



Universidad de los Andes  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química  
Dpto. de Operaciones Unitarias y Proyectos

# Destilación. Fundamentos.



*Prof. Jesús F. Ontiveros*

*Prof. Jesús F. Ontiveros O.*

## Contenido

- ☀ **Separación en Etapas Múltiples.**

Separación de una sola etapa. Etapas múltiples. Etapas en cascadas.

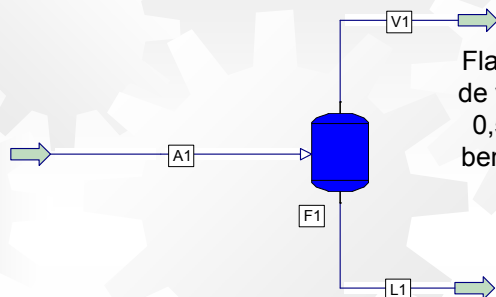
- ☀ **Destilación**

Definición, Generalidades.

- ☀ **Método de McCabe-Thiele**

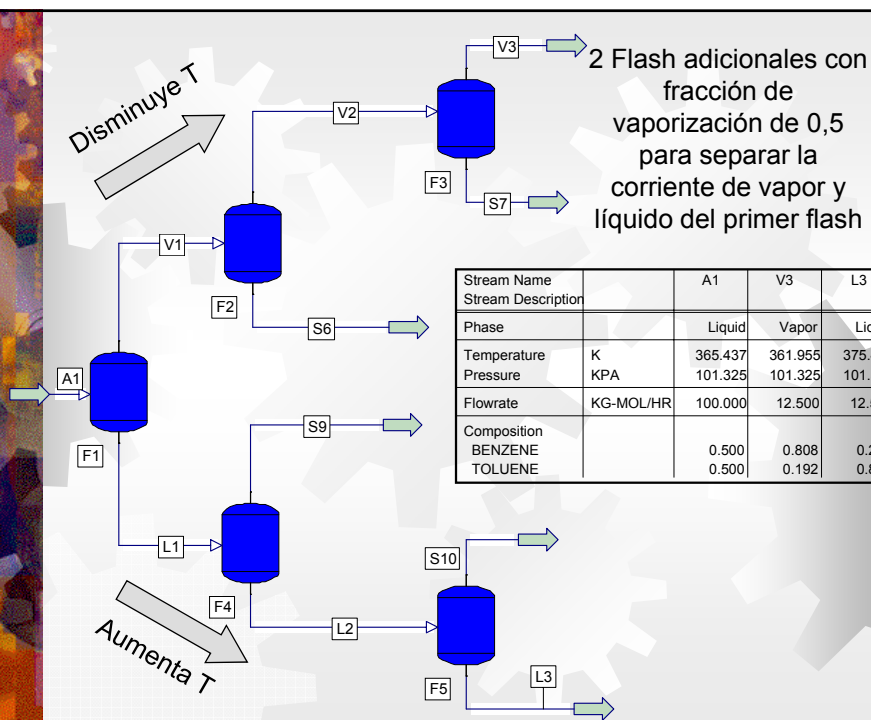
Zonas en la columna. Zona de Enriquecimiento. Zona de agotamiento. Zona de Alimentación. Condición Térmica. Rectas de Operación. Trazado de Etapas. Etapa óptima de alimentación.

