

Destilación: Índice

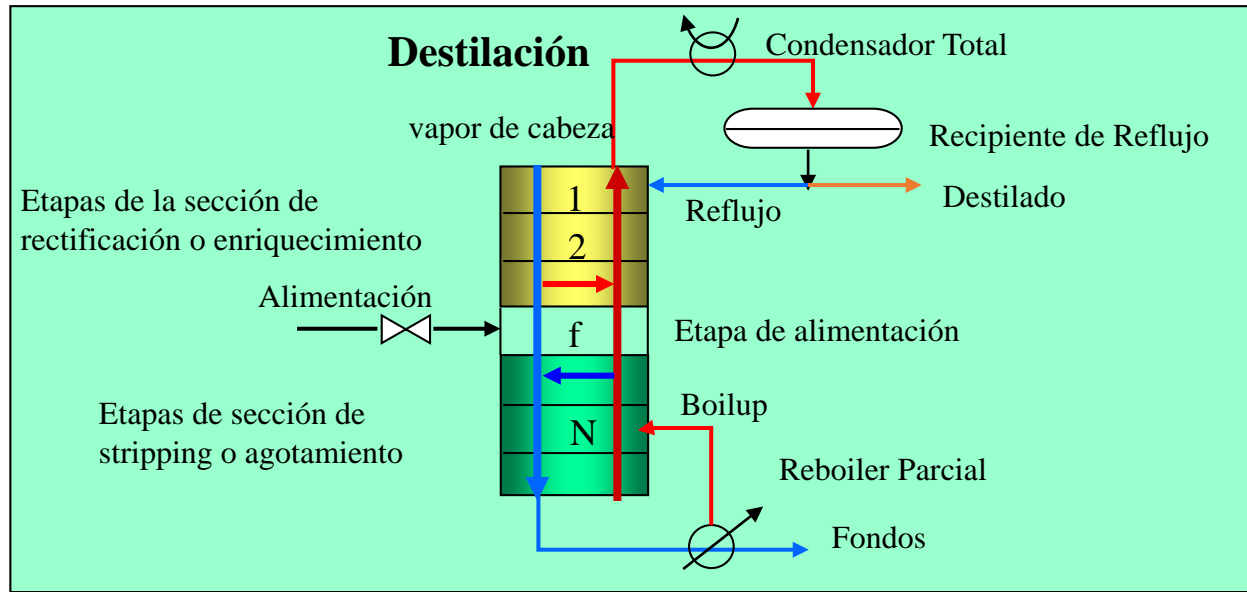
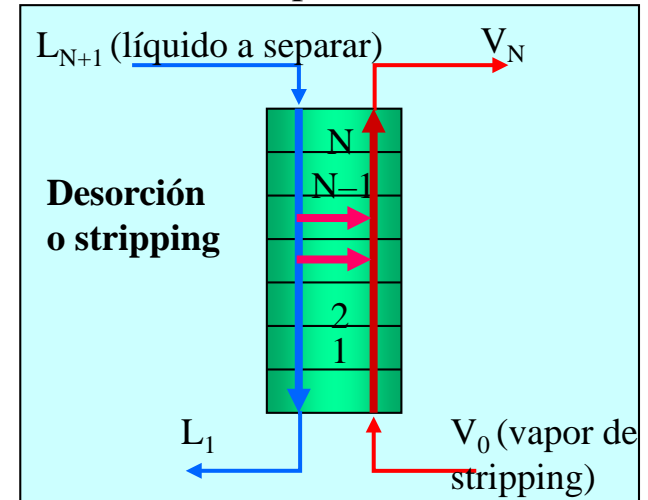
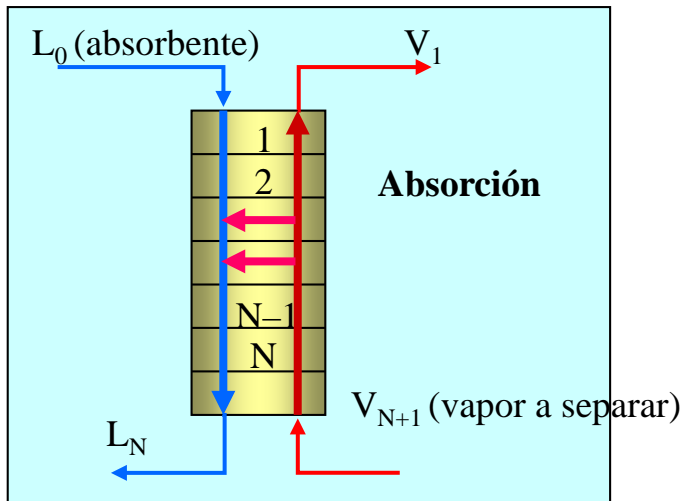
5 Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele

- Curva de equilibrio y volatilidad relativa
- Especificaciones requeridas
- Balances de materia
 - Línea de operación de la sección de rectificación
 - Línea de operación de la sección de agotamiento
 - Condiciones de la alimentación: línea “q”
 - Desarrollo método gráfico
 - Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio
 - Determinación de la relación de reflujo mínima
- Eficacia de Murphree

6 Sistemas de control

McCabe-Thiele : Método de Cálculo Columnas de Destilación

Las **Operaciones Unitarias** de ABSORCIÓN y DESORCIÓN son métodos comunes para la separación de mezclas de vapor y de líquido. La DESTILACIÓN es una OU más completa para lograr separaciones y que combina la absorción y desorción en una misma operación.

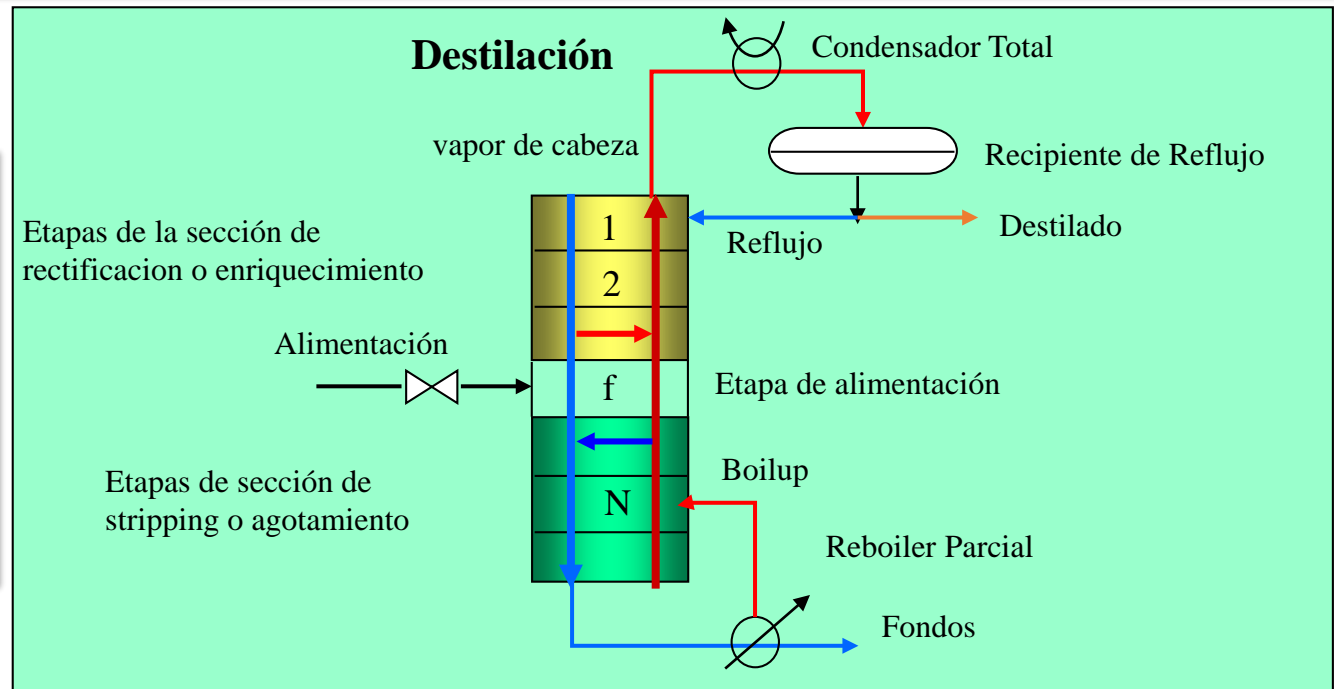


McCabe-Thiele : Método de Cálculo Columnas de Destilación

Una columna de **DESTILACION BINARIA** de múltiples etapas en contracorriente consiste en :

- Una columna de **N etapas teóricas de Equilibrio**.
- Un **condensador total** para producir el reflujo líquido que tiene el papel de absorbente y el destilado líquido
- Una **caldera o reboiler** parcial que produce el boilup de vapor que actúa como agente de desorción o stripping y el producto de fondo
- Una **etapa de alimentación** .

El objetivo de la destilación es separar una corriente **Alimento** en una corriente de **Destilado** rico en el componente clave ligero y una corriente de **Fondo** rica en el componente clave pesado



Esta configuración permitirá una separación excepto en el caso de presencia de azeótropo, donde la composición de uno de los productos se aproximará a la del azeótropo

McCabe-Thiele : Método de Cálculo Columnas de Destilación

La alimentación contiene un componente más volátil (clave ligero CL) y otro menos volátil (clave pesado CP). En las condiciones de presión y temperatura a la entrada de la columna, la alimentación puede ser vapor, líquida o mezclas de ambas . La composición de la alimentación se expresa mediante la fracción molar del CL Z_F . La composición de la corriente de fondo se expresa mediante la fracción molar del CL X_B , y la composición del destilado mediante la fracción del CL X_D .

La dificultad para conseguir una separación depende de la volatilidad relativa, α entre el CL(1) y el CP (2)

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

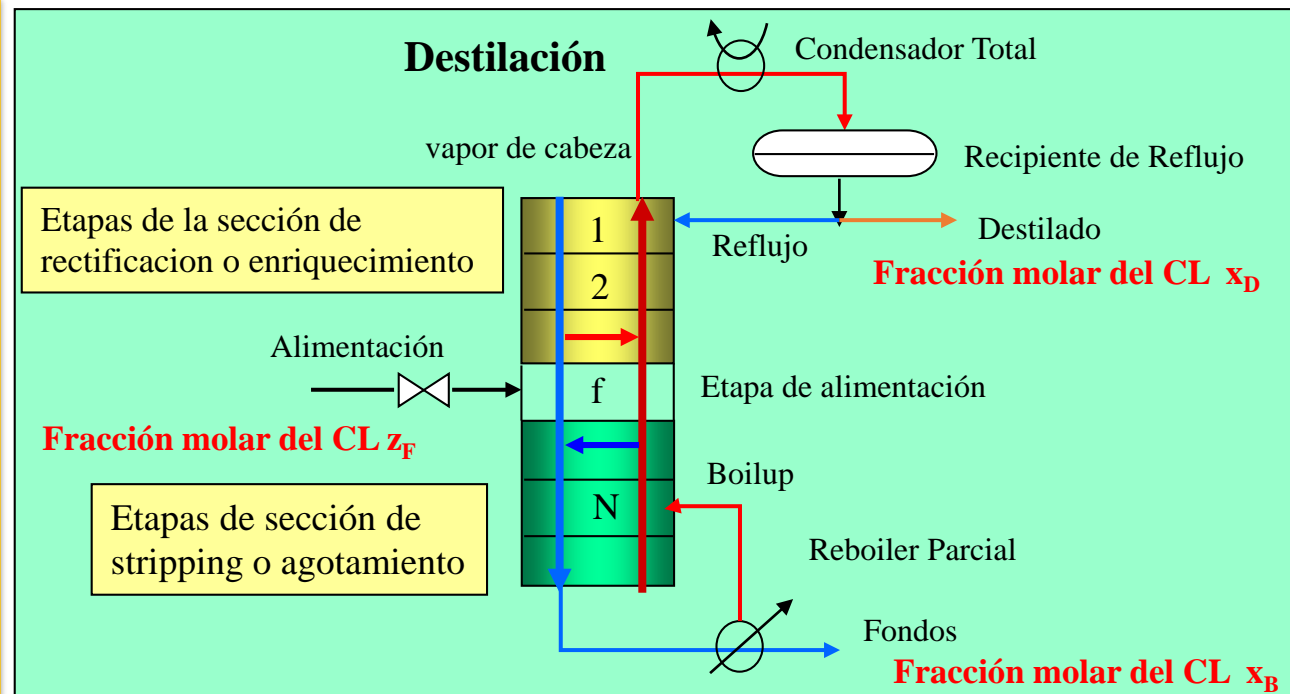
Si la mezcla tiene comportamiento ideal, aplicando la ley de Raoult

$$K_i = P_i^o / P$$

En este caso la volatilidad relativa es igual a la relación de presiones de vapor.

