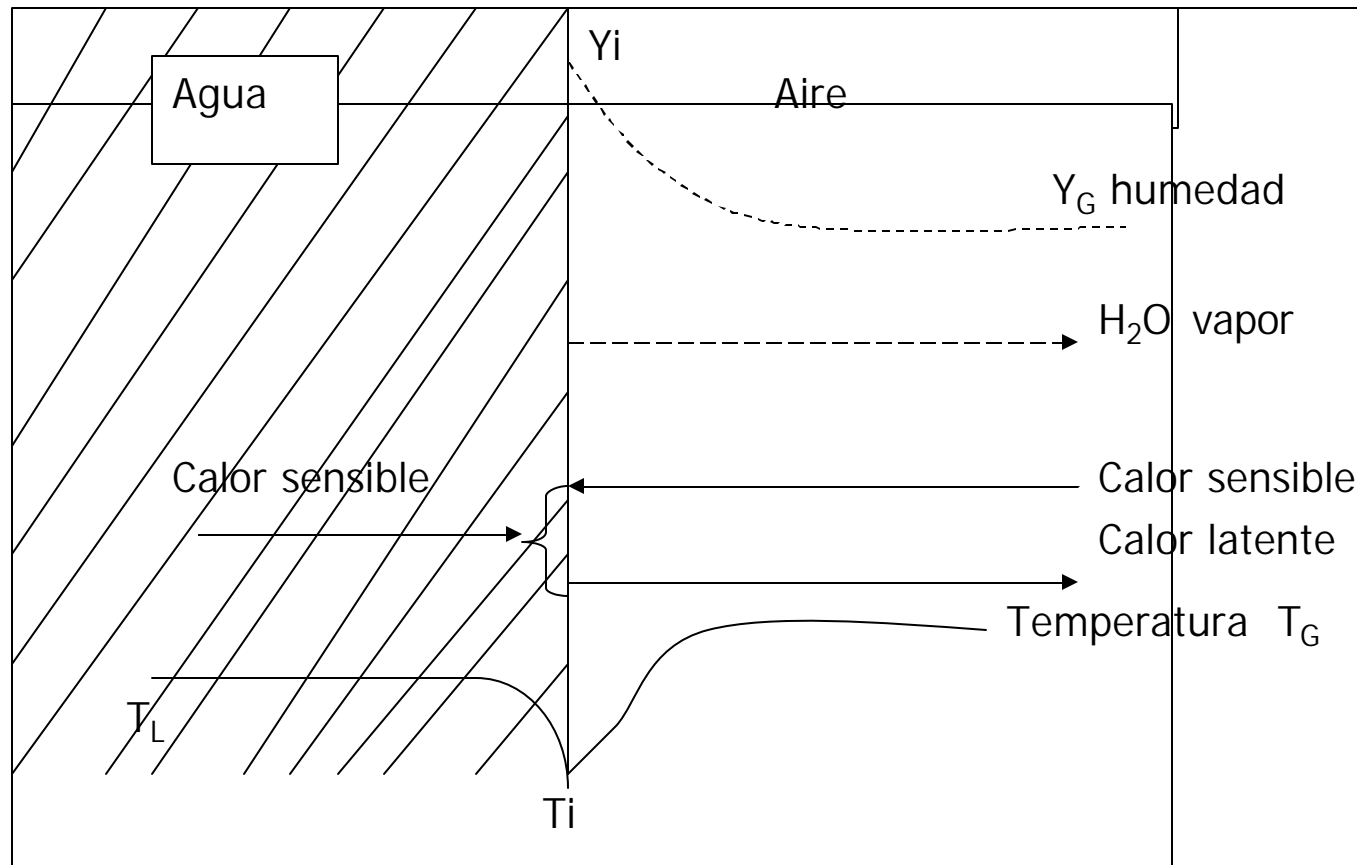
Condiciones en la parte superior de una torre de enfriamiento