## Separación en Etapas Múltiples



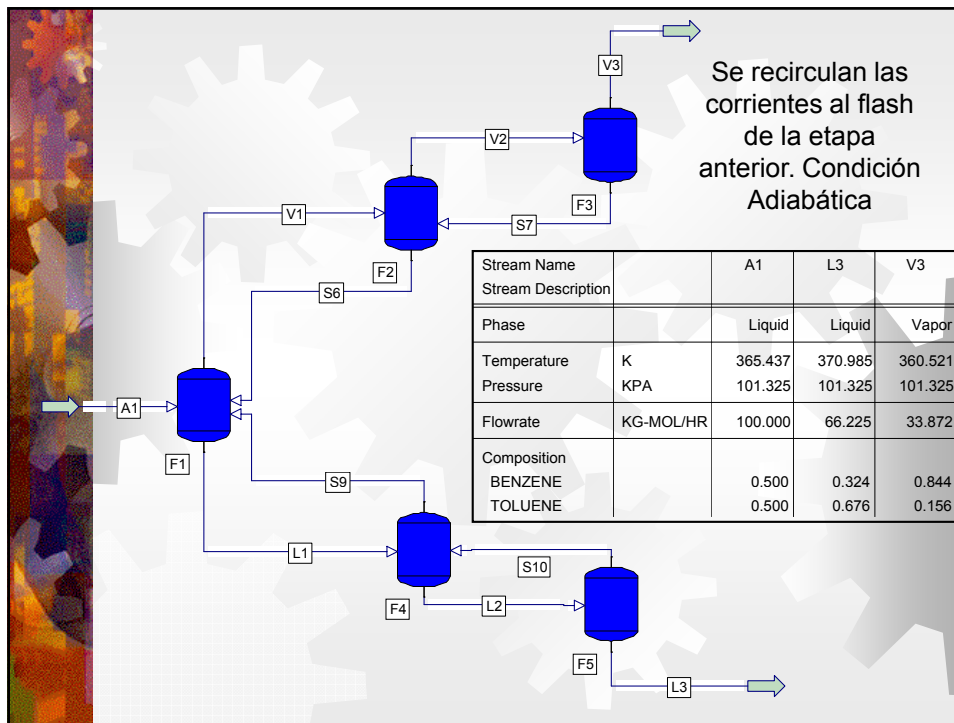
Flash con fracción de vaporización de 0,5 para separar benceno y tolueno

Stream Name		A1	L1	V1
Stream Description				
Phase		Liquid	Liquid	Vapor
Temperature	K	365.437	368.815	368.815
Pressure	KPA	101.325	101.325	101.325
Flowrate	KG-MOL/HR	100.000	50.000	50.000
Composition				
BENZENE		0.500	0.390	0.610
TOLUENE		0.500	0.610	0.390



2 Flash adicionales con fracción de vaporización de 0,5 para separar la corriente de vapor y líquido del primer flash

Stream Name		A1	V3	L3
Stream Description				
Phase		Liquid	Vapor	Liquid
Temperature	K	365.437	361.955	375.416
Pressure	KPA	101.325	101.325	101.325
Flowrate	KG-MOL/HR	100.000	12.500	12.500
Composition				
BENZENE		0.500	0.808	0.200
TOLUENE		0.500	0.192	0.800



Prof. Jesús F. Ontiveros O.

# Destilación

☀ **Generalidades**

Método de separación más económico cuando hay una diferencia de volatilidades entre los compuestos de la alimentación, basado en el equilibrio de fases líquido y vapor.

El líquido drena por gravedad y llega al rehervidor donde se produce un vapor y líquido (Fondo) en equilibrio. El vapor se recircula y asciende llegando a un condensador del cual se retira un líquido (Destilado) y parte se devuelve a la columna como un reciclo o reflujo.

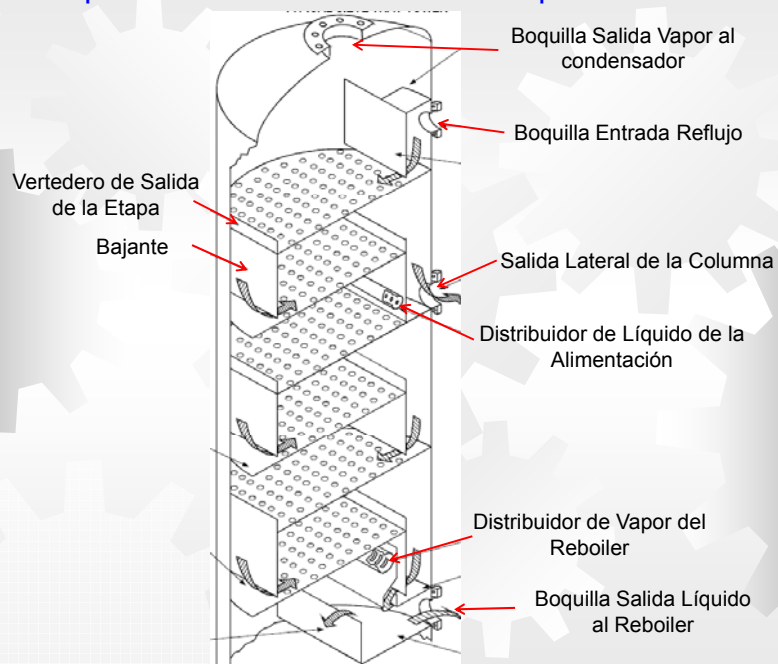
La columna de destilación puede estar estructurada internamente en platos o con empaques. Típicamente el diámetro está entre 0.3 y 10 metros (depende del flujo) mientras la altura oscila entre 3 y 75 metros (depende del grado de separación) [1]

