

# Método de McCabe y Thiele

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

30 de Marzo de 2021



- Recordatorio de Clase Anterior
- Objetivos de la Clase
- Columna de Destilación
  - Balance de Materia
  - Línea de Operación en zona de Rectificación (LOR)
  - Línea de Operación en zona de Agotamiento (LOA)
- Método McCabe y Thiele

# Líneas de operación (relación entre corrientes que se cruzan)

## Nomenclatura:

$D$  = flujo molar de producto de cabeza o **destilado**

$x_D$  = fracción molar de A en el destilado

$B$  = flujo molar de producto de cola (**bottom**)

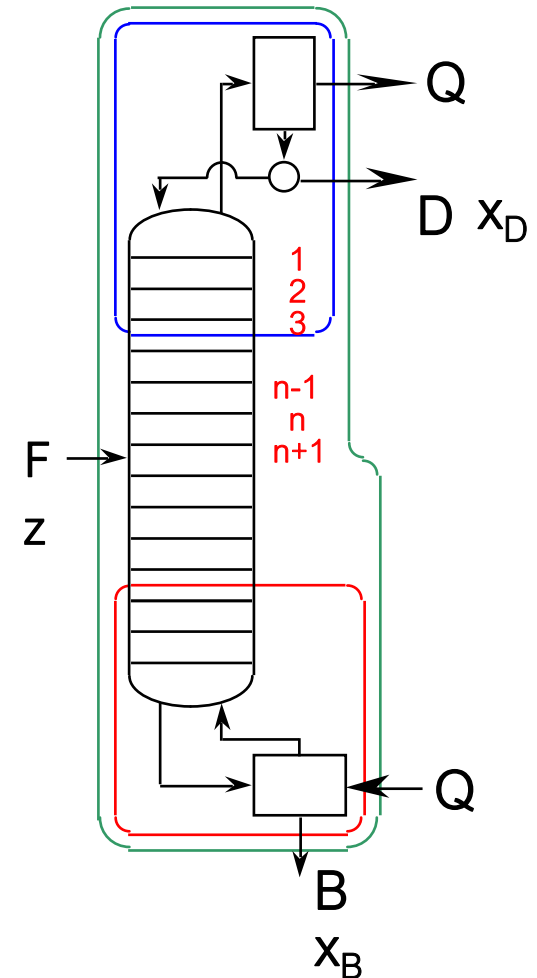
$x_B$  = fracción molar de A en el producto de cola

$V$  = flujo molar de vapor en la sección de enriquecimiento o rectificación (superior) de la columna

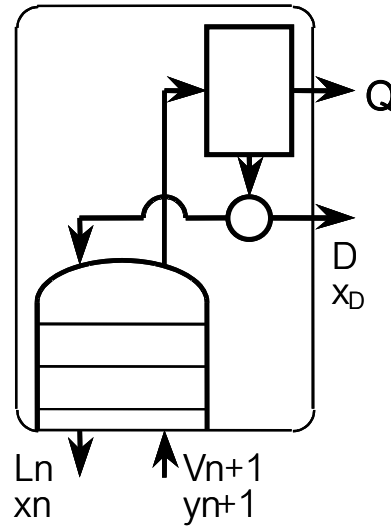
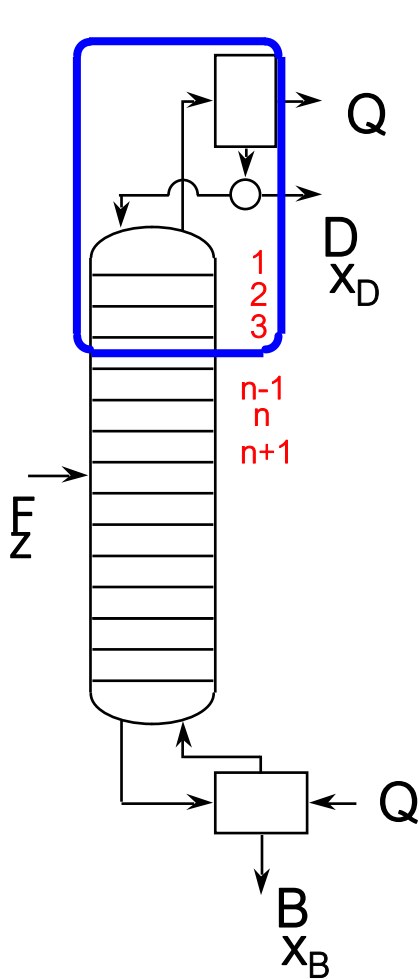
$L$  = flujo molar de líquido en la sección de enriquecimiento de la columna

$\bar{V}$  = flujo molar de vapor en la sección de agotamiento (inferior) de la columna

$\bar{L}$  = flujo molar de líquido en la sección de agotamiento de la columna



# Línea de operación en zona de rectificación (LOR)



Balances de materia:

$$V_{n+1} = L_n + D$$

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



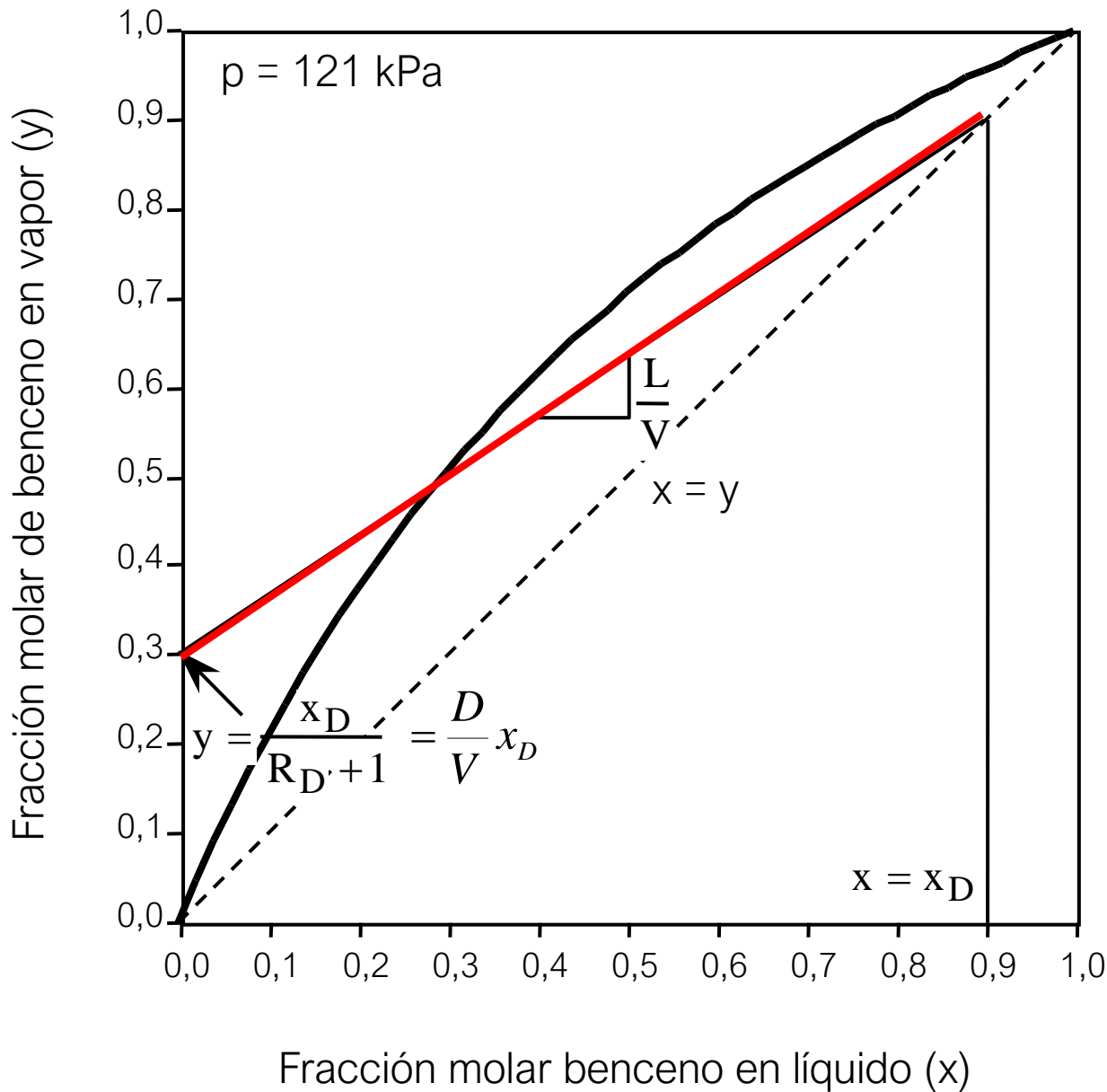
$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} \cdot x_n + \frac{D}{V_{n+1}} \cdot x_D$$