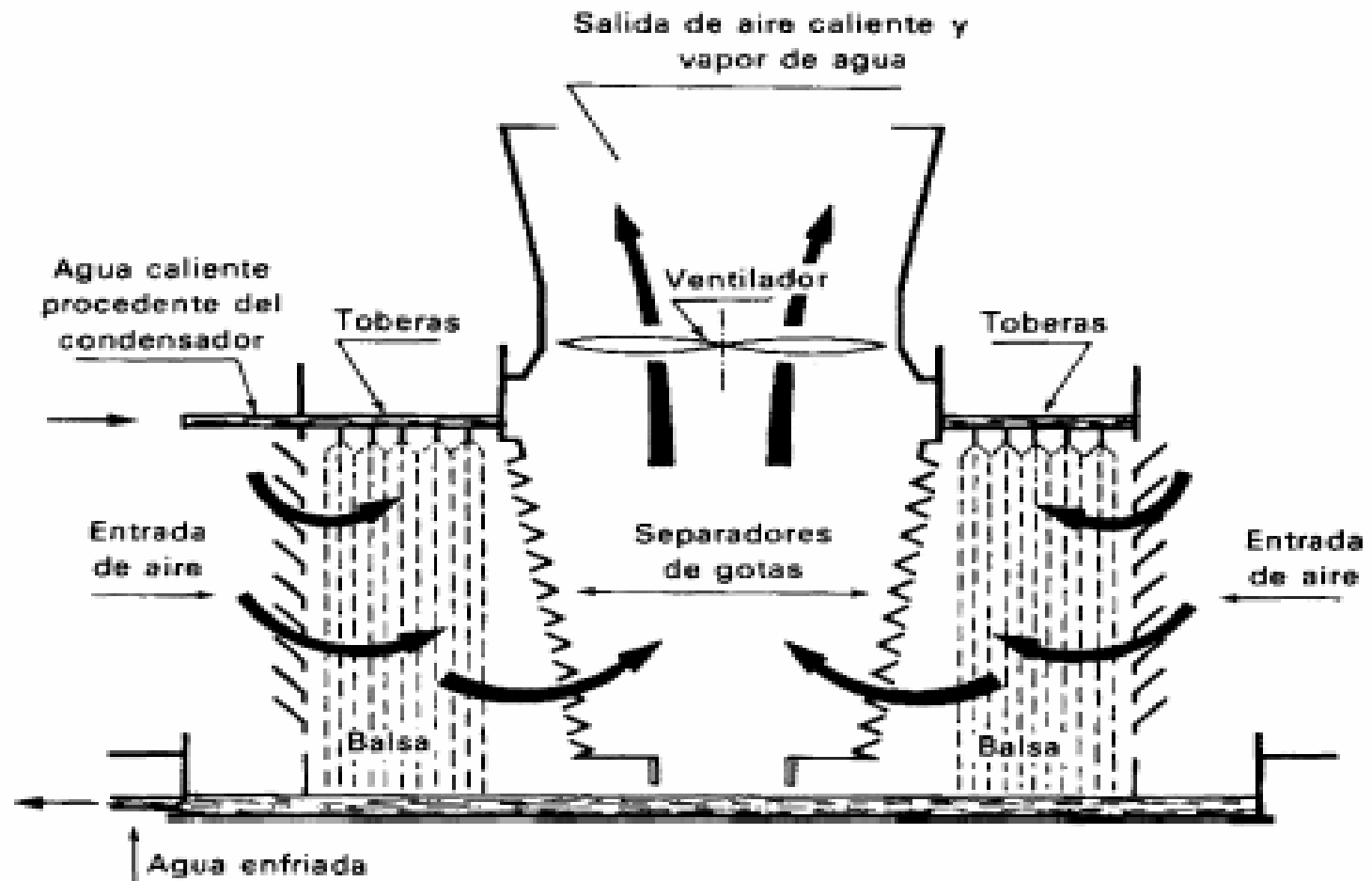
# MECANISMO DE INTERACCIÓN DEL AGUA Y DEL AIRE

- PERFILES