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

Solo función de T



Generalmente cuando T aumenta, α disminuye hasta un punto cercano a la unidad donde la separación ya no es posible

Destilación: Índice

5 Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele

- **Curva de equilibrio y volatilidad relativa**
- Especificaciones requeridas
- Balances de materia
 - Línea de operación de la sección de rectificación
 - Línea de operación de la sección de agotamiento
 - Condiciones de la alimentación: línea “q”
 - Desarrollo método gráfico
 - Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio
 - Determinación de la relación de reflujo mínima
- Eficacia de Murphree

6 Sistemas de control

McCabe-Thiele : Curva de Equilibrio

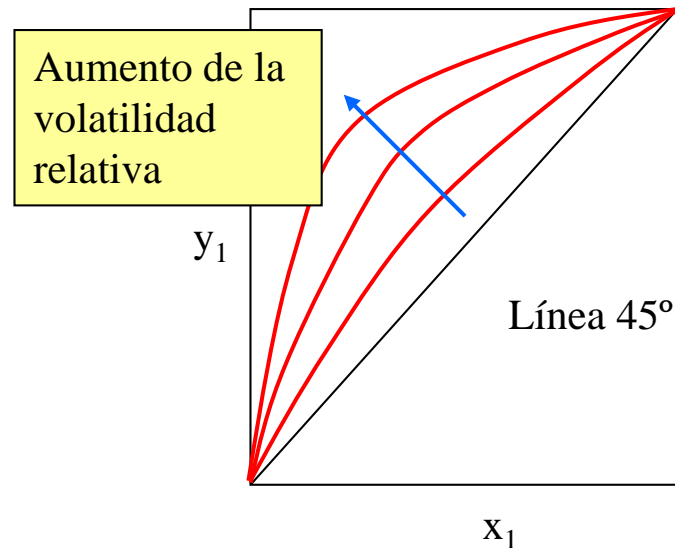
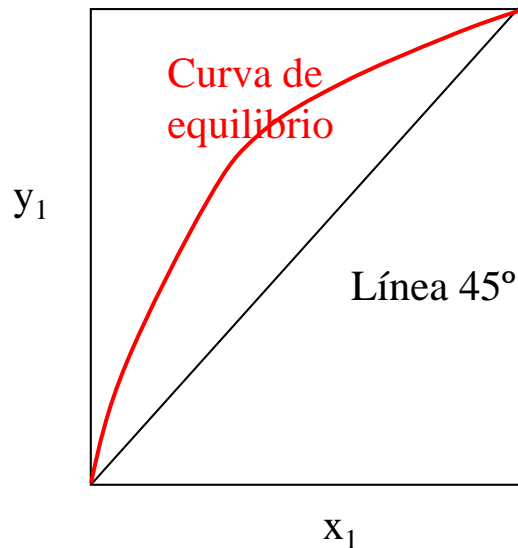
Se puede expresar la volatilidad relativa en función de las fracciones molares del CL y CP:

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

La volatilidad relativa puede considerarse constante en toda la columna cuando los componentes tienen puntos de ebullición parecidos, en el caso contrario α dependerá de la composición

Despejando la fracción del CL en la fase vapor:

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



Destilación: Índice

5 Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele

- Curva de equilibrio y volatilidad relativa
- **Especificaciones requeridas**
- Balances de materia
 - Línea de operación de la sección de rectificación
 - Línea de operación de la sección de agotamiento
 - Condiciones de la alimentación: línea “q”
 - Desarrollo método gráfico
 - Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio
 - Determinación de la relación de reflujo mínima
- Eficacia de Murphree

6 Sistemas de control

Especificaciones Requeridas para el Método de McCabe-Thiele

Especificaciones

F	Caudal de alimentación
z_F	Fracción molar CL en el Alimento
P	Presión de operación de la columna (se considera constante)
	Condiciones de fase de la alimentación @P
	Curva de equilibrio L-V para la mezcla binaria @ P
	Tipo de condensador (total o parcial)
x_D	Fracción molar CL en el Destilado
x_B	Fracción molar CL en el Fondo
R/R_{\min}	Cociente entre el Reflujo y Reflujo mínimo

Resultados

D	Caudal de Destilado
B	Caudal de Fondo
N_{\min}	Mínimo número de etapas de equilibrio
R_{\min}	Mínima relación de reflujo, L_{\min}/D
R	Relación de reflujo, L/D
V_B	relación de Boilup , \underline{V}/B
N	Número de etapas de equilibrio
	Localización óptima de la alimentación
	Composiciones del vapor y líquido en cada etapa

Destilación: Índice

5 Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele

- Curva de equilibrio y volatilidad relativa
- Especificaciones requeridas
- **Balances de materia**
 - Línea de operación de la sección de rectificación
 - Línea de operación de la sección de agotamiento
 - Condiciones de la alimentación: línea “q”
 - Desarrollo método gráfico
 - Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio
 - Determinación de la relación de reflujo mínima
- Eficacia de Murphree

6 Sistemas de control

Método de McCabe-Thiele : Balance Global de Materia en la Columna

Balance de materia del CL alrededor de la columna:

$$Fz_F = x_D D + x_B B$$

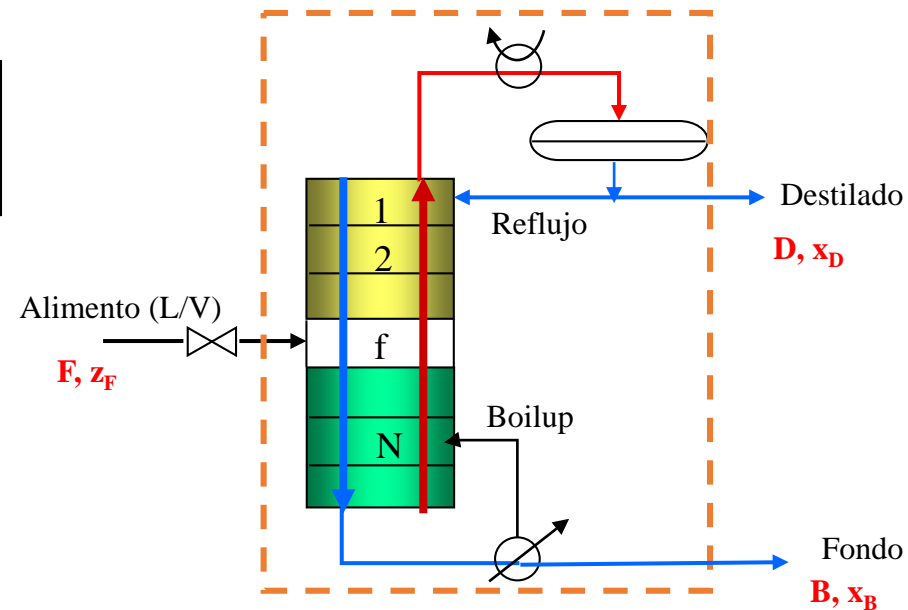
Balance global de materia alrededor de la columna :

$$F = D + B$$

El valor fracción molar del CL en la Alimentación es menor que la del Destilado y mayor que la del Fondo

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

Si D , F , y z_F , están especificados ,
entonces se puede especificar x_D o x_B



Método de McCabe-Thiele: B.M en Sección de Rectificación

➤ La zona de Rectificación comprende desde la etapa 1 hasta la etapa de alimentación

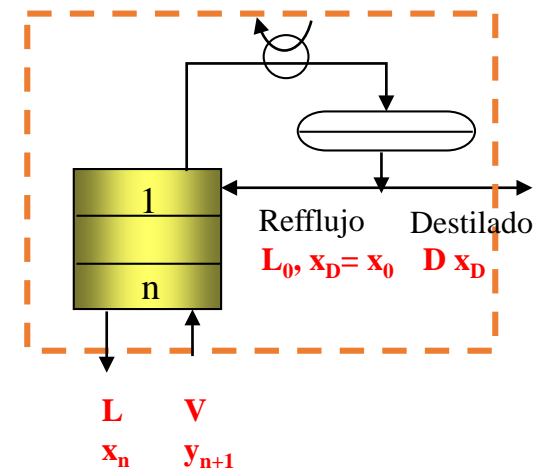
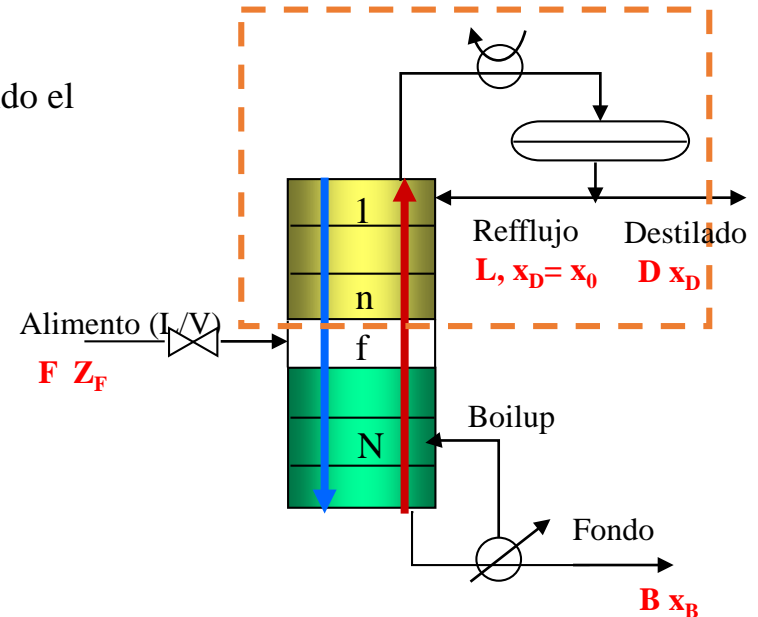
➤ El balance de materia del CL en la zona de rectificación incluyendo el condensador:

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

Reagrupando términos:

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

Si L y V son constantes a lo largo de la columna, esta ecuación representa una línea recta



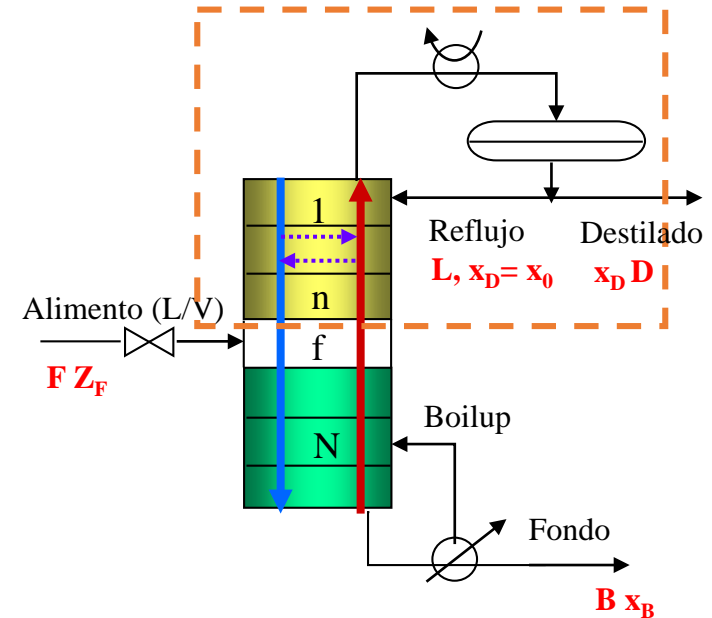
Método de McCabe-Thiele: Caudal Molar Constante

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

Los requerimientos para que L y V sean constantes, y por lo tanto esta función sea una recta, son:

- Los dos componentes tengan igual y constantes entalpías de vaporización.
- Que los cambios en las capacidades caloríficas sea despreciables comparados con los calores de vaporización.
- La columna esté bien aislada y son despreciables las pérdidas de calor al exterior.
- La presión en la columna es uniforme.

Estas condiciones aseguran **caudales molares constantes** a lo largo de la columna .



En estas condiciones los caudales molares transferidos desde el vapor al líquido y viceversa son iguales, entonces los caudales de vapor y líquido son **constantes** en toda la sección

Destilación: Índice

5 Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele

- Curva de equilibrio y volatilidad relativa
- Especificaciones requeridas
- **Balances de materia**
 - **Línea de operación de la sección de rectificación**
 - Línea de operación de la sección de agotamiento
 - Condiciones de la alimentación: línea “q”
 - Desarrollo método gráfico
 - Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio
 - Determinación de la relación de reflujo mínima
- Eficacia de Murphree

6 Sistemas de control

Método de McCabe-Thiele: Línea de Operación de la Sección de Rectificación

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

Considerando caudales molares constantes, se pueden eliminar las referencias a la etapa de procedencia del vapor y líquido.

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

Esta ecuación se denomina **LÍNEA DE OPERACIÓN DE LA SECCIÓN DE RECTIFICACION**

El líquido que entra en la etapa 1 es el Reflujo L y su relación con el caudal de destilado **L/D es la relación de reflujo R** . Si los caudales molares son constantes entonces también lo será R .

