

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Masa

## ABSORCIÓN Y DESORCIÓN

# ÍNDICE

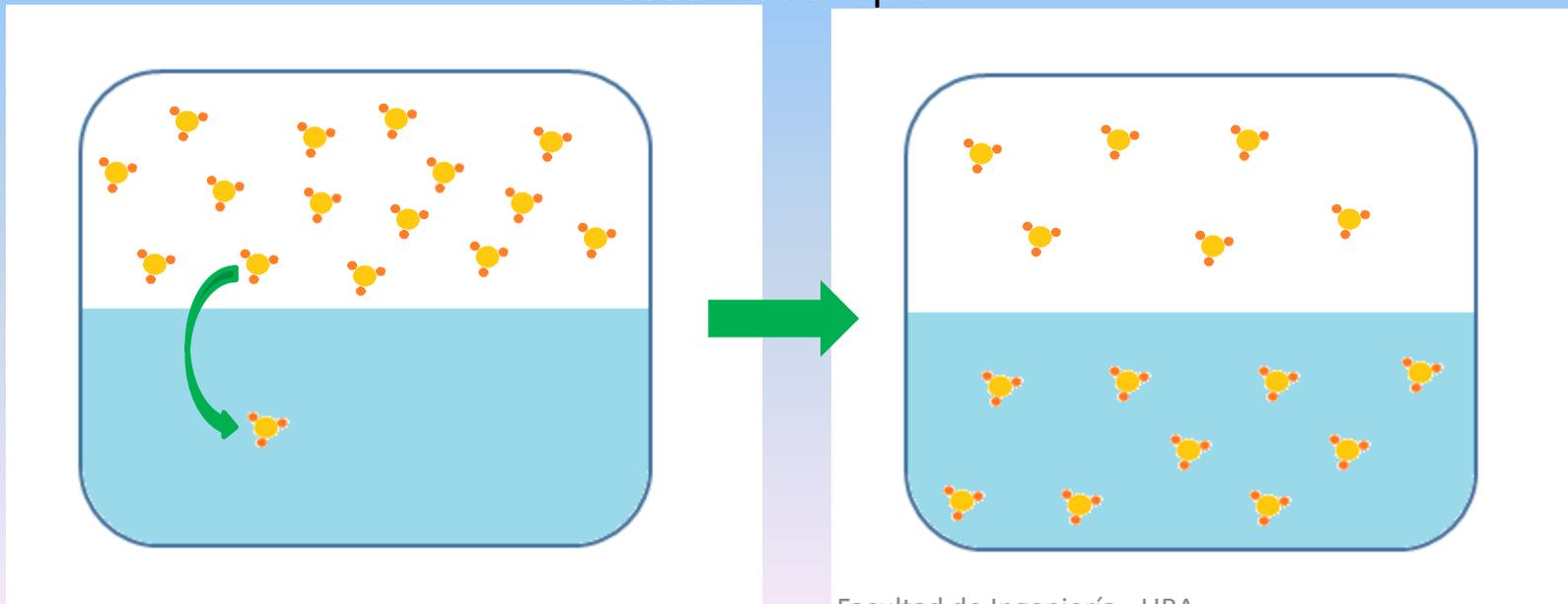
- Qué es la Absorción/Desorción?
- Diseño de equipos con varias etapas – Absorción
- Efecto de la Temperatura y la Presión
- Eficiencia
- Equipos de Absorción/Desorción por etapas
- Diseño de equipos de contactado continuo
- Equipos de Absorción/Desorción de contactado continuo
- Absorción No Isotérmica

## Qué es la absorción/desorción?

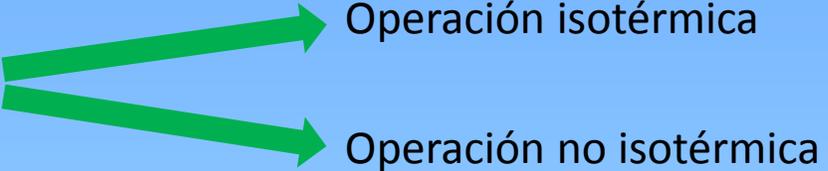
La absorción es una operación que consiste en la transferencia selectiva de uno o más componentes presentes en una fase gaseosa hacia la fase líquida con la que se pone en contacto.

La desorción es la operación “inversa” donde uno o más componentes de la fase líquida se transfieren selectivamente a la fase gaseosa.

Caso más simple



## Qué es la absorción/desorción?

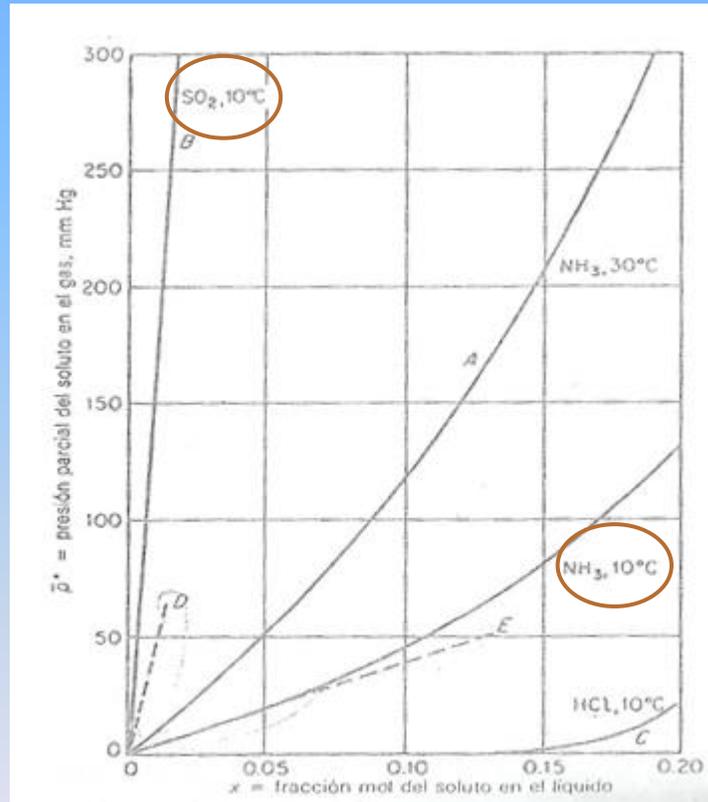
- La fase gaseosa y la fase líquida no suelen contener los mismo componentes (agente separador).
- Los efectos caloríficos se deben a los calores de disolución. 
  - Operación isotérmica
  - Operación no isotérmica
- Agente separador: Líquido (Absorción) o Gas (Desorción)



## Qué es la absorción/desorción?

Características a tener en cuenta de un agente separador:

- Solubilidad



Cuál es más soluble: El  $\text{SO}_2$  o el  $\text{NH}_3$ ?



- Selectividad

## Qué es la absorción/desorción?

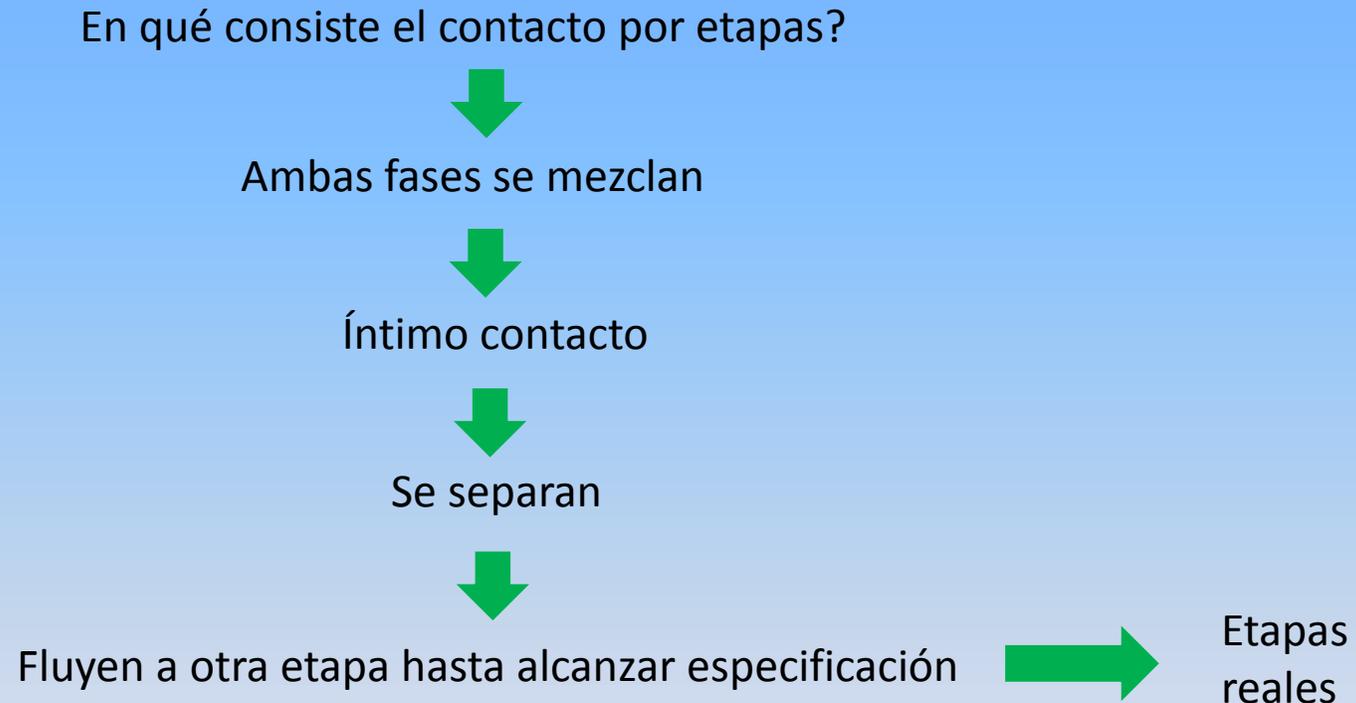
Características a tener en cuenta de un agente separador:

- Volatilidad  Pérdidas (\$\$\$\$)
  - Inflamabilidad
  - Características del producto final
  - Toxicidad
  - Características contaminantes (TEG, Aminas,  $K_3MnO_4$ , por ejemplo)
  - Corrosividad
  - Costo
  - Viscosidad
  - Recuperación
- }] } \$\$\$\$

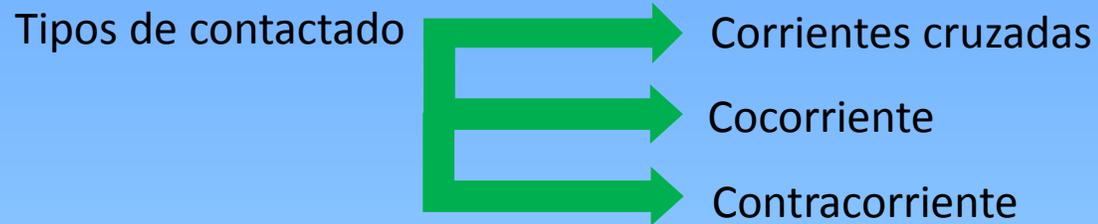
*Qué es la absorción/desorción?*

El compuesto a separar requiere, al menos, una etapa posterior de separación, en caso de necesitarlo puro.  
Contraejemplo: Producción de ácido clorhídrico.

