

# 76.52 Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## 76.05 Operaciones Unitarias III

---

### ✓ Profesor:

- Ing. Conrado González

### ✓ JTP:

- Ing. Julieta Medina

### ✓ Ayudantes:

- Ing. Ignacio Pérez – Ing. Ernesto Molina - Est. Lautaro Marzullo

### ✓ Horarios

- P: Martes de 18:30 a 22hs. Aula 502 Paseo Colón
- T: Miércoles de 19:00 a 21hs. Aula xxx Paseo Colón
- P: Viernes de 18:00 a 22 hs. Aula 221 Paseo Colón

### ✓ Comunicaciones:

- Campus FIUBA
- [congonzalez@yahoo.com](mailto:congonzalez@yahoo.com)

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

---

- **Bibliografía:**

- R. E. Treybal. "Operaciones con transferencia de masa"
- E. J. Henley, J. D. Seader, "Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química"
- Perry. "Manual del ingeniero químico". Mc. Graw Hill.
- J.M. Coulson, J.F. Richardson, "Ingeniería Química", Tomo II, Operaciones Básicas
- W. L. McCabe, J.C. Smith, P. Harriott. "Operaciones básicas de ingeniería química"
- A.S. Foust et al. "Principles of Unit Operations"
- B.D. Smith, "Design of Equilibrium Stage Processes"
- A.L. Lydersen. "Mass Transfer in Engineering Practice"
- F. Aguirre. "Termodinámica del equilibrio"
- T. Sherwood, R.L. Pigford, C.R. Wilke, "Mass Transfer"
- P.A. Schweitzer, "Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers"
- Judson King. "Procesos de separación"
- A.L Hines and R.N. Maddox, "Mass Transfer Fundamentals and Applications"
- C. Geankoplis, "Transport Processes and Unit Operations"
- Thibaut Brian, "Staged Cascades in Chemical Processing"

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

---

## ✓ Reglamento de aprobación de materia

### Condiciones de aprobación

- ❖ 1 Parcial (25/10/2022) con 2 recuperatorios (22/11/2022 y 06/12/2022).
- ❖ TP Multicomponentes (por grupo) (semana 08/11/2022).
- ❖ Resolución de ejercicios en clase (por grupo).
- ❖ Coloquio T+P.

## ✓ Verificación Correlativas y firma de cursada → Durante septiembre 2022

## ✓ Consultas → ?

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

76.52 Operaciones Unitarias de Transferencia de Masa 76.05 Operaciones Unitarias III				
Fecha		Teoría - Práctica 2C - 2022		
S1	23/8/2022	Ma	Clase 0 - Introducción. Presentación. Teorías de transferencia: modelo pelicular. Procesos separativos. Agente separador. Fuerza impulsora. Etapa ideal.	Coloquio 5
	24/8/2022	Mi	No se dictan clases	
	26/8/2022	Vi	Guía 1 - Problema 1 / Guía 2 - Problema 1	Práctica
S2	30/8/2022	Ma	Guía 1 - Cuestionario	Práctica
	31/8/2022	Mi	Multietapas. Cocorrientes. Corrientes cruzadas, Contracorriente. Balances. Equipos. Relaciones de Operación. Nro. etapas teóricas.	Teoría
	2/9/2022	Vi	Guía 2 - Problema 4	Práctica
S3	6/9/2022	Ma	Guía 2 - Problema 6 / Guía 4 - Problemas 1	Práctica
	7/9/2022	Mi	Absorción Isotérmica. Métodos de determinación de Np. Métodos de determinación de N y H. Etapas reales. Eficiencia.	Teoría
	9/9/2022	Vi	Guía 2 - Problemas 3 y 7	Práctica
S4	13/9/2022	Ma	Guía 3 - Problema 1 y 4	Práctica
	14/9/2022	Mi	Absorción no isotérmica. Fotos. Diseños. Diseño hidráulico de platos. Diseño hidráulico de torres rellenas.	Teoría
	16/9/2022	Vi	Guía 3 - Problema 1 y Cuestionario	Práctica
S5	20/9/2022	Ma	Guía 4 - Problema 8 y 9	Práctica
	21/9/2022	Mi	Destilación. Equilibrios. ROS, ROI, q, Método Mc Cabe Thiele. Torre Sencilla. Límites de operación (Nmin, Rmin).	Teoría
	23/9/2022	Vi	Guía 5 y 6 - Problema 1 y 2	Práctica
S6	27/9/2022	Ma	Guía 3 - Problema 8 (Adicional KG Tower)	Práctica
	28/9/2022	Mi	Condensador y reboiler parciales, Vapor Vivo, múltiples alimentaciones, pérdidas de calor. Multicomponentes. Conceptos. Destilación Flash.	Teoría
	30/9/2022	Vi	Guía 5 y 6 - Problemas 5 y 6	Práctica

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

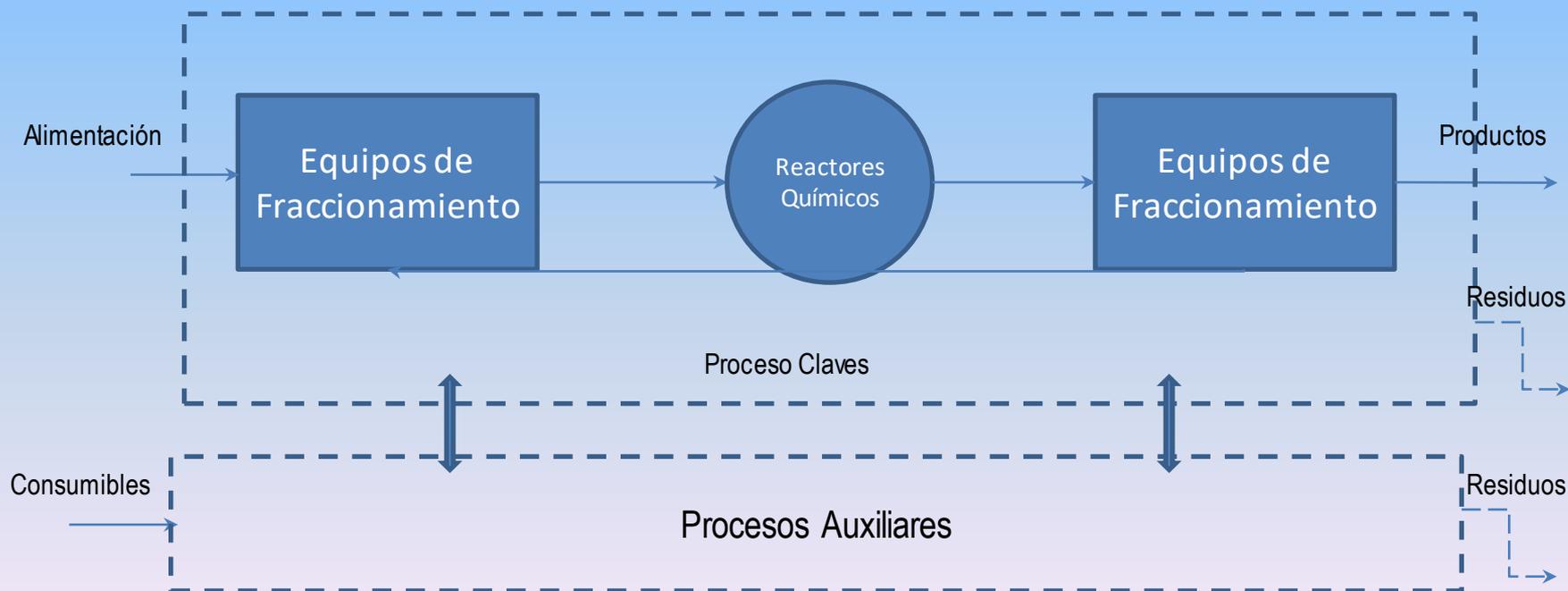
- Plantas Químicas

## Reacción de Mezclas:

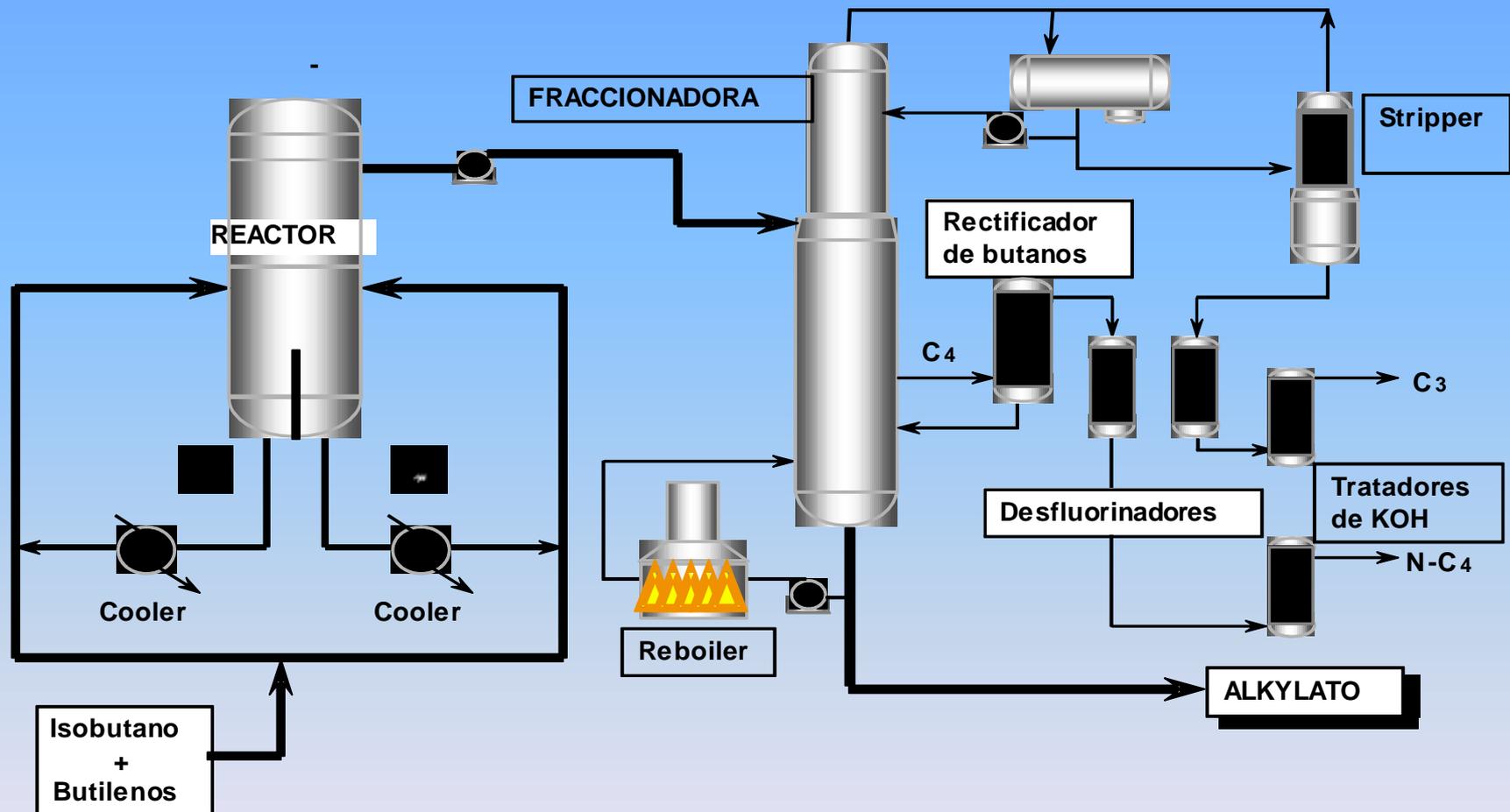
Cambian la estructura molecular de la alimentación. Operaciones de transferencia entre fases