Considerando L/V constantes, y eliminando subíndices:

$$y = \frac{L}{V} \cdot x + \frac{D}{V} \cdot x_D \quad \text{LOR}$$

$$V = L + D$$

$$\therefore V > L \rightarrow \frac{L}{V} < 1$$



$$\text{LOR: } y = \frac{L}{V} \cdot x + \frac{D}{V} \cdot x_D$$

Definiendo Relación de Reflujo como:  $R_D = L/D$

$$\text{LOR: } y = \frac{R_D}{R_D + 1} \cdot x + \frac{x_D}{R_D + 1}$$

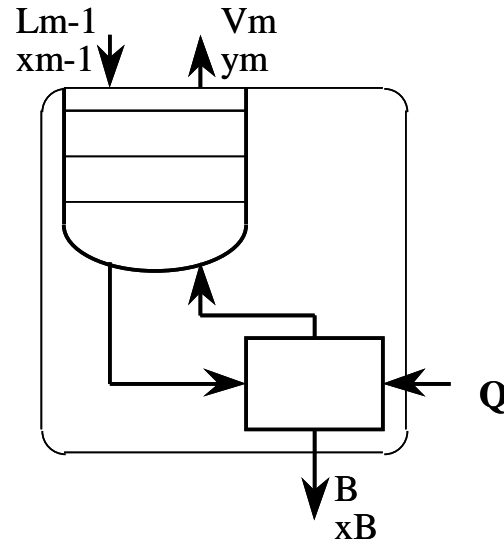
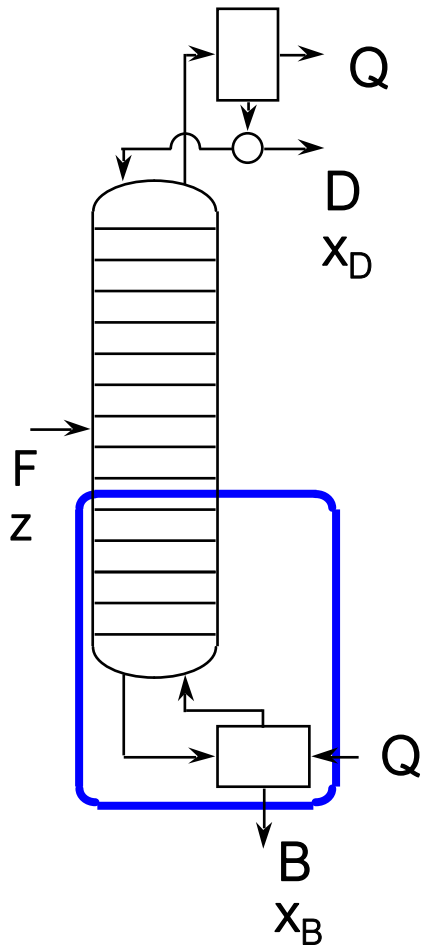
Pto. corte con  $x=y$   
 $x = y = x_D$

Interceptos:

$$x=0 \rightarrow Dx_D / V$$

$$x=1 \rightarrow (L + Dx_D) / V$$

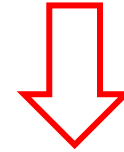
# Línea de operación en zona de agotamiento (LOA)



Balances de materia:

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

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



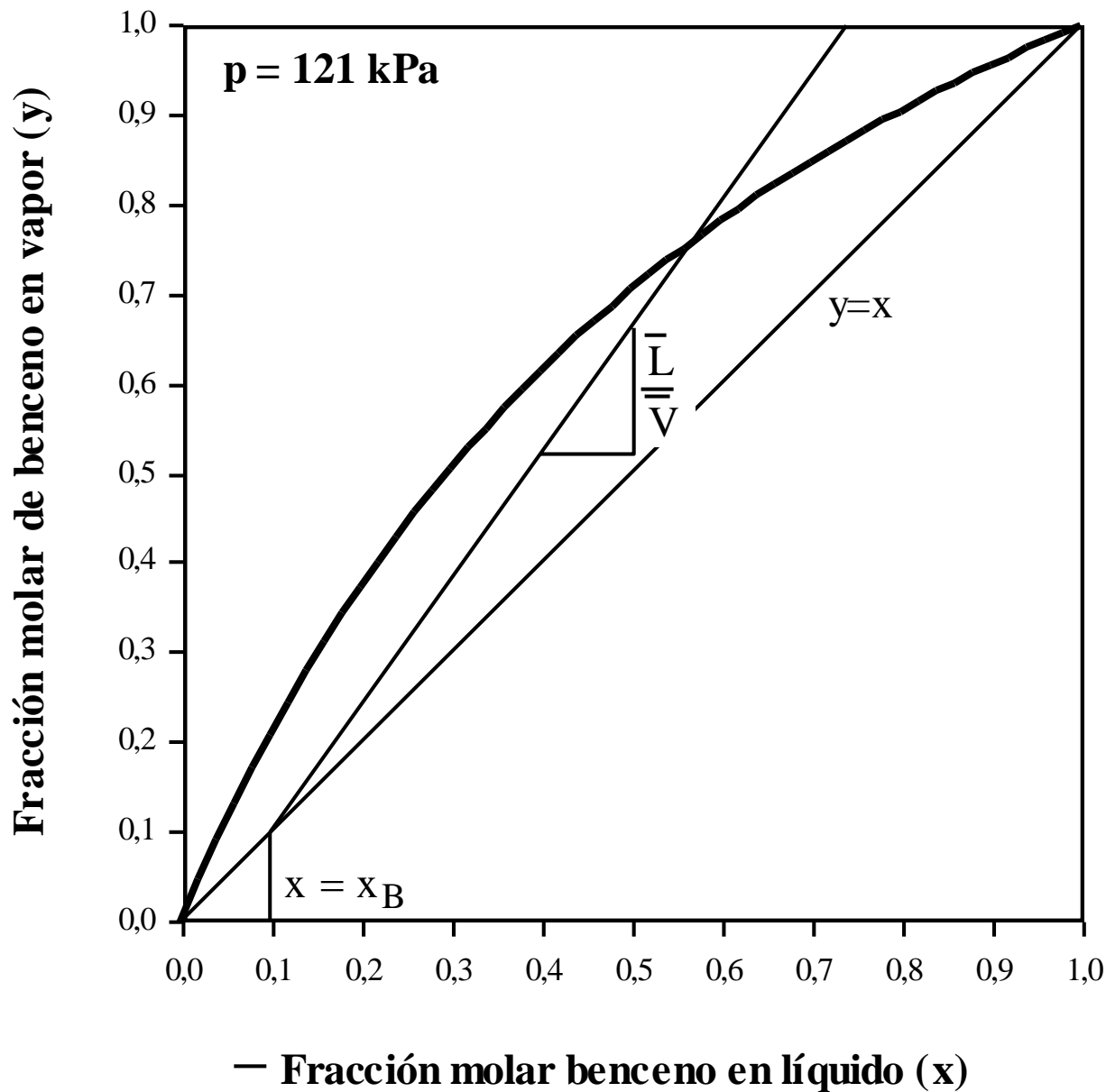
$$y_m = \frac{L_{m-1}}{V_m} \cdot x_{m-1} - \frac{B}{V_m} \cdot x_B$$

Considerando  $\bar{L}/\bar{V}$  constantes, y eliminando subíndices:

$$y = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \cdot x - \frac{B}{\bar{V}} \cdot x_B \quad \text{LOA}$$

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

$$\therefore \bar{L} > \bar{V} \rightarrow \frac{\bar{L}}{\bar{V}} > 1$$



$$\text{LOA: } y = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \cdot x - \frac{B}{\bar{V}} \cdot x_B$$

Pto. corte con  $x=y$   
 $x = y = x_B$

Interceptos:

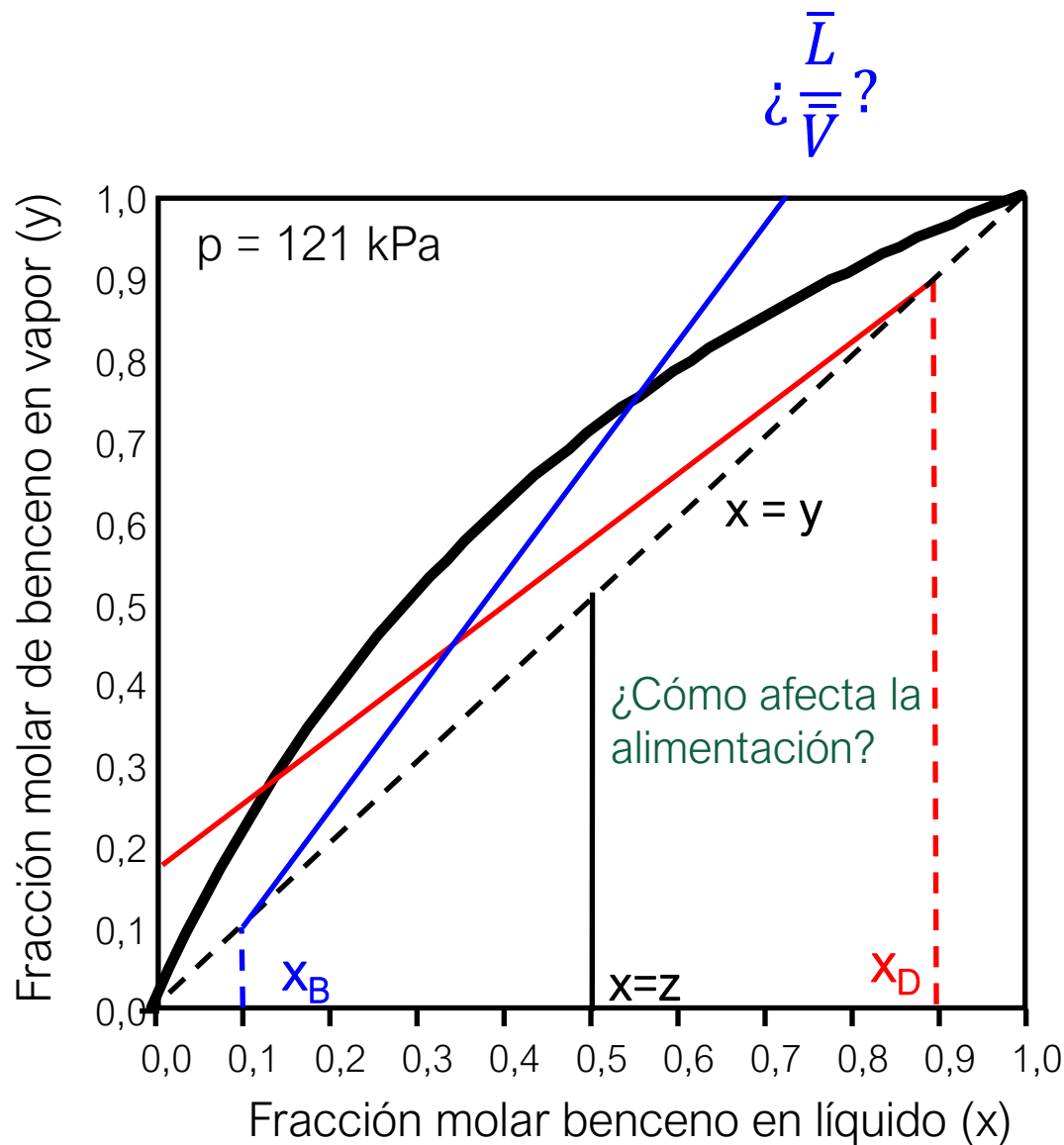
$$x=0 \rightarrow -Bx_B / \bar{V}$$

$$x=1 \rightarrow (\bar{L} - Bx_B) / \bar{V}$$

Reflujo =  $R_D = L/D$

$$\frac{x_D}{R_D + 1}$$

}





# Línea q: Lugar geométrico de todas las intersecciones de LOR y LOA

Recordemos:

$$\begin{array}{ll} \text{LOR} & y = \frac{L}{V} \cdot x + \frac{D}{V} \cdot x_D \\ \text{LOA} & y = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \cdot x - \frac{B}{\bar{V}} \cdot x_B \end{array} \quad (-)$$

---

$$(V - \bar{V}) \cdot y = (L - \bar{L}) \cdot x + F \cdot z$$

Si denominamos como  $q$  a los moles de líquido que fluyen en la sección de agotamiento por mol alimentado:

$$\bar{L} = L + q \cdot F$$

$$V = \bar{V} + (1 - q) \cdot F$$

$$q = \frac{\text{moles de líquido de alimentación a sección de agotamiento}}{\text{moles alimentados}}$$

# Línea q: Lugar geométrico de todas las intersecciones de LOR y LOA

Reemplazando:

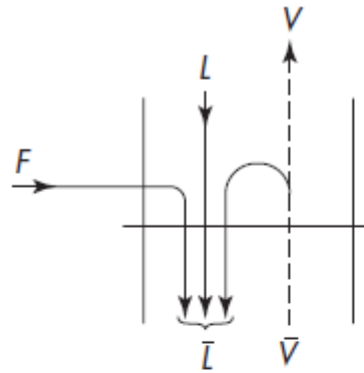
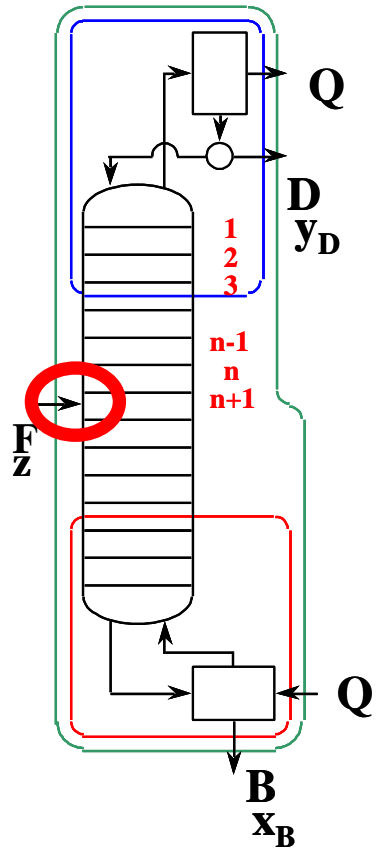
$$y \cdot (1 - q) \cdot F = -q \cdot F \cdot x + F \cdot z$$

Línea q: Intersección de LOR y LOA

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

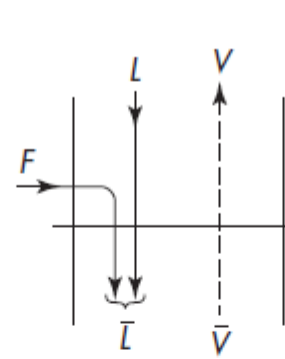
# Los distintos tipos de alimentación: la línea q

$$q = \frac{\text{moles de líquido de alimentación a sección de agotamiento}}{\text{moles alimentados}}$$



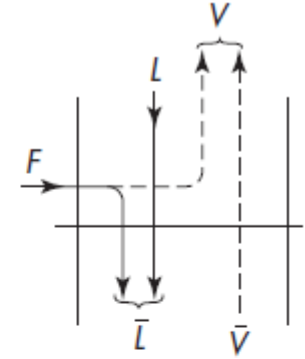
Líquido subenfriado

$$q > 1$$



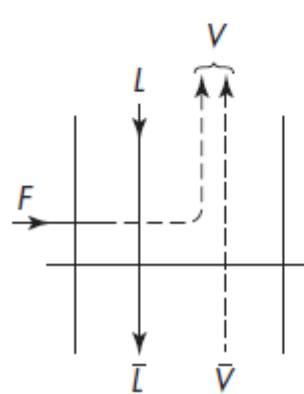
Líquido pto. burbuja

$$q = 1$$



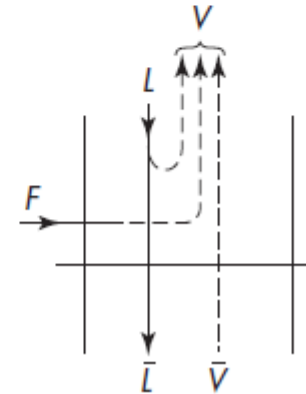
Mezcla líquido-vapor

$$0 < q < 1$$



Vapor pto. rocío

$$q = 0$$

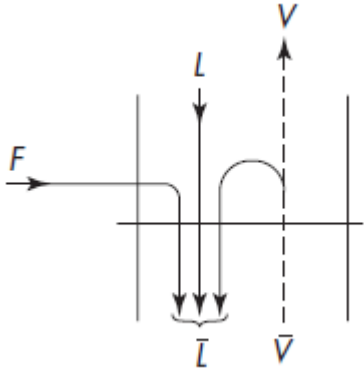


Vapor sobrecalentado

$$q < 0$$

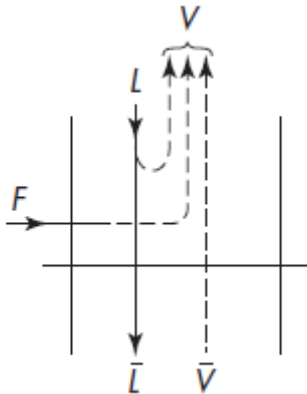
# Los distintos tipos de alimentación: la línea q

$$q = \frac{\text{moles de líquido de alimentación a sección de agotamiento}}{\text{moles alimentados}}$$



Líquido subenfriado

$$q > 1$$



Vapor sobrecalentado

$$q < 0$$

$$q = 1 + \frac{c_{pL}(T_b - T_F)}{\lambda}$$

$c_{pL}$  = Calor específico del líquido

$T_F$  = Temperatura Alimentación

$T_b$  = Temperatura del pto. Burbuja de la alimentación

$\lambda$  = Calor de vaporización

$c_{pV}$  = Calor específico del vapor

$T_d$  = Temperatura del pto. Rocío de la alimentación

$$q = - \frac{c_{pV}(T_F - T_d)}{\lambda}$$

Por la definición de la línea q es posible deducir que depende de:

1. Condición térmica del flujo de alimentación
2. Composición del flujo de alimentación (z)

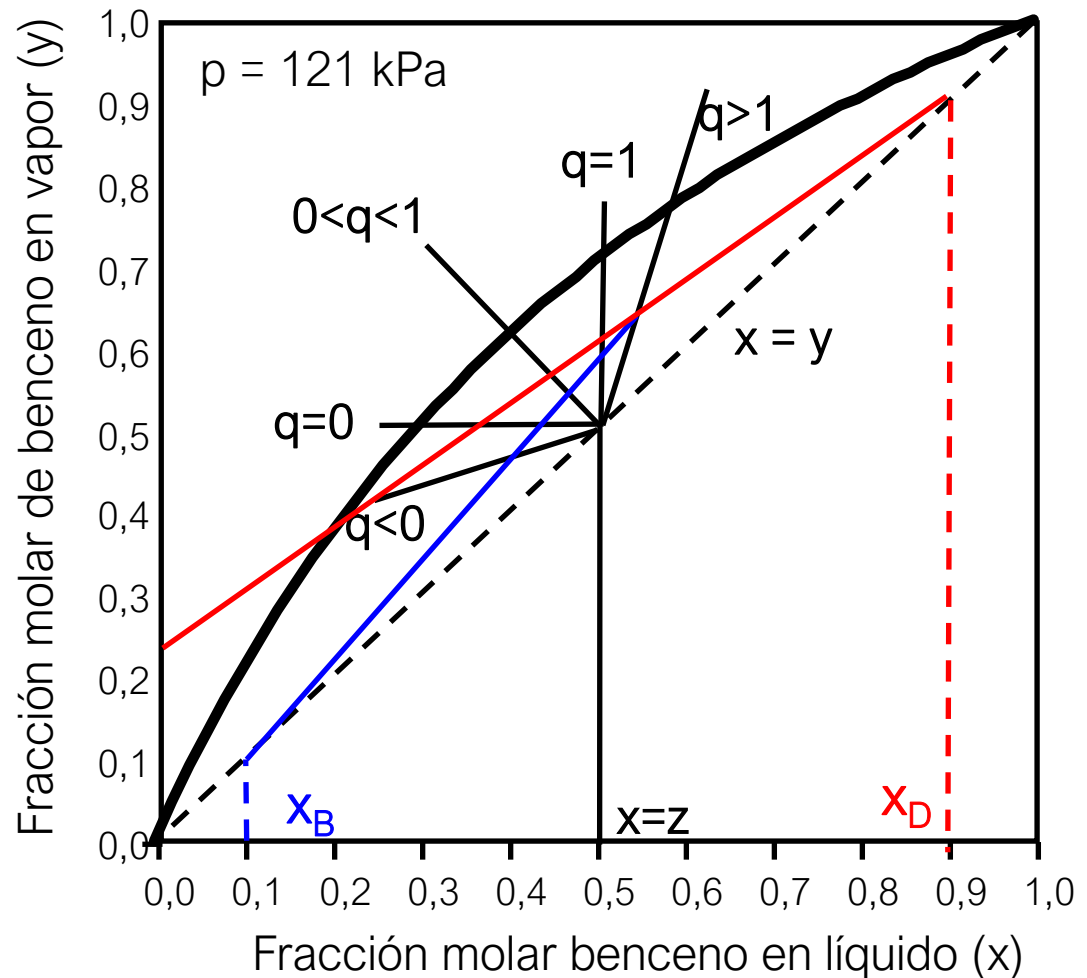
$$y = -\frac{q}{1-q} \cdot x + \frac{1}{1-q} \cdot z$$

Pasa por pto.

$$x=y=z$$

$$\text{Reflujo} = R_D = L/D$$

$$\frac{x_D}{R_D + 1}$$



OJO: Revisar balance térmico en McC&S

Por la definición de la línea q es posible deducir que depende de:

1. Condición térmica del flujo de alimentación
2. Composición del flujo de alimentación (z)

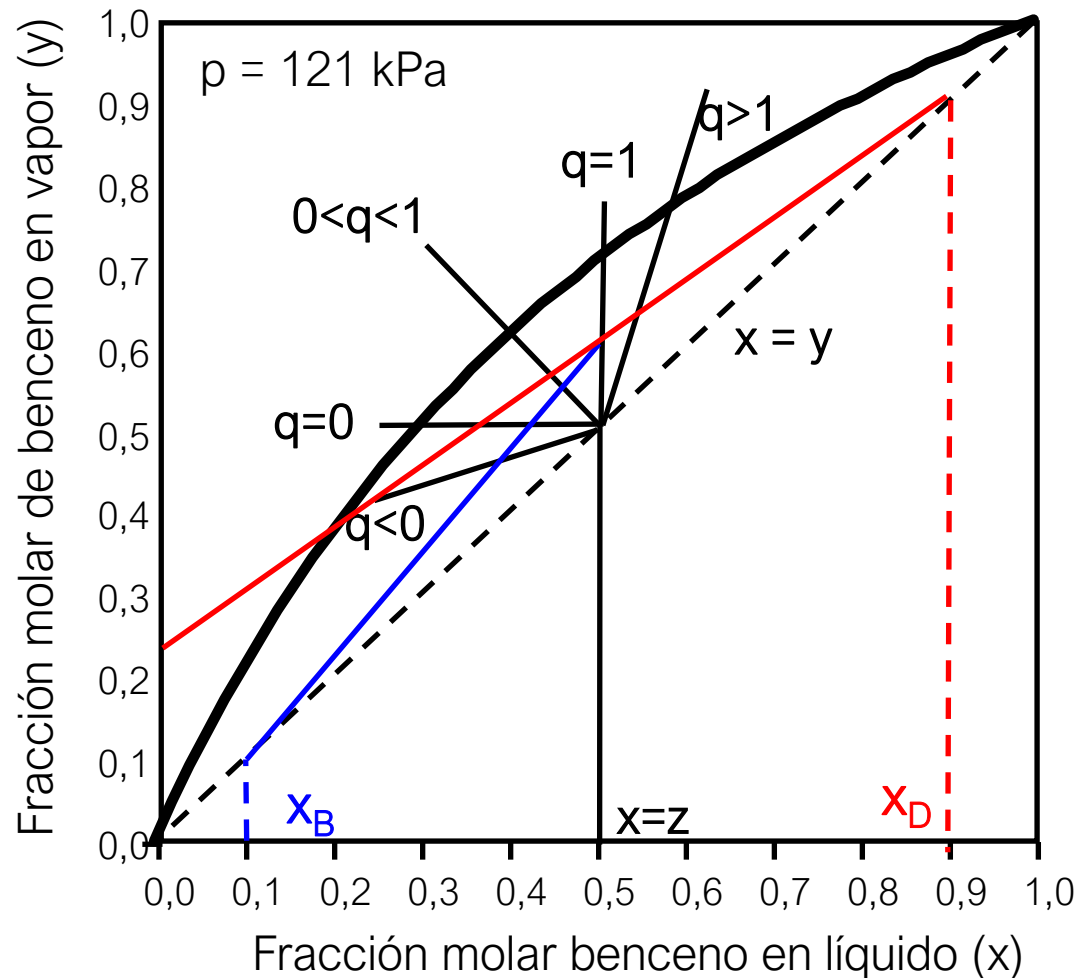
$$y = -\frac{q}{1-q} \cdot x + \frac{1}{1-q} \cdot z$$

Pasa por pto.

$$x=y=z$$

$$\text{Reflujo} = R_D = L/D$$

$$\frac{x_D}{R_D + 1}$$



OJO: Revisar balance térmico en McC&S

1. Condición térmica del flujo de alimentación
2. Composición del flujo de alimentación (z)

$$\frac{x_D}{R_D + 1}$$



1. Condición térmica del flujo de alimentación
2. Composición del flujo de alimentación (z)

$$\frac{x_D}{R_D + 1}$$





Por la definición de la línea  $q$  es posible deducir que depende de:

1. Condición térmica del flujo de alimentación
2. Composición del flujo de alimentación ( $z$ )

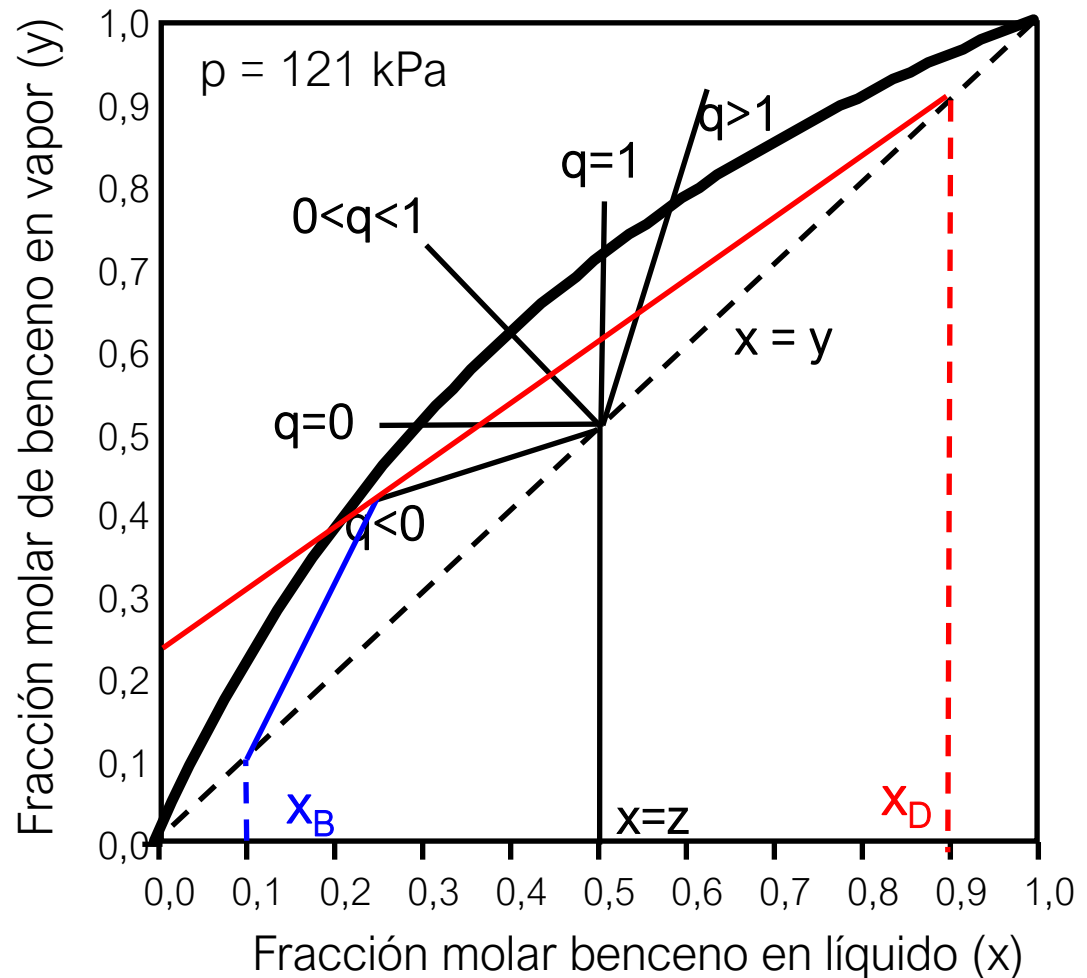
$$y = -\frac{q}{1-q} \cdot x + \frac{1}{1-q} \cdot z$$