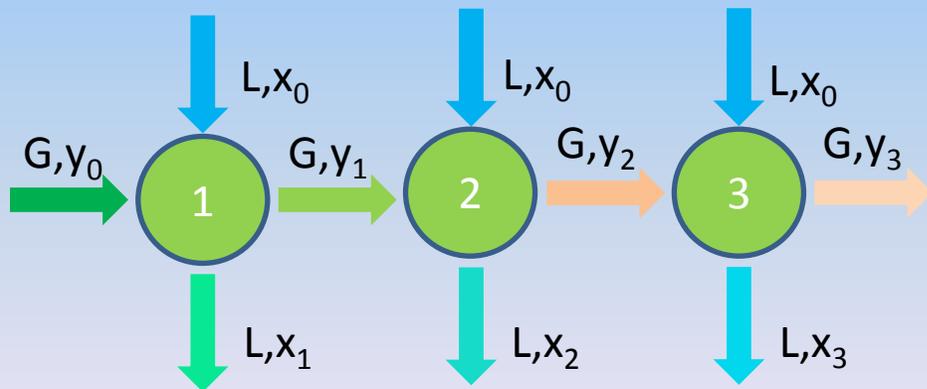
## *Diseño de equipos con varias etapas - Absorción*



# Diseño de equipos con varias etapas - Absorción



Corrientes cruzadas



Cocorriente



## Diseño de equipos con varias etapas - Absorción

Contracorriente



Datos (típicos en el diseño):

- Concentración de entrada de ambas corrientes
- Concentración deseada de salida
- Caudal de gas
- Equilibrio (@T y P de operación)

$$v_{\text{gas}} = v_{\text{liq}} \rightarrow \widehat{\phi}_i P \cdot y_i = \gamma_i \cdot P_{v,i} \cdot x_i \rightarrow P \cdot y_i = P_{v,i} \cdot x_i$$

$$y_i = \frac{P_{v,i}}{P} x_i = m_{(T,P)} \cdot x_i$$

Lineal a T  
y P cte

## Diseño de equipos con varias etapas - Absorción

La ecuación de equilibrio anterior está expresada en fracciones molares. Es conveniente trabajar SIEMPRE con fracciones?



Base libre de soluto (relaciones molares) cuando la transferencia de masa es lo "suficientemente grande" como para modificar el caudal circulante

$$Y = \frac{y}{1 - y}$$

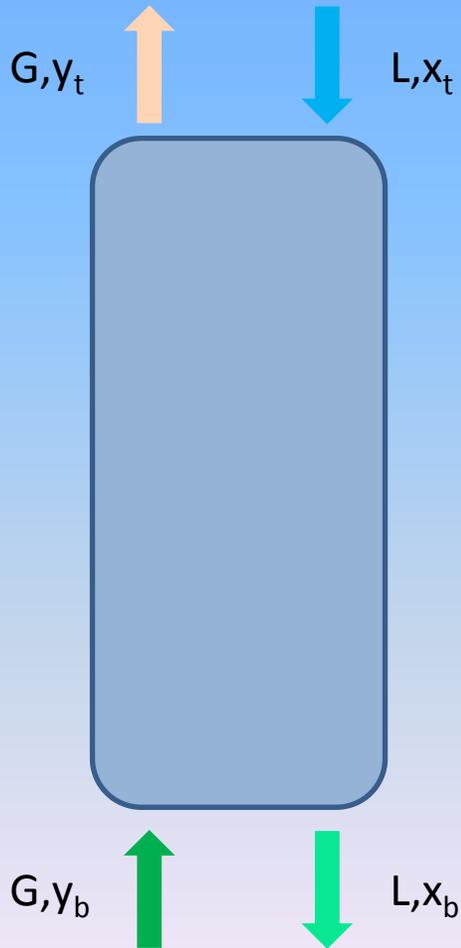
$$X = \frac{x}{1 - x}$$

$$y_i^* = m_{(T,P)} x_i$$

$$Y^* = \frac{mX}{1 - (m - 1)X}$$

# Diseño de equipos con varias etapas - Absorción

Balance de Masa - Contracorriente



Entradas = Salidas

$$Gy_b + Lx_t = Gy_t + Lx_b$$

$$G(y_b - y_t) = L(x_b - x_t)$$

$$\frac{y_b - y_t}{x_b - x_t} = \frac{L}{G}$$



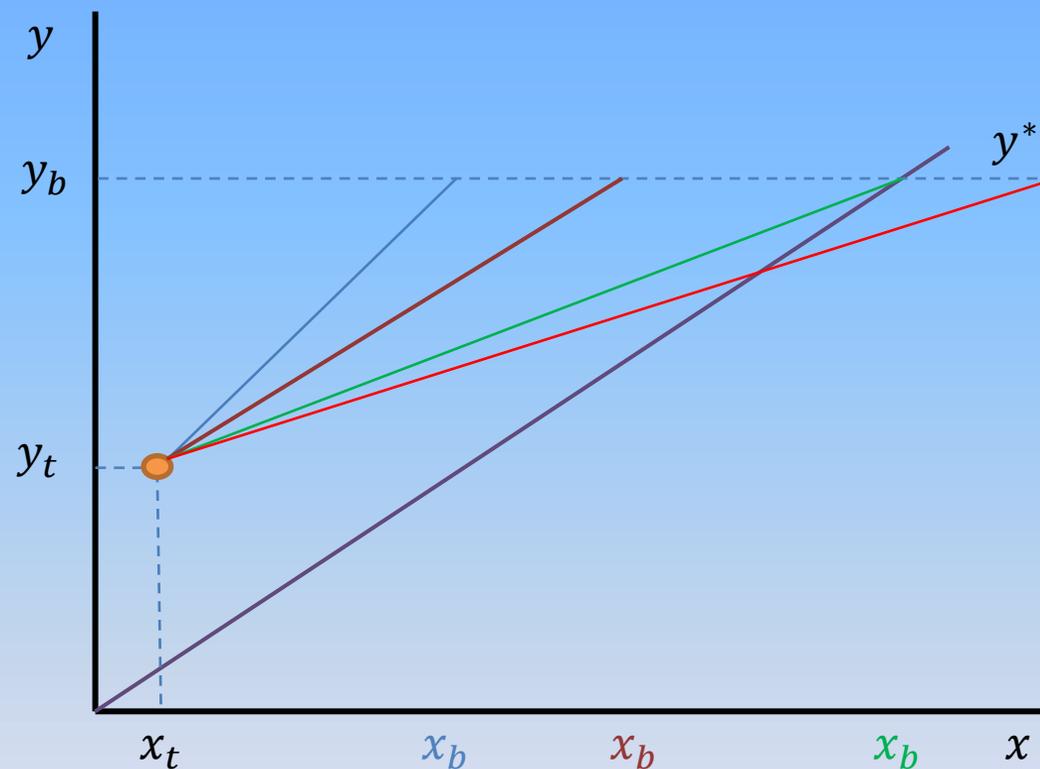
Recta de operación

Hipótesis:

- Estado estacionario
- No hay reacción química
- Temperatura y presión ctes
- Selectividad = 1 (para el soluto)
- Etapas ideales (eficiencia =1)

## Diseño de equipos con varias etapas - Absorción

Solvente mínimo



$$y_b = \frac{L}{G}x_b + cte$$

$$(y_b - cte) \frac{G}{L} = x_b$$

$$L > L > \textcircled{L} > L$$

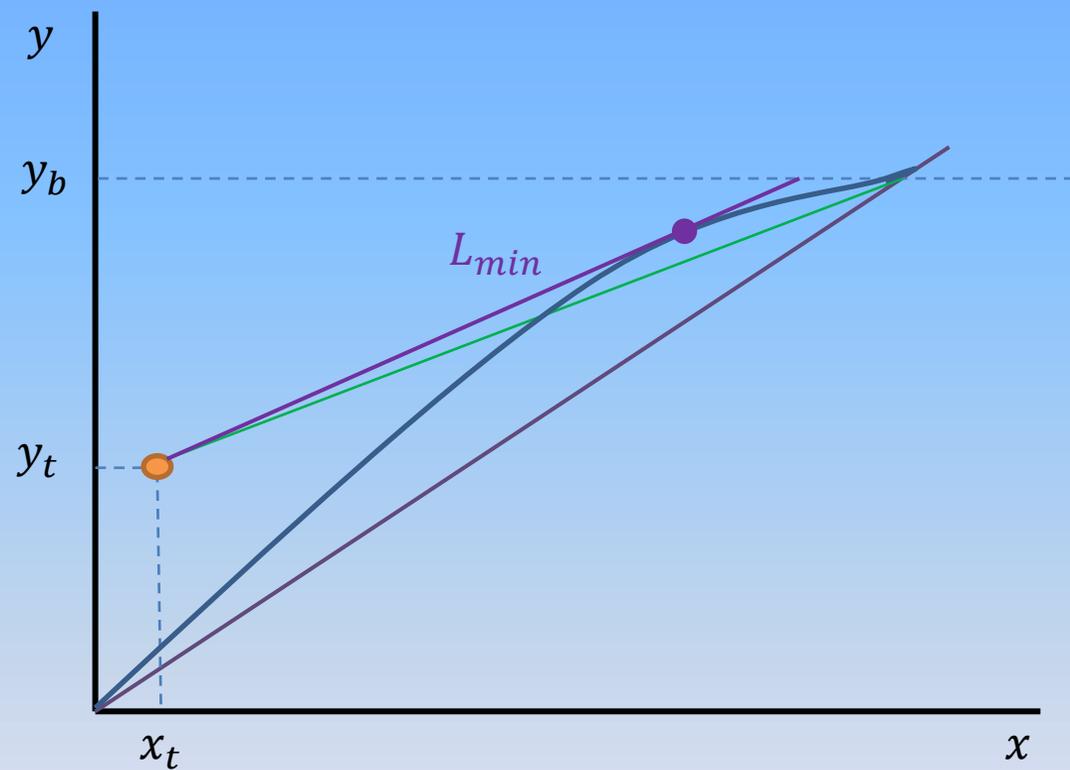
Caudal mínimo de solvente

$$L_{op} = \alpha L_{min}$$

Cierro balance de masa  
en todo el equipo ( $x_b$ )