## Separación de Mezclas:

en componentes puros y otras mezclas. Operaciones de transferencia entre fases



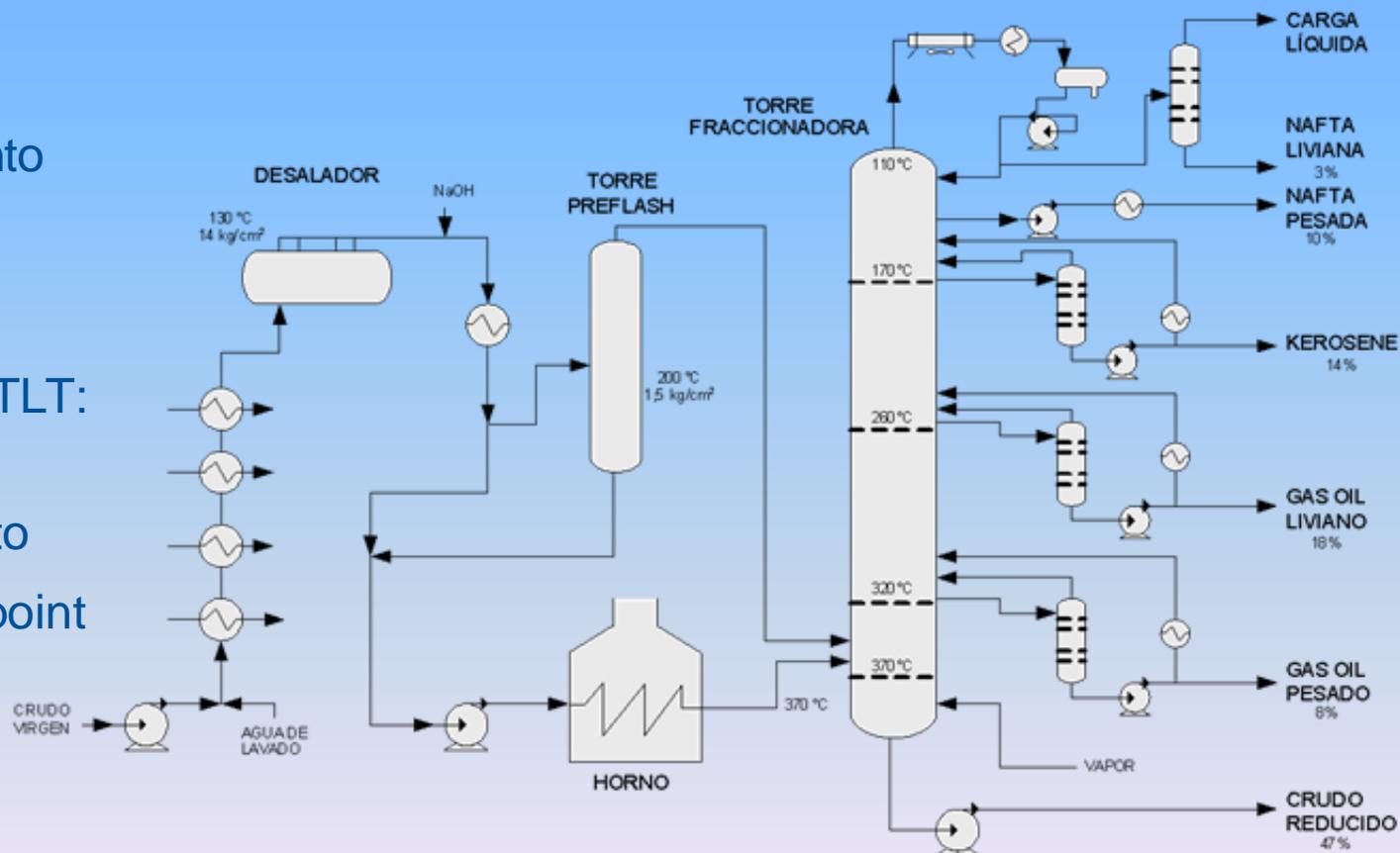
# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia



# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

Primer proceso del crudo en una refinería. Separación de los componentes de una mezcla de hidrocarburos, en función de sus diferentes temperaturas de ebullición

- Precalentamiento
- Desalado
- Preflash
- Horno (TLT: 375°C)
- Fraccionamiento
- Ajuste flash point (strippers)

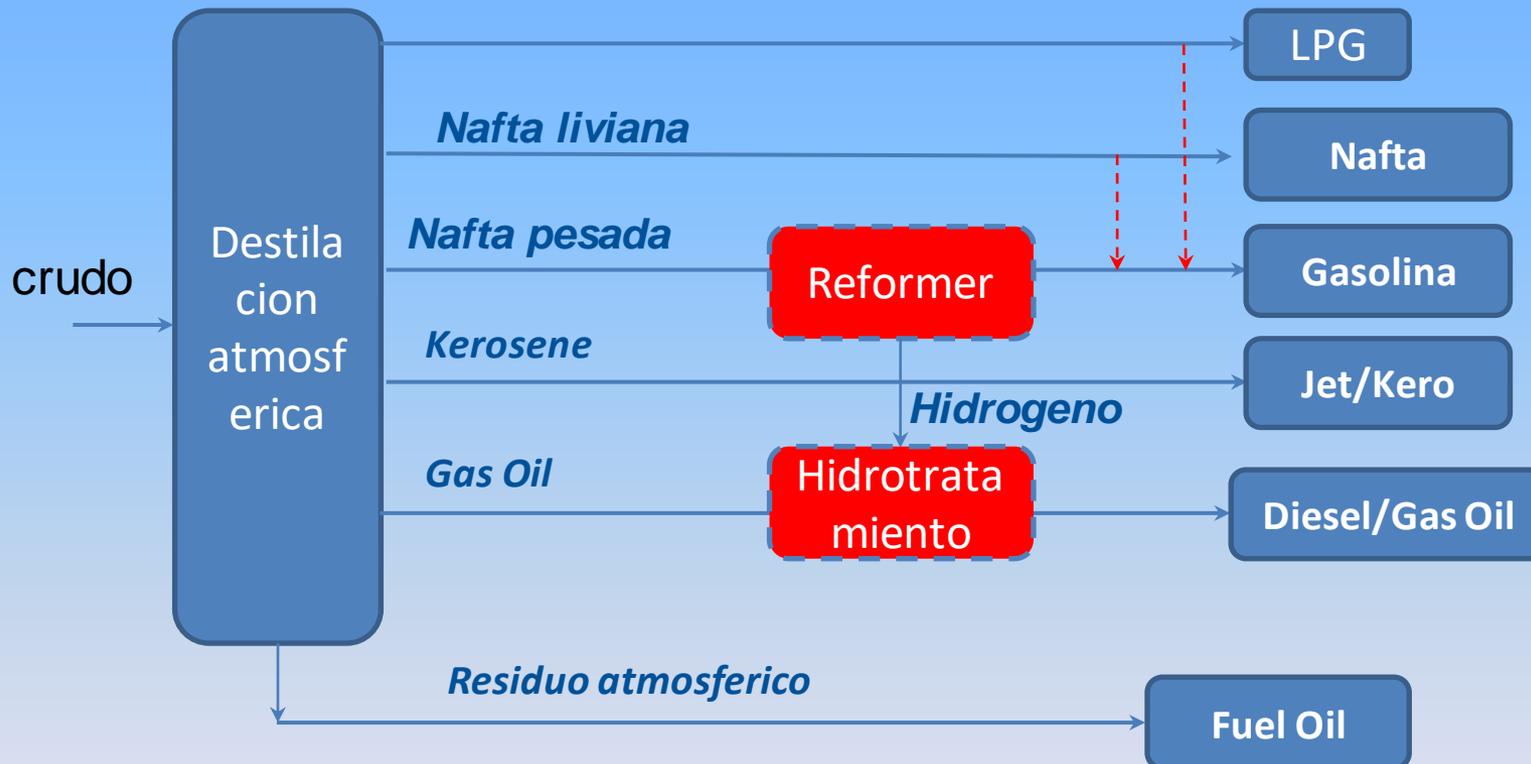


# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## Configuraciones de Refinerías