¿Cuándo se usan platos y cuando empaques?

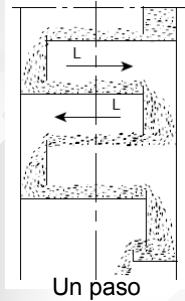
A modo general “ los platos se utilizan siempre en columnas de gran diámetro y torres con más de 20 o 30 etapas”. Las columnas con empaques se usan generalmente cuando : [4]

- Columnas con  $D < 0,6$  m
- Medios corrosivos.
- Destilaciones a vacío donde es imprescindible mantener bajas caídas de presión.
- El líquido tiende a formar espumas.

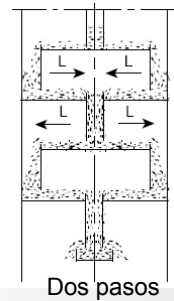
#### • Esquema 3D de una columna de 6 platos



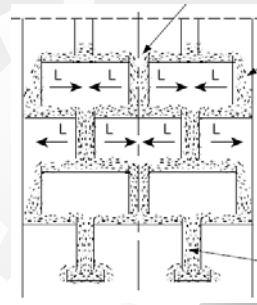
## ● Pasos en las etapas de una columna



Un paso



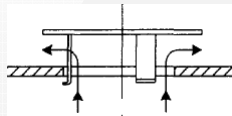
Dos pasos



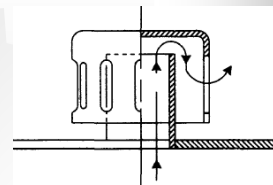
Cuatro pasos

## ● Tipos de Platos

Plato perforado



Válvula



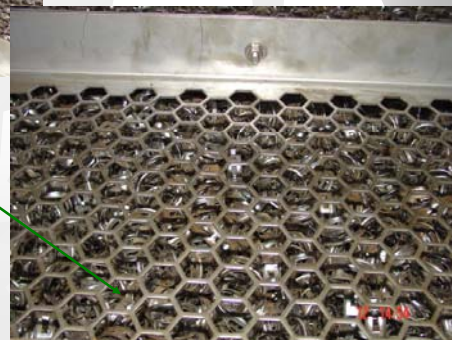
Borboteo

*Fotografías tomadas en el llenado con empaques nuevos de una columna de destilación durante una parada de planta*