Pasa por pto.

$$x=y=z$$

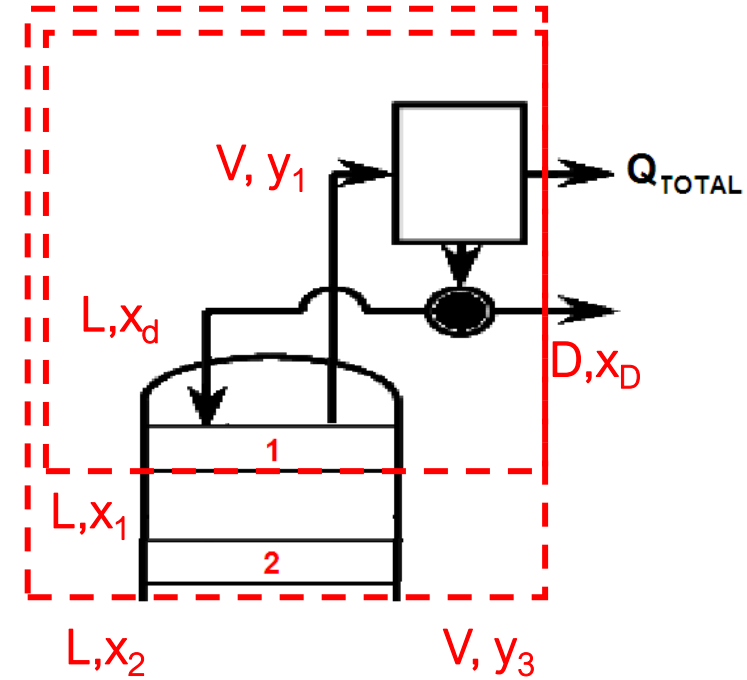
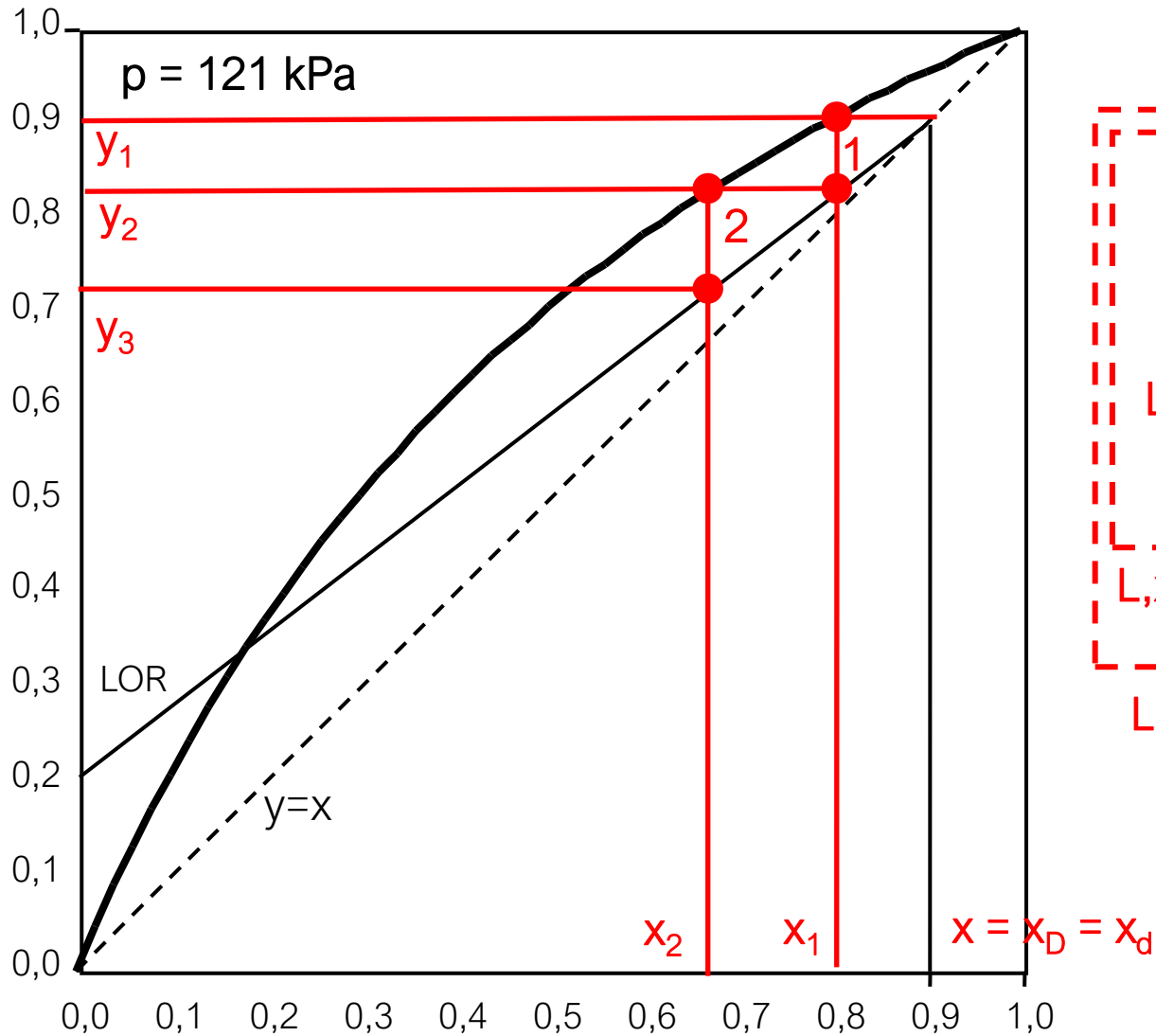
$$\text{Reflujo} = R_D = L/D$$

$$\frac{x_D}{R_D + 1}$$

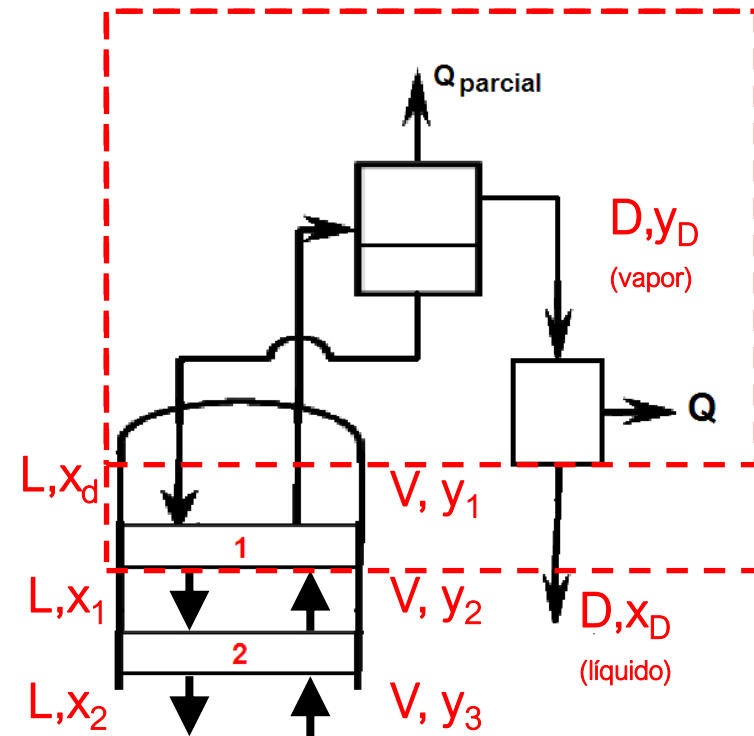
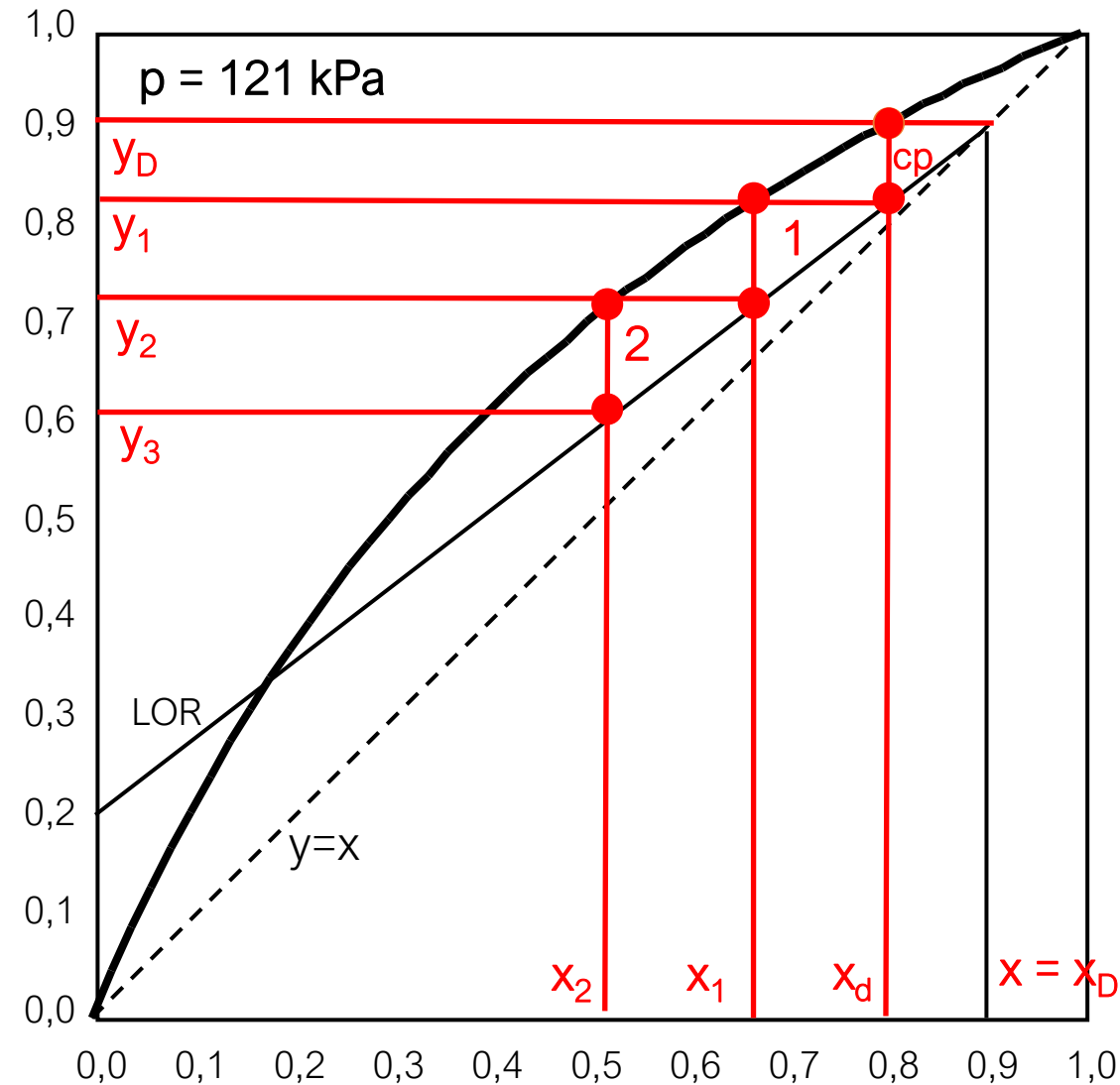