### Topping

### Hydroskimming

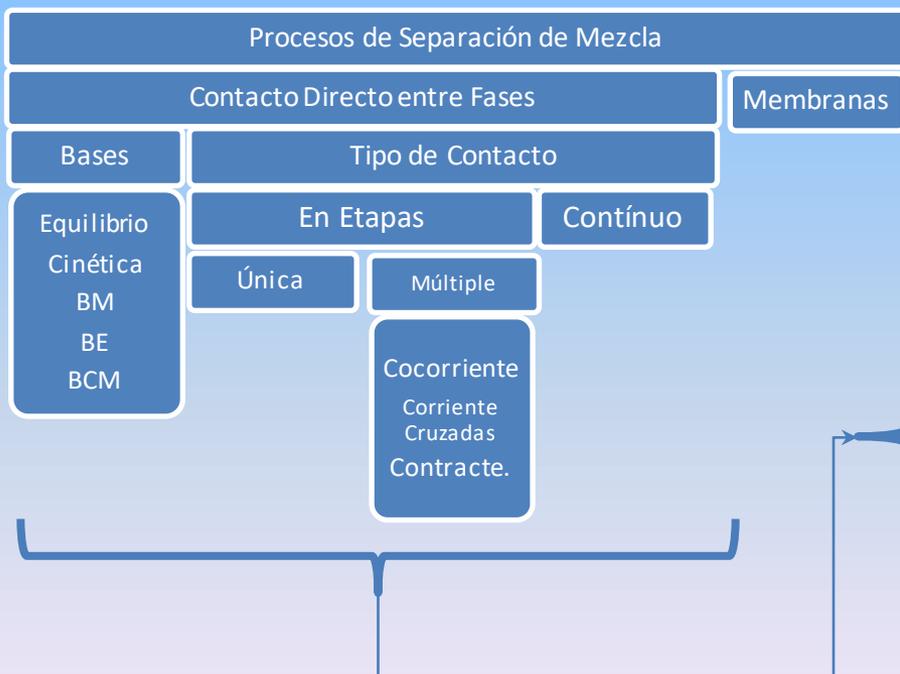






# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## • Procesos de Separación/Fraccionamiento



- Absorción/Desorción
- Destilación
- Extracción L-L
- Humidificación
- Secado
- Cristalización
- Adsorción

- Isotérmicos
- No Isotérmicos
- Binarios
- Multicomponentes

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

---

- **Agente de Separación**

Puede ser másico (ej.: absorción, extracción líquido-líquido), energético (ej.: destilación) o ambos (humidificación, secado).

- **Propiedades**

Un AMS debe seleccionarse teniendo en cuenta:

- *Costo*
- *Selectividad*
- *Capacidad de regeneración*
- *Volatilidad*
- *Viscosidad*
- *Toxicidad*
- *Corrosividad*
- *Disponibilidad.*

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## • Regla de las Fases

El número de variables en un sistema de varios componentes en equilibrio entre diversas fases se relaciona con el número de ecuaciones que las describen:

$F$  = número de variables intensivas que pueden variar de manera independiente.  
 $C$  = número de componentes del sistema  
 $P$  = número de fases en el sistema.

$$F = C + 2 - P$$

## • Equilibrio y Fuerza Impulsora

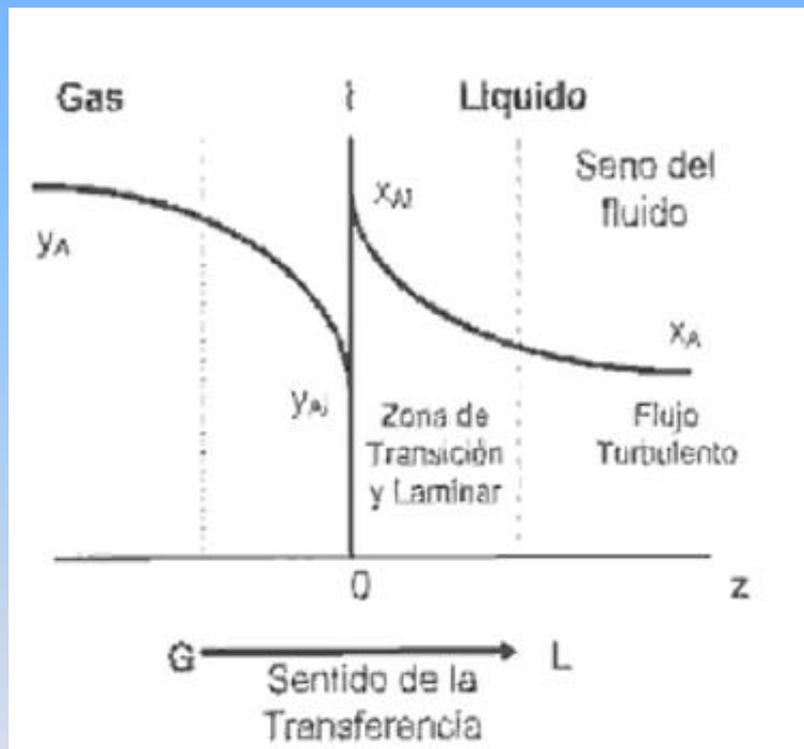
El equilibrio entre fases requiere un balance del potencial químico de cada componente en cada fase:

$$\mu_1' = \mu_1'' = \mu_1'''$$

*El potencial químico depende de las funciones termodinámicas y expresa la tendencia del componente a salir de la fase en la que está, en otras palabras es una medida de la inestabilidad del componente.*

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Coeficientes de transferencia de masa**



Flujo = Coeficiente x Fza. impulsora

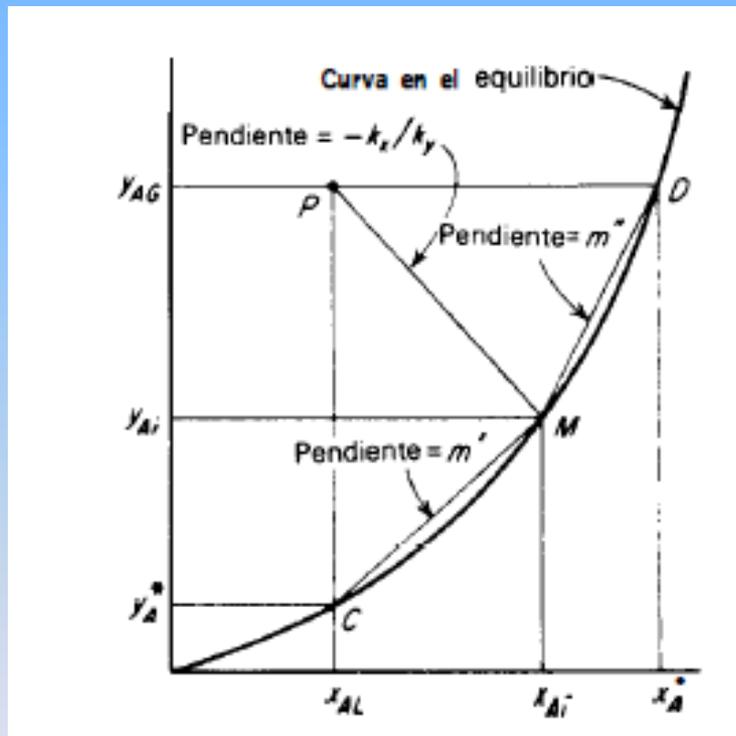
$$N_A = k_y(y_{A,G} - y_{A,i}) = k_x(x_{A,i} - x_{A,L})$$

$$\frac{y_{A,G} - y_{A,i}}{x_{A,L} - x_{A,i}} = -\frac{k_x}{k_y}$$

Teoría de la doble resistencia

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Coeficientes locales y globales



$$N_A = k_y(y_{A,G} - y_{A,i}) = k_x(x_{A,i} - x_{A,L})$$

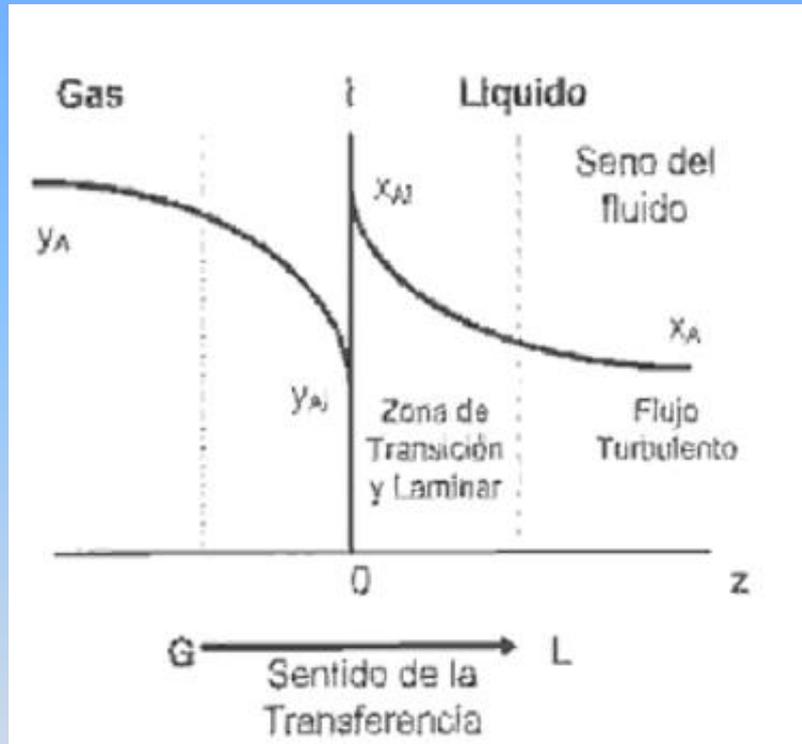
$$\frac{N_A}{K_y} = \frac{N_A}{k_y} + \frac{m' N_A}{k_x}$$

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m'}{k_x}$$

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{m'' k_y} + \frac{1}{k_x}$$

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## • Coeficientes



Flujo = Coeficiente x Fza. impulsora

$$N_A = k_y(y_{A,G} - y_{A,i}) = k_x(x_{A,i} - x_{A,L})$$

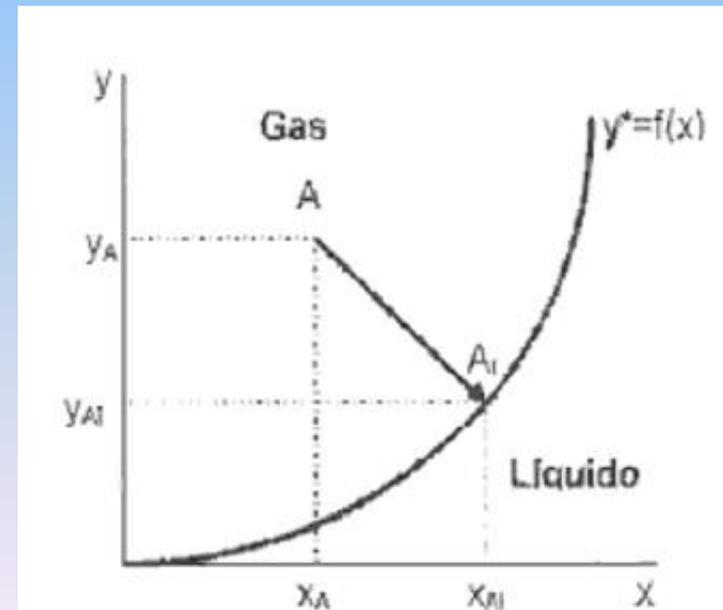
$$\frac{y_{A,G} - y_{A,i}}{x_{A,L} - x_{A,i}} = -\frac{k_x}{k_y}$$

$$N_A = k_g \cdot (p_A - p_{A,i})$$

$$k_g = \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}} \right]$$

$$N_A = k_y \cdot (y - y_i)$$

$$k_{y_0} = \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{frac. mol})} \right]$$



# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

$$y - y_1 = N_A / k_y$$

$$y_1 - y^* = m \cdot N_A / k_x$$

---


$$y - y^* = N_A \cdot (1/k_y + m/k_x)$$

$$N_A = \frac{1}{1/k_y + m/k_x} \cdot (y - y^*)$$

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}$$

$\frac{1}{K_y}$  = es la resistencia total a la transferencia de masa basada en la fuerza impulsora para toda la fase gaseosa.