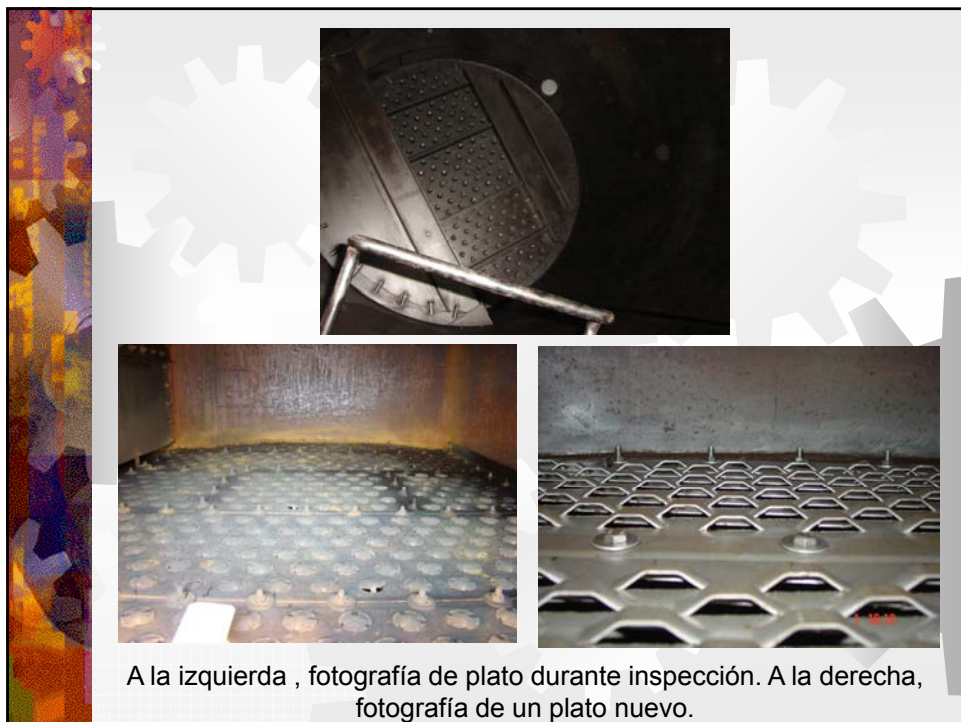


Rejilla de soporte para los empaques.

Nótese que en la parte inferior de la rejilla están ubicados los empaques







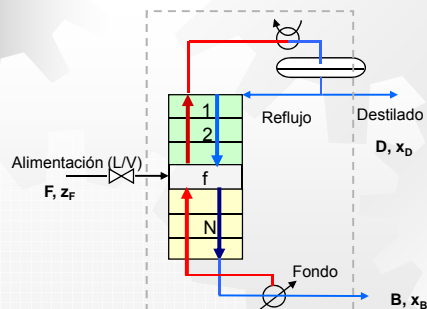
# McCabe Thiele

## Generalidades

[Ind. Eng. Chem , 17, 605 (1925)]

Método gráfico para separaciones binarias

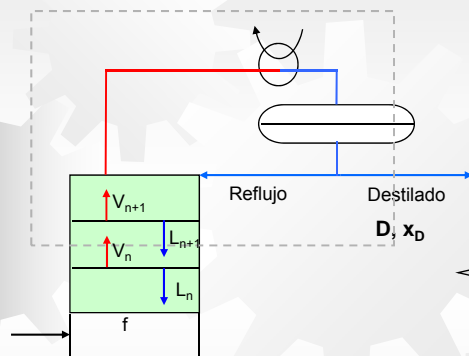
- Operación Adiabática
- No hay efectos de entalpía de mezcla y se desprecia el efecto del calor sensible
- Flujo Molar Constante en cada sección de la columna.



$$F = D + B$$

$$Z_{fi} \cdot F = X_{bi}B + X_{di}D$$

## Balace en la zona de Rectificación o Enriquecimiento



$$V_n = L_{n+1} + D$$

$$y_n V_n = x_{n+1} L_{n+1} + x_D D$$

$$y_n = x_{n+1} \frac{L_{n+1}}{V_n} + x_D \frac{D}{V_n}$$

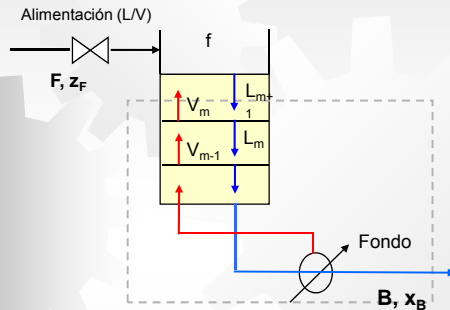
Relación de Reflujo

$$R = \frac{L}{D}$$

$$y_n = x_{n+1} \frac{R}{1+R} + \frac{x_D}{1+R}$$

Esta es la recta de operación en la zona de rectificación. Tiene pendiente y corte positivo. Se intercepta con la línea auxiliar  $y=x$  en el punto  $x=X_D$

