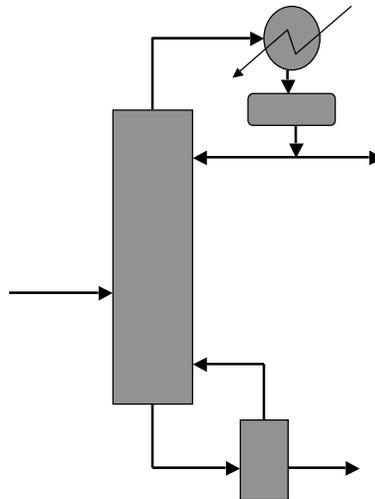


Destilación



Columna de destilación



Plato



Reboiler



Destilación mezclas binarias

La separación requiere

- Una segunda fase debe ser formada tal que las fases de líquido y vapor están presentes y puedan estar en contacto en cada etapa dentro de la columna.
- Los componentes tengan diferente volatilidad de manera que se repartan entre las dos fases de manera diferente
- Las dos fase puedan separarse por gravedad u otro mecanismo

Los factores que influyen en el diseño y análisis de la destilación binaria son

- Composición, flujo, temperatura, fase y presión de la alimentación
- Grado de separación deseado entre los componentes
- Presión de operación, debe ser menor a la presión crítica de la mezcla
- Caída de presión en la columna particularmente en las operaciones al vacío
- Mínimo reflujo y reflujo actual
- Mínimo numero de etapas de equilibrio y numero actual
- Tipo de condensador (parcial o total)
- Tipo de reboiler
- Tipo de contacto (platos o empaques)
- Diámetro y altura de la columna
- Etapa de alimentación

Si los componentes se descomponen a la temperatura del reboiler es necesario utilizar destilación al vacío

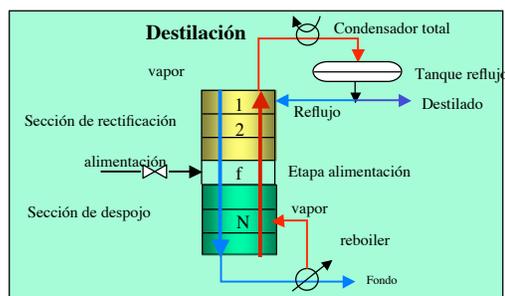
Método McCabe-Thiele

En general una columna de destilación binaria consiste de,

- Una **columna** de N etapas teóricas
- Un **condensador total** para producir un reflujo
- Un **reboiler parcial** para producir vapor
- Una etapa para la **alimentación**.

Esta configuración permita conseguir una separación excepto en los casos donde una azeotropo existe, donde uno de los producto este cerca de la concentración del azeotropo.

El objetivo de la destilación es alcanzar un destilado rico en el componente ligero y un residuo rico en el componente pesado



Método McCabe-Thiele

La alimentación contiene un componente mas volátil (el clave ligero, LK) y un componente menos volátil (el clave pesado, HK). A la temperatura y presión de la alimentación esta puede consistir de un liquido, de una mezcla liquido vapor o de un vapor.. La composición de la alimentación es dada por la fracción del componente LK Z_F . La composición del fondo es dada por la fracción del LK X_B , de cualquier forma la composición del destilado es dada por la fracción del LK X_D .

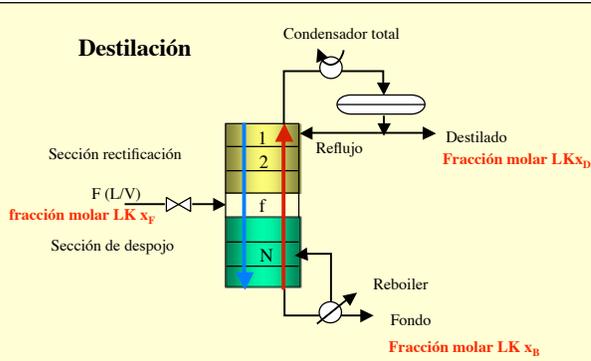
La dificultad en conseguir la separación es determinada por la volatilidad relativa α entre el LK=1, y el HK=2.

$$\alpha_{1,2} = K_1 / K_2$$

Si los dos componente forma una solución ideal entonces la ley de Raoult es aplicada :

$$K_i = P_i^s / P$$

$$\alpha_{1,2} = P_1^s / P_2^s$$



Únicamente función de T

Cuando T se incrementa, α decrece hasta un punto donde es igual a 1 y la separación no es posible

Método McCabe-Thiele : Curva Equilibrio

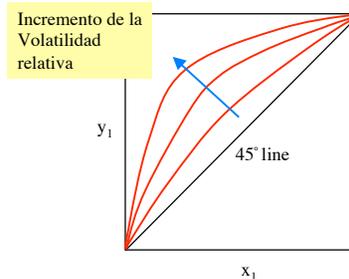
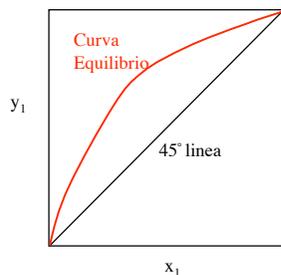
Se puede escribir la volatilidad relativa en términos de las fracciones molares del LK en una mezcla binaria como sigue

$$\alpha_{1,2} = K_1 / K_2 = \frac{y_1 / x_1}{y_2 / x_2} = \frac{y_1 / x_1}{(1 - y_1) / (1 - x_1)} = \frac{y_1 (1 - x_1)}{x_1 (1 - y_1)}$$