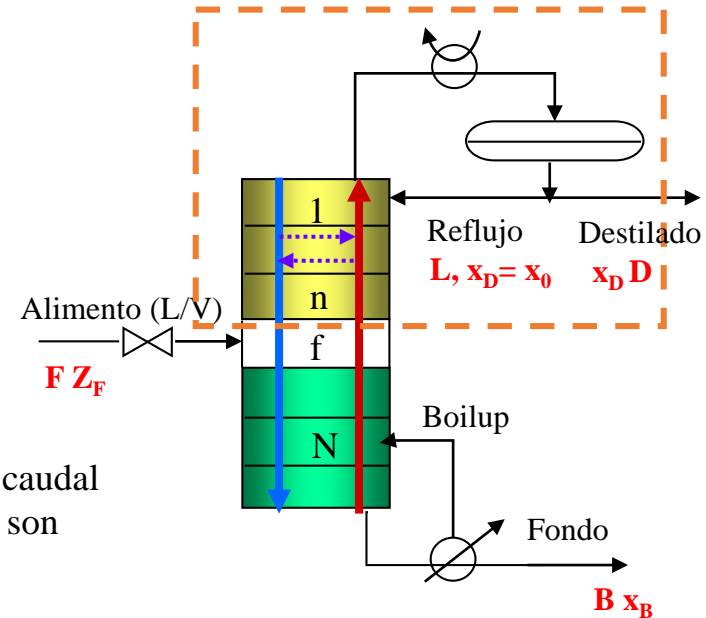
Como:

$$V = L + D$$

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

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

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



Método de McCabe-Thiele : Línea de Operación de la Sección de Rectificación

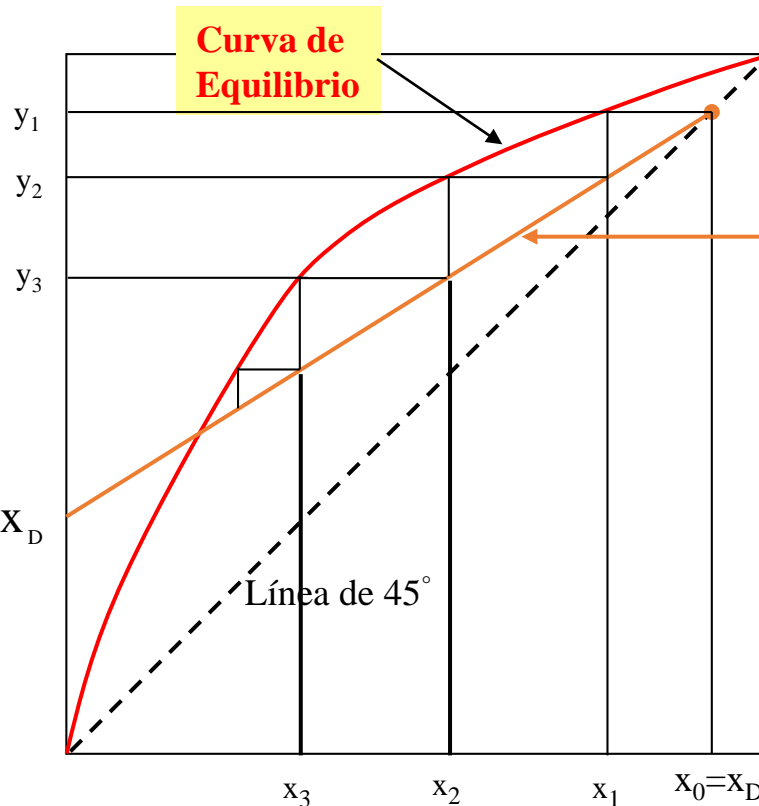
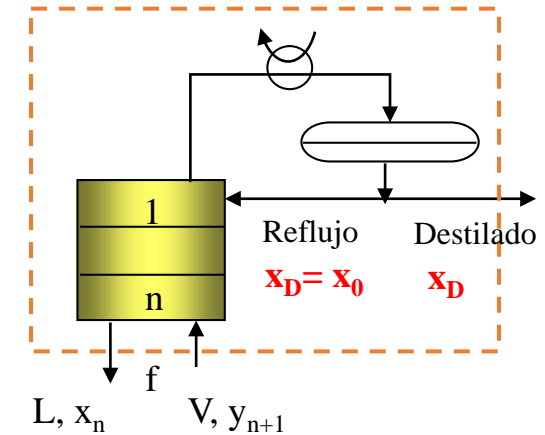
Se puede escribir :

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

como

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

Si R y x_D están especificados se puede representar la Línea de Operación



Sección de Rectificación, la pendiente de la Línea de Operación es

$$L/V = R/(R+1) < 1$$

- La curva de equilibrio representa las composiciones del vapor y líquido en cada etapa
- La recta de operación representa las composiciones del líquido de la etapa x_n y las del vapor de la y_{n+1}

Destilación: Índice

5 Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele

- Curva de equilibrio y volatilidad relativa
- Especificaciones requeridas
- **Balances de materia**
 - Línea de operación de la sección de rectificación
 - **Línea de operación de la sección de agotamiento**
 - Condiciones de la alimentación: línea “q”
 - Desarrollo método gráfico
 - Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio
 - Determinación de la relación de reflujo mínima
- Eficacia de Murphree

6 Sistemas de control

Método de McCabe-Thiele: Sección de Agotamiento

- La sección de Agotamiento o de Stripping comprende desde la etapa de alimentación hasta la etapa N, incluyendo la sección de la Caldera o Reboiler
- Realizando un balance del componente CL alrededor de la zona de agotamiento :

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

- Reagrupando términos y considerando constantes los caudales molares:

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

Esta función se denomina **LÍNEA DE OPERACIÓN DE LA SECCIÓN DE AGOTAMIENTO O STRIPPING**

- Como :

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

- Entonces

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

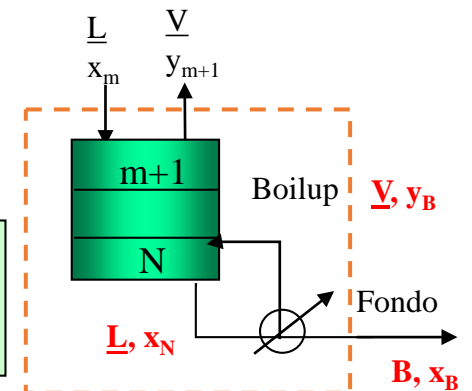
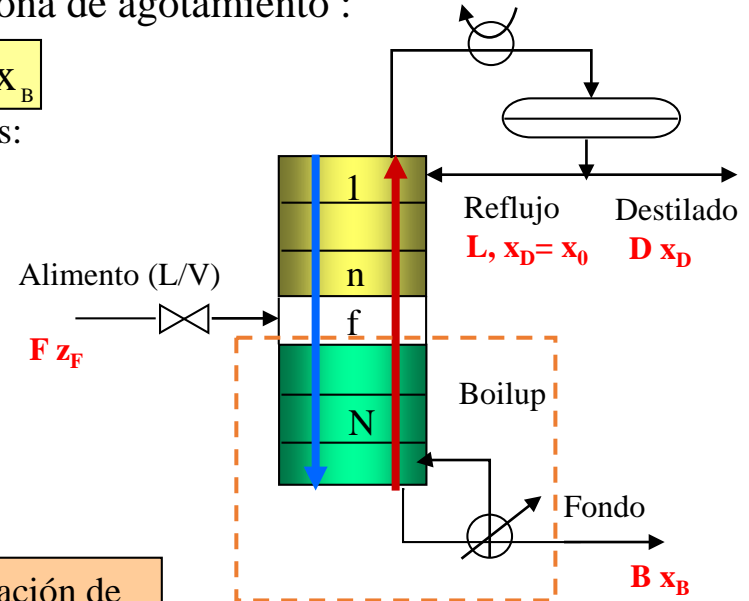
V_B se denomina relación de vaporización o Boilup .

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

- y

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

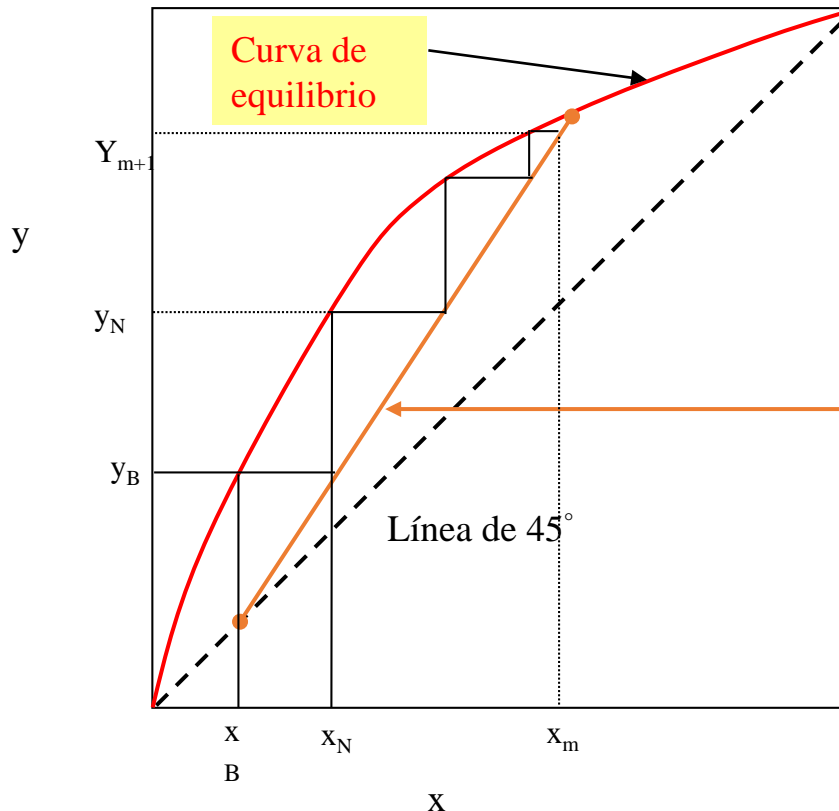
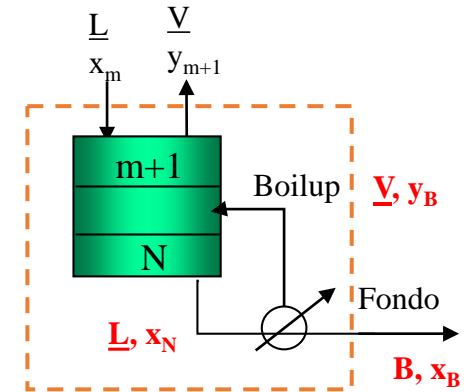
Es otra expresión de la línea de operación de la sección de agotamiento.



Método de McCabe-Thiele : Sección de Agotamiento

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

Si V_B y x_B se encuentran especificados se puede representar la línea de operación de la sección de agotamiento junto con la curva de equilibrio.



La pendiente de la Línea de la sección de agotamiento es

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

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

Destilación: Índice

5 Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele

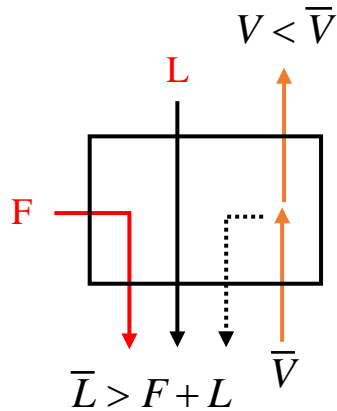
- Curva de equilibrio y volatilidad relativa
- Especificaciones requeridas
- **Balances de materia**
 - Línea de operación de la sección de rectificación
 - Línea de operación de la sección de agotamiento
 - **Condiciones de la alimentación: línea “q”**
 - Desarrollo método gráfico
 - Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio
 - Determinación de la relación de reflujo mínima
- Eficacia de Murphree

6 Sistemas de control

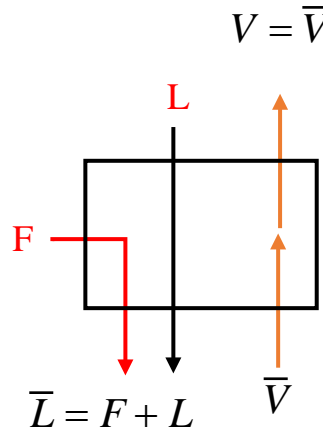
Consideraciones sobre la Etapa de Alimentación

En la determinación de las líneas de operación de las secciones de rectificación y agotamiento se precisan conocer las composiciones del fondo (X_B), destilado (X_D) y las relaciones de reflujo (R) y de vaporización (V_B). Las composiciones pueden ser especificadas independientemente, pero R y V_B dependerán de la relación vapor/líquido de la alimentación

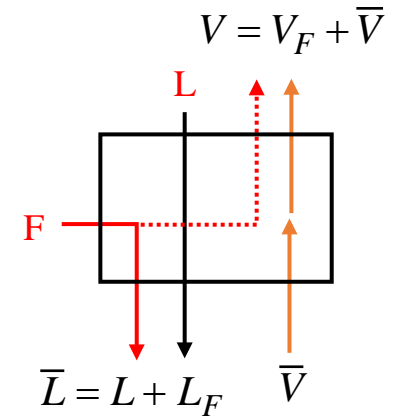
Líquido Subenfriado



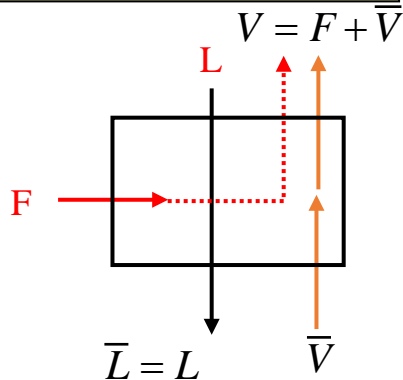
Líquido en el Punto de Burbuja



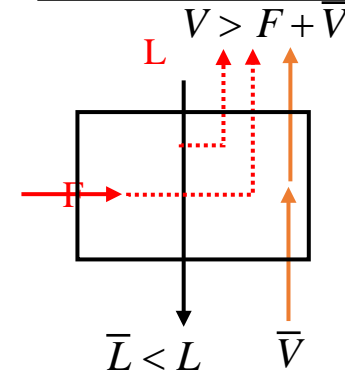
Parcialmente Vaporizada



Vapor en el Punto de Rocío



Vapor recalentado



Condiciones de la Alimentación

Considerando los casos donde la alimentación no es líquido subenfriado ni un vapor recalentado :

Balance alrededor de la caldera

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

Balance alrededor del condensador:

$$V = D + L$$

Balance alrededor de la columna:

$$V_F + L_F = D + B$$

Vapor que entra en la sección de rectificación:

$$V = \bar{V} + V_F$$

Líquido que entra en la sección de agotamiento:

$$\bar{L} = L + L_F$$

Sustituyendo en el balance de la columna:

$$V_F + \bar{L} - L = D + B$$

Sustituyendo B por el balance de la caldera

$$V_F + \bar{L} - L = D + \bar{L} - \bar{V}$$

$$\bar{V} = L + D - V_F$$

El vapor que entra en la sección de rectificación es el vapor que le llega al condensador menos el vapor presente en el alimento