### ☀ Balance en la zona de Agotamiento o Despojamiento



$$L_{m+1} = V_m + B$$

$$x_{m+1} L_{m+1} = y_m V_m + x_B B$$

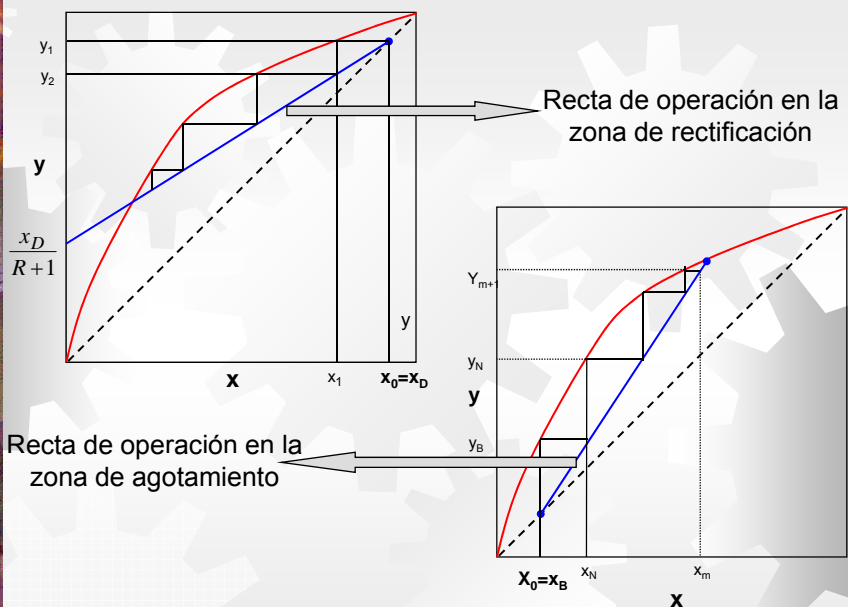
$$y_m = x_{m+1} \frac{L_{m+1}}{V_m} - x_B \frac{B}{V_m}$$

Relación de Reflujo  

$$R' = \frac{V}{B}$$

$$y_n = x_{m+1} \frac{R' + 1}{R'} - \frac{x_B}{R'}$$

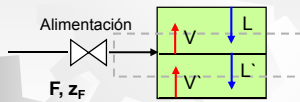
Esta es la recta de operación en la zona de agotamiento. Tiene pendiente positiva y corte negativo. Se intercepta con la línea auxiliar  $y=x$  en el punto  $x=X_B$



Si se graficaran en un mismo diagrama las dos rectas se interceptan...  
 ¿Donde?



### Balance en la zona de Alimentación



$$F + L + V = L' + V'$$

$$FH_F + LH_L + V'H_{V'} = L'H_{L'} + V'H_V$$

$$FH_F + H_L \cdot (L - L') = H_V \cdot (V - V')$$

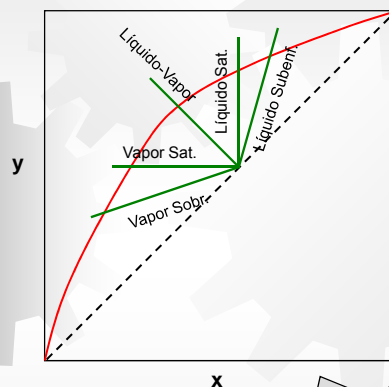
$$\frac{(H_V - H_F)}{(H_V - H_L)} = \frac{(L' - L)}{F}$$

- $q > 1$  Líquido Subenfriado
- $q = 1$  Líquido Saturado
- $0 < q < 1$  Mezcla Líquido-Vapor
- $q = 0$  Vapor Saturado
- $q < 0$  Vapor Sobrecalentado