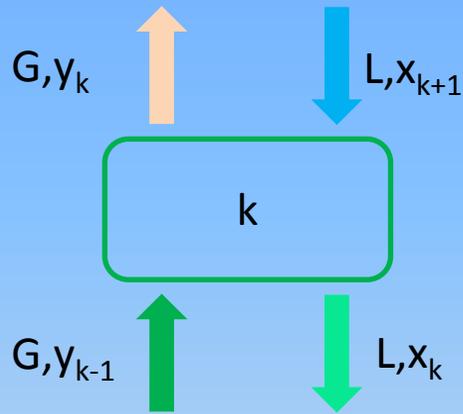
## Diseño de equipos con varias etapas - Absorción

Solvente mínimo



# Diseño de equipos con varias etapas - Absorción

Conteo de etapas – método analítico o de Lewis



$$Gy_{k-1} + Lx_{k+1} = Gy_k + Lx_k$$

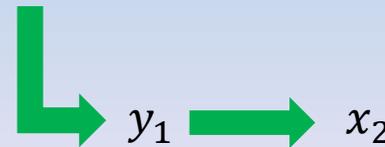
$$\frac{y_{k-1} - y_k}{x_k - x_{k+1}} = \frac{L}{G}$$

Suponiendo que k es la etapa 1, definida como la base de la torre

$$\frac{y_b - y_1}{x_b - x_2} = \frac{L}{G}$$

Al ser una etapa ideal, salida en equilibrio

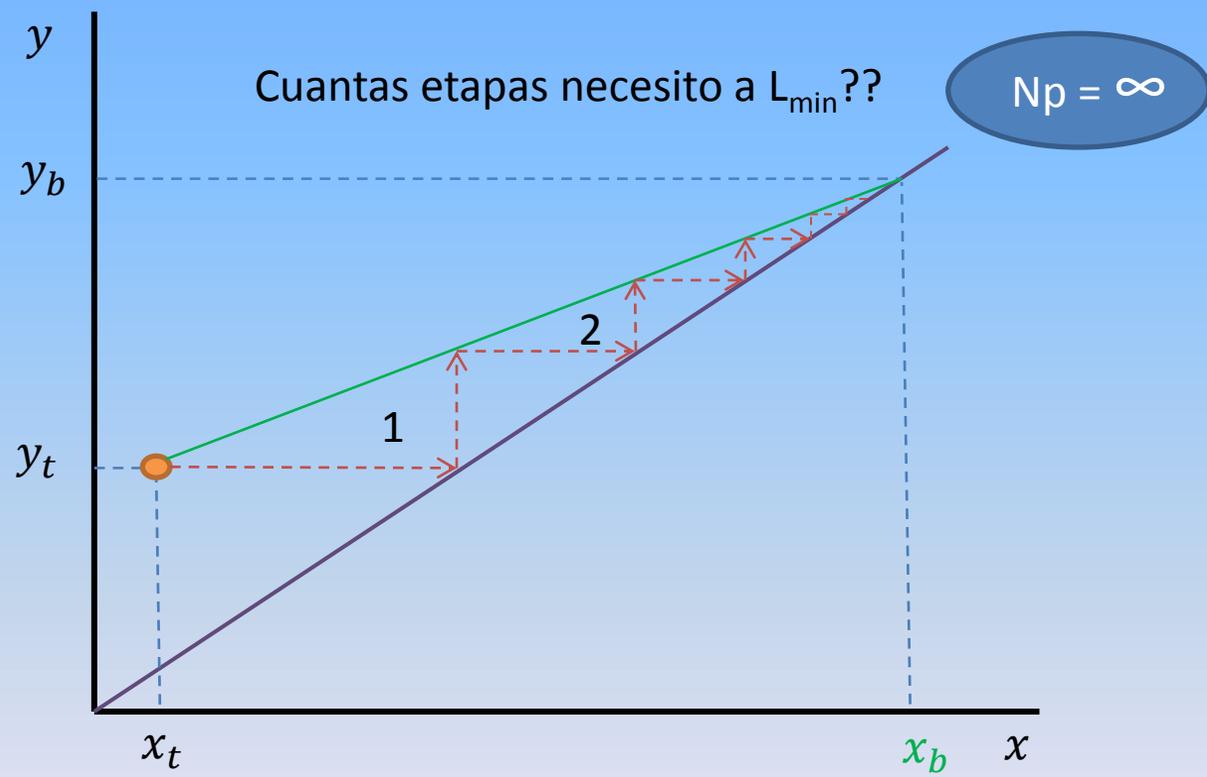
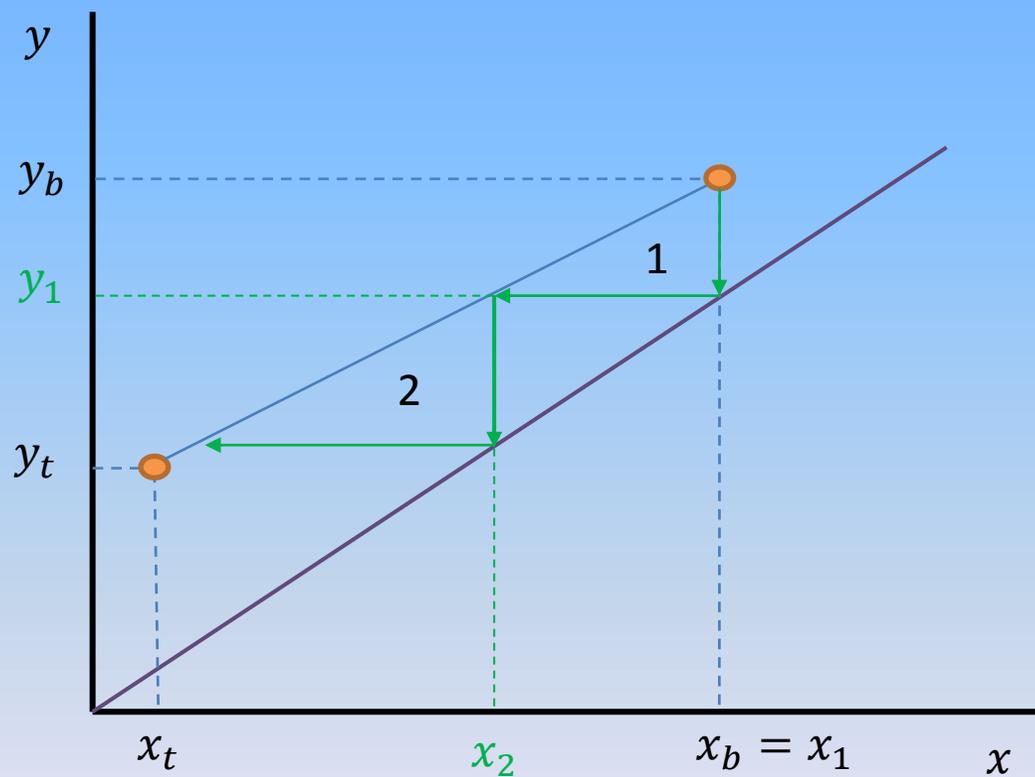
$$y_1 = m_{(T,P)}x_k = m_{(T,P)}x_b = m_{(T,P)}x_1$$



Paso a la siguiente etapa (k=2)

# Diseño de equipos con varias etapas - Absorción

Conteo de etapas – Método gráfico



# Diseño de equipos con varias etapas - Absorción

Conteo de etapas – Método de Kremser

Hipótesis:

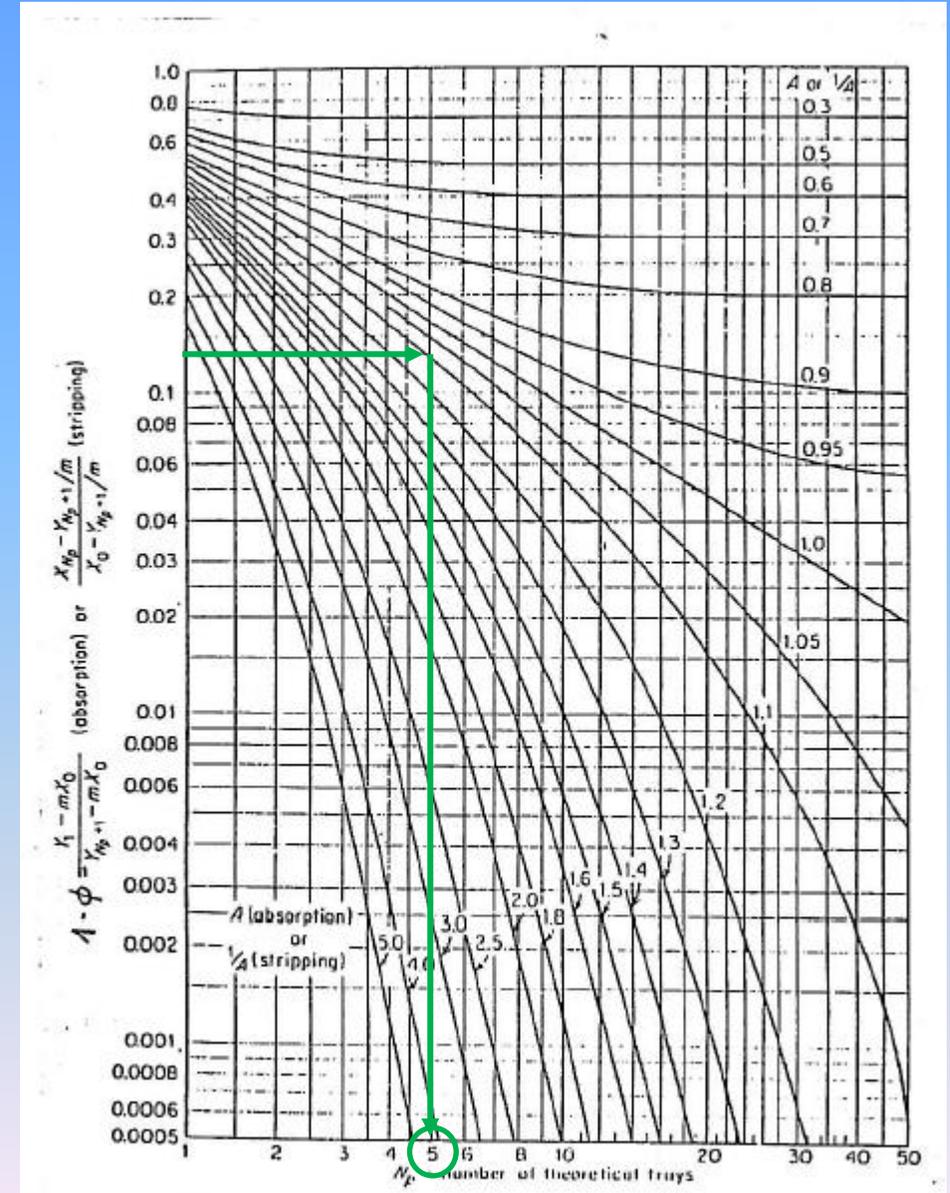
- Equilibrio lineal ( $y = mx$ )
- Recta de operación lineal ( $y = a.x + b$ )
- Eficiencia = 1