Cuando α es aproximadamente constante en función de la temperatura (componente con punto de ebullición cercano, se puede escribir:

$$y_1 = \frac{\alpha_{1,2} x_1}{1 + x_1 (\alpha_{1,2} - 1)}$$

Para componente que no tienen puntos de ebullición cercano α variara dependiendo de la composición. La **curva equilibrio** será similar a la de α fijo , pero no se puede fijar la composición en función de α



Método de McCabe-Thiele : Especificación

Especificaciones

F	Flujo molar total de la alimentación
z_F	fracción molar de la alimentación
P	Presión de operación de la columna (asuma cte)
	Condición de la alimentación (fase) @ P
	Curva de equilibrio @P
	Tipo de condensador (total o parcial)
x_D	Fracción molar del destilado
x_B	Fracción molar del fondo
R/R_{\min}	Relación de reflujo c/r al reflujo mínimo

Resultados

D	Flujo molar del destilado
B	Flujo molar del fondo
Nmin	Mínimo numero de etapas de equilibrio
Rmin	Mínimo reflujo, L_{\min}/D
R	Reflujo L/D
VB	\bar{V}/B
N	Numero de etapas de equilibrio
	Etapas óptimas de la alimentación

Metodo McCabe-Thiele Method: Balance molar

Un balance masa en el componente LK alrededor de la columna da:

$$Fz_F = x_D D + x_B B$$

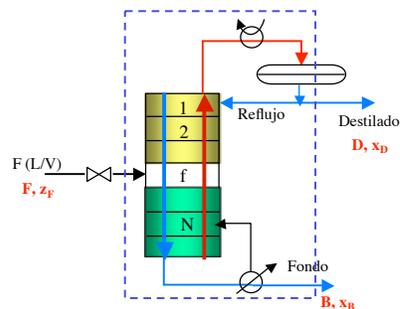
Un balance masa total alrededor de la columna da:

$$F = D + B$$

Entonces

$$D = F \left(\frac{z_F - x_B}{x_D - x_B} \right)$$

Si D, F, y z_F , están especificados, entonces x_D o x_B pueden ser calculados



Método McCabe-Thiele : Sección de rectificación

La sección de rectificación comprende de la primera etapa hasta la etapa de alimentación
Si hacemos un balance en el KL a lo largo de las etapas de rectificación incluyendo el condensador

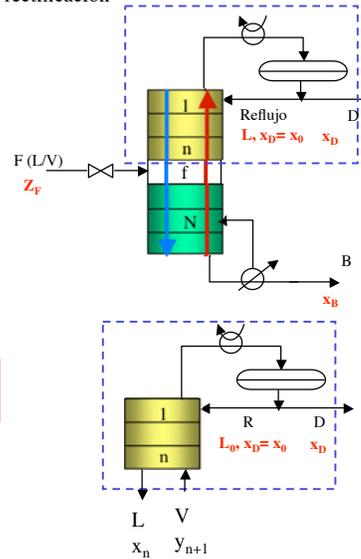
$$V_{n+1}y_{n+1} = L_nx_n + Dx_D$$

Arreglando se puede escribir

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}}x_n + \frac{D}{V_{n+1}}x_D$$

Si L y V son constantes en la columna de etapa a etapa
Entonces es una línea recta

$$y = \frac{L}{V}x + \frac{D}{V}x_D$$



Método de McCabe-Thiele: flujo molar constante

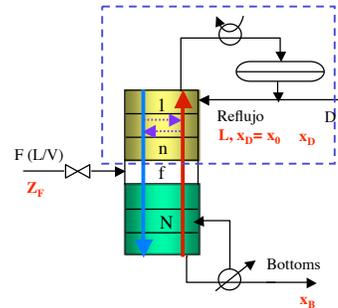
$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}}x_n + \frac{D}{V_{n+1}}x_D$$

Si L y V son constantes , entonces esto es una línea recta. Esto requiere que

- $\Delta H/\Delta y = \Delta h/\Delta x$
- La columna este bien aislada sin pérdidas de calor
- La presión de la columna sea uniforme

Todo esto conduce a condiciones de **flujo molar constante**

Para estas condiciones la cantidad de vapor transferido al liquido es igual a la cantidad de liquido transferido al vapor en cada etapa. Esto es los flujos de vapor y liquido son **constantes** en una sección entera.



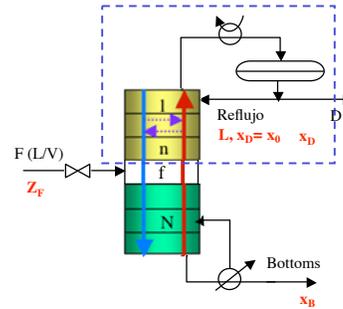
McCabe-Thiele : Línea de operación de la sección rectificación

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} x_n + \frac{D}{V_{n+1}} x_D$$