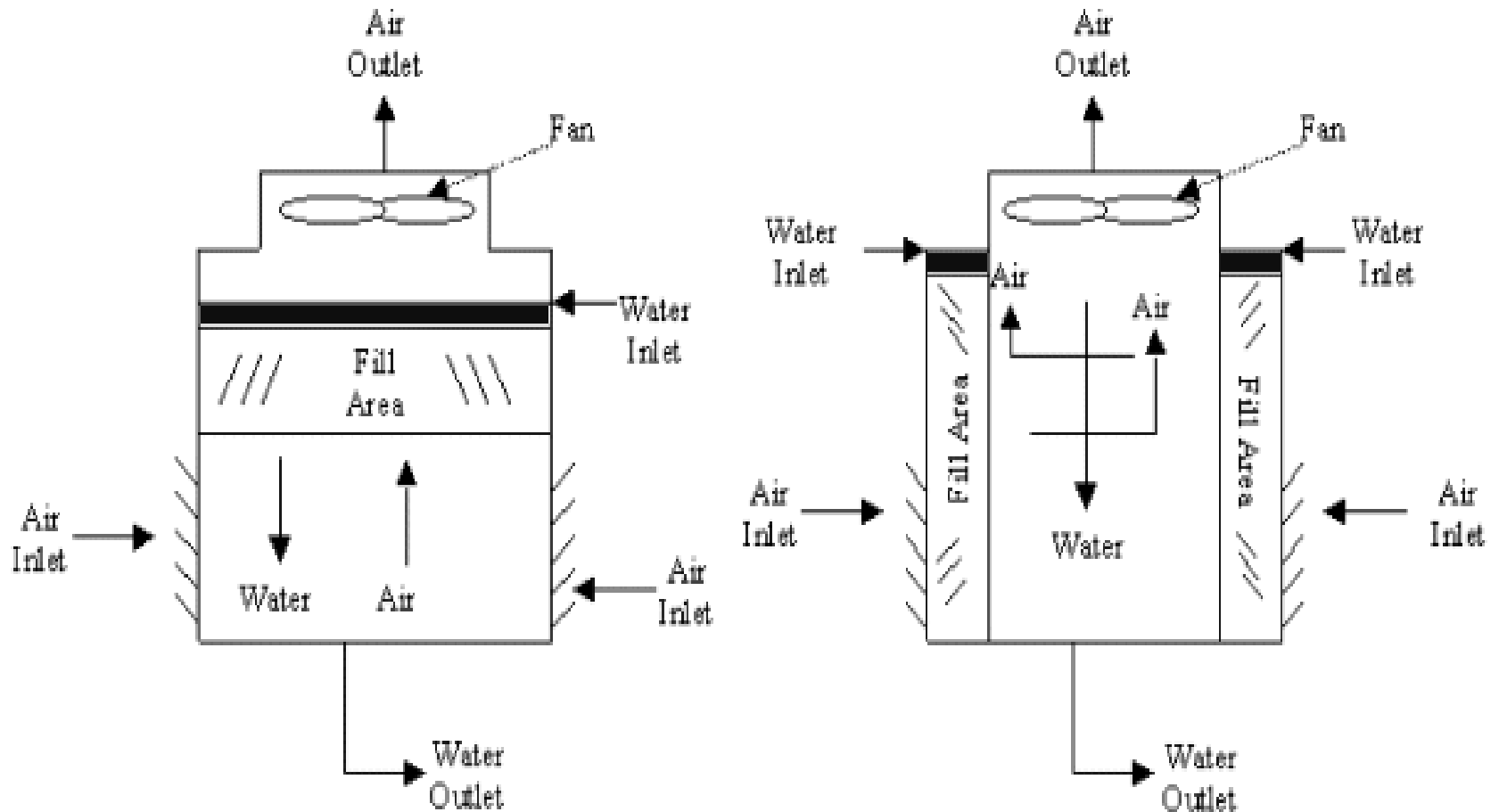
Condiciones en la parte inferior de una torre de enfriamiento