Excepto en los casos donde el alimento sea vapor recalentado o líquido subenfriado, el vapor producido en la caldera se relaciona con la relación de reflujo mediante el balance de materia.

$$\bar{V} = L + D - V_F$$

Dividiendo por B se llega a la relación de vaporización en la caldera.

$$V_B \equiv \frac{\bar{V}}{B} = \frac{L + D - V_F}{B}$$

La destilación puede especificarse mediante la Relación de Reflujo (R) o la Relación de Vaporización en la caldera (V_B), pero lo más frecuente es especificar la relación de reflujo (o R/R mínima)

La Línea “q”

Se define el parámetro “q” mediante:

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

Fracción líquida presente en la alimentación

Restando las expresiones de las dos líneas de operación:

$$yV = Lx + Dx_D \quad y\bar{V} = \bar{L}x - Bx_B$$

Se llega a :

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

Que con el balance del CL:

$$Dx_D + Bx_B = Fz_F$$

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

Utilizando el balance alrededor de la etapa de alimentación para eliminar el caudal de vapor

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

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

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

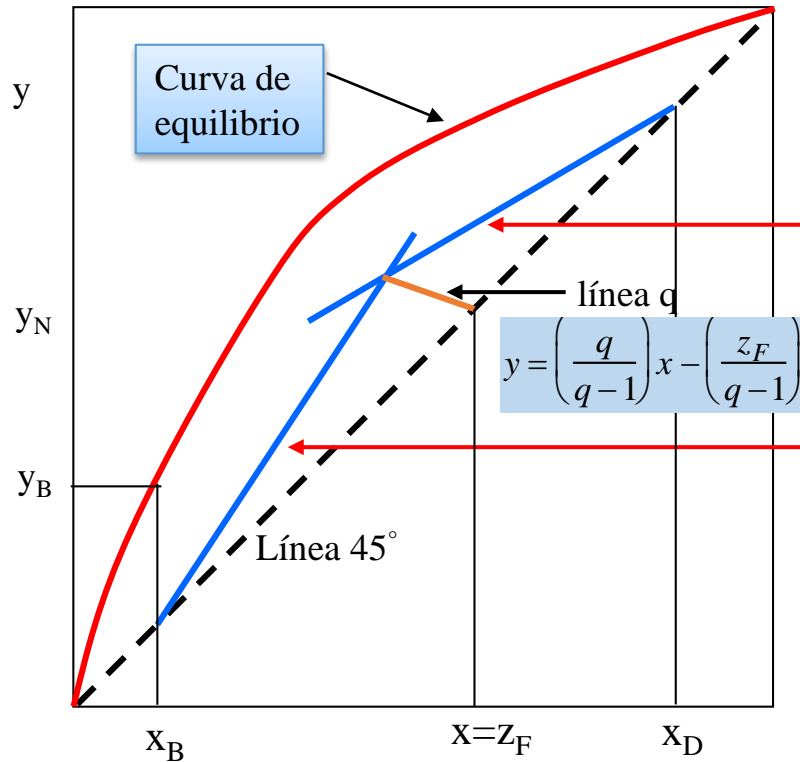
Simplificando y sustituyendo la expresión del parámetro “q” se llega a la expresión de la **Línea “q”**

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

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

La línea “q” tiene una pendiente de $q/(q-1)$ corta a la línea de 45° en $y = z_F$

Líneas de Construcción para el Método de McCabe-Thiele



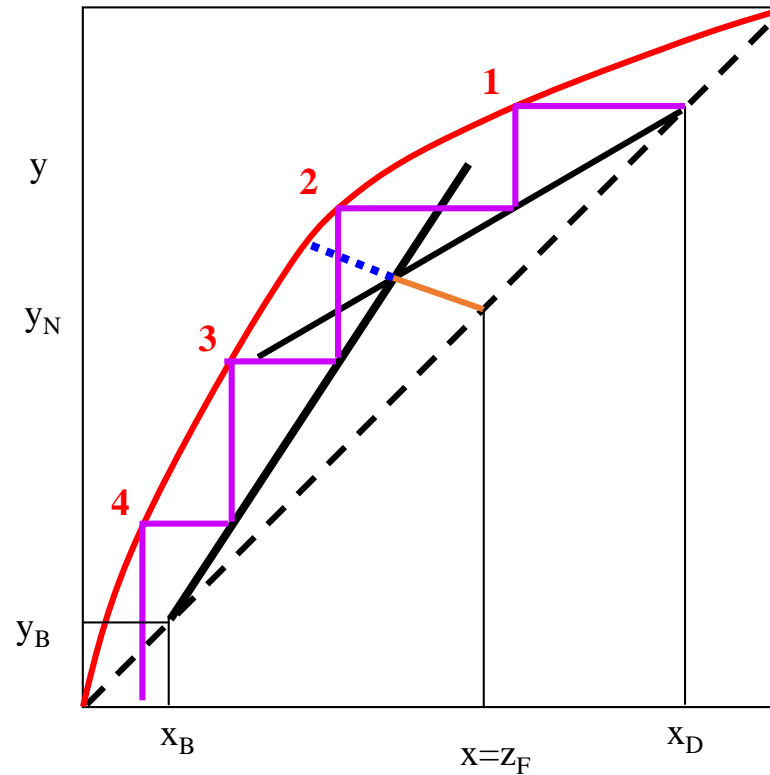
Sección de rectificación:
Pendiente = $L/V = R/(R+1) < 1$

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

Sección de agotamiento:
Pendiente = $\underline{L}/\underline{V} = (V_B+1)/V_B > 1$

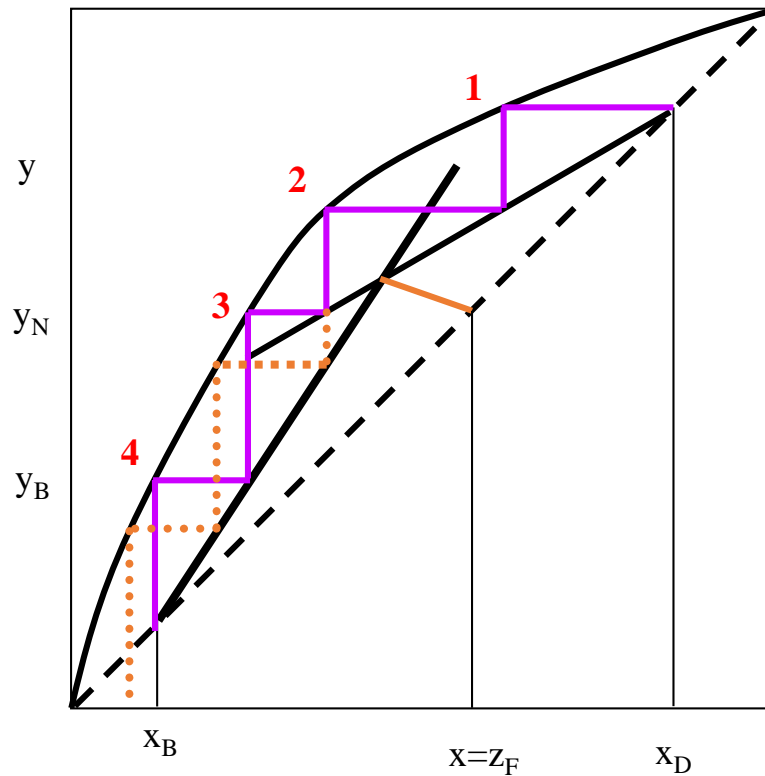
$$y = \frac{\bar{L}}{\bar{V}}x - \frac{B}{\bar{V}}x_B$$

McCabe-Thiele: Localización de la Etapa de la Alimentación

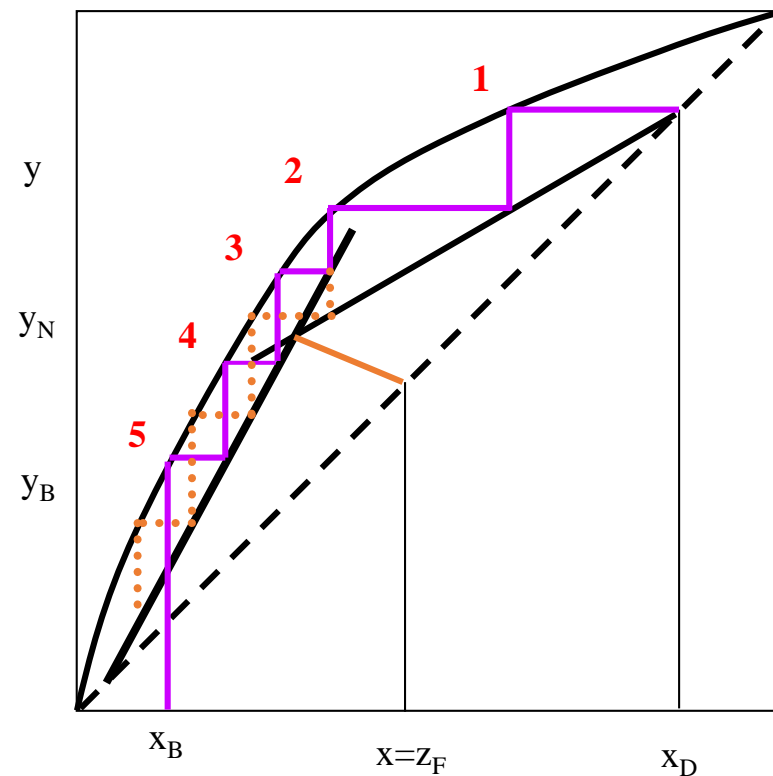


Cuando una etapa cruza la línea “q” esta es la etapa optima de alimentación. Esta columna con la alimentación en cualquier otra etapa requerirá más etapas de equilibrio para lograr la misma separación

McCabe-Thiele: Localización de la Etapa de la Alimentación

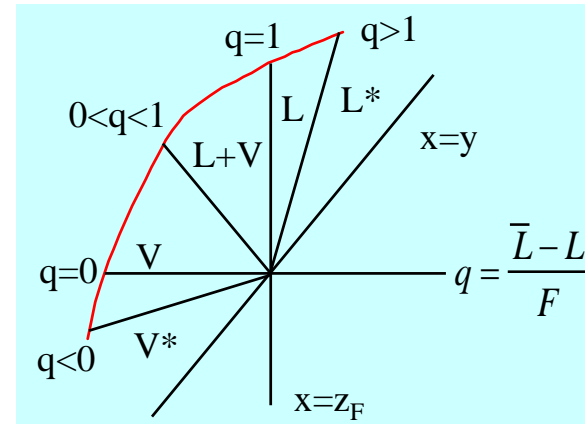
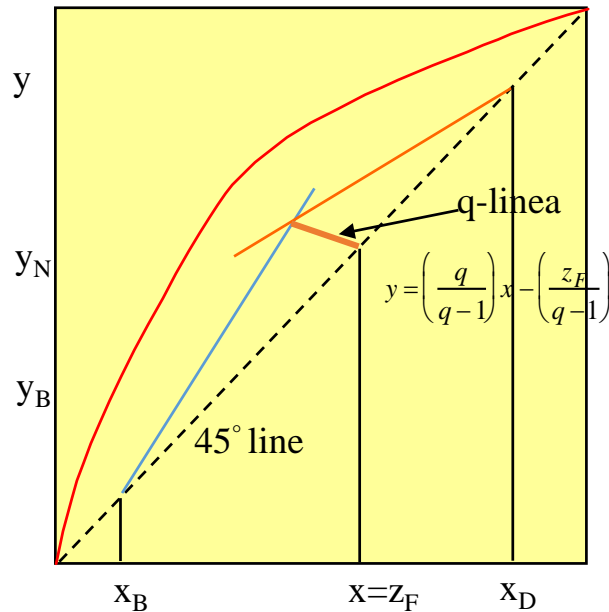


La etapa de la alimentación situada un plato por debajo del óptimo



La etapa de la alimentación situada un plato por encima del óptimo

Método de McCabe-Thiele : Evaluación de la Línea “q”



Condiciones de la Alimentación $q = \Delta L / F$

Líquido saturado	1,0
Vapor Saturado	0,0
2 Fases (condiciones de flash)	$0,0 < q < 1$; $q = 1 - \Psi$
Líquido subenfriado	$q = (1 + CP_L (T_B - T_F) / \Delta H_V) > 1^{(*)}$
Vapor Recalentado	$q = (CP_V (T_D - T_F) / \Delta H_V) < 1^{(**)}$