Condición Térmica  $q$

$$q = \frac{L' - L}{F}$$

### Balance en la zona de Alimentación



$$yV = xL + x_D D$$

$$yV' = xL' - x_B B$$

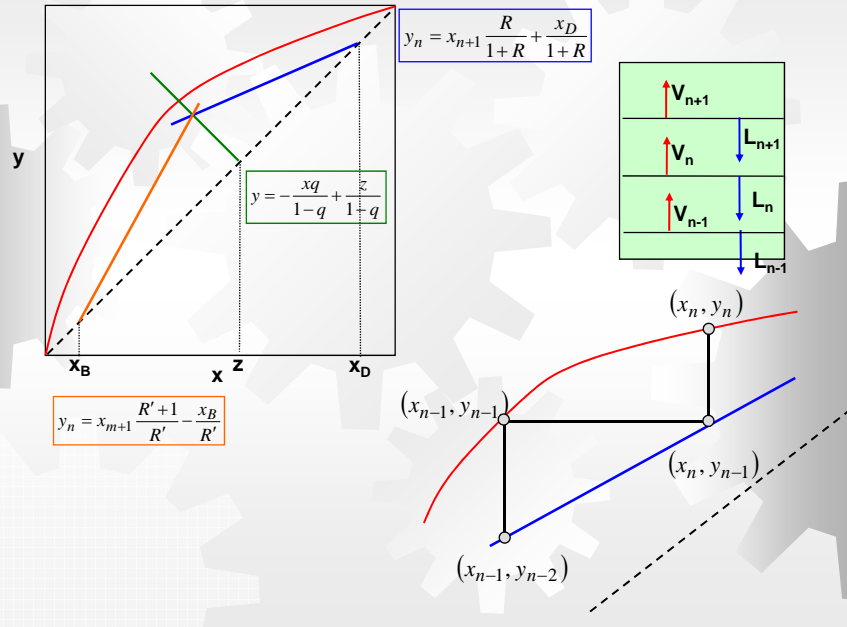
$$y(V - V') = x(L - L') + zF$$

$$y(F + L - L') = x(-qF) + zF$$

$$y = -\frac{xq}{1-q} + \frac{z}{1-q}$$

La especificación de la condición térmica y de la alimentación permiten conocer la recta de alimentación

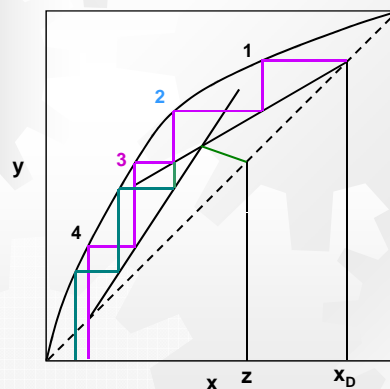
### Rectas de Operación. Trazado de Etapas.



### Localización de la Etapa de Alimentación.

Si está especificado el número de etapas, la posición que da mayor separación entre la composición de tope y fondo.

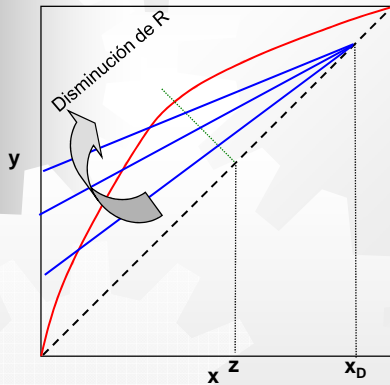
Si no está especificado el número de etapas, la posición que minimice el número de etapas entre  $x_D$  y  $x_B$



La etapa 2 es la etapa óptima de alimentación

☀ **Razón de Reflujo.**  $R = \frac{L}{D}$   
 Parámetro operacional muy importante

Influye directamente en el número de etapas

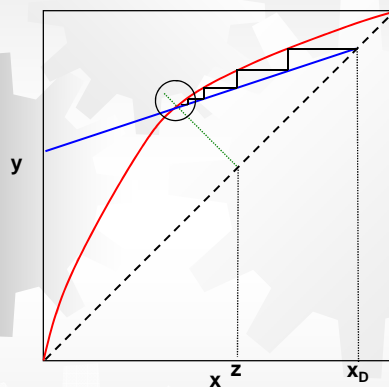


$$y_n = x_{n+1} \frac{R}{1+R} + \frac{x_D}{1+R}$$

La razón de reflujo normalmente es una función del reflujo mínimo.  
 Típicamente  $R = (1.1-1.5)R_{\min}$