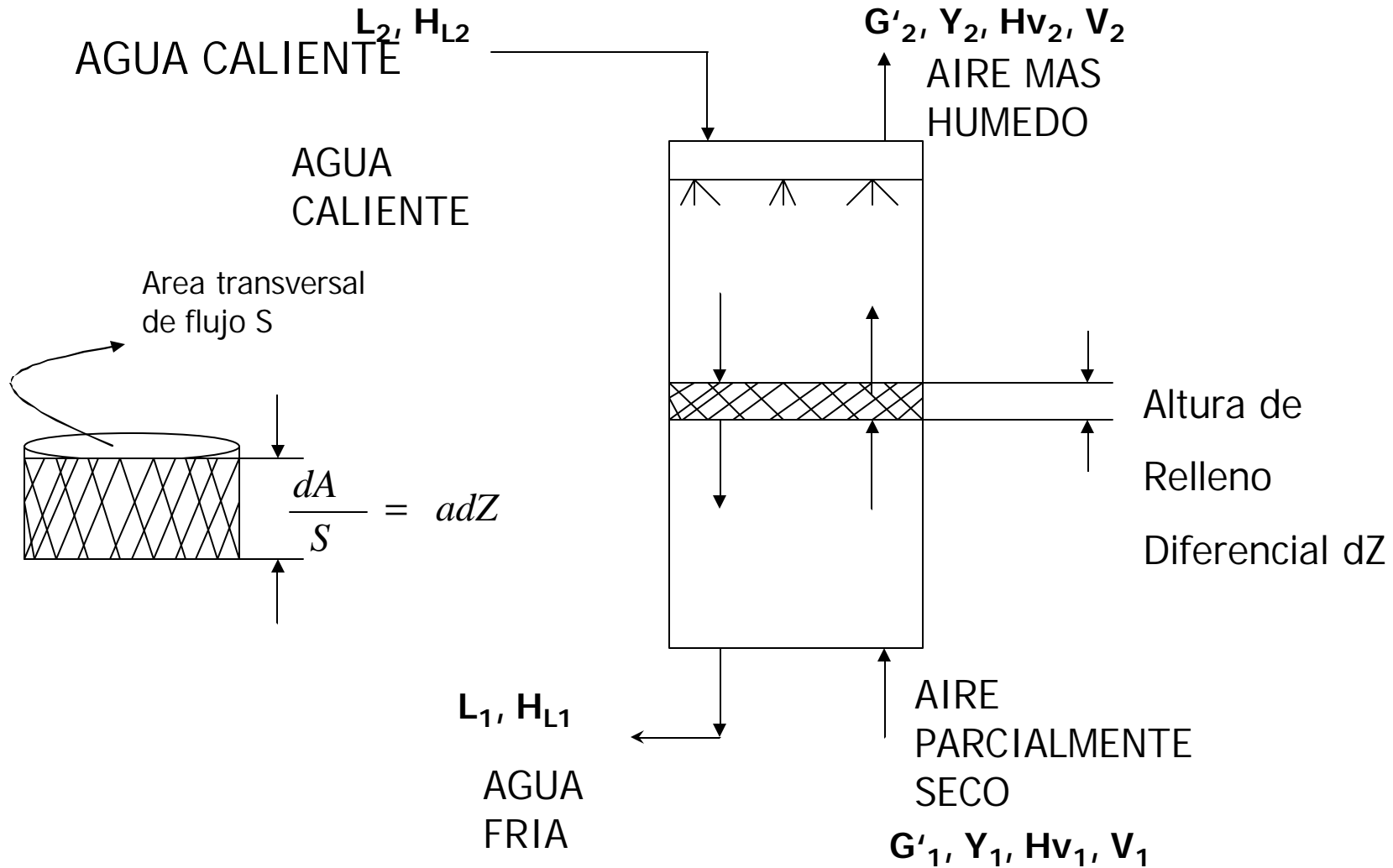
# TEORIA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO



# TEORIA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO



# Balances de materia y energía



# Balances de materia y energía

Donde la nomenclatura es la siguiente:

$G'$ : Flujo másico de gas seco

$L$ : Flujo másico de líquido

$Y$ : Humedad en masa de agua/masa de aire seco

$H$ : entalpía de la fase gaseosa

Subíndices: 1 fondo de la torre, 2: tope de la torre

$S$ : Área transversal de flujo

$a$ : área interfacial de transferencia por volumen de torre

$A$ : superficie interfacial



# Balances de materia y energía

Donde la nomenclatura es la siguiente:

$G'$ : Flujo másico de gas seco

$L$ : Flujo másico de líquido

$Y$ : Humedad en masa de agua/masa de aire seco

$H$ : entalpía de la fase gaseosa

Subíndices: 1 fondo de la torre, 2: tope de la torre

$S$ : Área transversal de flujo

$a$ : área interfacial de transferencia por volumen de torre

$A$ : superficie interfacial

# Balances de materia y energía: Línea de Operación

Haciendo un balance global en la columna:

$$L_2 - L_1 = G'(Y_2 - Y_1)$$

Balance global de entalpía:

$$L_2 H_{L2} + G' H_1 + q = L_1 H_{L1} + G' H_2$$

Para la altura diferencial de la columna  $dZ$  los balances quedan:

Masa:

$$G' dY = dL$$

Energía con  $q = 0$

$$G' dH = d(LH_L)$$

Las magnitudes del calor específico  $c_s$  y del calor de vaporización del agua muestran que solamente una pequeña fracción del agua se evapora durante el enfriamiento, de hecho por cada 10°F de enfriamiento se evapora 1% de agua, por lo tanto la variación del  $cp_{\text{Líquido}}$  es pequeña, así:

$$d(LH_L) = L c_L dT_L$$

$$\text{Donde } L = (L_1 + L_2)/2$$

# Balances de materia y energía: Línea de Operación

Integrando la ecuación anterior sobre la torre queda:

$$G' \int_{H_1}^{H_2} dH = \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} Lc_L dT_L$$

$$G'(H_2 - H_1) = Lc_L (T_{L2} - T_{L1})$$

$$\frac{H_2 - H_1}{T_{L2} - T_{L1}} = \frac{Lc_L}{G'}$$

Esta ecuación define la línea de operación para la torre en un diagrama H vs  $T_L$

# Balances de materia y energía: Desarrollo de la Ecuación de Diseño

Para el cambio de entalpía en la fase gaseosa la expresión en términos de temperatura es rigurosa **si el calor húmedo es constante**:

$$G'(dH) = G'd(c_s(T_G - T_o) + Yl_o) = G'c_s dT_G + G'l_o$$

Es decir, un término de calor sensible y un término de calor latente.