CP_L	Capacidad calorífica molar del líquido
CP_V	Capacidad calorífica molar del vapor
Ψ	Fracción vaporizada
ΔH_V	Entalpía molar de vaporización
TB	Temperatura de burbuja del líquido subenfriado
TD	Temperatura de rocío del vapor recalentado

$$(*) F CP_L (T_B - T_F) = (\bar{L} - L - F) \Delta H_V$$

$$(**) F CP_V (T_D - T_F) = (L - \bar{L}) \Delta H_V$$

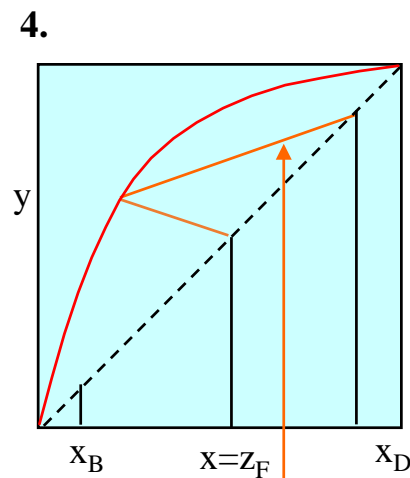
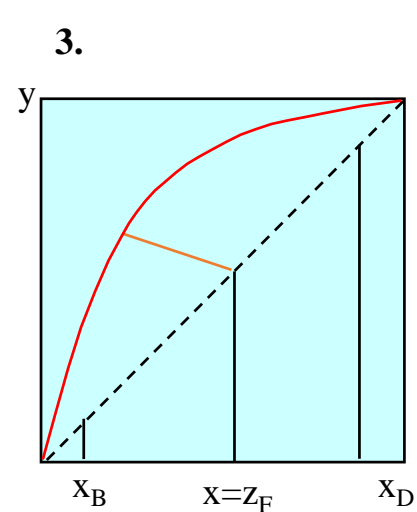
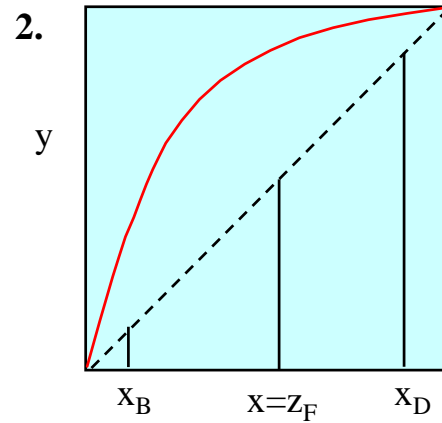
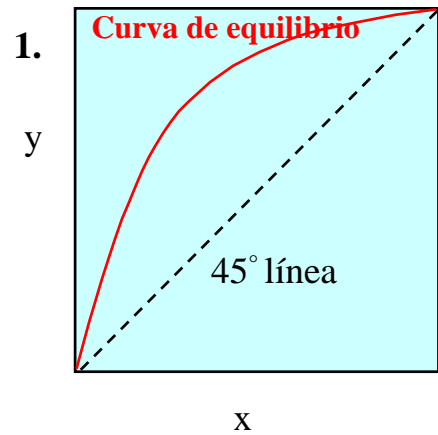
Destilación: Índice

5 Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele

- Curva de equilibrio y volatilidad relativa
- Especificaciones requeridas
- **Balances de materia**
 - Línea de operación de la sección de rectificación
 - Línea de operación de la sección de agotamiento
 - Condiciones de la alimentación: línea “q”
 - **Desarrollo método gráfico**
 - Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio
 - Determinación de la relación de reflujo mínima
- Eficacia de Murphree

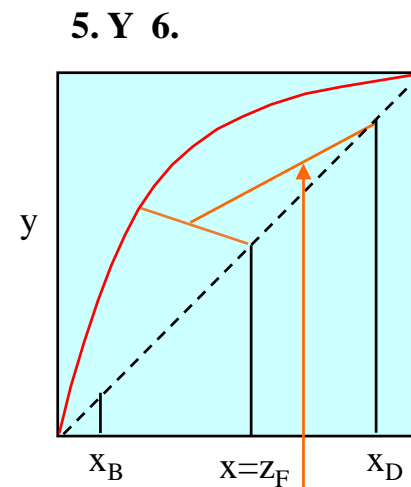
6 Sistemas de control

Método McCabe-Thiele : Ejecución

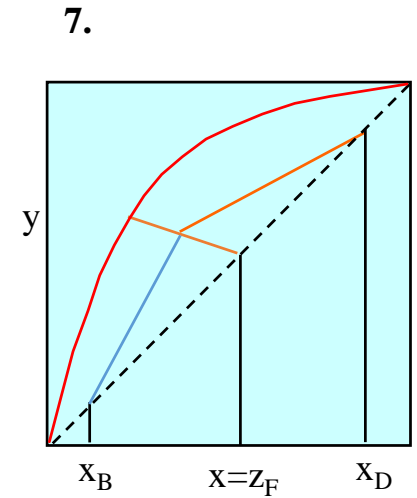


$$R_{\min}/(R_{\min}+1)$$

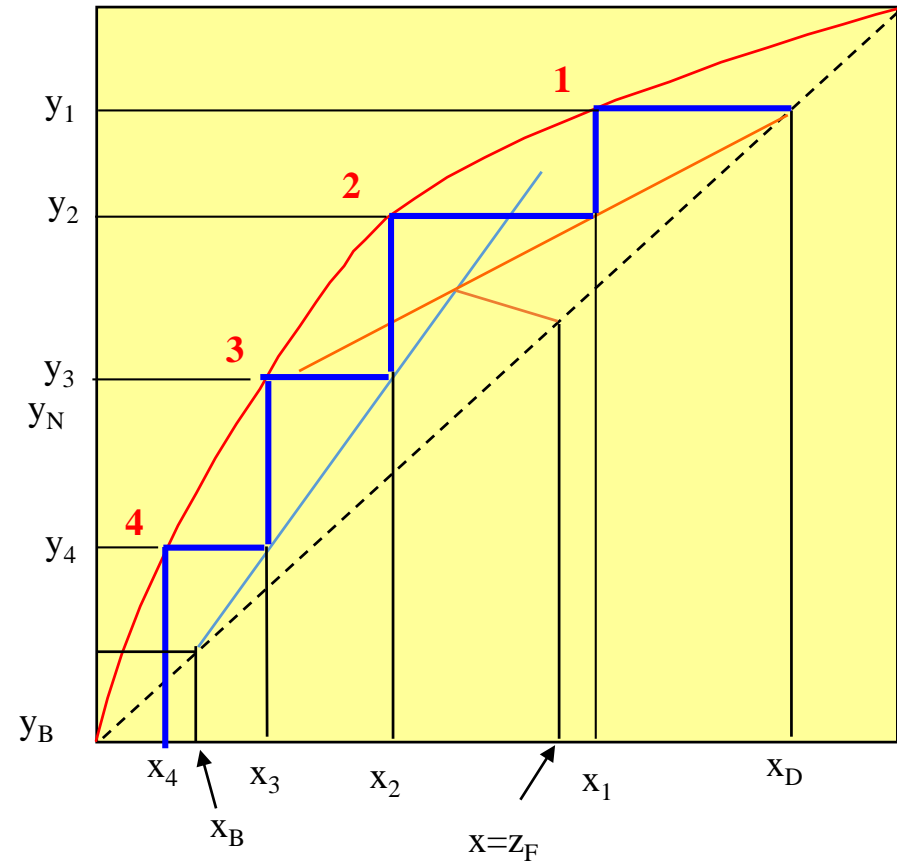
- 1: Dibujar la curva de equilibrio y la línea de 45°.
- 2: Marcar las composiciones de (F, B, y D)
- 3: Conocidos L_F y V_F dibujar la línea "q"
- 4: Determinar R_{\min} por la pendiente de la intersección de la LO en el punto de corte de "q" con la curva de equilibrio.
- 5: **Determinar R de la relación R/R_{\min}**
- 6: Dibujar la LO de la sección de rectificación
- 7: Dibujar la LO de la sección de agotamiento



$$R/(R+1)$$



McCabe-Thiele: Determinación de N y x_B



- 1: Dibujar la curva de equilibrio y la línea de 45°.
- 2: Marcar las composiciones de (F, B, y D)
- 3: Conocidos L_F y V_F dibujar la línea “q”
- 4: Determinar R_{\min} por la pendiente de la intersección de la LO en el punto de corte de “q” con la curva de equilibrio.
- 5: **Determinar R de la relación R/R_{\min}**
- 6: Dibujar la LO de la sección de rectificación
- 7: Dibujar la LO de la sección de agotamiento

Solución:

- 1: Desde X_D localizar x_1 e y_1 dibujando una horizontal hasta la curva de equilibrio para la etapa 1
- 2: Localizar y_2 dibujando una vertical desde x_1 hasta la LO de rectificación, el balance establece la condición x_1 y y_2 .
- 3: Desde y_2 trazar horizontal hasta la curva de equilibrio, son las composiciones de la etapa 2 y se localiza x_2 .
- 4: Repetir las etapas 2 y 3 hasta que $x_i < z_F$. Entonces las verticales trazarlas hasta la LO de la sección de agotamiento.
- 5: Se termina la “escalera” cuando se llega al número de etapas predeterminado o cuando x_i es menor que x_B .

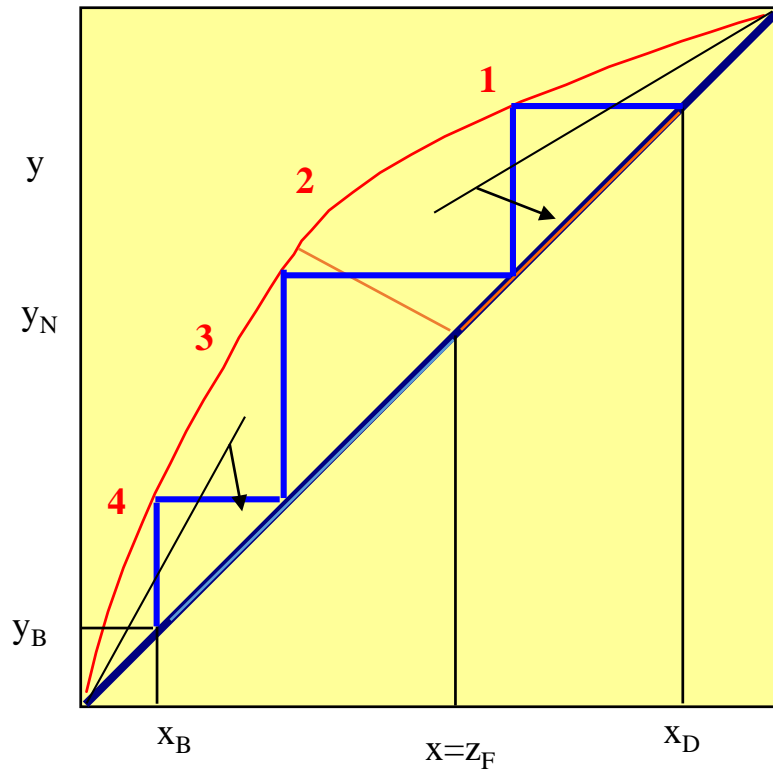
Destilación: Índice

5 Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele

- Curva de equilibrio y volatilidad relativa
- Especificaciones requeridas
- **Balances de materia**
 - Línea de operación de la sección de rectificación
 - Línea de operación de la sección de agotamiento
 - Condiciones de la alimentación: línea “q”
 - Desarrollo método gráfico
 - **Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio**
 - Determinación de la relación de reflujo mínima
- Eficacia de Murphree

6 Sistemas de control

McCabe-Thiele: Mínimo Número de Etapas de Equilibrio



“no depende de la alimentación”

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

LO de sección de Rectificación

Si R se incrementa mucho $y \approx x$; $L = V$

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

LO de sección de Agotamiento

Si V_B se incrementa mucho $y \approx x$; $\bar{V} = \bar{L}$

Ecuación de FENSKE

$$N + 1 = \frac{\log \left\{ \left(\frac{x_{CL}}{x_{CP}} \right)_D \left(\frac{x_{CP}}{x_{CL}} \right)_B \right\}}{\log (\alpha_{CL,CP})_{media}}$$

- La Columna trabaja a **REFLUJO TOTAL** no se produce Destilado ni Fondo
- Se corresponde con el Mínimo Número de etapas de equilibrio

Destilación: Índice

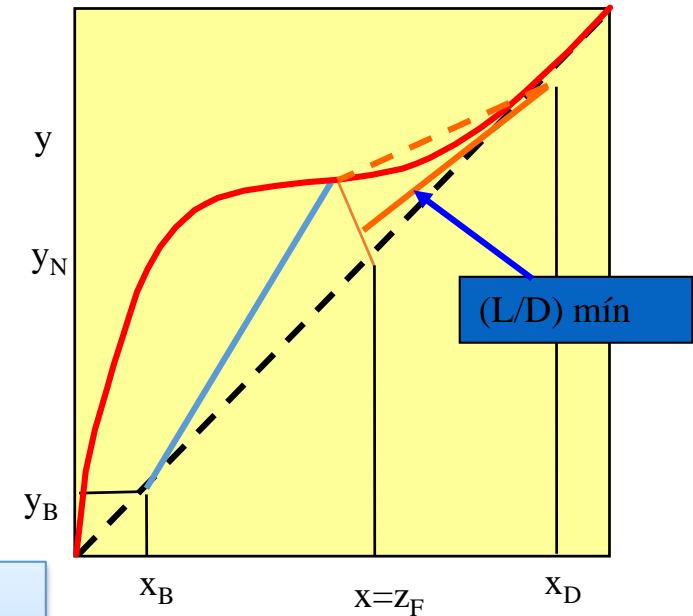
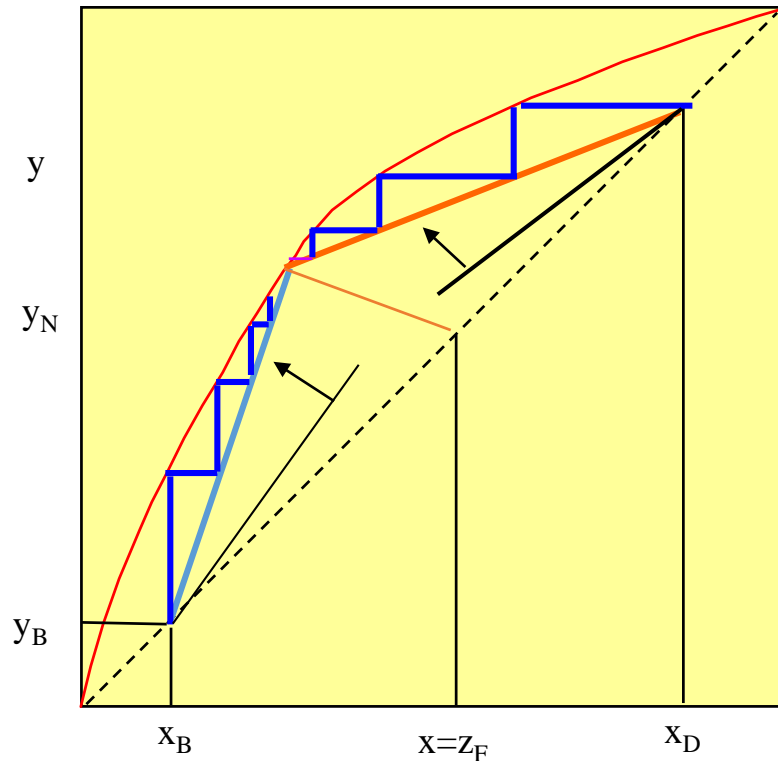
- 5 **Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele**
 - Curva de equilibrio y volatilidad relativa
 - Especificaciones requeridas
 - **Balances de materia**
 - Línea de operación de la sección de rectificación
 - Línea de operación de la sección de agotamiento
 - Condiciones de la alimentación: línea “q”
 - Desarrollo método gráfico
 - Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio
 - **Determinación de la relación de reflujo mínima**
 - Eficacia de Murphree
- 6 **Sistemas de control**