Define al factor de absorción A (factor de desorción  $S = A^{-1}$ )

$$A = \frac{L}{Gm}$$

Define el grado de absorción  $\phi$

$$1 - \phi = \frac{y_t - mx_t}{y_b - mx_t}$$



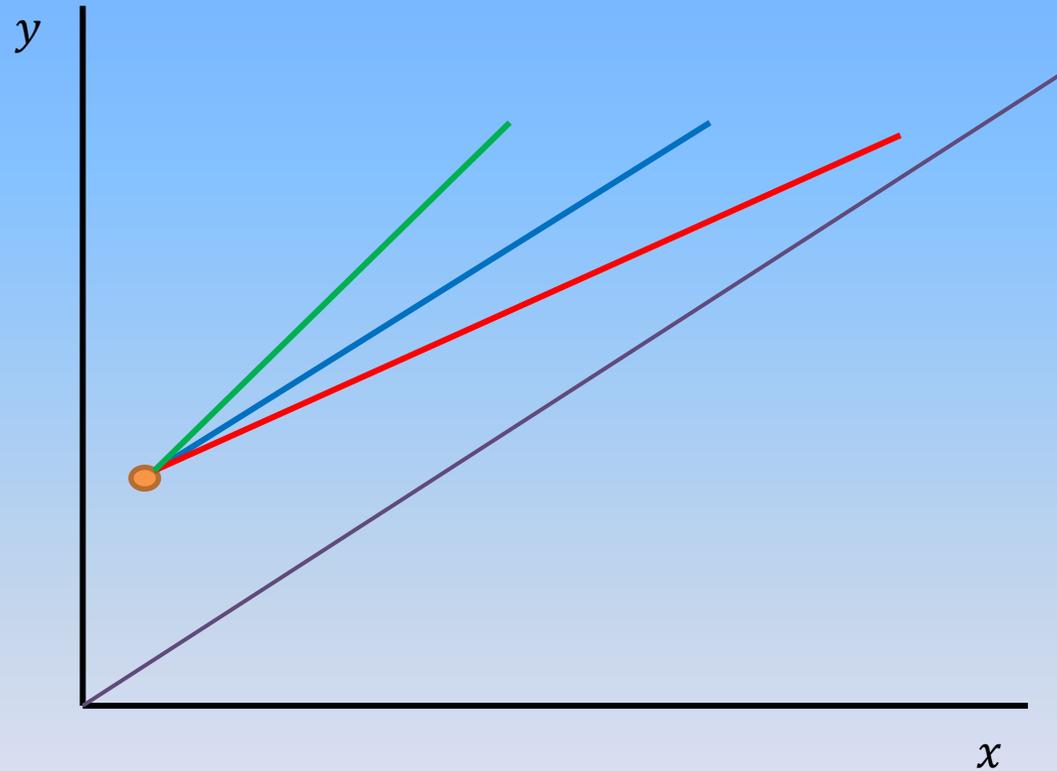
# Diseño de equipos con varias etapas - Absorción

Conteo de etapas – Método de Kremser

Si  $A=1$       $\frac{L}{G} = m$      

Si  $A < 1$       $\frac{L}{G} < m$      

Si  $A > 1$       $\frac{L}{G} > m$      

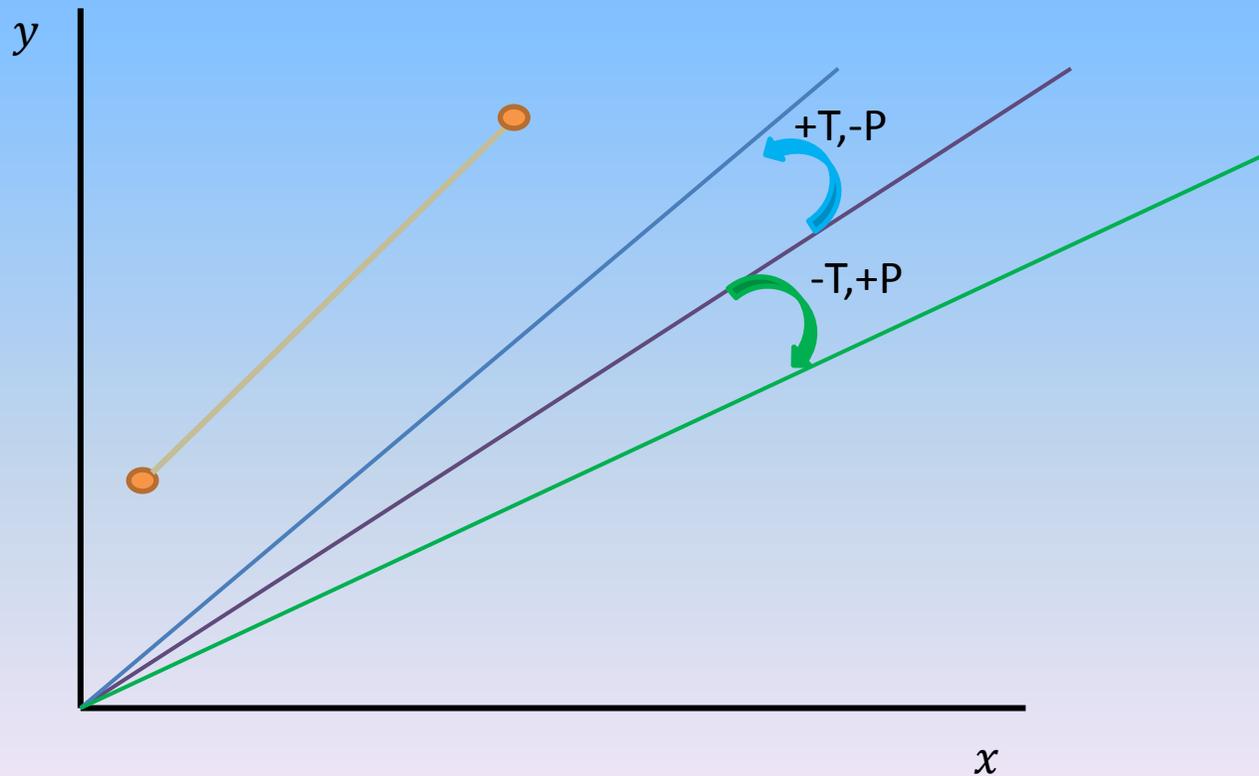


# Efecto de la Temperatura y la Presión

$$y_i = \frac{P_{v,i}}{P} x_i$$

$\xrightarrow{+T \text{ aumenta } P_{v,i}}$   
 $\xrightarrow{-P}$

Aumenta  $m_{(T,P)}$

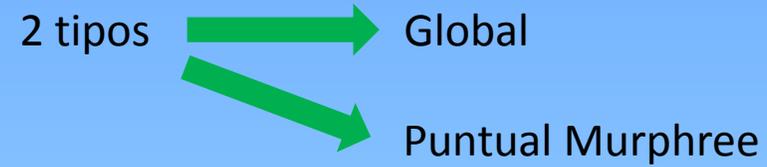


El aumento/disminución de la Temperatura y la Presión tienen un efecto inverso sobre el equilibrio

Disminuir la Presión y/o aumentar la Temperatura favorecen la desorción.

Aumentar la Presión y/o disminuir la Temperatura favorecen la absorción.

# Eficiencia



## Eficiencia Global

$$E_g = \frac{\#etapas\ te\acute{o}ricas\ (N_T)}{\#etapas\ reales\ (N_R)} \quad \longrightarrow \quad N_R = \frac{N_T}{E_g}$$

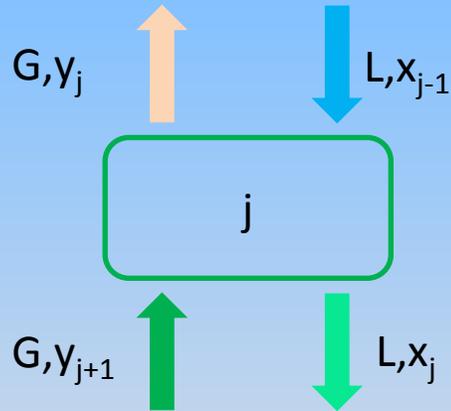
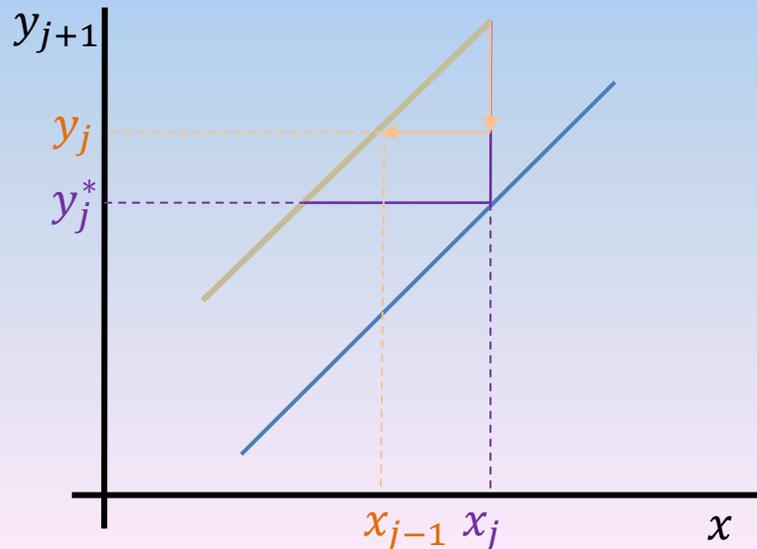
Se puede utilizar con Kremser!!