El calor sensible se transfiere de la interface a la masa de mezcla gas vapor a la velocidad de:

$$G'c_s dT_G = h_G a (T_i - T_G) SdZ$$

La transferencia de calor latente en la fase gaseosa:

$$G'l_o dY = l_o k_Y a (Y_i - Y) SdZ$$

Sustituyendo ambos términos en la ecuación inicial:

$$\frac{G'}{S}(dH) = G'h_G a (T_i - T_G) dZ + l_o k_Y (Y_i - Y) dZ$$

# Balances de materia y energía: Desarrollo de la Ecuación de Diseño

Separando  $k_Y a$  de la derecha de la ecuación y designando el término  $\frac{h_G a}{k_Y a} = r$  donde  $r$  es la relación psicrométrica queda:

$$\frac{G'}{S} (dH) = k_Y a [c_s r (T_i + I_o Y_i) - (c_s r T_G + I_o Y)] dZ$$

También se ha hecho la suposición de que las áreas para la transferencia de calor y de masa son iguales, esto será cierto solo para proporciones altas de líquido, tales que el empaque este completamente húmedo.

Si  $r$  es igual a 1 (Sistema Aire Agua) los términos dentro de los paréntesis en la ecuación anterior son entalpías con:

$$H_i = c_s T_i + I_o Y_i$$

$$H_G = c_s T_G + I_o Y$$

Al sustituir queda entonces la ecuación:

$$\frac{G'}{S} dH = k_Y a [H_i - H_G] dZ$$

# Balances de materia y energía: Desarrollo de la Ecuación de Diseño

La cual al integrar queda:

$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{G'}{S} \frac{dH}{k_Y a (H_i - H_G)} = \int_0^Z dZ = Z$$

Esta es la ecuación de diseño para una torre de enfriamiento de agua

La integración de esta ecuación se lleva a cabo generalmente usando valores de  $G'$  y  $k_Y a$  promediados para la altura de la columna. Esto introduce un pequeño error.

Si ahora consideramos la transferencia de calor sensible en el líquido, es decir desde el líquido hacia la interfase, se obtiene entonces de la ecuación inicial:

$$\frac{G'}{S} dH = \frac{d(LH_L)}{S} = \frac{L}{S} c_L dT_L$$

Y combinando esta ecuación con la ecuación  $\frac{G'}{S} dH = k_Y a [H_i - H_G] dZ$

# Balances de materia y energía: Desarrollo de la Ecuación de Diseño

Queda:

$$\frac{L}{S} c_L dT_L = h_L a (T_L - T_i) dZ = k_Y a (H_i - H_G) dZ$$

Rearreglando obtenemos:

$$-\frac{h_L a}{k_Y a} = \frac{H_G - H_i}{T_L - T_i} \quad \text{Ecuación de la línea de unión}$$

Esta última ecuación se aplica para cualquier punto de un equipo que ponga en contacto aire y agua, a partir de ella la temperatura y la entalpía de la interfase pueden determinarse para cualquier punto en el cual, la temperatura del líquido ( $T_L$ ).

Las condiciones de la interfase pueden obtenerse mediante un método gráfico.

# ECUACIONES DE TRABAJO

Finalmente las ecuaciones de trabajo a utilizar son:

1.- Ecuación de la línea de Operación: 
$$\frac{Lc_L}{G'} = \frac{H_2 - H_1}{T_{L_2} - T_{L_1}}$$

2.- Ecuación de la línea de Unión: 
$$-\frac{h_L a}{k_Y a} = \frac{H_G - H_i}{T_L - T_i}$$

3.- Ecuación de diseño: 
$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{G'}{S} \frac{dH}{k_Y a (H_i - H_G)} = \int_0^Z dZ = Z$$