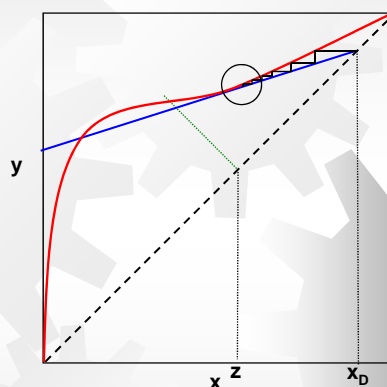
☀ **Razón de Reflujo. Reflujo Mínimo**

Reflujo para el cual el número de etapas requeridas es infinita



**Caso A**

Diagramas ideales, intersección típica en la línea de alimentación

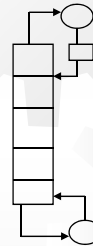
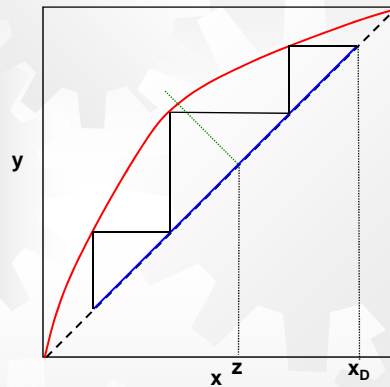


**Caso B**

Diagramas no ideales, intersección en un punto de tangencia anterior a línea de alimentación

### ☀ Razón de Reflujo. Reflujo Total.

Reflujo para el cual el número de etapas requeridas es mínimo.



### ☀ Eficiencia en las etapas.

Etapas de equilibrio  $\neq$  Platos

Problemas de mezclado hacen que las corrientes de salida de cada etapa no estén en equilibrio. Es necesario definir una eficiencia. La eficiencia de Murphree se establece como el cociente de la diferencia de las composiciones de dos etapas sucesivas y la diferencia de las composiciones bajo consideraciones de equilibrio. Se puede tomar en base al vapor o al líquido:

$$E_v = \frac{y_n - y_{n-1}}{y_{eq} - y_{n-1}} \times 100 \quad E_l = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_{eq} - x_{n-1}} \times 100$$

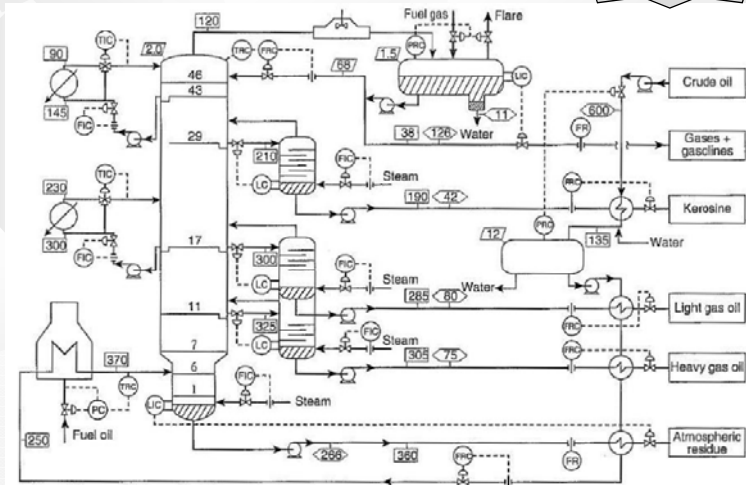


# Destilación en la Industria

Mc Cabe-Thiele

Utilidad Pedagógica

Simuladores



## Referencias

- [1] Coulson J., Richardson J., "Chemical Engineering. Volume 2: Particles Technology and Separation Processes." Quinta Edición. (2002). Pág. 542 y ss.
- [2] Perry, R., Green D., Maloney J., "Perry Manual del Ingeniero Químico." McGraw Hill. Quinta Edición. (1997). Tomo IV pág. 13-5 y ss.
- [3] King, Judson, "Procesos de Separación". Editorial Reverté (1980). Pág. 26 y ss.
- [4] Henley E. ; Seader J. "Operaciones de Separación por etapas de equilibrio en Ingeniería Química" Editorial Reverté (2000). Pág 108.

Foto de la portada y del contenido de la presentación corresponden a equipos durante una parada de planta. Note en la foto de portada los andamios al lado de la columna de destilación.