Para el caso de flujo molar constante podemos escribir:

$$y = \frac{L}{V} x + \frac{D}{V} x_D$$

Se define esta ecuación como
Línea operación de la sección
de rectificación



En función del reflujo $R = L/D$ esta puede ser escrita

$$\frac{L}{V} = \frac{L}{L+D} = \frac{L/D}{L/D + D/D} = \frac{R}{R+1}$$

y

$$\frac{D}{V} = \frac{D}{L+D} = \frac{1}{R+1}$$

McCabe-Thiele : Línea Operación

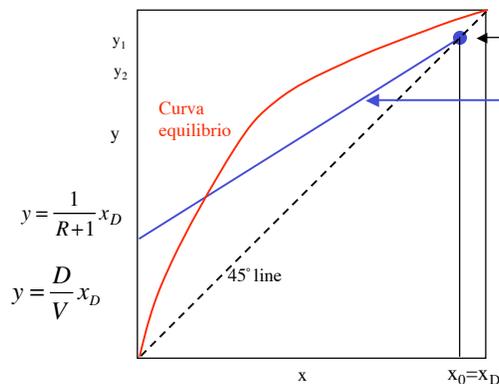
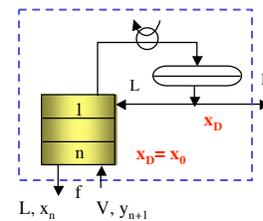
Se puede reescribir :

$$y = \frac{L}{V} x + \frac{D}{V} x_D$$

como

$$y = \frac{R}{R+1} x + \frac{1}{R+1} x_D$$

Si R y x_D son especificados se puede graficar la línea:



Con $y=0 \rightarrow y=x_D$

$$m = \frac{L}{V} = \frac{R}{R+1} < 1$$

Línea de operación Sección de
enriquecimiento (LOE)

Método McCabe-Thiele : Sección de despojo

La sección de despojo comprende desde la etapa de alimentación hasta el reboiler. Si hacemos un balance de materia en el componente ligero alrededor de la sección de despojo. Incluyendo el reboiler se tiene:

$$\bar{L}x_m = \bar{V}y_{m+1} + Bx_B$$

Si el flujo molar es constante entonces

$$y = \frac{\bar{L}}{\bar{V}}x - \frac{B}{\bar{V}}x_B$$

Se define esta ecuación como **línea de operación de la sección de despojo (LOD)**

De:

$$\bar{L} = \bar{V} + B$$

Entonces

$$\frac{\bar{L}}{\bar{V}} = \frac{\bar{V} + B}{\bar{V}} = \frac{V_B + 1}{V_B}$$

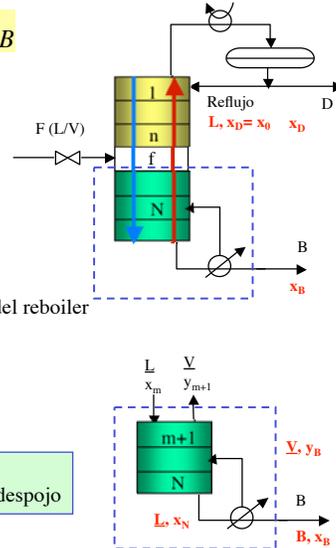
V_B es llamado reflujo del reboiler

$$V_B = \frac{\bar{V}}{B}$$

y

$$y = \frac{V_B + 1}{V_B}x - \frac{1}{V_B}x_B$$

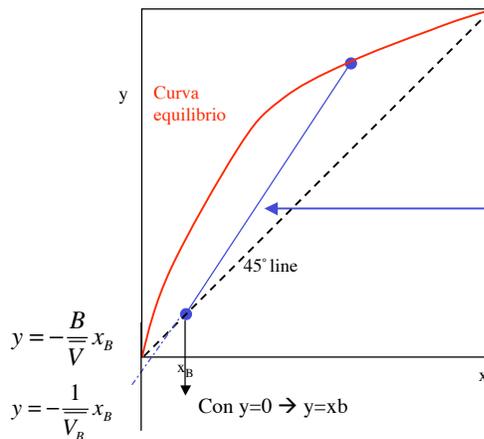
Esta también es la línea de operación de la sección de despojo



Método McCabe-Thiele: Sección de despojo

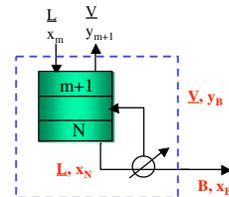
$$y = \frac{V_B + 1}{V_B}x - \frac{1}{V_B}x_B$$

Si V_B y x_B son especificados se puede graficar la LOD



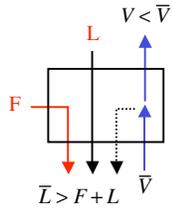
$$m = \frac{L}{V} = \frac{V_B + 1}{V_B}$$

Línea de operación de la sección de despojo

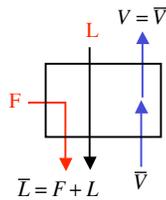


Consideraciones de la alimentación

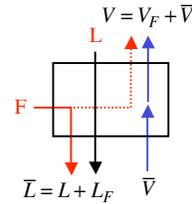
Líquido subenfriado



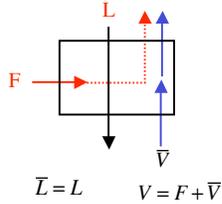
Líquido pto ebullición



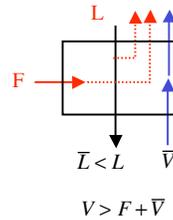
Parcialmente Vaporizado



Punto de rocío vapor



Vapor sobrecalentado



Línea q

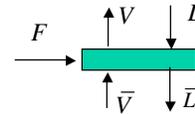
$$q = \frac{\bar{L} - L}{F} \rightarrow \frac{L_f}{F} \quad L - \bar{L} = L_f$$