**LA PREGUNTA ES ¿COMO UTILIZARLAS?**



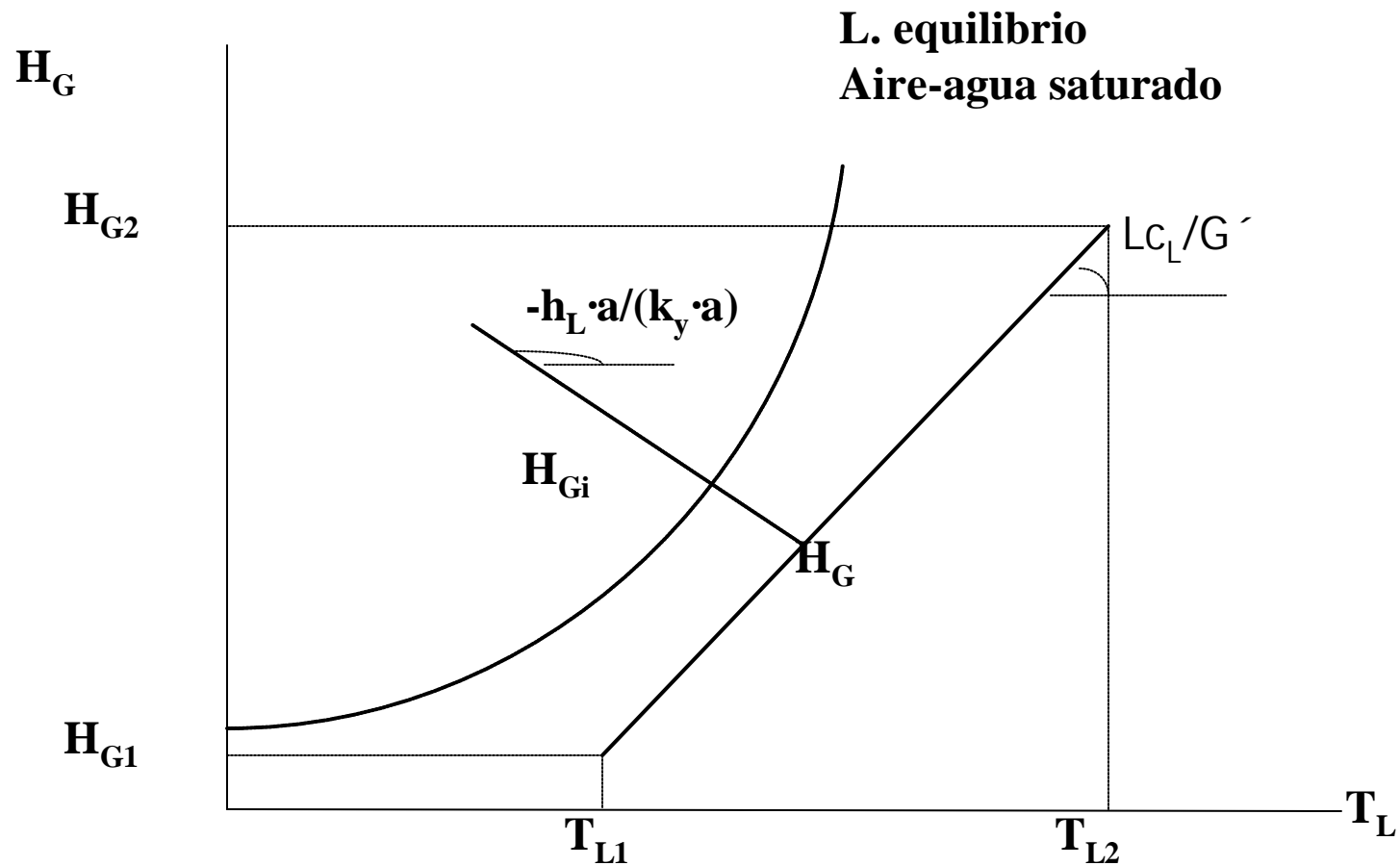
# ECUACIONES DE TRABAJO

Hemos mencionado que son las ecuaciones de líneas pero ¿Donde?