$\frac{1}{k_y}$  = es la resistencia a la transferencia del lado del gas

$\frac{m}{k_x}$  = es la resistencia a la transferencia del lado del líquido

$$x^* - x_1 = N_A / m \cdot k_y$$

$$x_1 - x = N_A / k_x$$

---


$$x^* - x = N_A \cdot (1/m \cdot k_y + 1/k_x)$$

$$N_A = \frac{1}{1/m \cdot k_y + 1/k_x} \cdot (x^* - x)$$

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{m \cdot k_y} + \frac{1}{k_x}$$

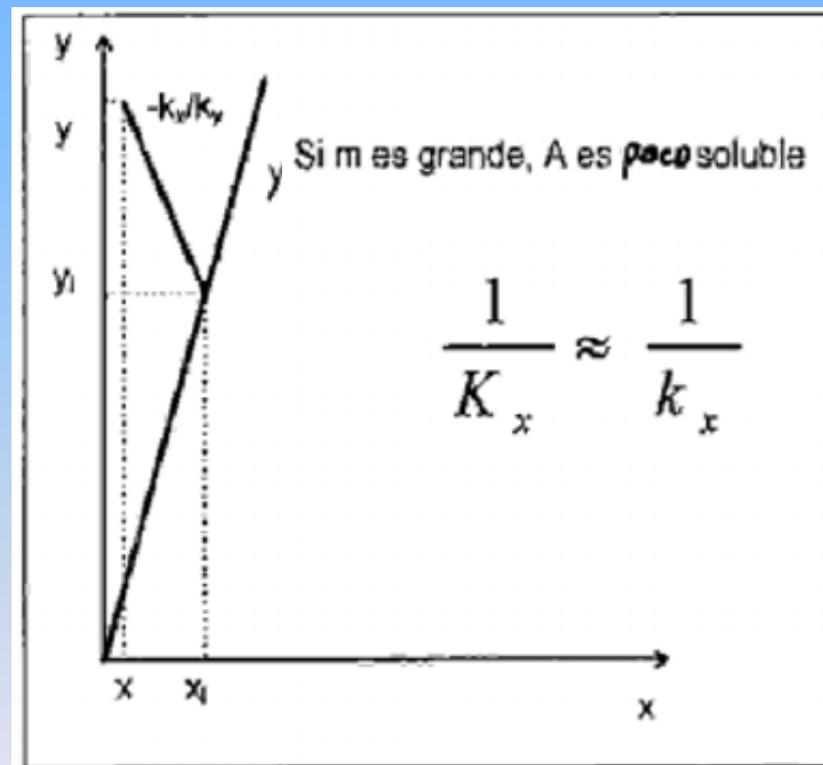
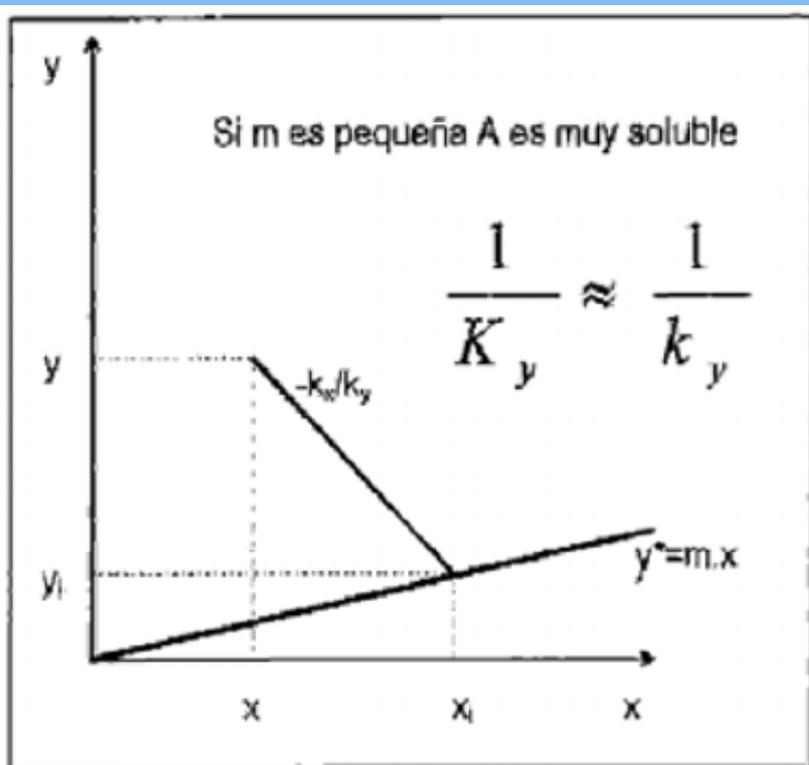
# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## • Coeficientes (cont.)

Para  $k_y; k_x$  del mismo orden

$$\frac{\text{Resistencia en la fase gaseosa}}{\text{Resistencia total en las dos fases}} = \frac{1/k_y}{1/K_y}$$

$$\frac{\text{Resistencia en la fase líquida}}{\text{Resistencia total en las dos fases}} = \frac{1/k_x}{1/K_x}$$



Como criterio conviene controlar en la fase que tiene mayor resistencia

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

---

- **Flujo de materia**

$$N_A = k_y(y_{A,G} - y_{A,i}) = k_x(x_{A,i} - x_{A,L})$$

Donde  $N_A$  tiene unidades masa/tiempo\*área ( $\text{kmol} / \text{h} \cdot \text{m}^2$ )

- **Fuerza Impulsora**

La fuerza impulsora  $\Delta y = (y - y^*)$  o  $\Delta x = (x^* - x)$

Donde  $y^*$  y  $x^*$  corresponden a concentraciones en el equilibrio

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## • Equilibrio

Equilibrio Gas Líquido ☐ Mezclas Ideales

$$\text{Ley de Raoult } P_i = P_i^v * x_i$$

$$\text{Ley de Dalton } P_i = P_t * y_i$$

$$y_i = \left( \frac{P_i^v}{P_t} \right) * x_i = K_i * x_i$$

Equilibrio Liq-Vapor f(volatilidad)

$$K_i = \left( \frac{y_i}{x_i} \right) * \frac{P_i^v}{P_t}$$

$$\alpha_{ij} = \frac{K_i}{K_j} = * \frac{P_i^v}{P_j^v} = \frac{y_i/x_i}{y_j/x_j}$$

$$y_j = (1 - y_i)$$

$$x_j = (1 - x_i)$$

$$y_i = \frac{\alpha_{ij} * x_i}{1 + x_i * (\alpha_{ij} - 1)}$$

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## Equilibrio Gas Líquido ☐ Mezclas No Ideales

$$P_i = \gamma_i * P_i^v * x_i$$

donde

$$\gamma_i = f(C_i, T)$$

*coeficiente de actividad*

## Sistemas diluidos

Ley de Henry  $\rightarrow P_i = H_i * x_i$

Ley de Dalton  $\rightarrow P_i = P_t * y_i$

$$y_i = \left(\frac{H_i}{P_t}\right) * x_i = K_i * x_i$$

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## • Sistemas concentrados vs. diluídos

- Para Sistemas diluídos puedo utilizar L y G como constantes → verificar.
- Para Sistemas concentrados se debe utilizar relaciones molares

### Soluciones concentradas:

$G_S; L_S$  : inertes o disolventes que no se transfieren

Relaciones molares:

$$Y_A = \frac{\text{moles. de. A}}{\text{moles. de. } G_S} \quad Y = \frac{y}{1-y} \quad y = \frac{Y}{1+Y}$$

$$X_A = \frac{\text{moles. de. A}}{\text{moles. de. } L_S} \quad X = \frac{x}{1-x} \quad x = \frac{X}{1+X}$$

$$y^* = m \cdot x$$

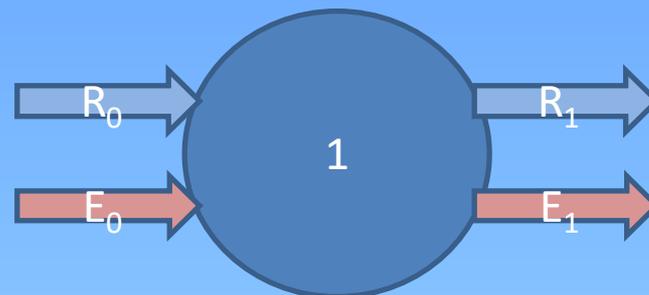


$$Y^* = \frac{m \cdot X}{1 - (m - 1) \cdot X}$$

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## • Etapa de equilibrio

- $R_0$  → Solvente extracción
- $E_0$  → Corriente a tratar
- $R_1$  → Refinado (solvente rico)
- $E_1$  → Extracto (corriente tratada)