Restando las dos líneas de operación: $yV = Lx + Dx_D$ menos $y\bar{V} = \bar{L}x - Bx_B$

$$y(V - \bar{V}) = (L - \bar{L})x + Dx_D + Bx_B$$

Usando balance en el componente KL: $Dx_D + Bx_B = Fz_F$

$$y(V - \bar{V}) = (L - \bar{L})x + Fz_F$$



Usando balance materia a lo largo de la etapa de alimentación:

$$F + \bar{V} + L = V + \bar{L}$$

$$\rightarrow y(F + L - \bar{L}) = (L - \bar{L})x + Fz_F$$

$$V - \bar{V} = F + L - \bar{L}$$

Simplificando y usando la definición de q:

$$y = \left(\frac{q}{q-1} \right) x - \left(\frac{z_F}{q-1} \right)$$

$$\rightarrow x = z_F \Rightarrow y = z_F$$

La línea q tienen una $m = q/(q-1)$ e interseca a $x=y$ en $y=z_F$

Línea q

$$q = \frac{L_f}{F} \quad y = \left(\frac{q}{q-1} \right) x - \left(\frac{z_F}{q-1} \right)$$

a) Líquido saturado $q = 1 \rightarrow m = \infty$

b) Vapor saturado $q = 0 \rightarrow m = 0$

c) Líquido subenfriado

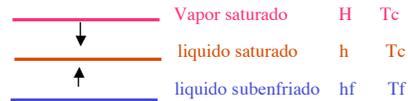
Balace de energía

$$FC_{pf}(T_c - T_f) = V_f(h - H) = -V_f\lambda_c$$

$$\frac{V_f}{F} = -\frac{C_{pf}(T_c - T_f)}{\lambda_c}$$

$$q = \frac{L_f}{F} \rightarrow F = L_f + V_f \rightarrow 1 = q + \frac{V_f}{F} \rightarrow q = 1 - \frac{V_f}{F}$$

$$q = 1 + \frac{C_{pf}(T_c - T_f)}{\lambda_c}$$



Línea q

$$q = \frac{L_f}{F} \quad y = \left(\frac{q}{q-1} \right) x - \left(\frac{z_F}{q-1} \right)$$