McCabe-Thiele: Reflujo Mínimo

$$(L/V)_{\min} = R_{\min} / (R_{\min} + 1)$$

$$R_{\min} = (L/V)_{\min} / \{1 - (L/V)_{\min}\}$$

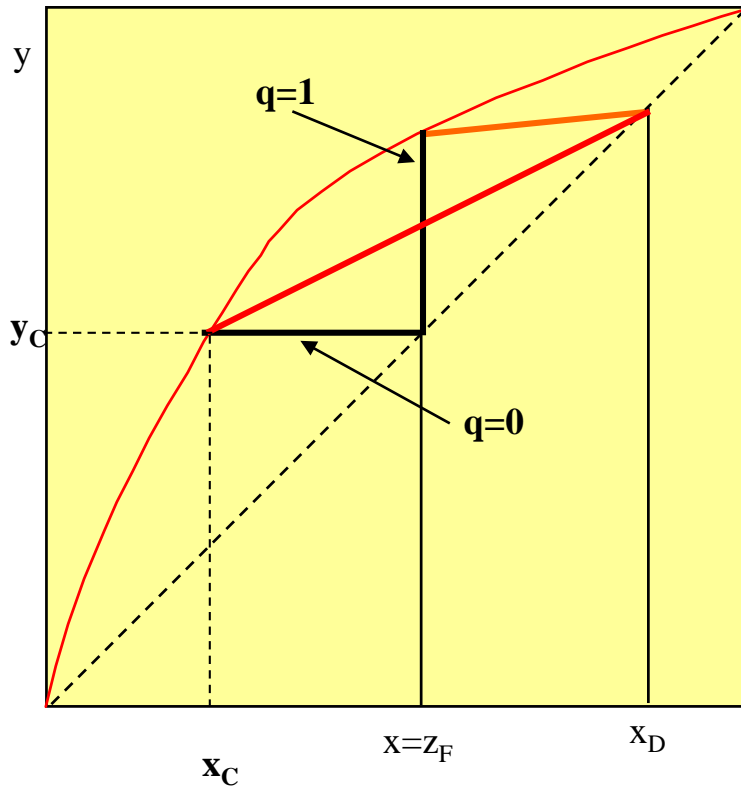
$$(V_B)_{\min} = 1 / \{(\bar{L}/\bar{V})_{\max} - 1\}$$



La condición de mínimo reflujo está representada por unas LO's que se cortan con la recta "q" sobre la Curva de Equilibrio. La curva de equilibrio establece un **LÍMITE TERMODINÁMICO** para las posibles composiciones del vapor y líquido a lo largo de la columna, representadas por las líneas de operación

Estas condiciones de mínimo reflujo requieren un **NÚMERO INFINITO DE ETAPAS DE EQUILIBRIO**

McCabe-Thiele: Reflujo Mínimo



Ecuación de UNDERWOOD

$$R_m = \frac{1}{\alpha_{CL,CP} - 1} \left\{ \frac{x_{CL,D}}{x_{CL,F}} - \alpha_{CL,CP} \frac{x_{CP,D}}{x_{CP,F}} \right\}$$

$$(L/V)_{\min} = R_{\min} / (R_{\min} + 1)$$

$$R_{\min} = (L/V)_{\min} / \{1 - (L/V)_{\min}\}$$

$$(V_b)_{\min} = 1 / \{(\bar{L}/\bar{V})_{\max} - 1\}$$

Líquido @ T° de Ebullición (saturado): $q = 1$

$$R_{\min}/(R_{\min}+1) = (x_D - y_F)/(x_D - z_F)$$

$$R_{\min} = (x_D - y_F)/(y_F - z_F)$$

Vapor @ T° de Rocío (saturado) : $q = 0$

$$R_{\min}/(R_{\min}+1) = (x_D - y_c)/(x_D - x_c)$$

$$R_{\min} = (x_D - y_c)/(y_c - x_c), \quad y_c = x_F$$

$$R_{\min} = (x_D - x_F)/(x_F - x_c),$$

Problema : Determination Nm y Rm

Se desea diseñar una columna para separar una mezcla de benceno y tolueno con un 40 % de benceno en dos corrientes, cabeza 90 % molar en benceno y fondo 10 % molar en benceno. Suponiendo una volatilidad relativa media entre benceno y tolueno de 2,4, calcular el número de etapas de equilibrio necesarios cuando la columna opera a reflujo total y también determinar el reflujo mínimo.

Solución Problema : Determination Nm y Rm

Datos:

$$x_{CL,F} = 0,4 ; x_{CL,D} = 0,9 ; x_{CL,B} = 0,1$$

$$x_{CP,F} = 0,6 ; x_{CP,D} = 0,1 ; x_{CP,B} = 0,9$$

$$\alpha_{CL,CP} = 2,4$$

$$N + 1 = \frac{\log \left\{ \begin{pmatrix} x_{CL} \\ x_{CP} \end{pmatrix}_D \begin{pmatrix} x_{CP} \\ x_{CL} \end{pmatrix}_B \right\}}{\log (\alpha_{CL,CP})_{media}}$$

$$N + 1 = \frac{\log \left\{ \begin{pmatrix} 0,9 \\ 0,1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,9 \\ 0,1 \end{pmatrix} \right\}}{\log (2,4)} = 5$$

$$N = 4$$

$$R_m = \frac{1}{\alpha_{CL,CP} - 1} \left\{ \frac{x_{CL,D}}{x_{CL,F}} - \alpha_{CL,CP} \frac{x_{CP,D}}{x_{CP,F}} \right\}$$

$$R_m = \frac{1}{2,4 - 1} \left\{ \frac{0,9}{0,4} - 2,4 \frac{0,1}{0,6} \right\} = 1,32$$

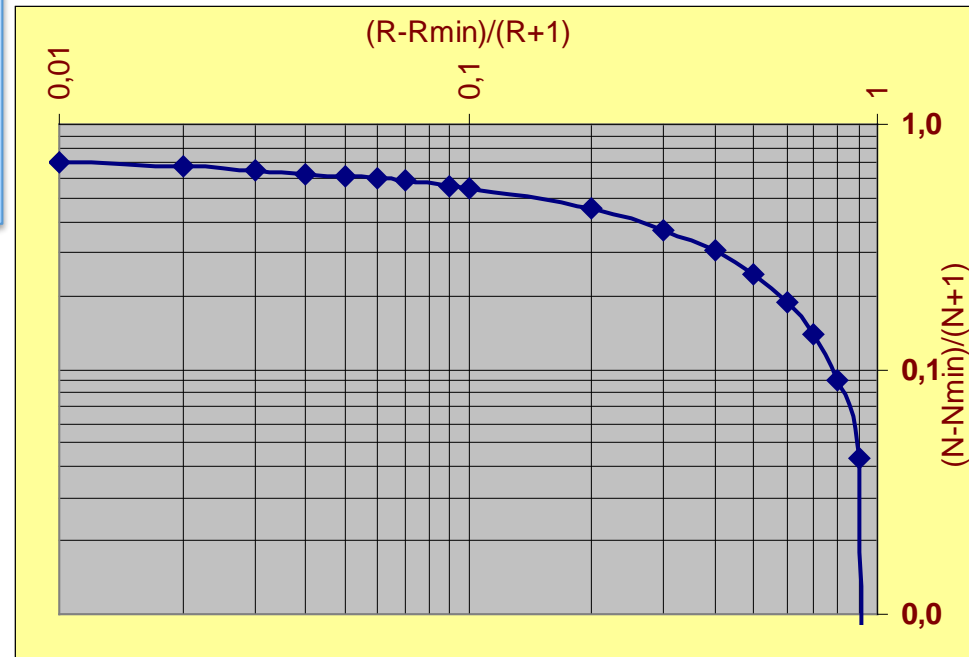
Correlación de Gilliland : Determination Nm y Rm

Es una correlación empírica obtenida por ajuste de datos reales:

1. N° de componentes 2 a 11
2. Q= 0,28 a 1,48
3. Presión : vacío a 600 psig
4. α : 1,11 a 4,05
5. Rmin: 0,53 a 9,09
6. Nmin: 3,4 a 60,3

Relaciona la Relación de Reflujo con el número de etapas teóricas

$$\frac{N - N_{\min}}{N + 1} = 0,75 \left\{ 1 - \left(\frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right)^{0,57} \right\}$$



Problema : Determination of N and x_B for McCabe-Thiele

Se alimentan 100 Kmol/hr con 60% benceno y 40% heptano a una columna de destilación para su separación. Se especifica 90% de benceno en el destilado y 10 % de benceno en el fondo. La corriente alimento contiene un 30 % en fase vapor .

A) Determinar R mínima .

B) Para $R = 1,5$ ($R_{\text{mínima}}$); determinar el n° de etapas de equilibrio.

C) Calcular el balance global e individual en la columna

Datos:

Se puede asumir una volatilidad relativa constante igual a 4.

La presión de la columna es uniforme e igual a 1 atm

Problema : Determination of N and x_B for McCabe-Thiele

1: Dibujar la Curva de Equilibrio y la linea 45° . Se debe utilizar la ecuación \longrightarrow

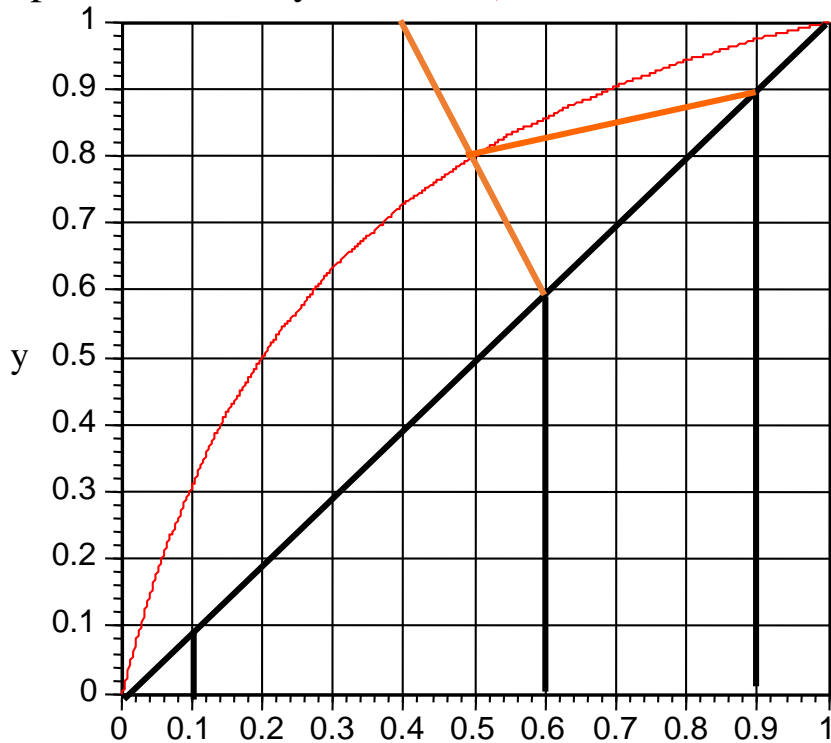
$$y = \frac{\alpha x}{1 + x(\alpha - 1)}$$

2: marcar las composiciones de F, B y D

3: Dibujar la recta "q" con L_F y V_F \longrightarrow

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

4. Determinar gráficamente la intersección de la LO de rectificación con la curva de equilibrio en el corte con "q", esto ocurre para una recta de pendiente 0,25 y **$R_{min} = 0,33$**

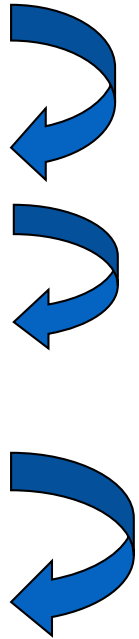


$$y = \left(\frac{q}{q-1} \right) x - \left(\frac{z_F}{q-1} \right) = -2.333x + 2$$