OJO: Revisar balance térmico en McC&S

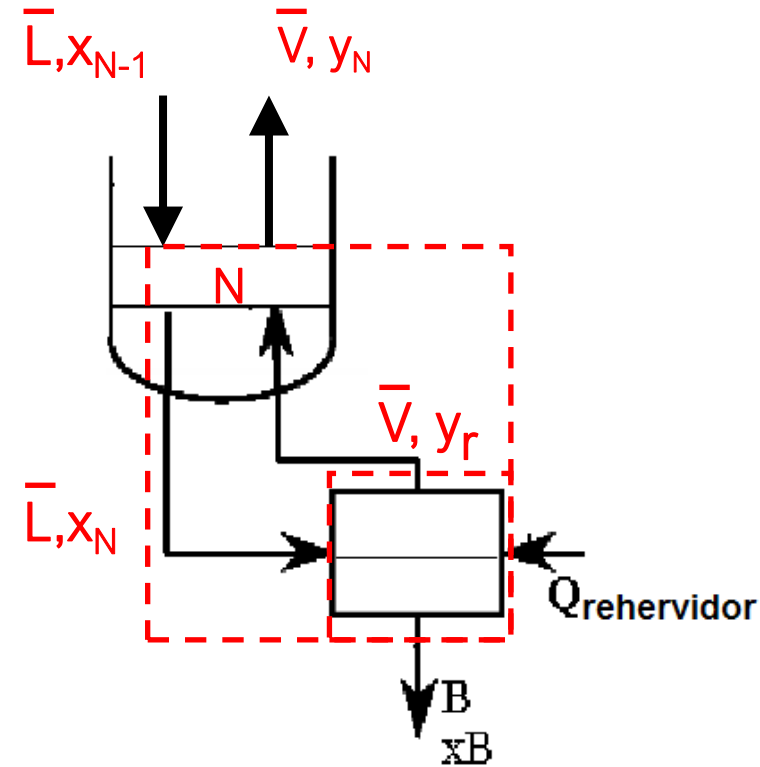
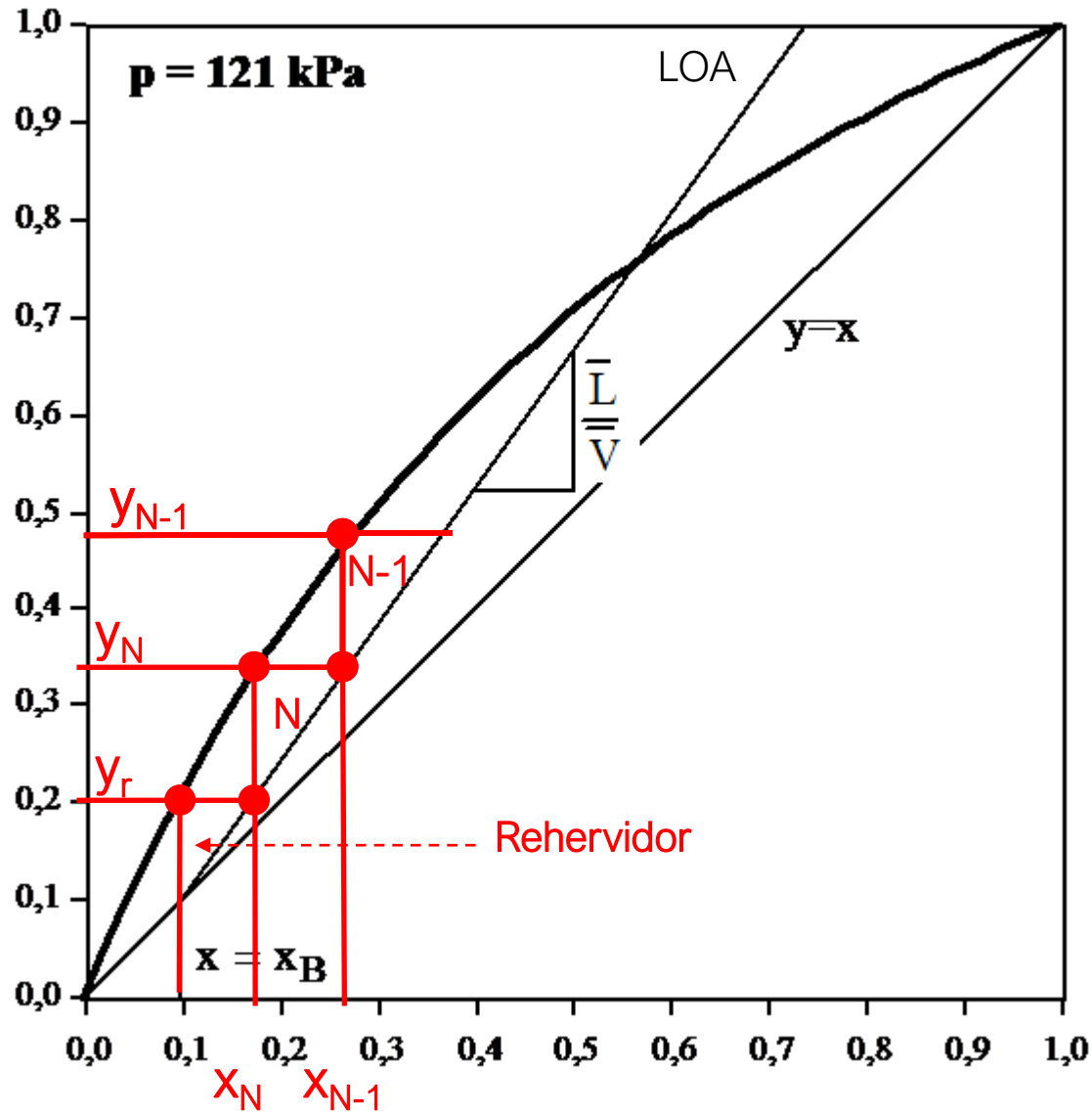
# Parte superior: Condensador total