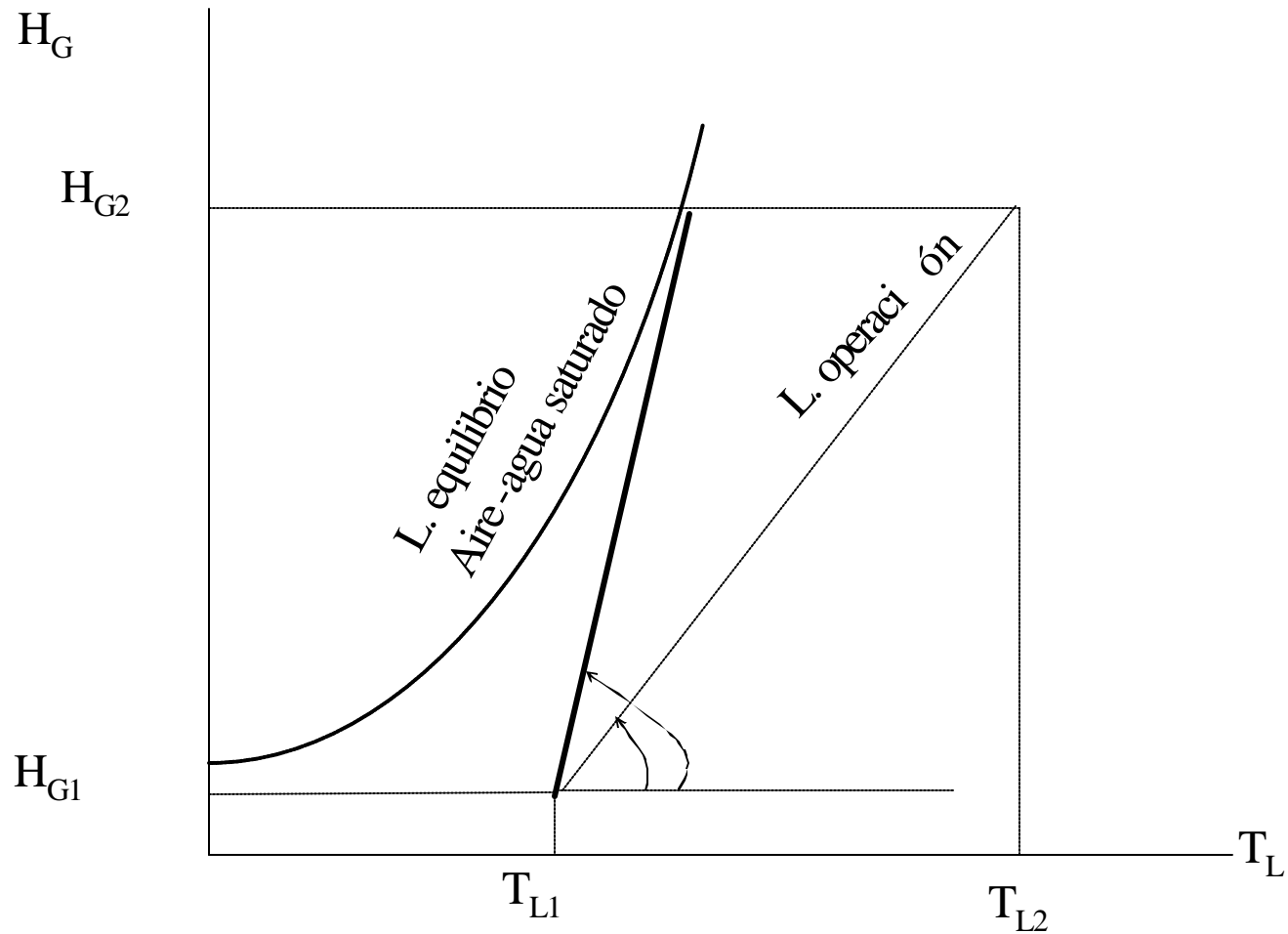
Si hacemos una inspección a las ecuaciones nos damos cuenta de que aparece la entalpía de la fase gas y la temperatura, entonces la respuesta es sencilla, son líneas en un diagrama  $H$  vs  $T_L$ .

La entalpía se grafica en el eje de ordenadas y la temperatura del líquido en el eje de las abscisas.