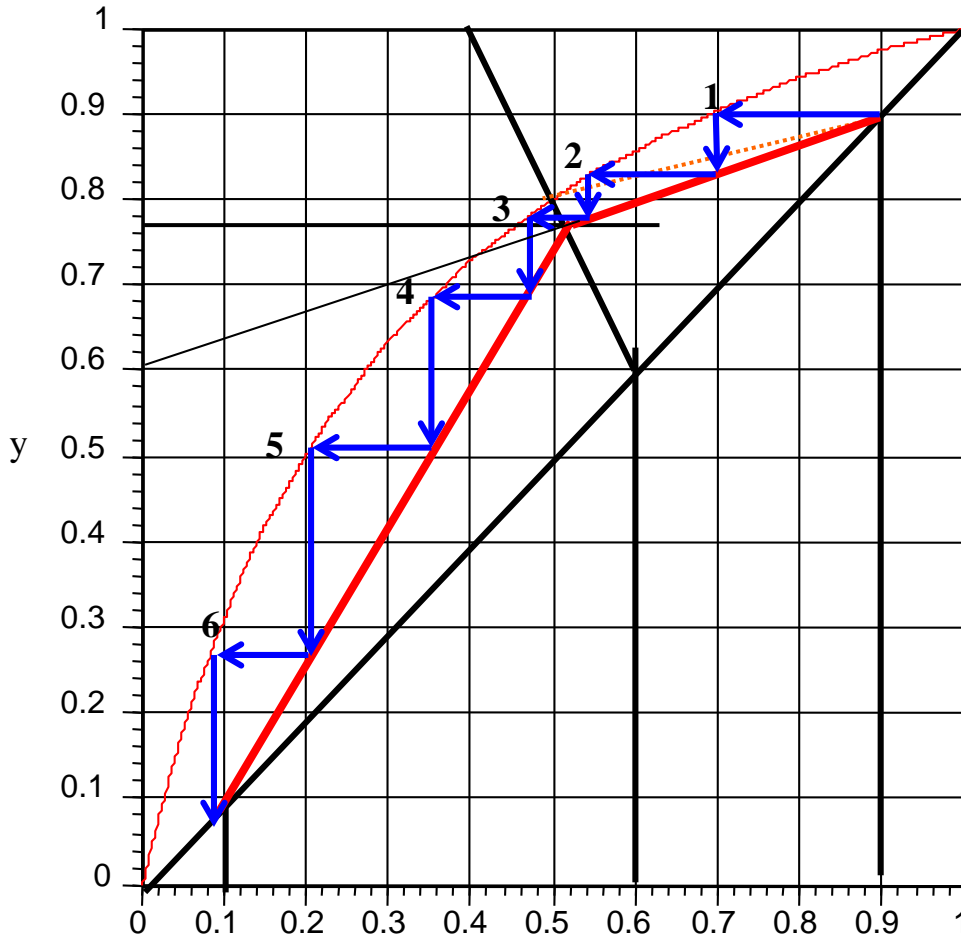
$$@ x = 0,4 \Rightarrow y = 1$$

$$\text{Pendiente} = (0,9 - 0,8) / (0,9 - 0,5) = 0,25$$

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



Problema : Determination of N and x_B for McCabe-Thiele



5. Dibujar la LO de la sección de rectificación

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

Rope. = (1,5) Rmin. = 0,5

$R/(R+1)=0,333$; $1/(1+R) = 0,666$

$y = 0,333x + (0,666)(0,9) = 0,333x + 0,6$

y (@ $x=0,5$) = 0,77

Número de etapas requeridas de equilibrio 6

6. Balances global e individuales

$$F = D + B$$

$$Fz_F = x_D D + x_B B$$

$$100 = D + B \quad (100)(0,6) = (D)(0,9) + (B)(0,1)$$

Kmol/h	Alimentación	Destilado	Fondo
Benceno	60	56,25	3,75
Heptano	40	6,25	33,75
Total	100	62,5	37,5

Problema : Determination of N and x_B for McCabe-Thiele

Se alimentan 100 Kmol/hr con 60% benceno y 40% heptano a una columna de destilación para su separación. Se especifica 90% de benceno en el destilado y 10 % de benceno en el fondo. La corriente alimento contiene un 30 % en fase vapor .

A) Determinar R mínima .

B) Para $R = 3$ ($R_{\text{mínima}}$); determinar el n° de etapas de equilibrio.

C) Calcular el balance global e individual en la columna

Datos:

Se puede asumir una volatilidad relativa constante igual a 4.

La presión de la columna es uniforme e igual a 1 atm

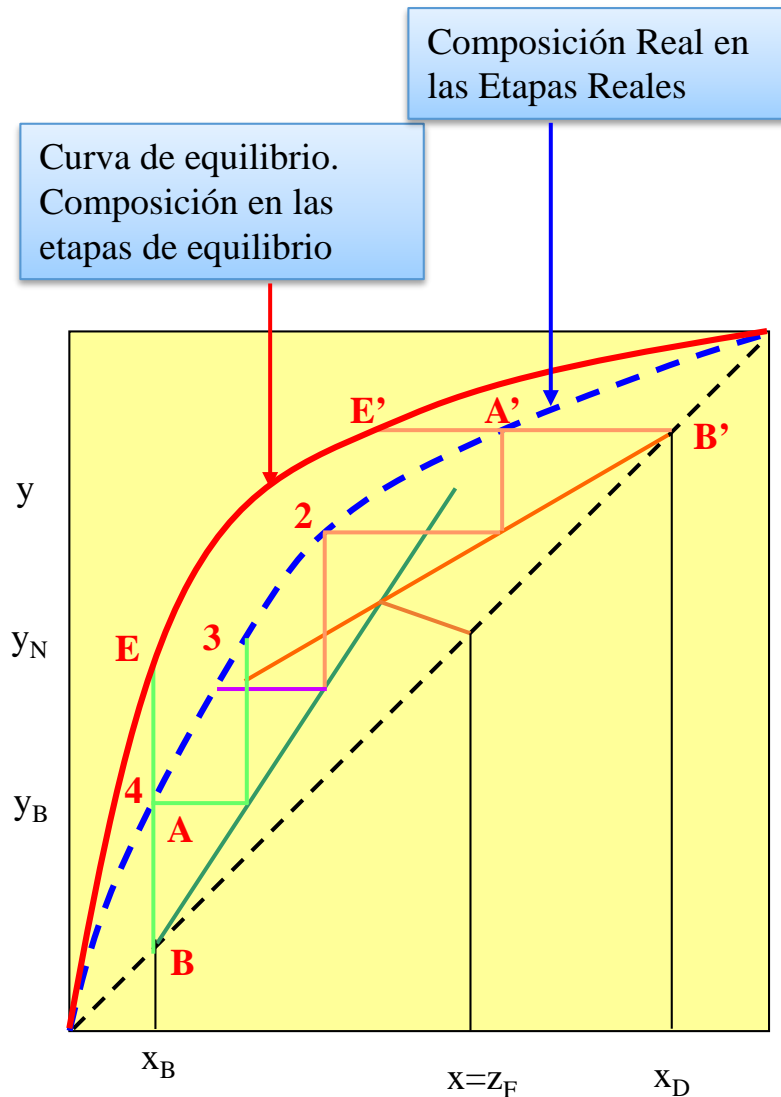
Destilación: Índice

5 Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele

- Curva de equilibrio y volatilidad relativa
- Especificaciones requeridas
- **Balances de materia**
 - Línea de operación de la sección de rectificación
 - Línea de operación de la sección de agotamiento
 - Condiciones de la alimentación: línea “q”
 - Desarrollo método gráfico
 - Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio
 - Determinación de la relación de reflujo mínima
- **Eficacia de Murphree**

6 Sistemas de control

McCabe-Thiele: . Etapas Reales, Eficiencia de Murphree



La eficiencia de plato de **Murphree** es la relación en dos platos consecutivos de la diferencia entre la composición real y la que se obtendría en una etapa teórica de equilibrio.

Eficiencia para el vapor

$$E_{MV} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{EB}}$$

Eficiencia para el líquido:

$$E_{ML} = \frac{x_n - x_{n+1}}{x_n^* - x_{n+1}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{E'B'}}$$

La Eficiencia de Murphree no es constante y cambia a lo largo de la columna

McCabe-Thiele: . Etapas Reales, Eficiencia de Murphree

Valores Típicos de Eficiencias

Disperser	System	Column diameter, ft	Tray spacing, in	Pressure, psia	Static submergence, in	Efficiency, %		
						E_{mv}^*	E_{oc}^\dagger	
Bubble-cap	Ethanol-water	1.31	10.6	14.7	1.18	83-87	60-80	
		1.31	16.3	14.7	1.18	84-97		
		2.5	14	14.7	1.2	80-85		
	Methanol-water	3.2	15.7	14.7	1.0	90-95		
	Ethyl benzene-styrene	2.6	19.7	1.9	0.2	55-68		
	Cyclohexane- <i>n</i> -heptane	4.0	24	14.7	0.25	65-90		
				24	4.25	65-90		
				50		65-90		
	Cyclohexane- <i>n</i> -heptane	4.0	24	5	0.6	65-85		
				24		75-100		
	Benzene-toluene	1.5	15.7	14.7	1.5	70-80		
	Toluene-isooctane	5.0	24	14.7	0.4			
Sieve	Methanol-water	3.2	15.7	14.7		70-90	64 86	
	Ethanol-water	2.5	14	14.7	1.0	75-85		
	Methanol-water	3.2	15.7	14.7	1.57	90-100		
	Ethyl benzene-styrene	2.6	19.7	1.9	0.75	70		
	Benzene-toluene	1.5	15.7	14.7	3.0	60-75		
	Methyl alcohol- <i>n</i> -propyl alcohol- <i>sec</i> -butyl alcohol	6.0	18	18	1.38			
	Mixed xylenes + C ₈ -C ₁₀ paraffins and naphthenes	13.0	21	25	1.25			
	Cyclohexane- <i>n</i> -heptane	4.0	24	5	2.0	60-70		
				24		80		
			4.0	24	5	2.0		70-80
	Isobutane- <i>n</i> -butane	4.0	24	165	2.0	110		
			4.0	24	165	2.0		120
			4.0	24	300	2.0		110
			4.0	24	400	2.0		100
	<i>n</i> -heptane-toluene	1.5	15.7	14.7	3.0	60-75		
	methanol-water	2.0	13.6	14.7	2.0	68-72%		
	isopropanol-water	2.0	13.6	14.7	2.0	59-63%		
toluene-methylcyclohexane	2.0	13.6	14.7	2.0	70-82%			
Valve	Methanol-water	3.2	15.7	14.7		70-80	50-96 104-121	
	Ethanol-water	2.5	14	14.7	1.0	75-85		
	Ethyl benzene-styrene	2.6	19.7	1.9	0.75	75-85		
	Cyclohexane- <i>n</i> -heptane	4.0	24	20	3.0			
	<i>n</i> -Butane-isobutene	4.0	24	165	3.0			

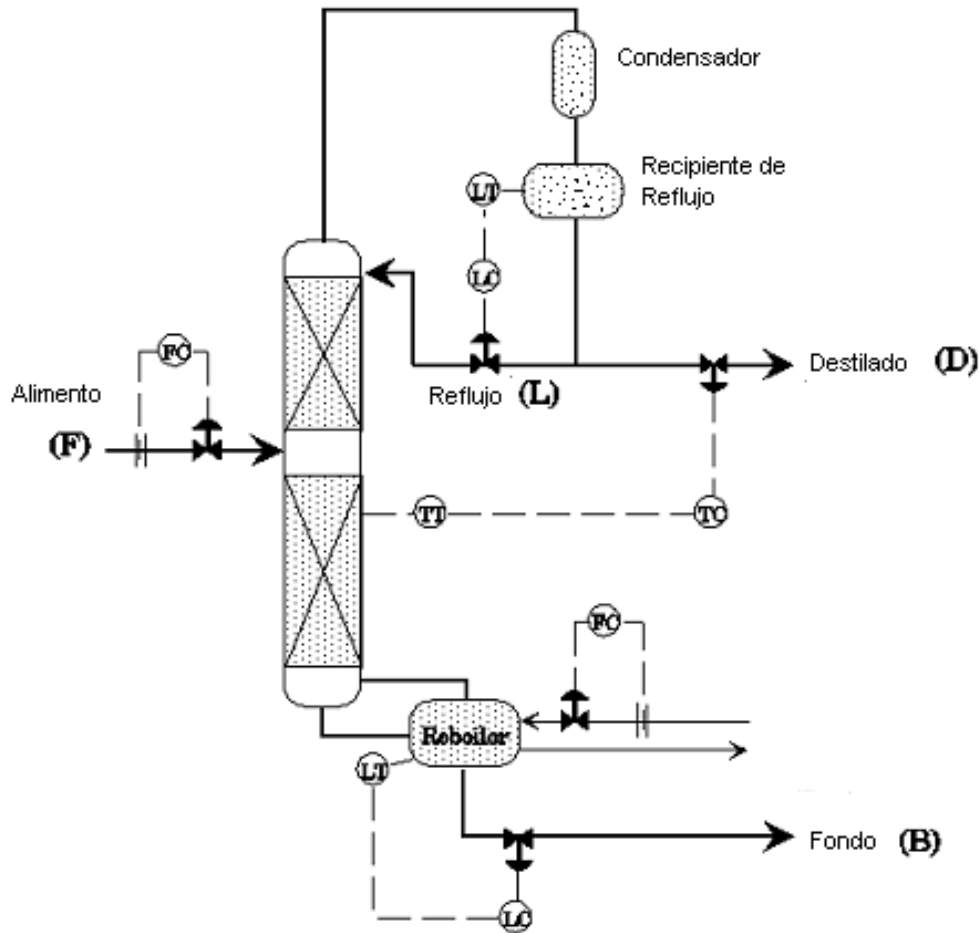
Destilación: Índice

5 Cálculo número de etapas de equilibrio de una columna de destilación para mezclas binarias: método de McCabe-Thiele

- Curva de equilibrio y volatilidad relativa
- Especificaciones requeridas
- **Balances de materia**
 - Línea de operación de la sección de rectificación
 - Línea de operación de la sección de agotamiento
 - Condiciones de la alimentación: línea “q”
 - Desarrollo método gráfico
 - Determinación del mínimo número de etapas de equilibrio
 - Determinación de la relación de reflujo mínima
- Eficacia de Murphree