## • Balance de Masa

$$R_0 * x_0 + E_0 * y_0 = R_1 * x_1 + E_1 * y_1 \quad \Rightarrow$$

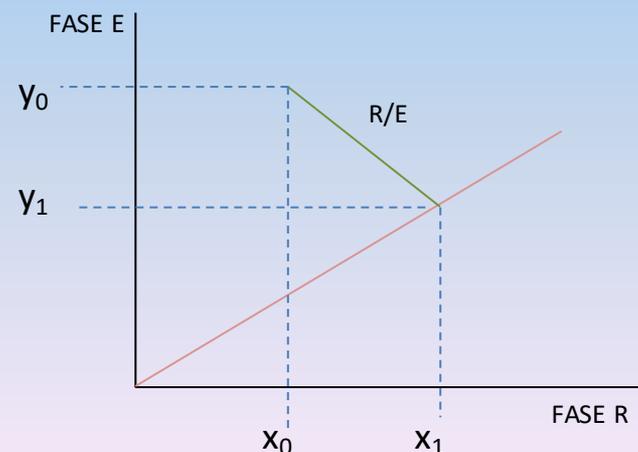
$$R_0 * x_0 - R_1 * x_1 = E_1 * y_1 - E_0 * y_0$$

En sistemas donde caudales se mantienen constantes  $R_0 \sim R_1 \rightarrow R$  y  $E_0 \sim E_1 \rightarrow E$

$$R * (x_0 - x_1) = E * (y_1 - y_0)$$

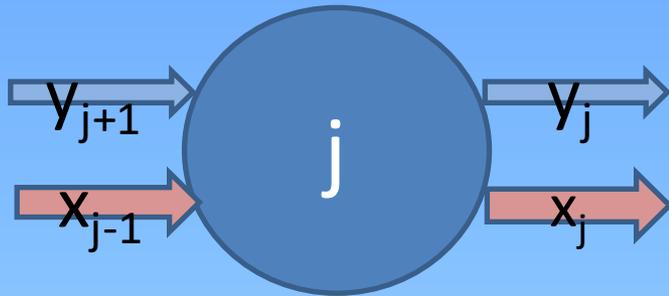


$$- R/E = (y_0 - y_1) / (x_0 - x_1)$$



# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

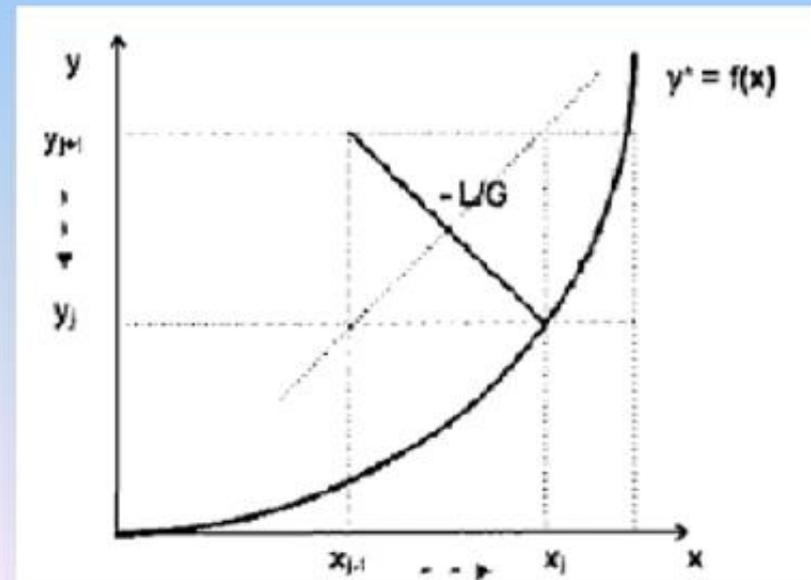
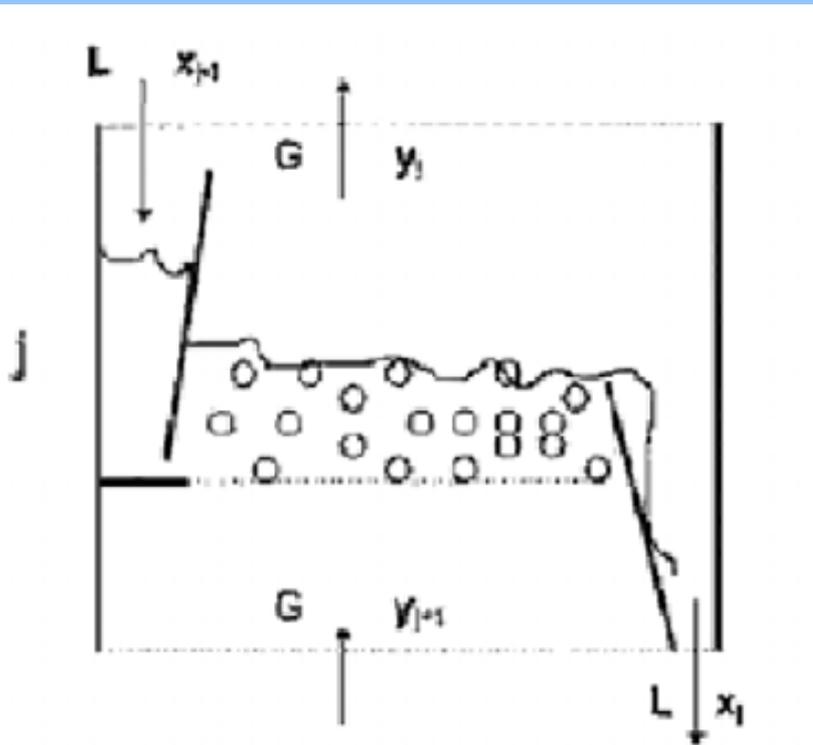
- Etapa de equilibrio



$$G \cdot y_{j+1} + L \cdot x_{j-1} = G \cdot y_j + L \cdot x_j$$

$$G \cdot (y_{j+1} - y_j) = L \cdot (x_j - x_{j-1})$$

$$\frac{(y_{j+1} - y_j)}{(x_{j-1} - x_j)} = -\frac{L}{G}$$



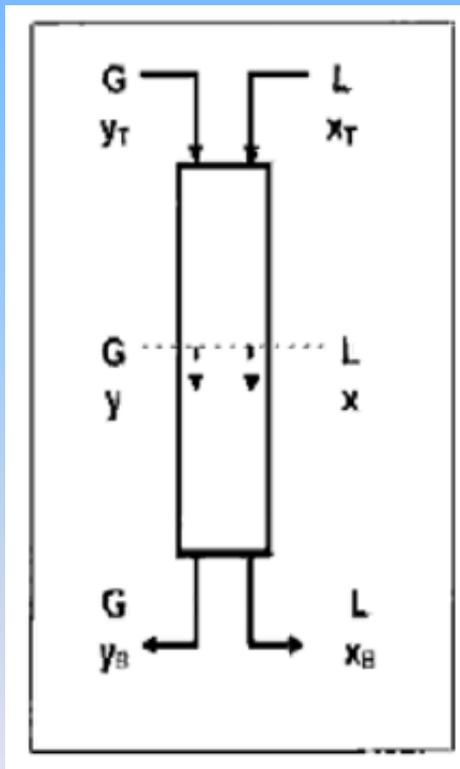
# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

---

- **Tipos de Contactado:**
  - Co-corriente
  - Corrientes Cruzadas
  - Contracorriente

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Tipos de Contactado: **Cocorrente**



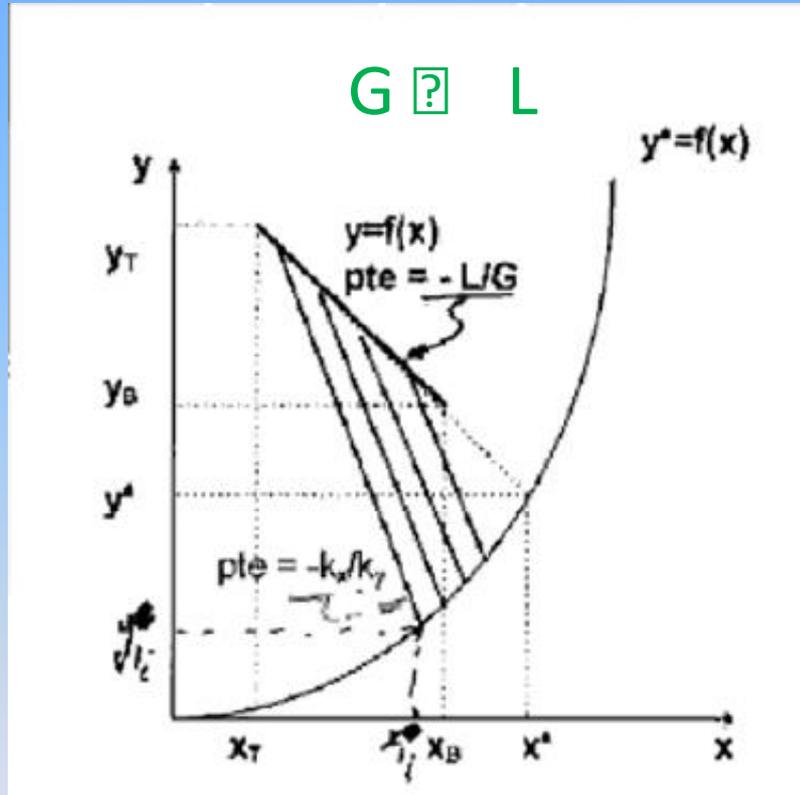
$$G.y_T + L.x_T = G.y + L.x = G.y_B + L.x_B$$

$$y = \left(y_T + \frac{L}{G} \cdot x_T\right) - \frac{L}{G} \cdot x = \left(y_B + \frac{L}{G} \cdot x_B\right) - \frac{L}{G} \cdot x$$