# Eficiencia

Eficiencia de Murphree  Lado gas  
 Lado líquido

Lado gas

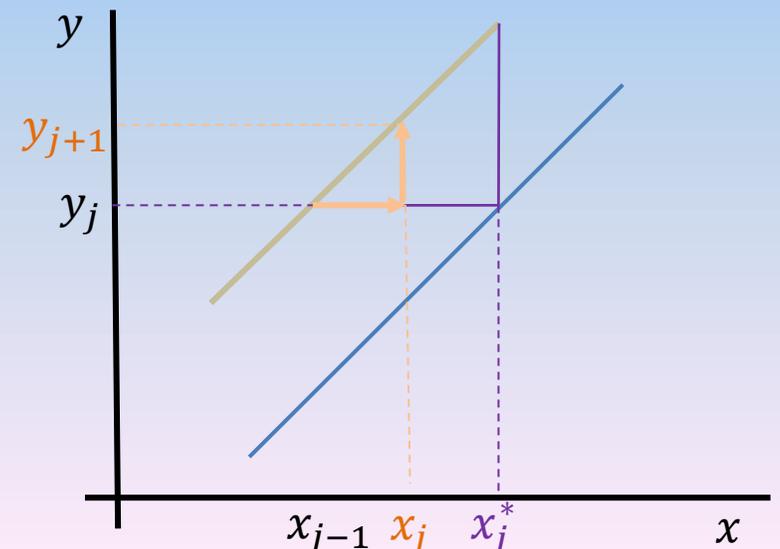
$$E_{Mg} = \frac{y_{j+1} - y_j}{y_{j+1} - y_j^*} = \frac{y_{j+1} - y_j}{y_{j+1} - mx_j}$$



Suma una ecuación al método de Lewis!!

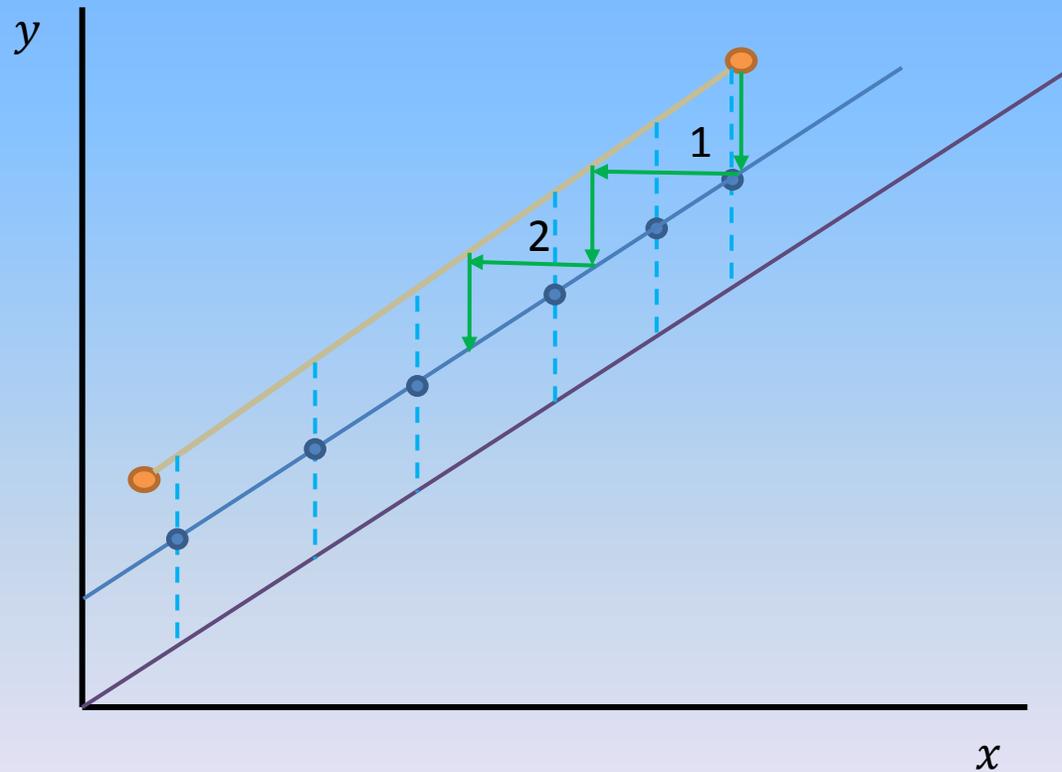
Lado Líquido

$$E_{Ml} = \frac{x_j - x_{j-1}}{x_j^* - x_{j-1}} = \frac{x_j - x_{j-1}}{y_j/m - x_{j-1}}$$



# Eficiencia

Eficiencia de Murphree – Pseudo-curva de equilibrio

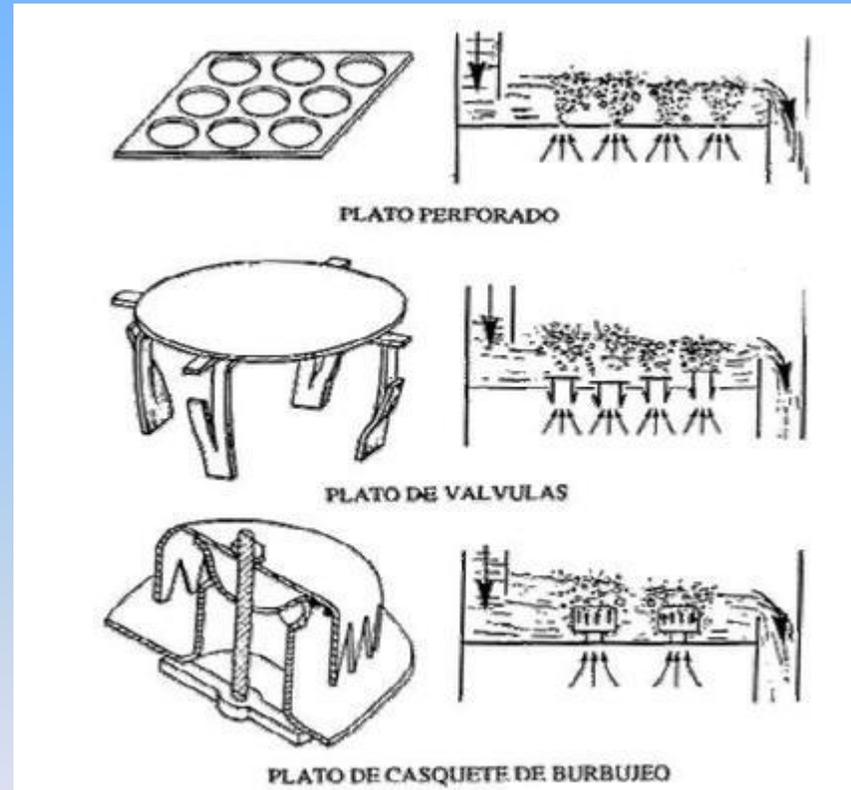
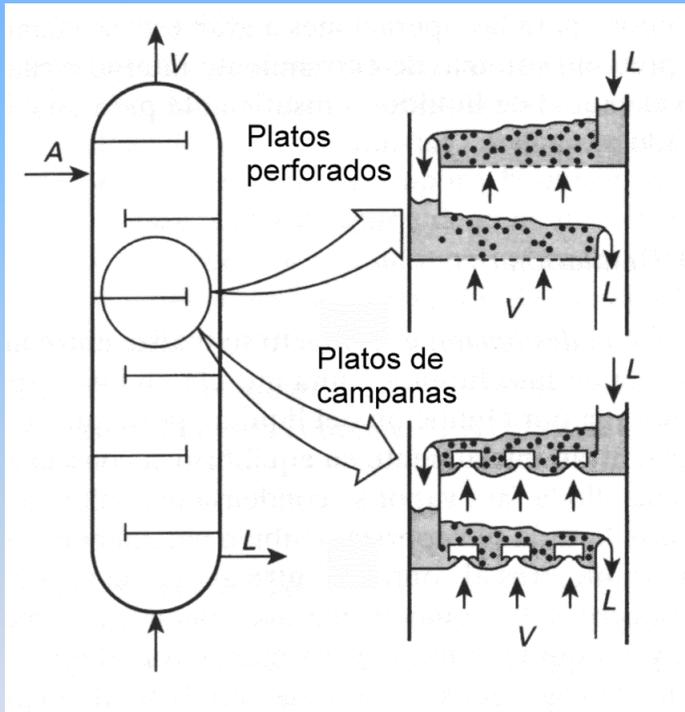


La eficiencia afecta a la cantidad de solvente mínimo?

Eficiencia 90% lado gas  $\rightarrow$  gráfico?

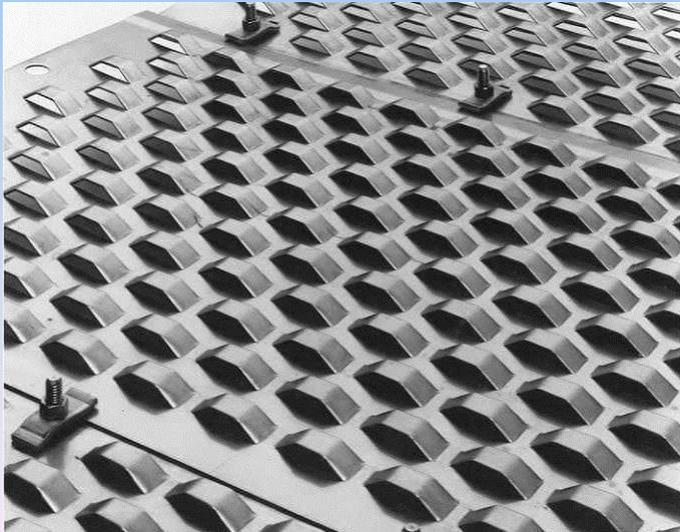
# Equipos de Absorción/Desorción por etapas