# Parte superior: Condensador parcial (se produce EFQ)

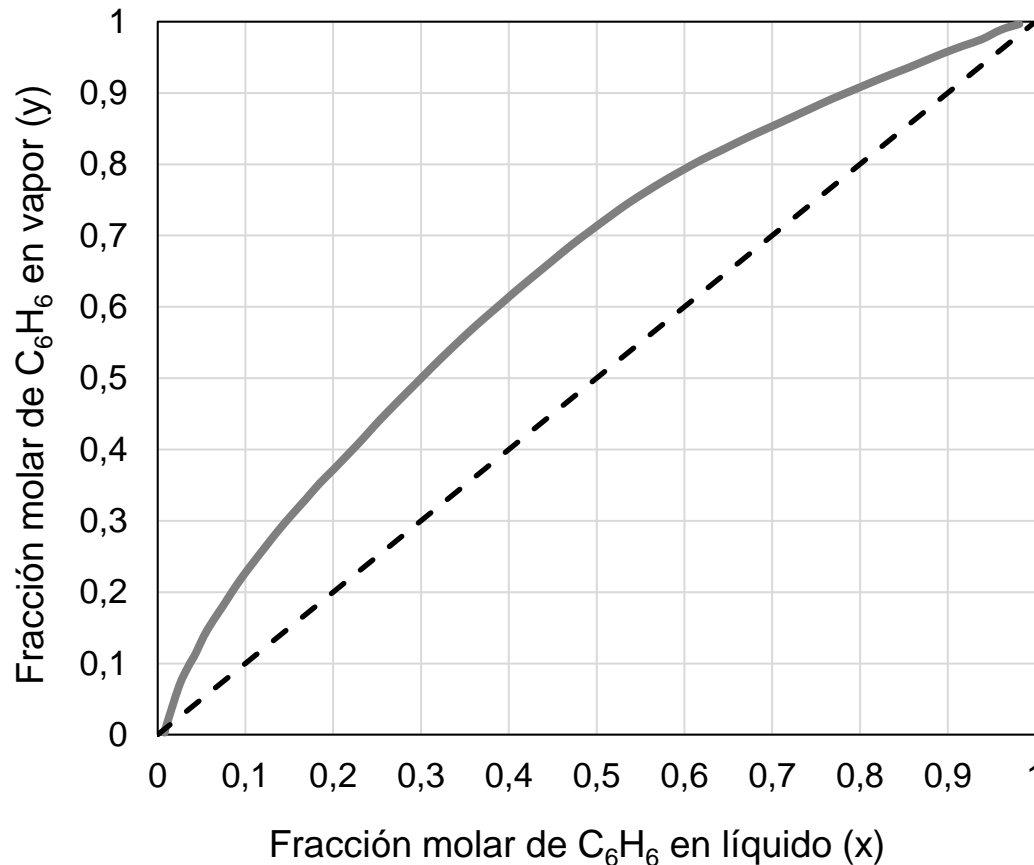


# Parte inferior: Hervidor



# Veamos un ejemplo

Una mezcla de benceno y tolueno contiene 40% de benceno y se desea separarlo en una columna de destilación fraccionada, obteniendo un producto de destilado de 90% de benceno y un producto de cola que tenga a lo más de 10% de benceno. La alimentación de la columna está en su punto de ebullición y se configura la columna para trabajar con una razón de reflujo igual a 3 ( $R_D = L/D = 3$ ) utilizando un condensador total. Determine el número de platos teóricos aplicando el método McCabe-Thiele, apóyese en el diagrama de equilibrio entregado.



# Veamos un ejemplo

Supongamos una corriente de 100 kmol de alimentación por hora, entonces el balance global en la columna es:

$$100 = D + B$$

El balance por el componente más volátil (benceno) es:

$$(100 \cdot 0.4) = 0.9 \cdot D + 0.1 \cdot B$$

Si, sustituimos el término B por (100-D) obtenemos:

$$40 = 0.9 \cdot D + 0.1 \cdot (100 - D)$$

$$D = 37.5 \text{ kmol/h} \quad y \quad B = 62.5 \text{ kmol/h}$$

Ahora si utilizamos de definición de reflujo obtenemos que:

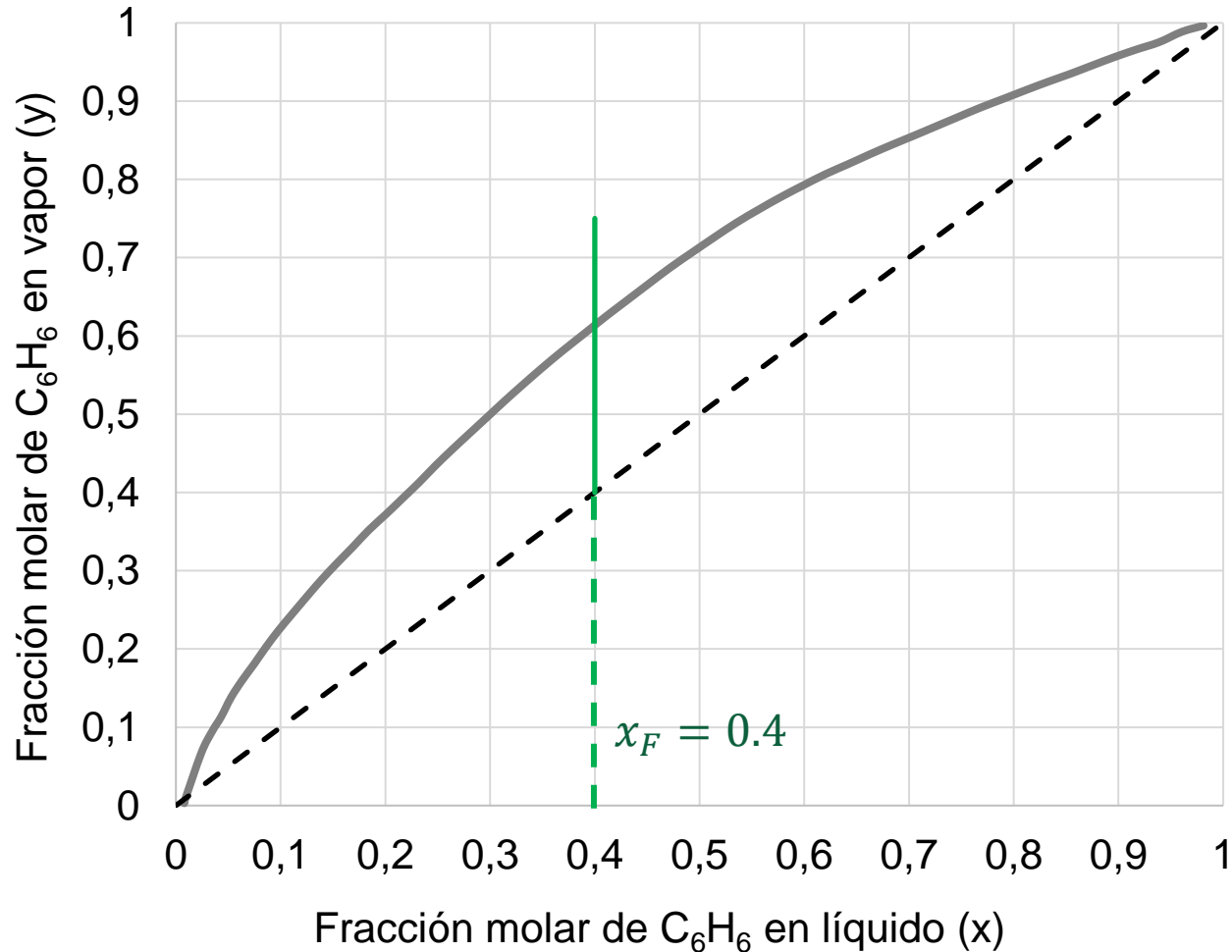
$$R_D = \frac{L}{D} = 3 \rightarrow L = 3D = 112.5 \text{ kmol/h}$$

Y haciendo el balance en la zona de rectificación obtenemos que:

$$V = L + D = 150 \text{ kmol/h}$$

# Veamos un ejemplo

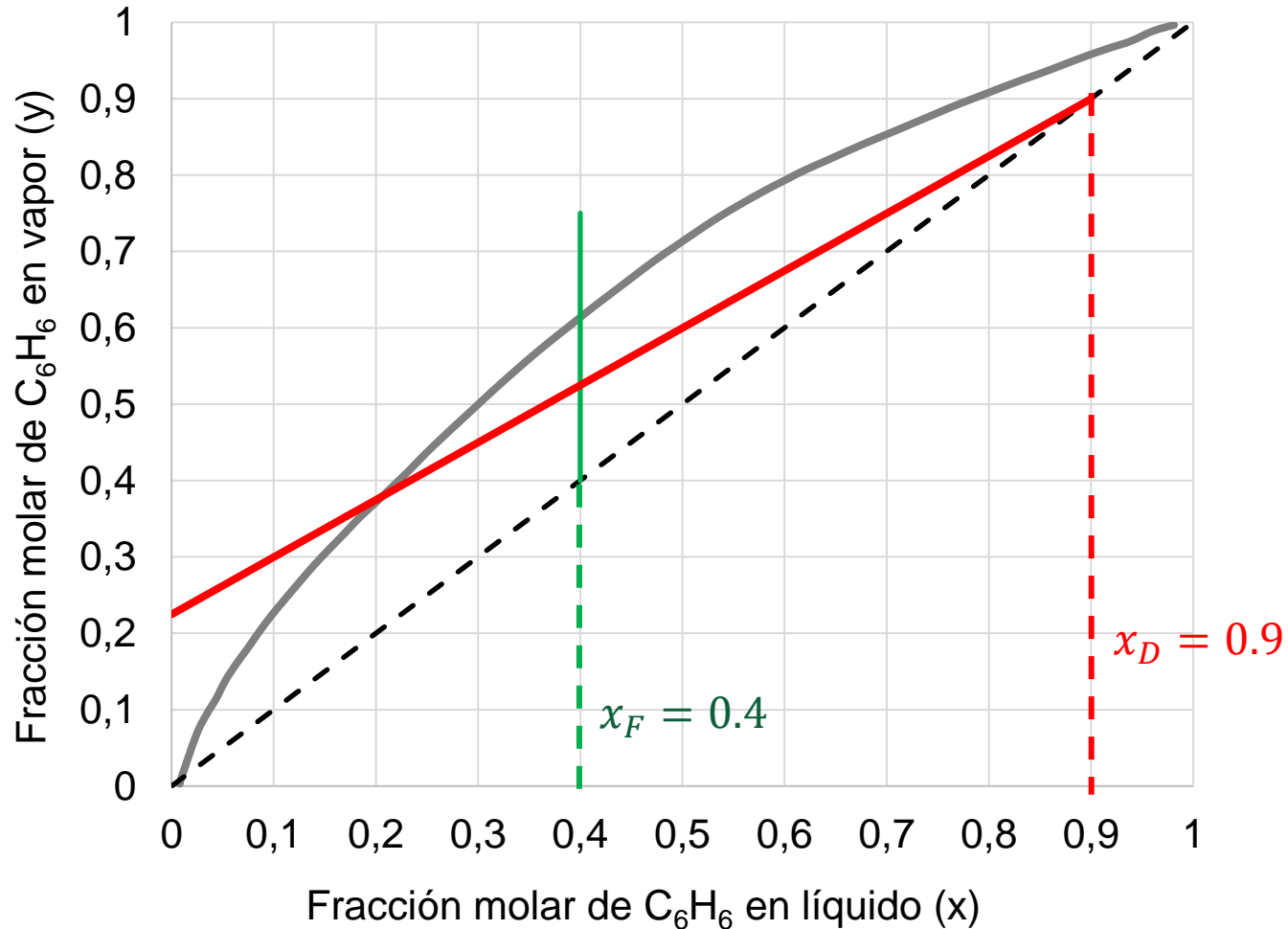
Graficamos la línea de alimentación ( $q$ ), como estamos con una alimentación en el punto de ebullición entonces  $q = 1$