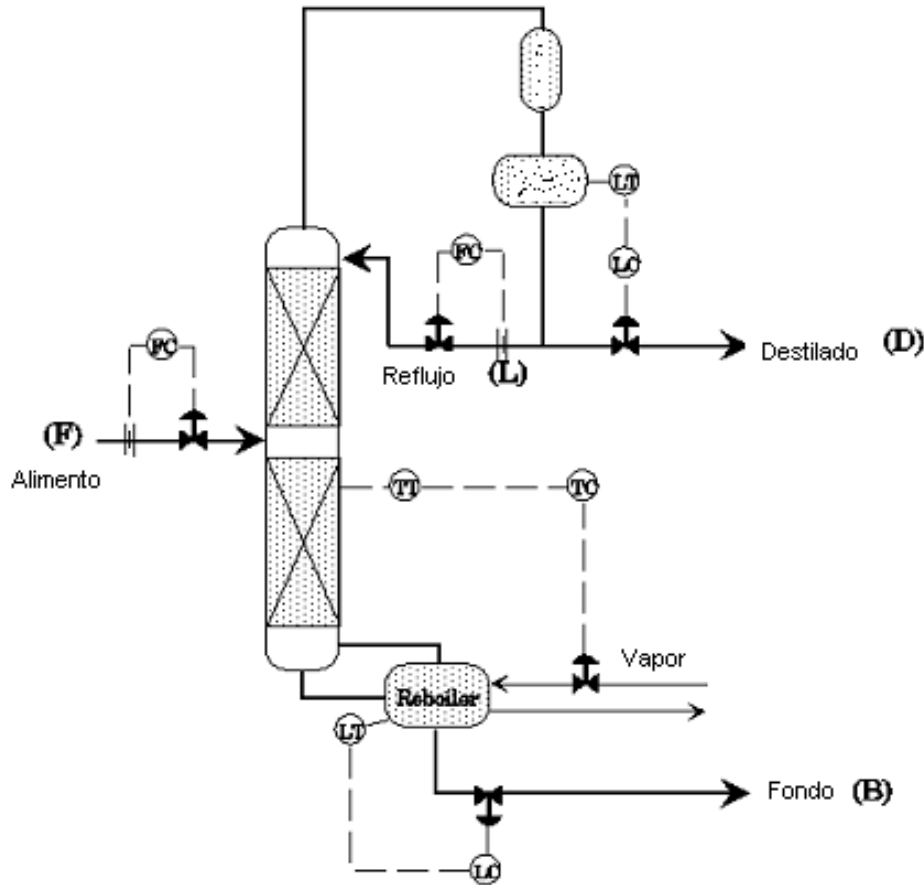
6 Sistemas de control

Sistemas de Control



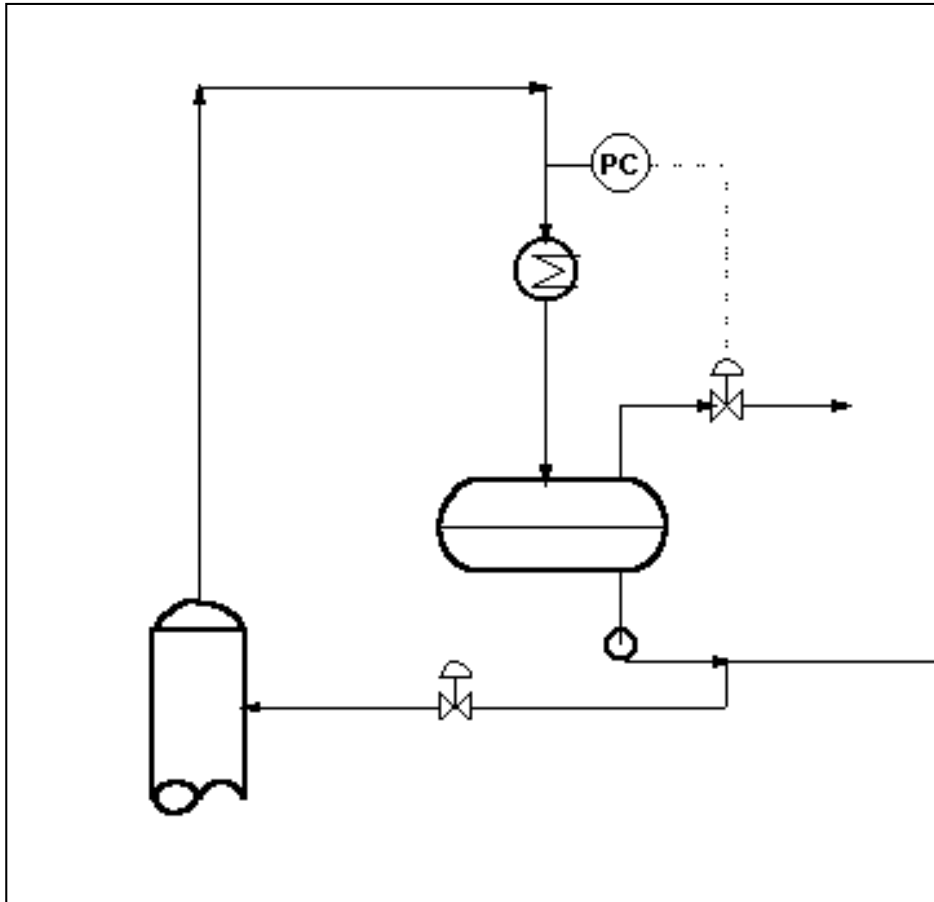
En esta figura se representa un sistema típico de control de una columna de destilación. La calidad de los productos de cabeza (la composición del destilado) se establece mediante el control de la temperatura de la columna. El controlador de temperatura actúa sobre el caudal de destilado. Esta estrategia de control se establece cuando el Duty de calor al reboiler está limitado o debe ser fijo. Este sistema establece un **control directo** de la composición del destilado, manipulando su caudal

Sistemas de Control

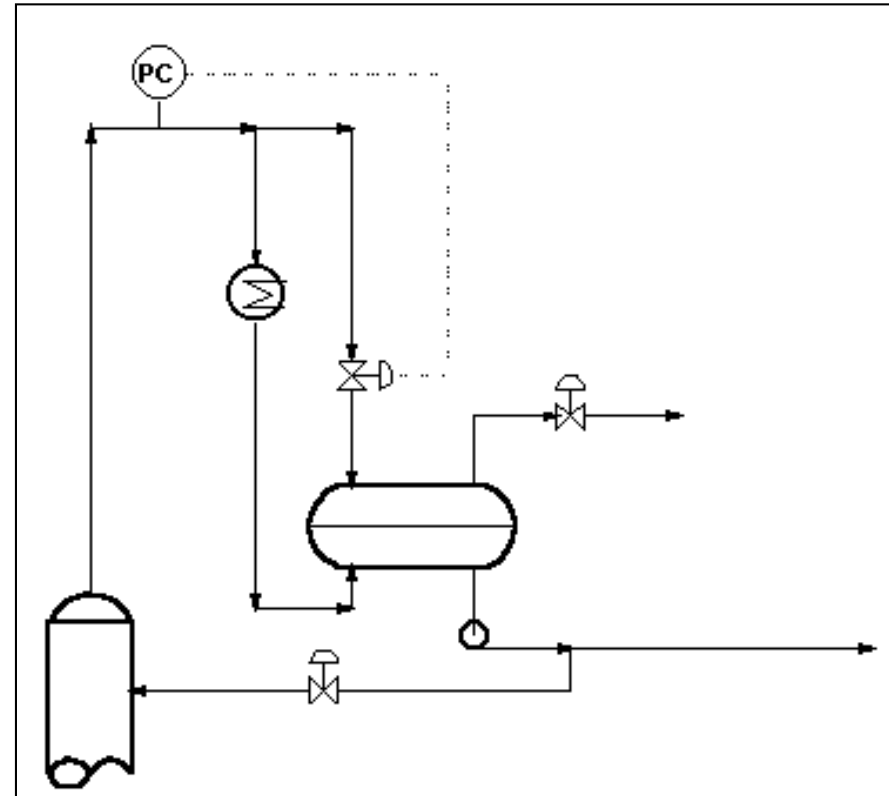


Es sistema de control , controla la composición del destilado manipulando la temperatura y el caudal de vapor , es un sistema in directo de control de la calidad del destilado . La principal ventaja es un menor tiempo de respuesta..

Control de Presión de la Columna

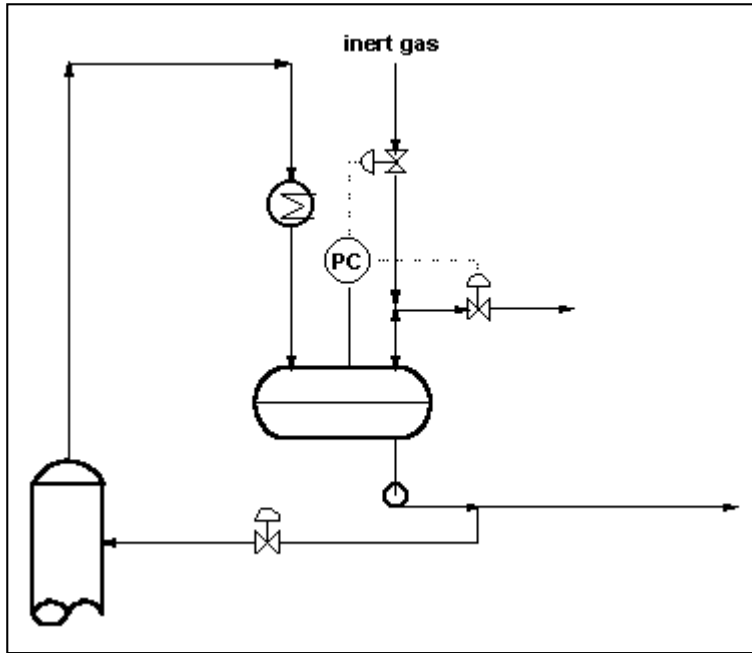


Control Directo del vapor
Producido

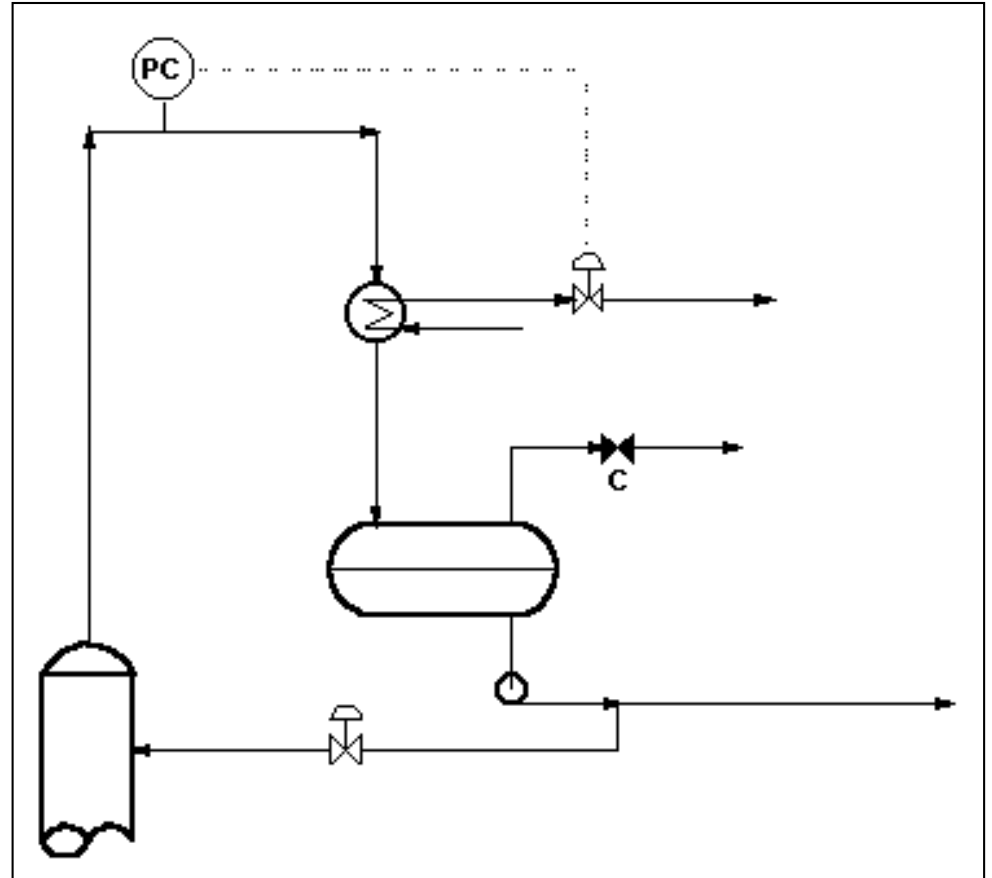


Control de la condensación mediante “bypass” de
vapor caliente **'Hot vapor bypass'**

Control de Presión de la Columna



Control mediante make-up de gas inerte



Control mediante caudal de fluido frío al condensador