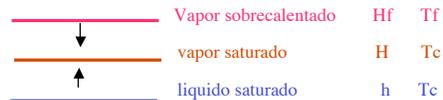
d) Vapor sobrecalentado

$$FC_{pf}(T_c - T_f) = L_f(H - h) = L_f\lambda_e$$

$$\frac{L_f}{F} = \frac{C_{pf}(T_c - T_f)}{\lambda_e}$$

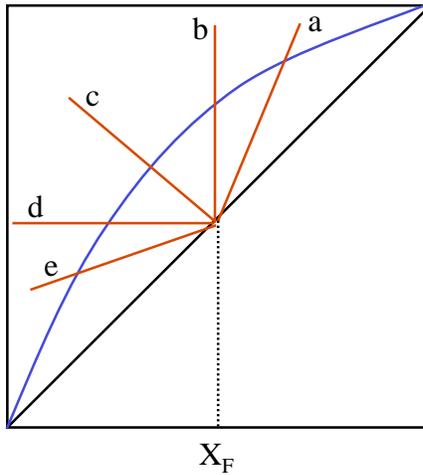
$$q = \frac{L_f}{F}$$

$$q = \frac{C_{pf}(T_c - T_f)}{\lambda_e}$$



Consideraciones de la alimentación

$$q = \frac{L_f}{F}$$



Pendiente: $q/q-1$

a- líquido subenfriado, $q > 1$

b- líquido saturado, $q = 1$

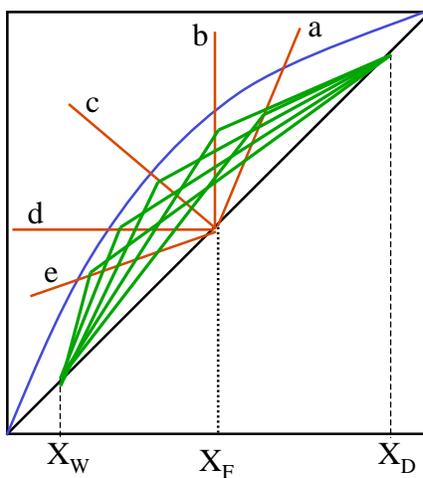
c- mezcla L - V, $0 < q < 1$

d- vapor saturado, $q = 0$

e- vapor sobrecalentado, $q < 0$

Consideraciones de la alimentación

Pendiente: $q/q-1$



a- líquido subenfriado, $q > 1$

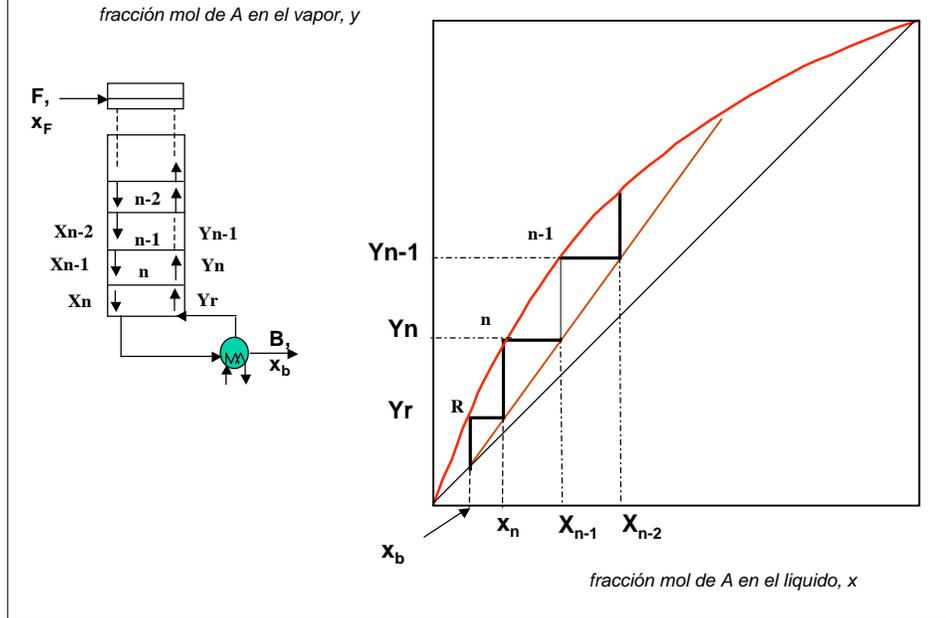
b- líquido saturado, $q = 1$

c- mezcla L - V, $0 < q < 1$

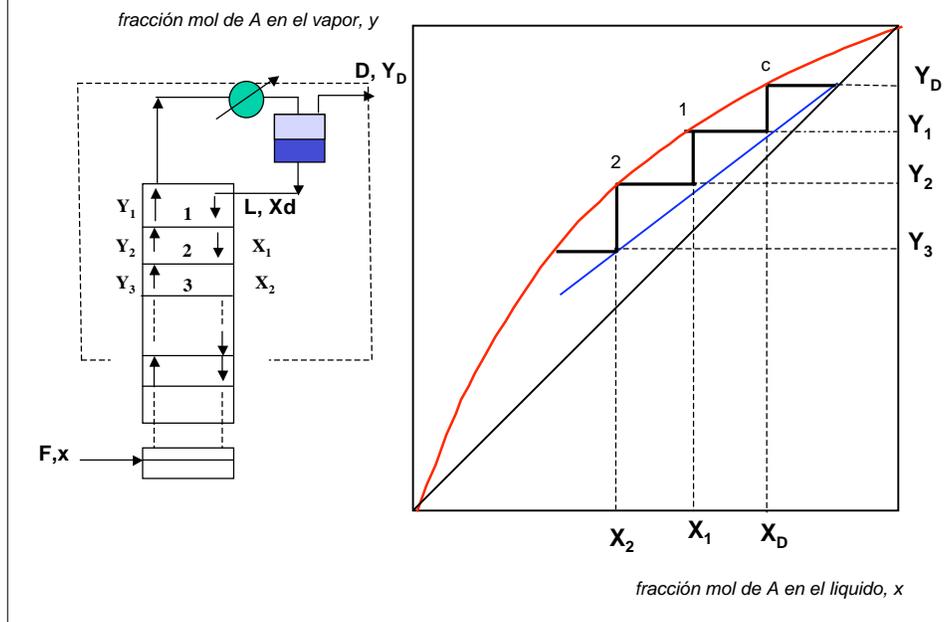
d- vapor saturado, $q = 0$

e- vapor sobrecalentado, $q < 0$

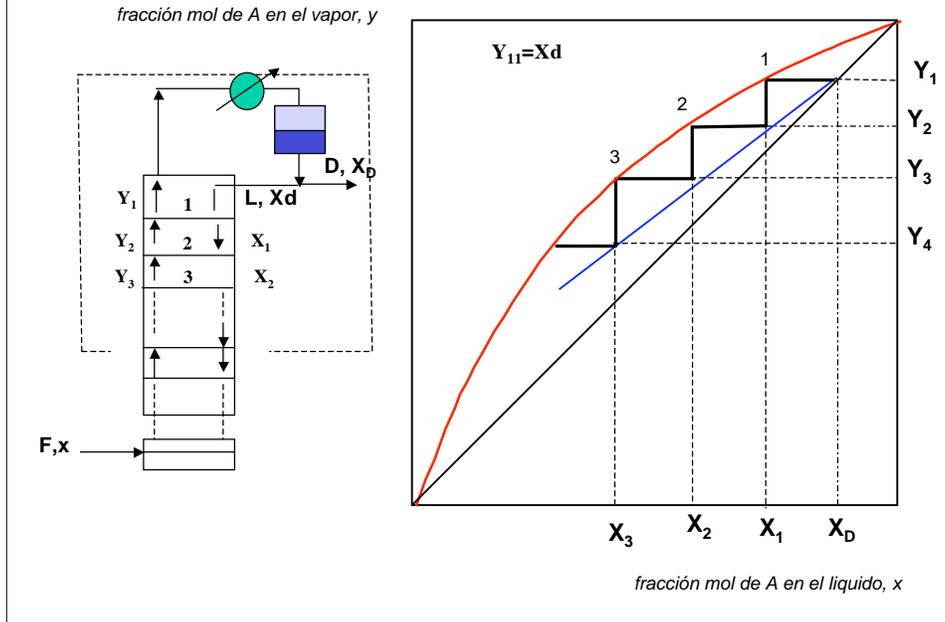
Método McCabe: Trazado en la zona de despojo