## Torre de platos

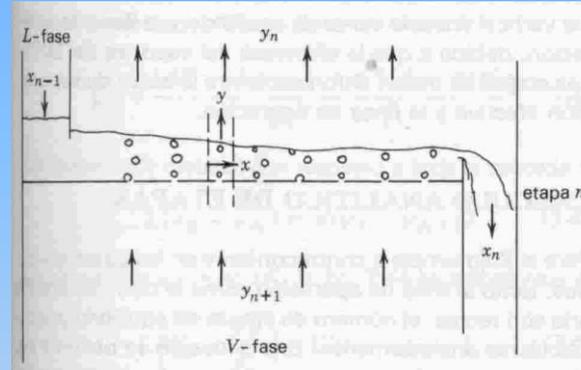


# Equipos de Absorción/Desorción por etapas

Plato de válvulas



Plato de orificios

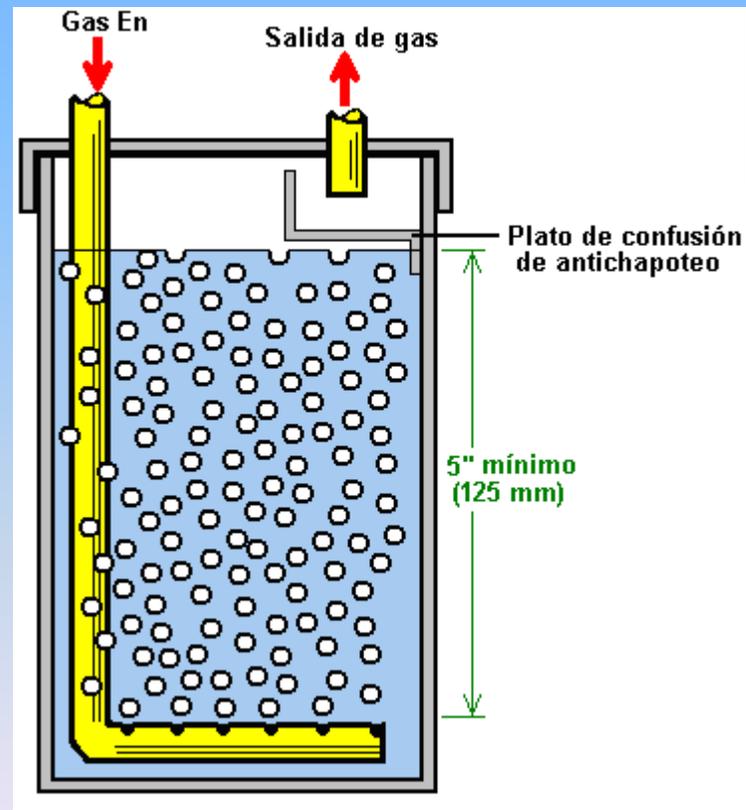


Plato de capuchas

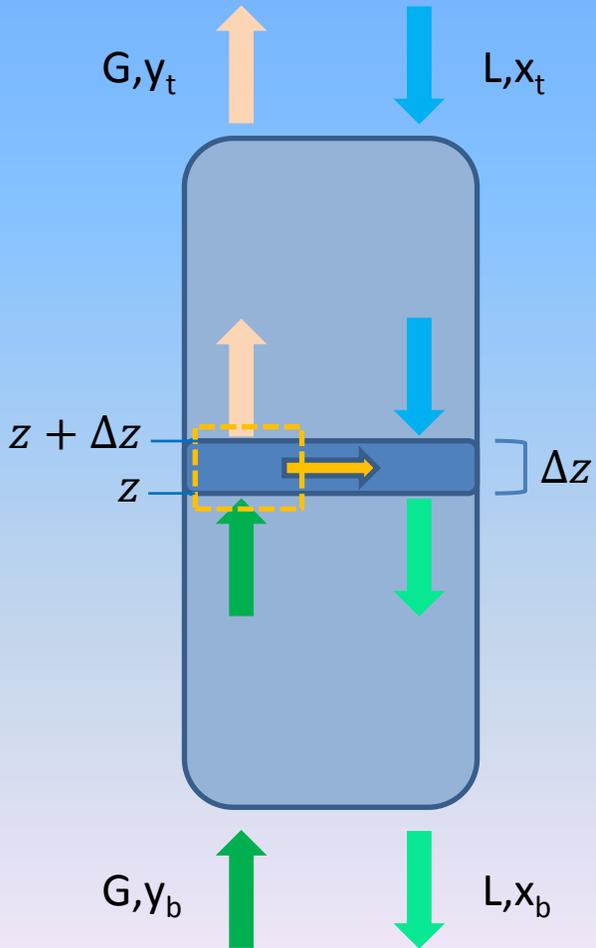


## Equipos de Absorción/Desorción por etapas

Tanque de burbujeo



# Diseño de equipos de contactado continuo



Balance de masa global

$$Lx_t + Gy_b = Gy_t + Lx_b$$

Balance diferencial – lado gas

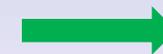
$$Gy|_z - Gy|_{z+\Delta z} - N_A \Delta V = 0$$

Divido por  $\Delta z \rightarrow 0$

$$-\frac{dGy}{dz} - N_A S = 0$$

$$-\frac{dGy}{dz} = N_A S = k_y a (y - y_i) S$$

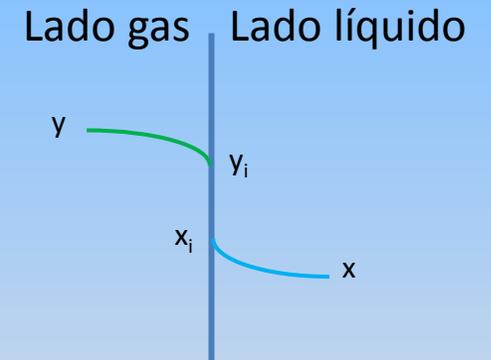
Qué es  $a$ ?



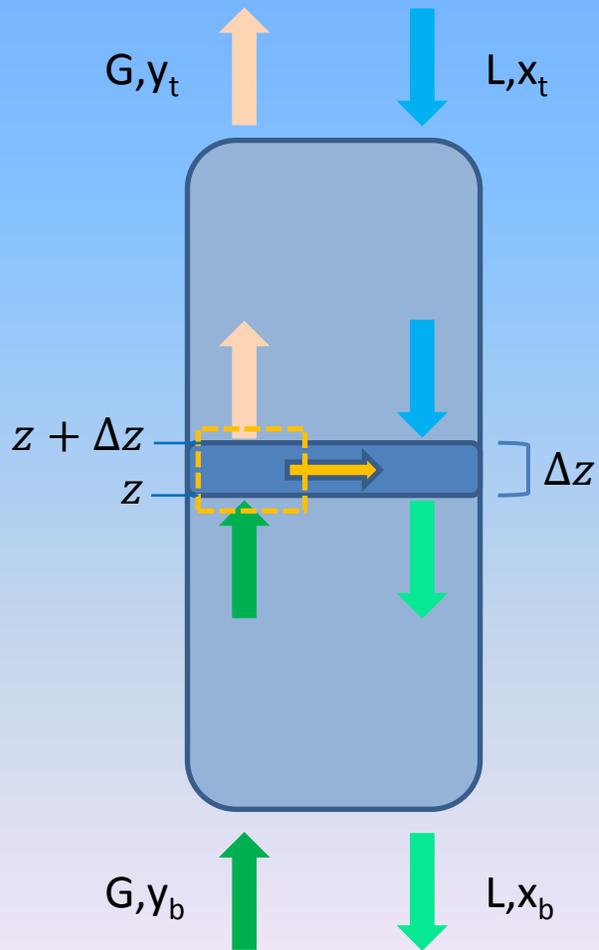
$$a = \frac{m^2 \text{ de transferencia}}{m^3 \text{ de relleno}}$$

Hipótesis:

- Estado estacionario
- No hay reacción química
- Temperatura y presión ctes
- Selectividad = 1 (para el soluto)
- Etapas ideales (eficiencia =1)



## Diseño de equipos de contactado continuo



$$-\int_{G_{yt}}^{G_{yb}} dGy = \int_0^z k_y a (y - y_i) S dz$$

$$z = \int_{G_{yt}}^{G_{yb}} \frac{dGy}{k_y a (y - y_i) S}$$

Si G es constante, entonces

$$z = \frac{G}{k_y a S} \int_{G_{yt}}^{G_{yb}} \frac{dy}{(y - y_i)}$$

$$H_G = \frac{G}{k_y a S} \quad N_G = \int_{G_{yt}}^{G_{yb}} \frac{dy}{(y - y_i)}$$

$$z = H_G N_G$$

## Diseño de equipos de contactado continuo

$H_G$

Altura de una unidad de transferencia. Es la altura de relleno que requiero para realizar una separación de una unidad de transferencia. Depende de las condiciones operativas y las características del relleno, por lo que suele ser un dato del proveedor del mismo o correlaciones.

$N_G$

Número de unidades de transferencia. Es un adimensional que representa la dificultad de la separación, ya que depende de cuanto se desea separar ( $y_t$ ,  $y_b$ ) y de la fuerza impulsora ( $y - y_i$ ).

Dado que las condiciones de interfase rara vez se conocen se hace uso de los coeficientes globales

$$z = \frac{G}{K_y a S} \int_{G y_t}^{G y_b} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

$$H_{OG} = \frac{G}{K_y a S}$$

$$N_{OG} = \int_{G y_t}^{G y_b} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