$$\frac{y_T - y}{x_T - x} = -\frac{L}{G}$$

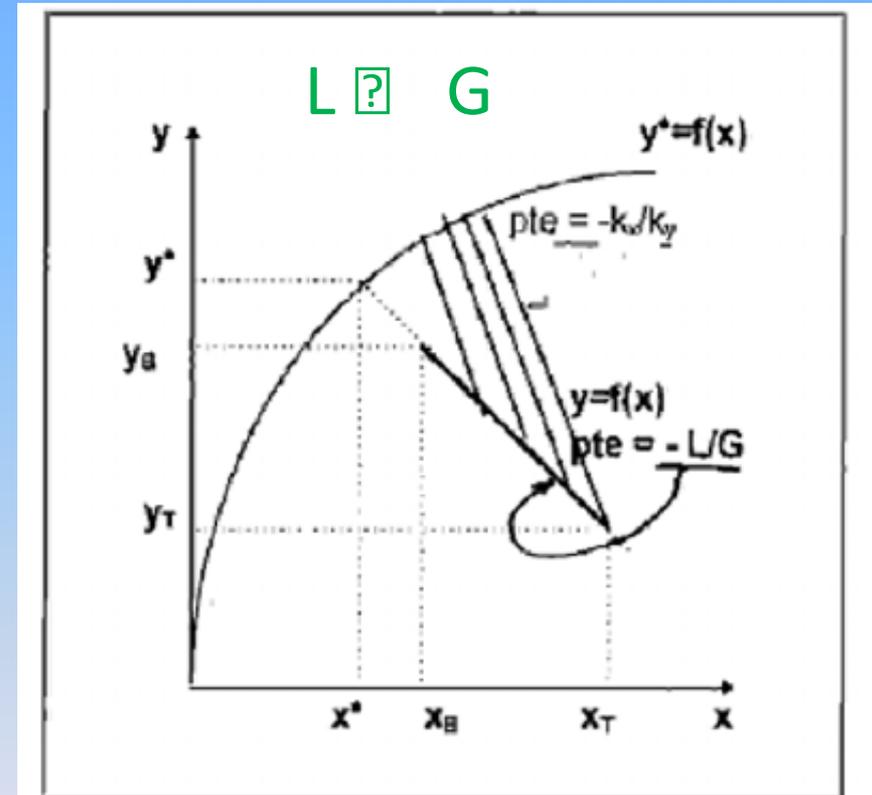
# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Tipos de Contactado: **Cocorrente**



$$y_T > y_B \quad x_T < x_B$$

$$y > y^* \quad x < x^*$$



$$y_T < y_B \quad x_T > x_B$$

$$y < y^* \quad x > x^*$$

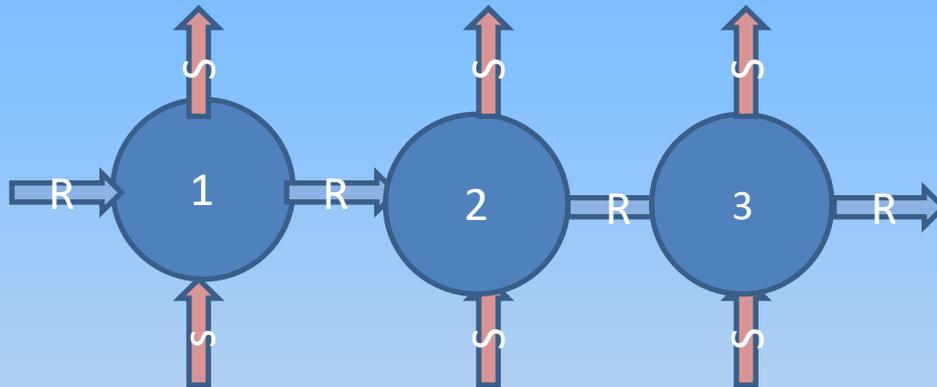
# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

---

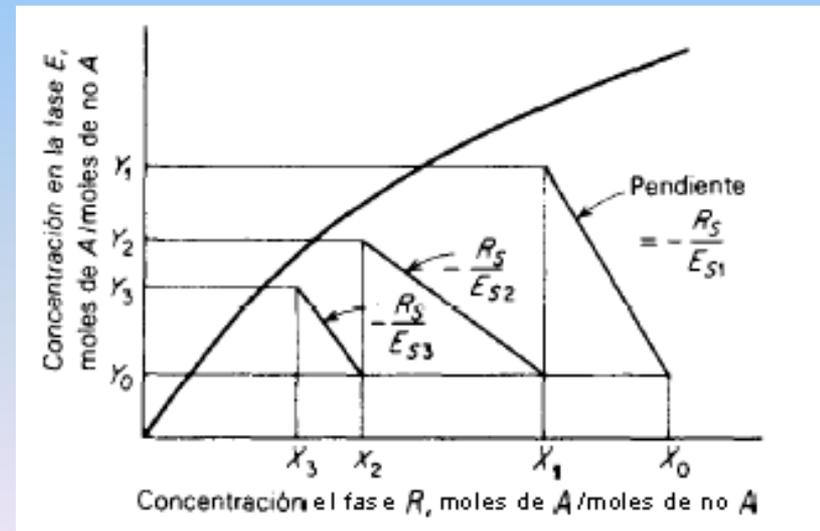
- **Tipos de Contactado: Corrientes Cruzadas**

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Contacto multietapa: **corrientes cruzadas**

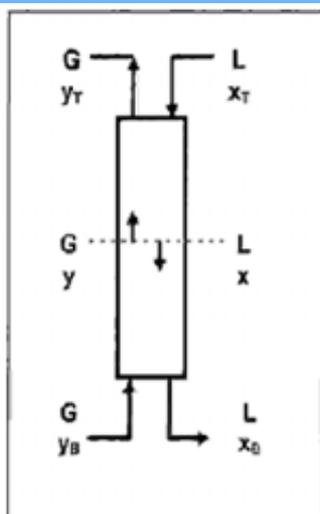


Balances y diagrama



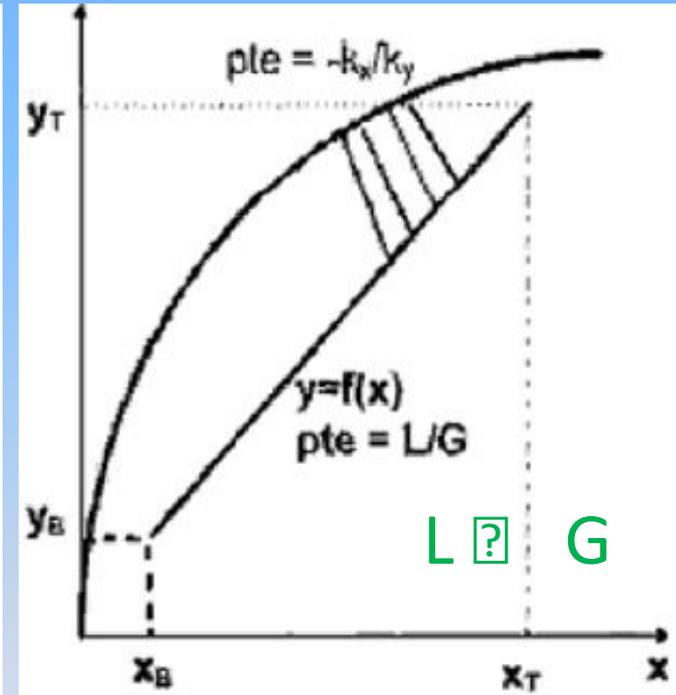
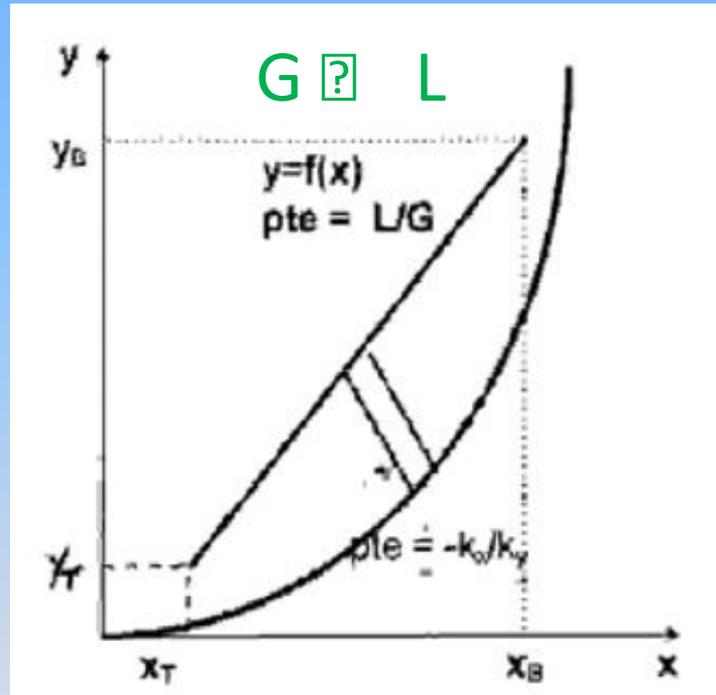
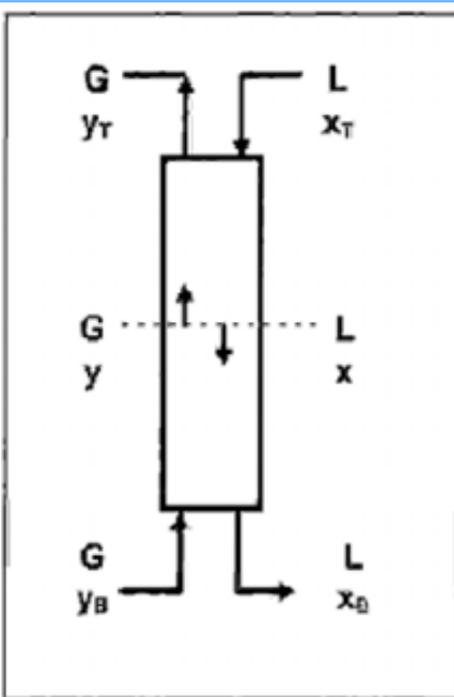
# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Tipos de Contactado: **Contra Corriente**



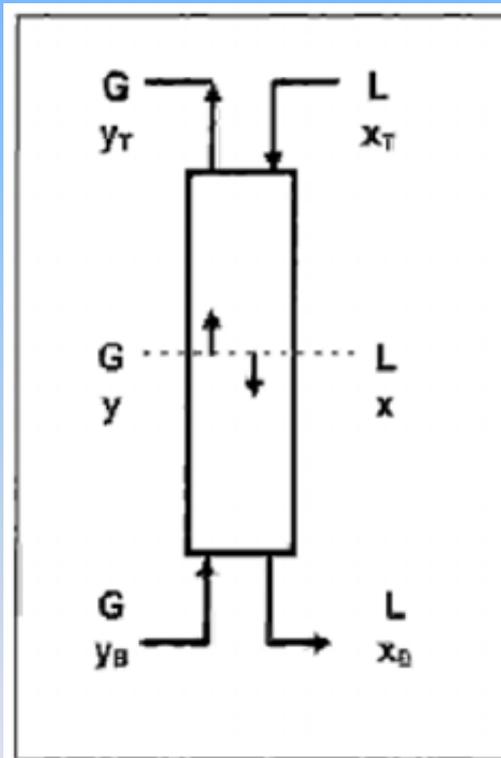
# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Tipos de Contactado: **Contra Corriente**



# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Tipos de Contactado: **Contra Corriente**



$$G \cdot y_B + L \cdot x_T = G \cdot y_T + L \cdot x_B$$

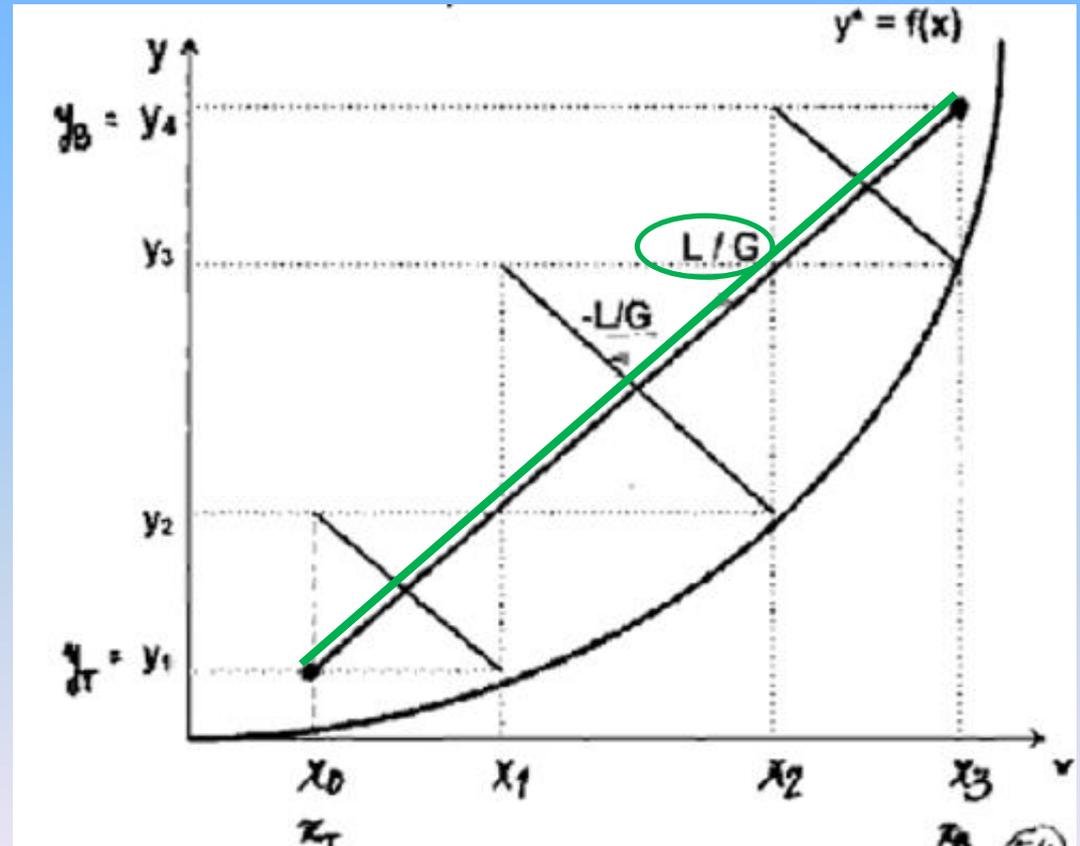
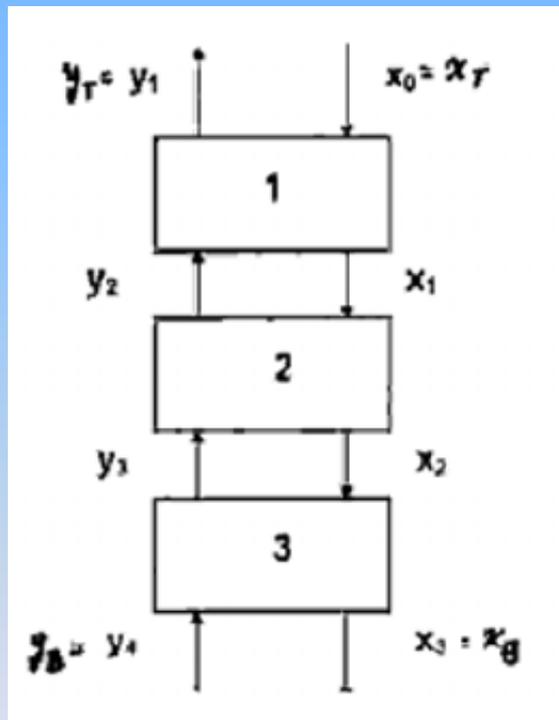
$$G \cdot y + L \cdot x_T = G \cdot y_T + L \cdot x$$

$$y = \left( y_T - \frac{L}{G} \cdot x_T \right) + \frac{L}{G} \cdot x = \left( y_B - \frac{L}{G} \cdot x_B \right) + \frac{L}{G} \cdot x$$

$$\frac{y_T - y}{x_T - x} = \frac{L}{G}$$

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

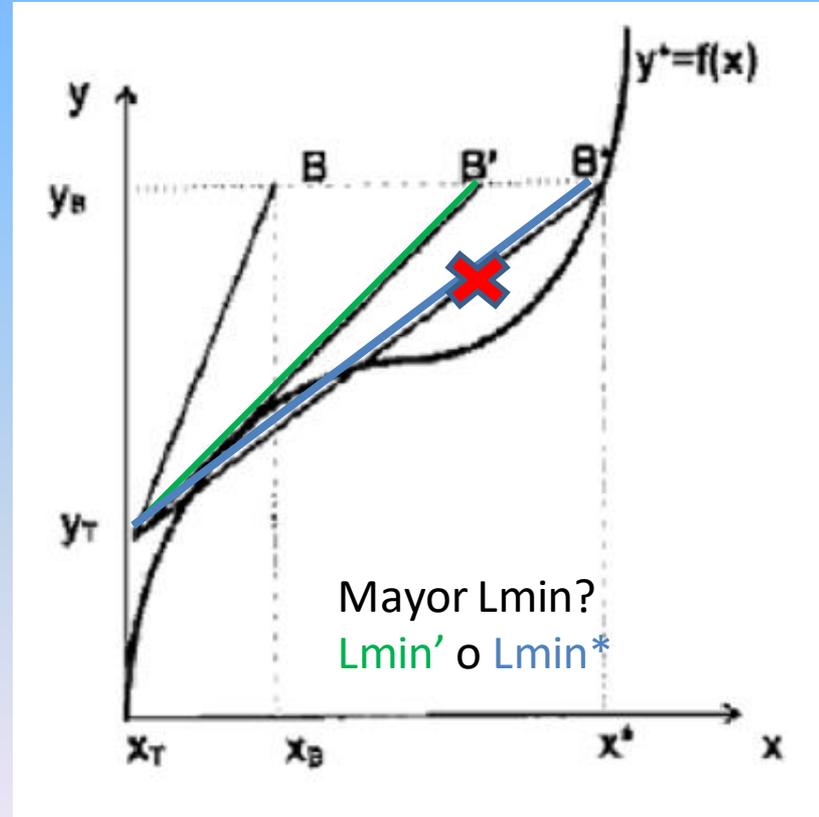
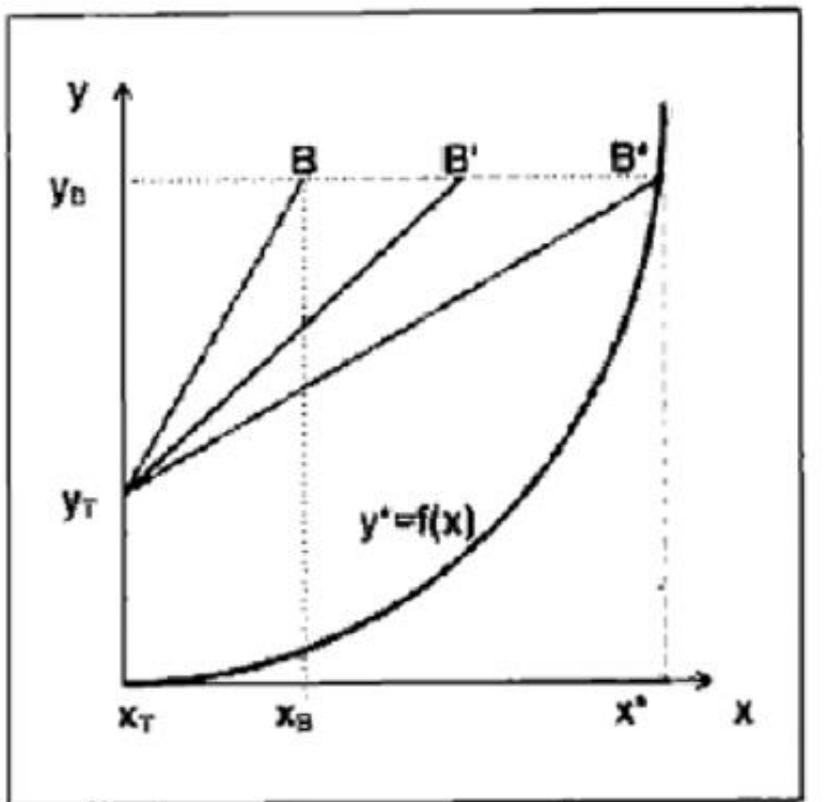
- **Tipos de Contactado: Contra corriente**
  - Método de McCabe Thiele



# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Condiciones límite de operación: **Lmin**

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{min} = \frac{(y_B - y_T)}{(x_B^* - x_T)}$$



# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

---

- Condiciones límite de operación: **Lmin**

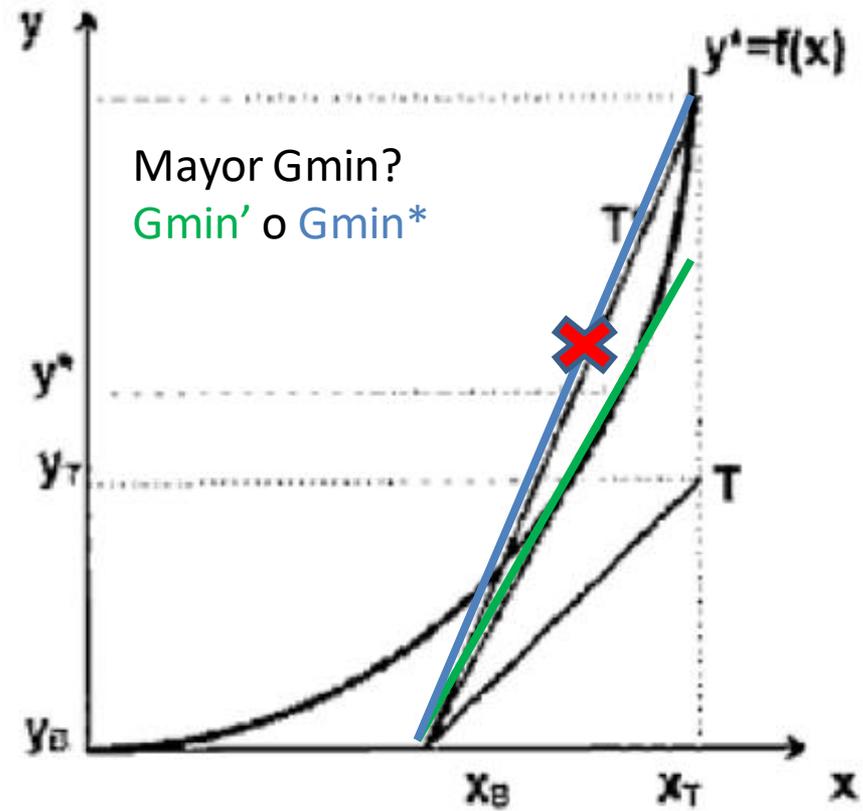
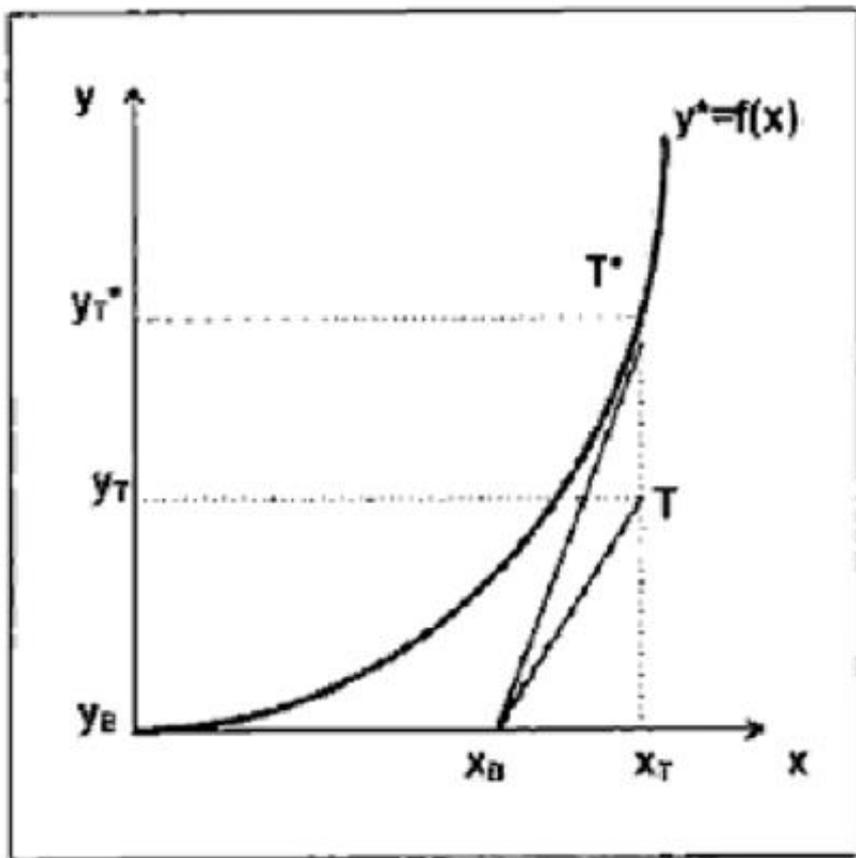
$$G.(y_B - y_T) = L.(x_B - x_T)$$

$$G.(y_B - y_T) = L_{min}.(x_B^* - x_T)$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{min} = \frac{(y_B - y_T)}{(x_B^* - x_T)}$$

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Condiciones límite de operación: **Gmin**



# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

---

- Condiciones límite de operación: **Gmin**

$$G \cdot (y_T - y_B) = L \cdot (x_T - x_B)$$

$$G_{min} \cdot (y_T^* - y_B) = L \cdot (x_T - x_B)$$

$$\left( \frac{L}{G} \right)_{max} = \frac{L}{G_{min}} = \frac{(y_T^* - y_B)}{(x_T - x_B)}$$

# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## • Eficiencias

Eficiencia global  $\square$

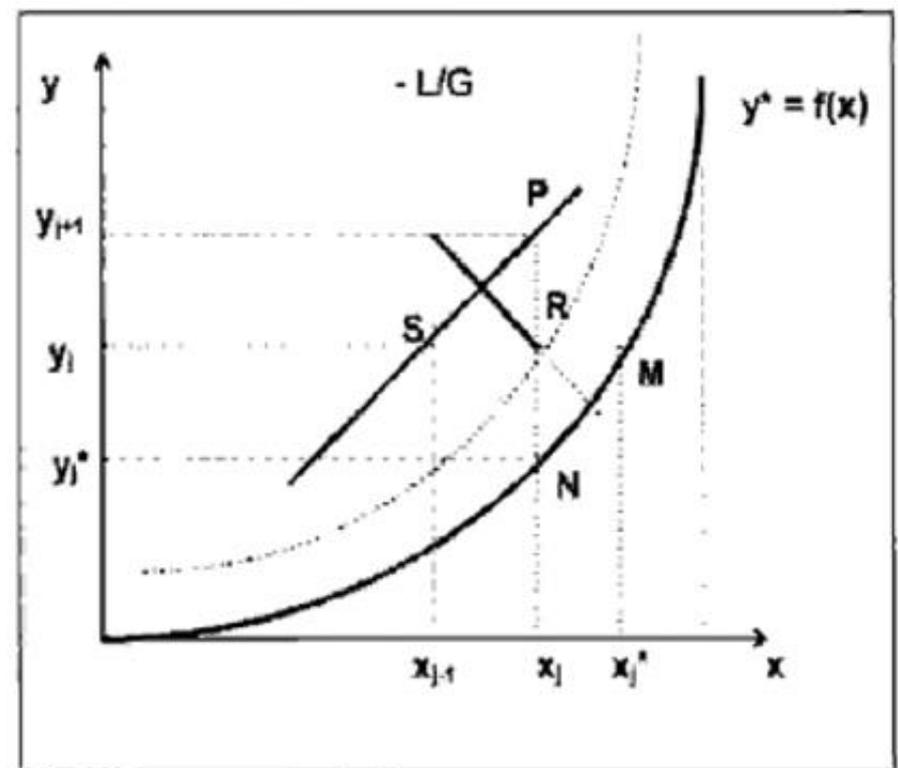
$$E_g = \frac{N^\circ \cdot \text{Etapas. Teoricas}}{N^\circ \cdot \text{Etapas. Reales}}$$

Eficiencia de Murphee

$$EM = \frac{\text{Cambio de Conc. en Etapa Real}}{\text{Cambio de Conc. en Etapa Ideal}}$$

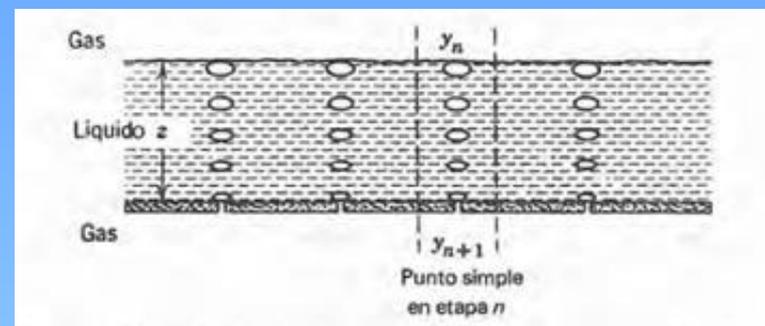
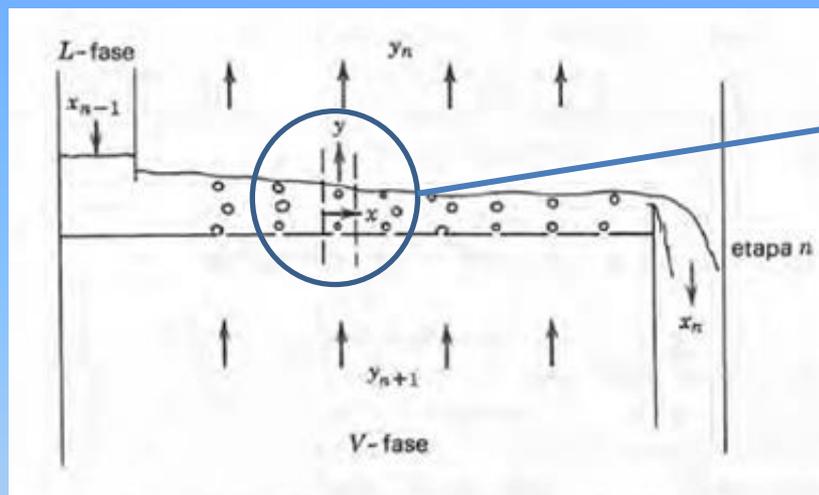
$$E_{MG} = \frac{y_{j+1} - y_j}{y_{j+1} - y^*} = \frac{\overline{PR}}{\overline{PN}}$$

$$E_{ML} = \frac{x_j - x_{j-1}}{x^* - x_{j-1}} = \frac{\overline{RS}}{\overline{MS}}$$



# Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

## • Eficiencia puntual



$$E_{V^o} = \frac{y - y_{n+1}}{y^* - y_{n+1}}$$

$y$ : es la composición del vapor que sale de un punto de la etapa, en donde la composición del líquido es  $x$  e  $y^*$  es la composición de un vapor hipotético en equilibrio con el líquido de composición  $x$ . También es posible definir una eficiencia de punto para el líquido.

**Las eficiencias puntuales pueden relacionarse con las eficiencias de etapa ( $E_g$ ) suponiendo un modelo físico para el mezclado del líquido. Existen gráficos y correlaciones.**