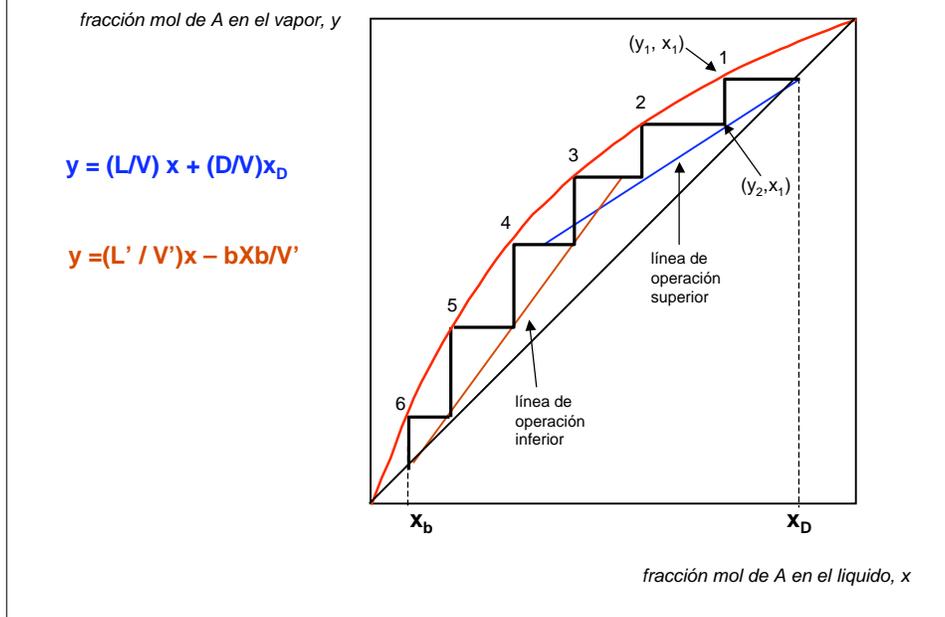
Trazado en la zona de enriquecimiento: condensador parcial



Trazado en la zona de enriquecimiento: condensador total

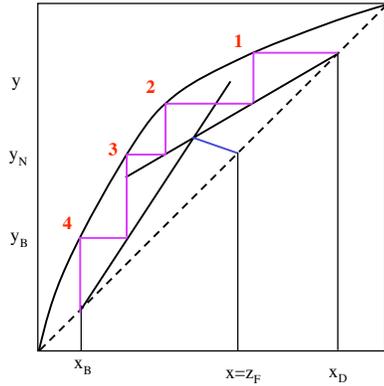


Método McCabe-Thiele

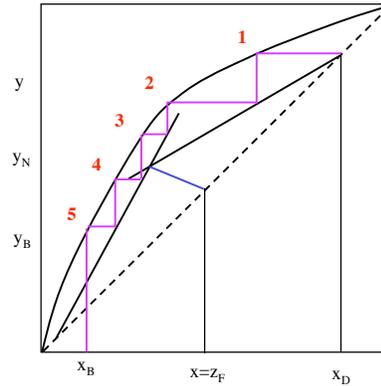


Localización de la alimentación McCabe-Thiele

Localización de la alimentación en una etapa muy baja (etapa 3)

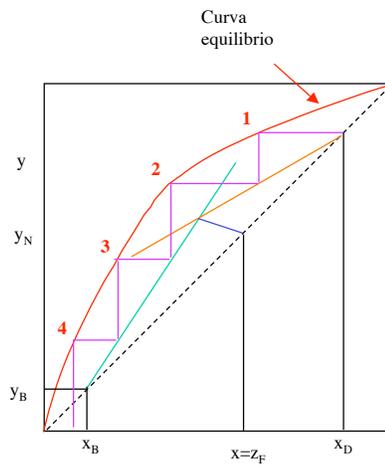


Localización de la alimentación en una etapa muy alta (etapa 2)



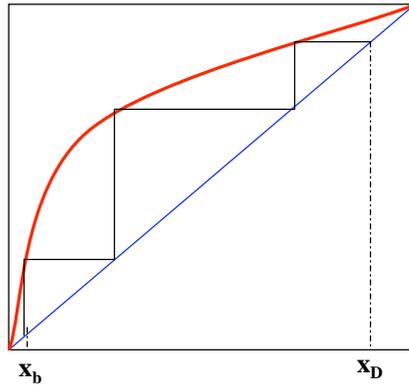
- 1- Para un número determinado de etapas es con el que se logra la mayor diferencia entre y y x .
2. Si no se especifican el número de etapas, es el que permite una determinada separación con el menor número de etapas.

Localización óptima de la alimentación



Relación de reflujo máxima: Numero mínimo de etapas

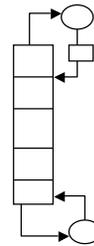
$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{1}{R+1}x_D$$



$$D = 0$$

$$L = V$$

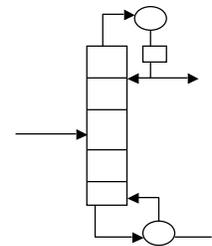
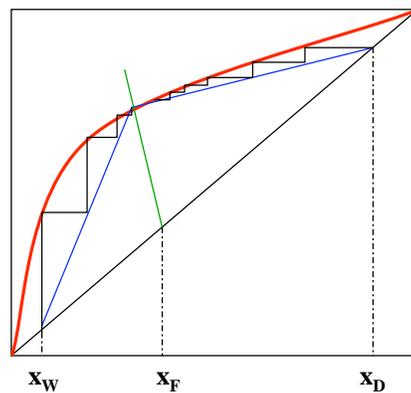
$$L/V = 1$$



Cuando la columna trabaja a reflujo total. No hay alimentación, ni salidas de destilado ni de fondos durante la operación de la columna