$$z = H_{OG} N_{OG}$$

## *Diseño de equipos de contactado continuo*

$$Z = H_G * N_G = H_{OG} * N_{OG} = H_L * N_L = H_{OL} * N_{OL} = HETP * N_P$$



1. Integración directa
2. Integración gráfica
3. Integración numérica
4. Método de Colburn

## Diseño de equipos de contactado continuo

Cálculo de  $N_{OG}$  – Integración directa

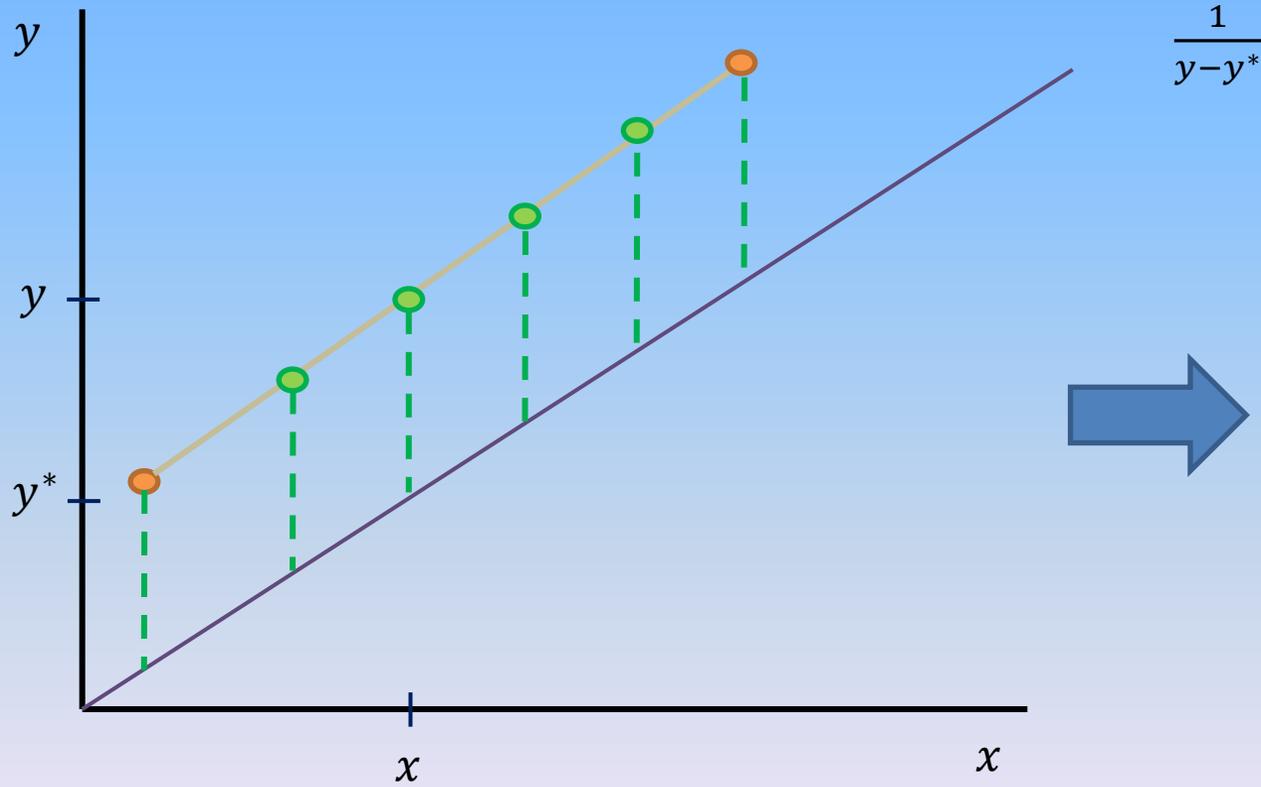
$$\left. \begin{aligned} y^* &= mx + r \\ y &= L/G(x - x_2) + y_2 \end{aligned} \right\} y - y^* = q * x + s$$

$$N_{OG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{(y - y^*)} = \frac{L}{G} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{qx + s} = \frac{L}{Gq} \ln \frac{(y - y^*)_1}{(y - y^*)_2}$$

$$N_{OG} = \frac{y_1 - y_2}{(y - y^*)_{mlq}}$$

# Diseño de equipos de contactado continuo

Cálculo de  $N_{OG}$  – Integración gráfica



$$\frac{1}{y-y^*}$$

$$N_{OG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{(y-y^*)}$$

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta y}{y-y^*} \Big|_i$$

## *Diseño de equipos de contactado continuo*

Cálculo de  $N_{OG}$  – Integración numérica

$$N_{OG} = \sum \frac{\Delta y}{(y - y^*)_{prom}}$$

Se aplica algún método numérico como por ejemplo la regla de Simpson

# Diseño de equipos de contactado continuo

## Cálculo de $N_{OG}$ – Método de Colburn

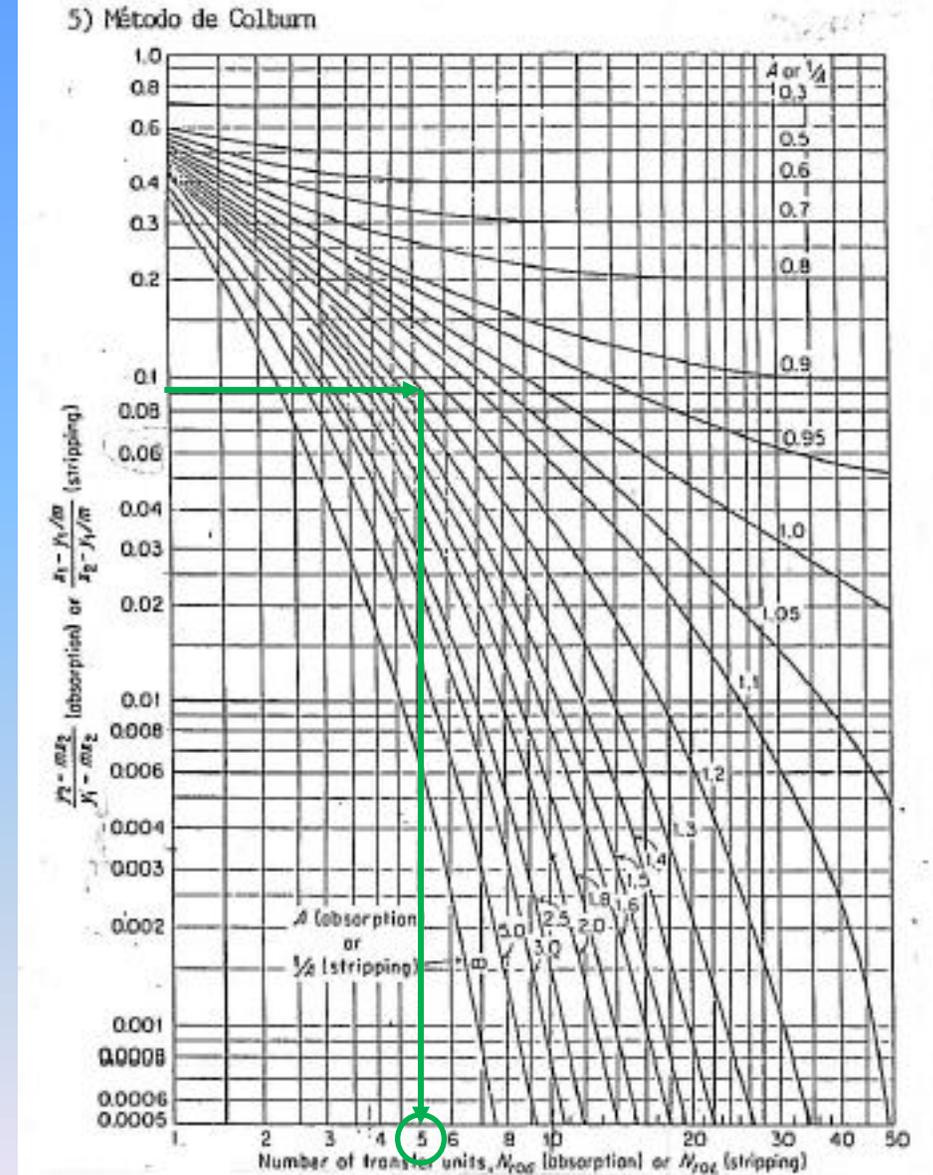
Hipótesis:

- Equilibrio lineal ( $y = mx$ )
- Recta de operación lineal ( $y = a.x + b$ )
- Eficiencia = 1

Define al factor de absorción A (factor de desorción  $S=A^{-1}$ )

$$A = \frac{L}{Gm}$$

$$\text{Ordenada} = \frac{y_t - mx_t}{y_b - mx_t}$$



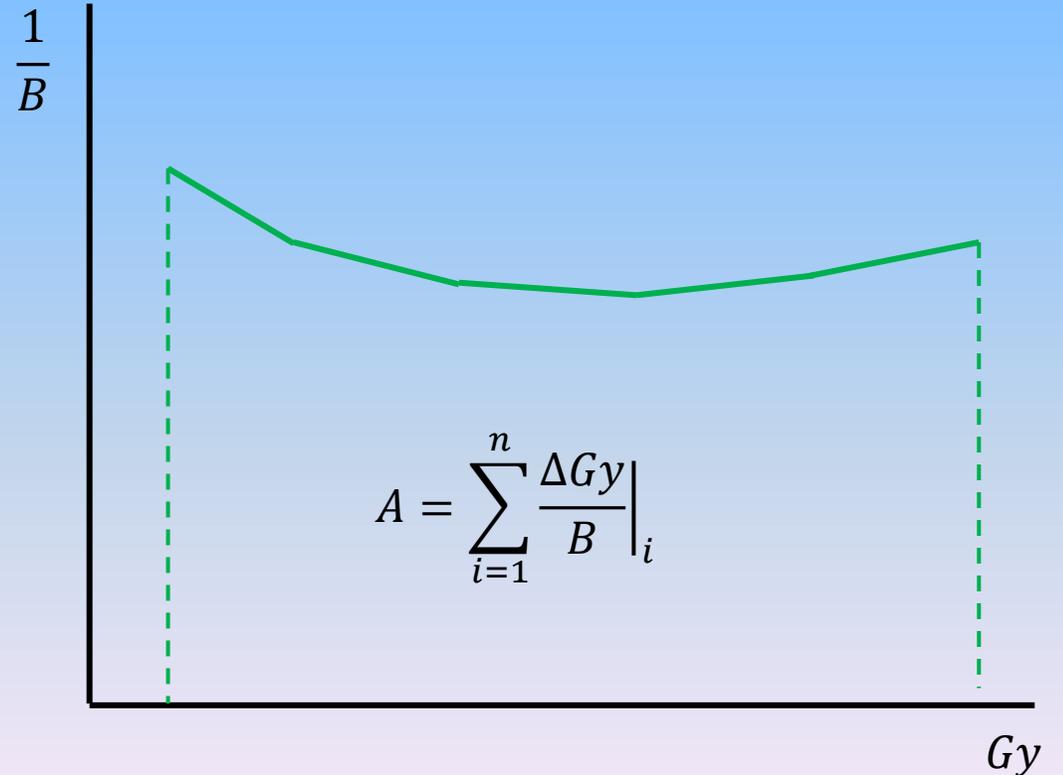
## Diseño de equipos de contactado continuo

Cálculo de  $N_{OG}$  – Sistemas concentrados

Los caudales dejan de ser constantes, por lo que no pueden salir de la integral, entonces:

$$z = \int_{G_{yt}}^{G_{yb}} \frac{dGy}{k_y a (y - y_i) S}$$


$B$



## Diseño de equipos de contactado continuo

Método alternativo – Altura Equivalente de Plato Teórico (HETP)

$$z = (\text{número de etapas teóricas}) \times \text{HETP}$$


Suministrado por el fabricante

$$z = N_{OG}H_{OG} = N_t HETP \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} N_{OG} \neq N_t \\ H_{OG} \neq HETP \end{array}$$

## Absorción No Isotérmica

En algunos procesos de absorción, especialmente en aquellos donde hay reacción química, hay liberación de calor, lo cual se traduce en un incremento de la temperatura del líquido, con la consecuencia de un desplazamiento adverso de la curva de equilibrio (disminuye la solubilidad).