# ECUACIONES DE TRABAJO



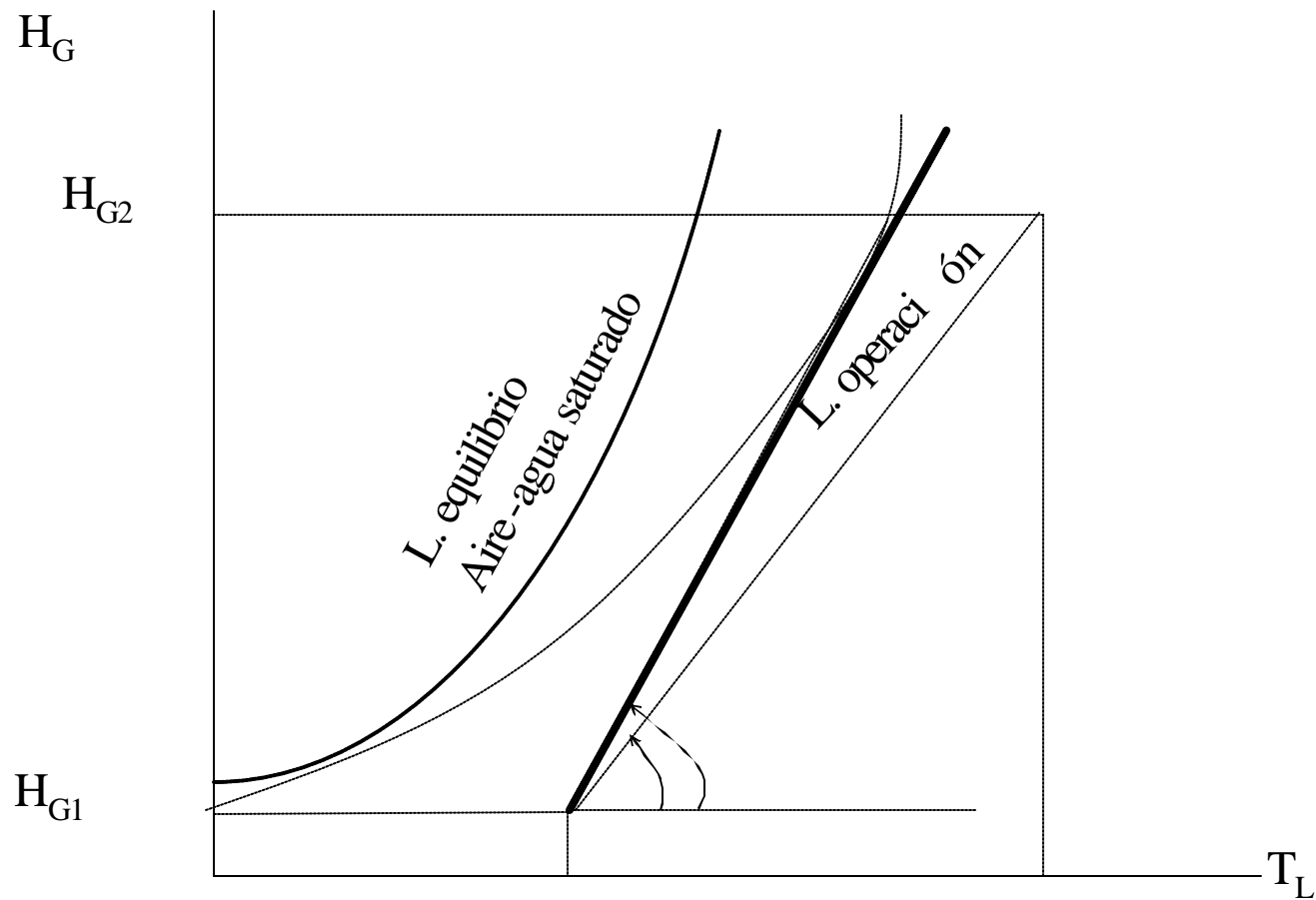
# RELACION L/G MINIMA



# RELACION L/G MINIMA

Como puede observarse en las graficas anteriores, se alcanza un punto en el cual la linea de operaci3n toca la curva de equilibrio, produce una fuerza motriz igual a cero, y en consecuencia una superficie interfacial infinita o altura infinita de la torre, para lograr un cambio en la temperatura del liquido

# RELACION L/G MINIMA



# NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA

En la ecuación de diseño, si consideramos que  $k_Y a$  es constante se tiene:

$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H_i - H_v} = \frac{k_Y a S}{G'} Z$$

Designando a  $G'/S$  simplemente como  $G'_s$  tenemos:

$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H_i - H_v} = \frac{k_Y a}{G'_s} Z$$

Al término de la Izquierda se le conoce como el número de unidades de transferencia NTU

# NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA

Reacomodando para calcular Z, la altura de la torre:

$$Z = \frac{G'_s}{k_Y a} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H_i - H_v}$$

$$Z = \text{HTU} * \text{NTU}$$

$$\text{donde} \quad \text{HTU} = \frac{Z}{\text{NTU}} = \frac{G'_s}{k_Y a}$$

Siendo HTU la altura del elemento de transmisión

# EVALUACION DEL NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA

La integral del Numero de unidades de transferencia puede ser evaluada numéricamente por integración grafica.

Los datos necesarios por este procedimiento se obtienen de la gráfica de  $H$  vs  $T_L$ , de la linea de operación se traza una linea de union de pendiente  $h_G/k_y a$  hasta que corte la curva de equilibrio, ese punto de corte representa las condiciones  $(H_i, T_i)$ , y el punto sobre la linea de operación representa las condiciones  $(H, T_L)$ .

El procedimiento se completa al trazar tantas lineas de union que permitan cubrir el rango de temperatura de operación de la torre, los datos colectados se tabulan y se calcula la integral.

Por el método grafico se debe construir una curva de  $1/(H_i - H)$  vs  $H$  y el area bajo tal curva representa la integral.

Por el método numérico se utiliza el metodo de Simpson, o cualquier otro metodo adecuado.