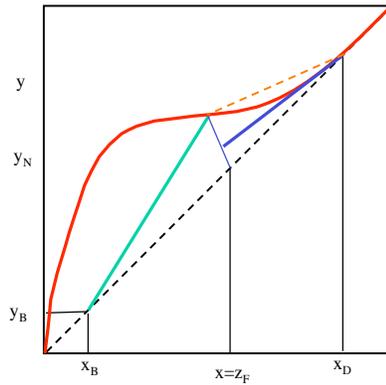
Relación de reflujo mínima

N_T
máximo

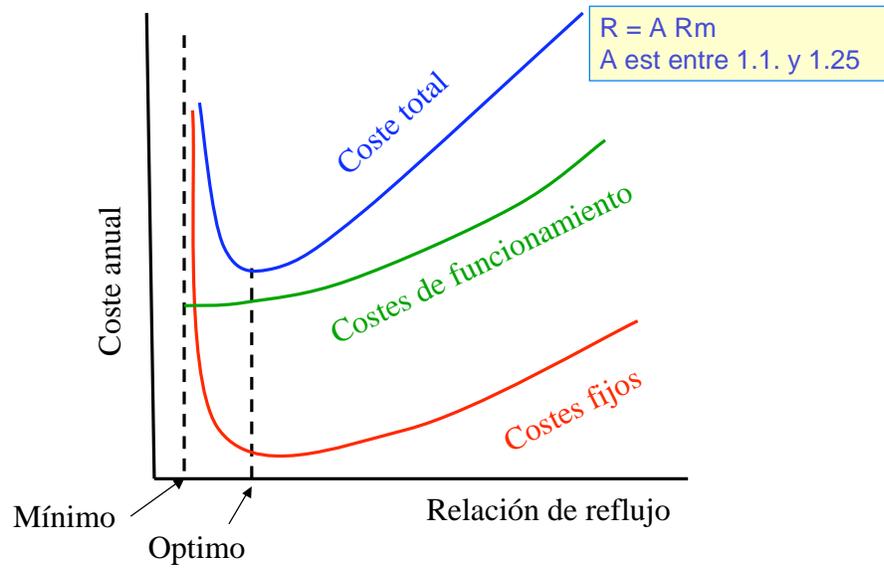


Cuando la línea de operación de la zona de enriquecimiento interseca la curva de equilibrio y se requiere una cantidad infinita de etapas.