Efectos caloríficos por disolución no son despreciables  Cambia la Temperatura a lo largo del equipo

Método Simplificado!!  Líquido se lleva el calor ( $C_P^{liq} \gg C_P^{gas}$ )

Hipótesis:

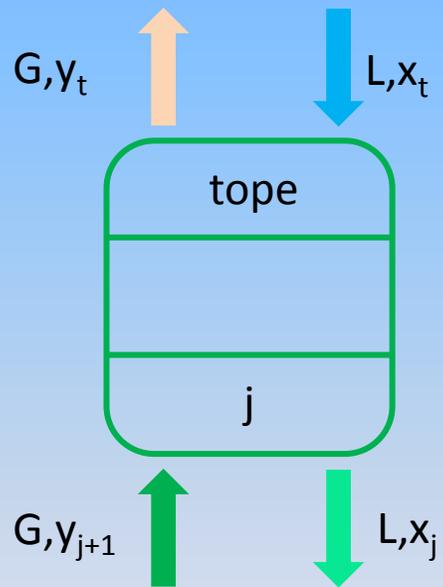
- Caudales constantes
- Propiedades constantes
- Calor sensible lado gas despreciable
- Solo se transfiere 1 componente



El método simplificado asume que el calor de disolución solo afecta la temperatura del líquido y no hay vaporización del solvente.  
Conservador, resulta en torres más altas

# Absorción No Isotérmica – Método simplificado

Balance entre tope y etapa j



Balance de masa

$$G(y_{j+1} - y_t) = L(x_j - x_t)$$

Balance de energía

$$LH_t^L + GH_{j+1}^G = LH_j^L + GH_t^G$$

Calor de disolución

$$H^L = C_P^L(T - T_{ref}) + \Delta H_s x$$

$$H^G = \overline{C_P^g}(t - t_{ref}) + \lambda y$$

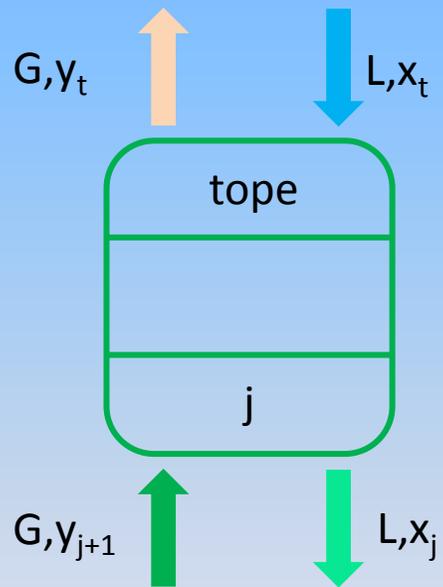
$$(1 - y)C_P^{gas}(t - t_{ref}) + yC_P^{soluto}(t - t_{ref})$$

$$L \left( C_P^L(T_t - T_j) + \Delta H_s(x_t - x_j) \right) = G \left( \overline{C_P^g}(t_t - t_{j+1}) + \lambda(y_t - y_{j+1}) \right)$$

$$G(y_t - y_{j+1}) = L(x_t - x_j)$$

## Absorción No Isotérmica – Método simplificado

Balance entre tope y etapa j



$$T_t - T_j = \frac{\lambda - \Delta H_s}{C_P^L} (x_t - x_j)$$
$$T_j = T_t + \frac{\lambda - \Delta H_s}{C_P^L} (x_j - x_t)$$

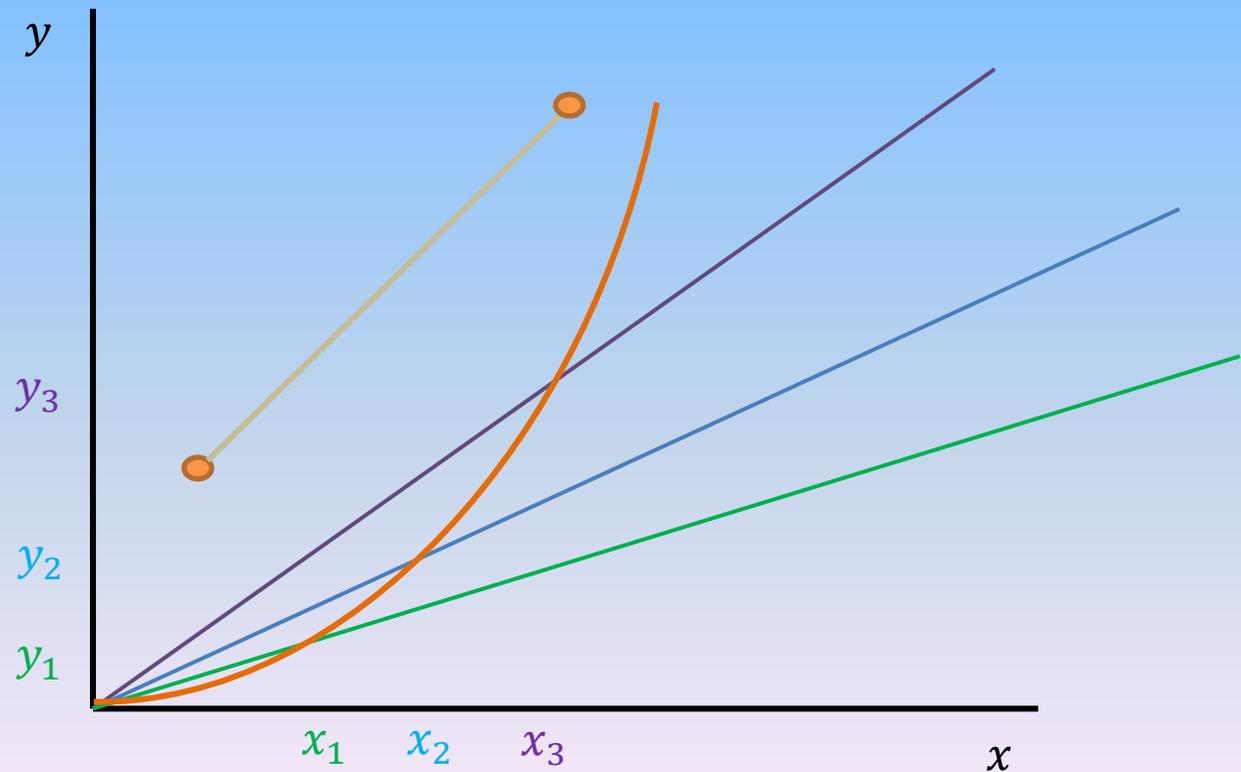
Calor de absorción  $q_{abs}$

# Absorción No Isotérmica- – Método simplificado

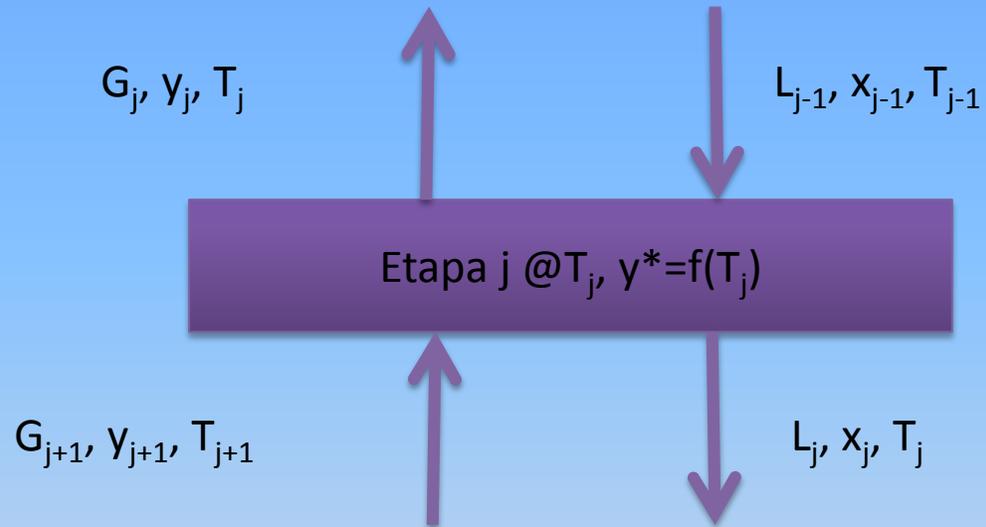
Resolución gráfica

Grafico equilibrio a diferentes temperaturas (curva de equilibrio)  Resuelvo como siempre

x	T	m	$y^*$
$x_1$	$T_1$	$m_1$	$y^*_1$
$x_2$	$T_2$	$m_2$	$y^*_2$
$x_3$	$T_3$	$m_3$	$y^*_3$



## Absorción No Isotérmica- – Método riguroso



Balance de Energía (Etapa  $j$ )

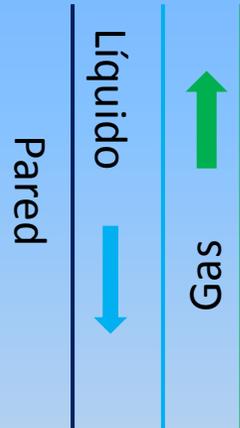
$$L_{j-1} H_{j-1}^L + G_{j+1} H_{j+1}^G = L_j H_j^L + G_j H_j^G$$

$$H_j^L = (1-x_j) c_{LB} (T_j - T_{ref}) + x_j c_{LA} (T_j - T_{ref}) + x_j \Delta H_s$$

$$H_j^G = (1-y_j) c_{GB} (T_j - T_{ref}) + y_j c_{GA} (T_j - T_{ref}) + y_j \lambda$$

## *Equipos de Absorción/Desorción de contactado continuo*

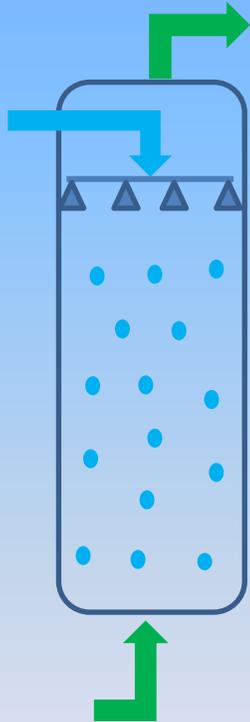
Absorbedor de película



- Baja caída de P
- Superficie interfasial controlada (estudios teóricos)

## *Equipos de Absorción/Desorción de contactado continuo*

Columna Spray



- Líquido disperso
- Baja caída de P
- Altos costos de bombeo
- Gran arrastre de líquido (demister)

## Equipos de Absorción/Desorción de contactado continuo

### Torres rellenas



# Equipos de Absorción/Desorción de contactado continuo

## Torres rellenas



- Contacto continuo de líquido y gas
- Relleno con gran superficie ( $a$ )
- Gran volumen vacío (bajo  $\Delta P$ )
- Rellenos baratos
- Rellenos resistentes a corrosión (+\$)
- Dos tipos: al azar o regulares



# GRACIAS!