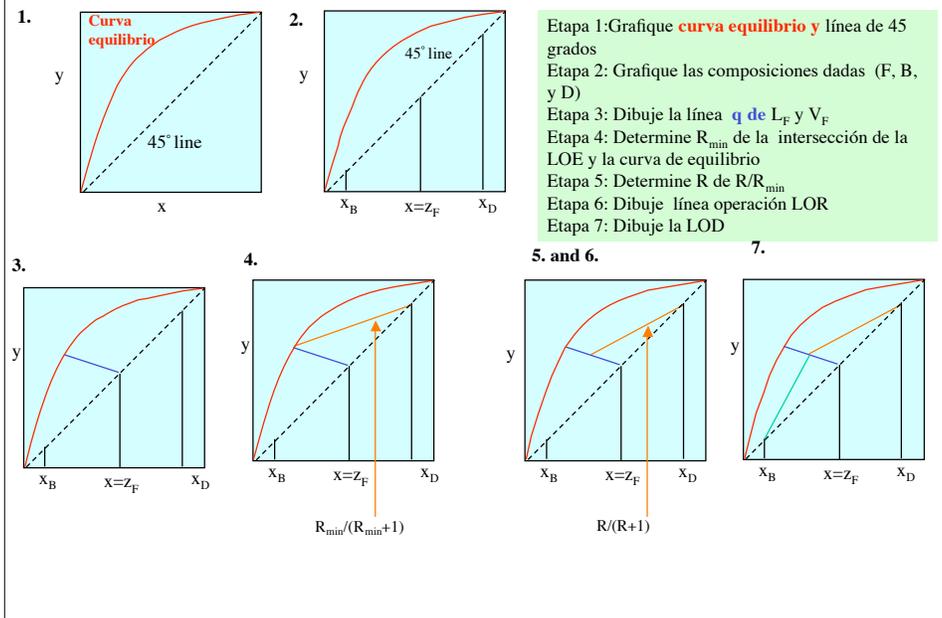
Minimo Reflujo no ideal



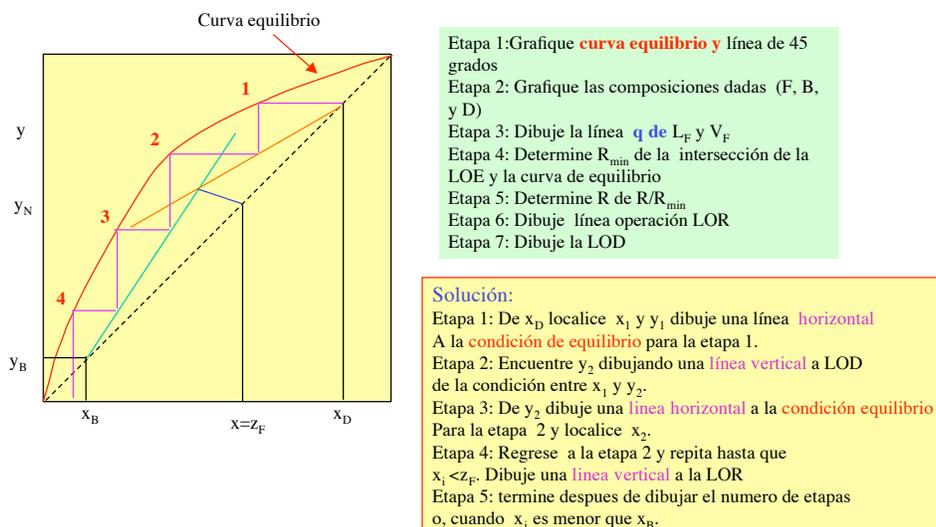
Selección de la relación de reflujo



Construcción McCabe-Thiele



Determinación de N y x_B por McCabe-Thiele

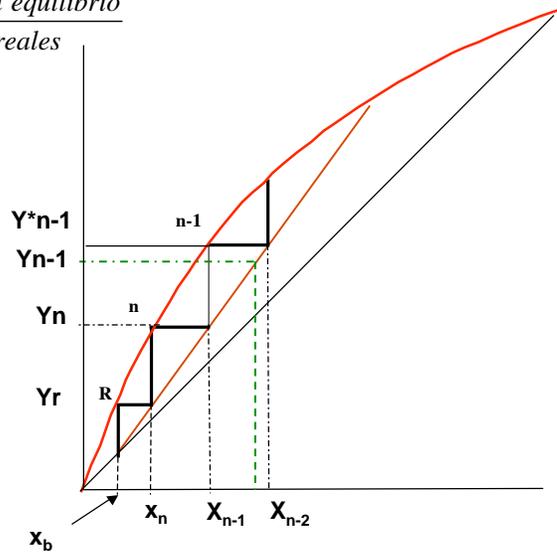


Eficiencia

$$E = \frac{N^\circ \text{ de etapas en equilibrio}}{N^\circ \text{ etapas reales}}$$

$$E_{MV} = \frac{Y_{n-1} - Y_n}{Y_{n-1}^* - Y_n}$$

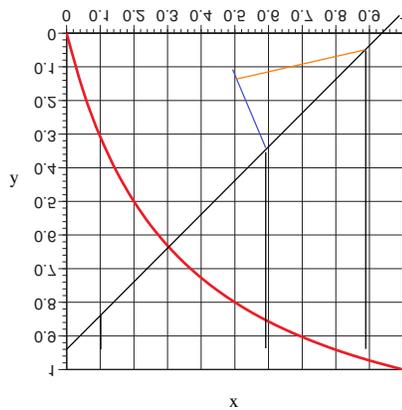
$$E_{ML} = \frac{X_{n+1} - X_n}{X_{n+1} - X_n^*}$$



Ejemplo: Determinación de N y x_B por McCabe-Thiele

Dado:

100 Kmol/hr de una alimentación de 60% benceno y 40% heptano es separada por destilación. El destilado tiene que ser 90% benceno y el fondo 10% benceno. La alimentación entra a la columna como 30mol% vapor. Use R 1.5 veces el mínimo. Asuma volatilidad relativa de 4 y que la presión es constante en la columna =1 atm



Construcción:

Etapa 1: Dibuje **curva equilibrio** y línea 45 grados.
La curva de equilibrio es dibujada usando :

$$y = \frac{\alpha x}{1 + x(\alpha - 1)}$$

Etapa 2: Dibuje las composiciones dadas (F, B, y D)

Etapa 3: Dibuje **línea-q**- de L_F y V_F . Use

$$q = \frac{\bar{L} - L}{F} = \frac{L + L_F - L}{F} = \frac{L_F}{F} = 0.7$$

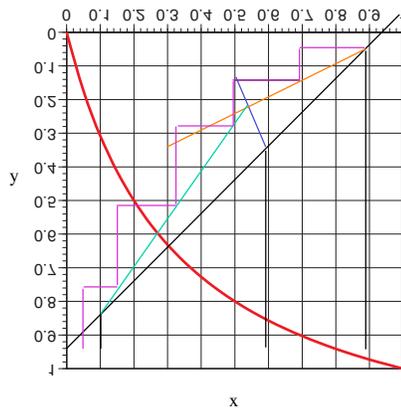
$$y = \left(\frac{q}{q-1} \right) x - \left(\frac{z_F}{q-1} \right) = -2.333x + 2$$

Etapa 4: Determine R_{\min} de la intersección de LOR Y la curva de equilibrio.

Esta pasa en una pendiente aproximadamente de .25

$$0.25 = \frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1} \Rightarrow R_{\min} = 0.333$$

Ejemplo: Determinación de N y x_B por McCabe-Thiele



Resultados:
 Etapa alimentación 2 y 3.
 5 etapas (mínimas etapas = 3.2)
 $x_B=0.05\%$ benceno

Etapa 5: De $R_{\min}=0.333$ y $R=3R_{\min}$ se tiene que $R=1$
 Y la pendiente de la recta de LOR es 0.5
 Etapa 6: Dibuje la línea con pendiente 0.5 la cual es la LOR
 Etapa 7. Dibuje la línea de operación de la composición del fondo, con la intersección de la línea de rectificación y q

Solución:

Etapa 1: De x_D localice x_1 y y_1 dibuje una **línea horizontal** A la **condición equilibrio** para la etapa 1
 Etapa 2: Encuentre y_2 dibujando una **línea vertical** a la LOD
 De la condición del balance de masa entre x_1 and y_2 .
 Etapa 3: De y_2 dibuje una **línea horizontal** a la **condición equilibrio** para la etapa 2 para localizar x_2 .
 Etapa 4: regrese a la etapa 2 y repita hasta $x_i < x_F$.