# Veamos un ejemplo

Trazamos la LOR utilizando la formula:

$$y = \frac{R_D}{R_D + 1}x + \frac{x_D}{R_D + 1} = \frac{3}{3 + 1}x + \frac{0.9}{3 + 1} = 0.75x + 0.225$$

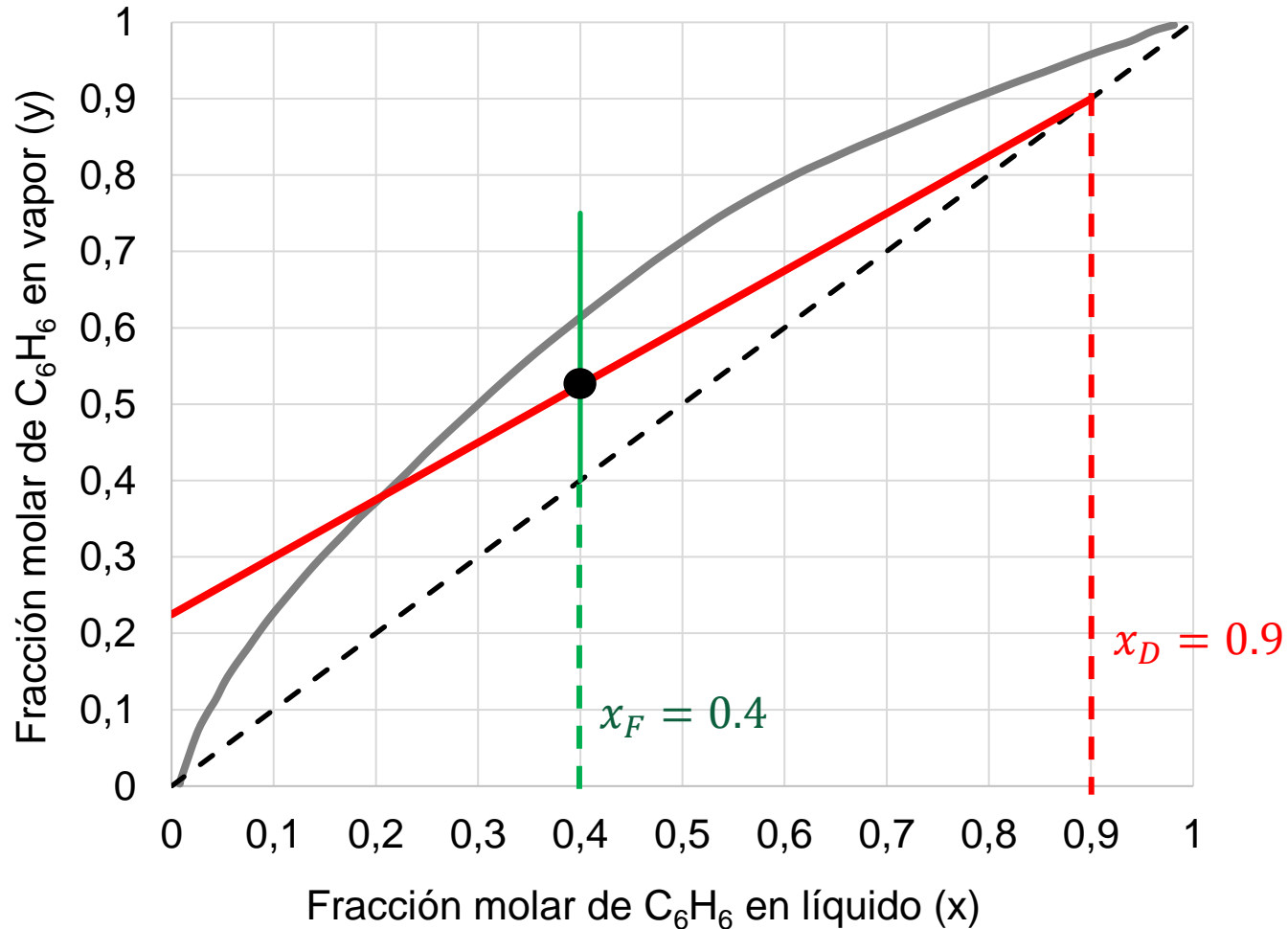




# Veamos un ejemplo

Al interceptar la alimentación con la línea de operación obtenemos:

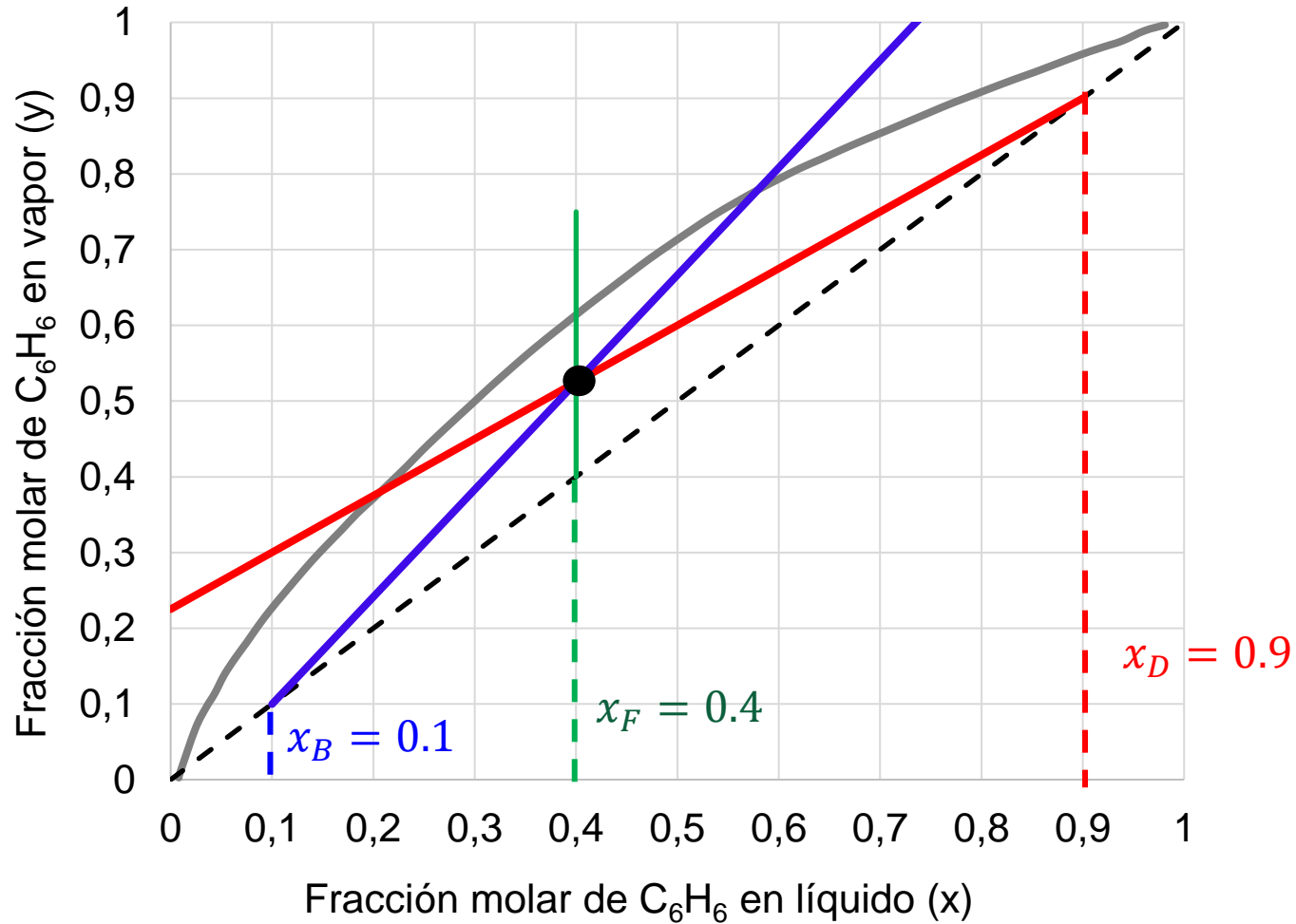
$$y = 0.75x + 0.225 = 0.75(0.4) + 0.225 = 0.525$$



# Veamos un ejemplo

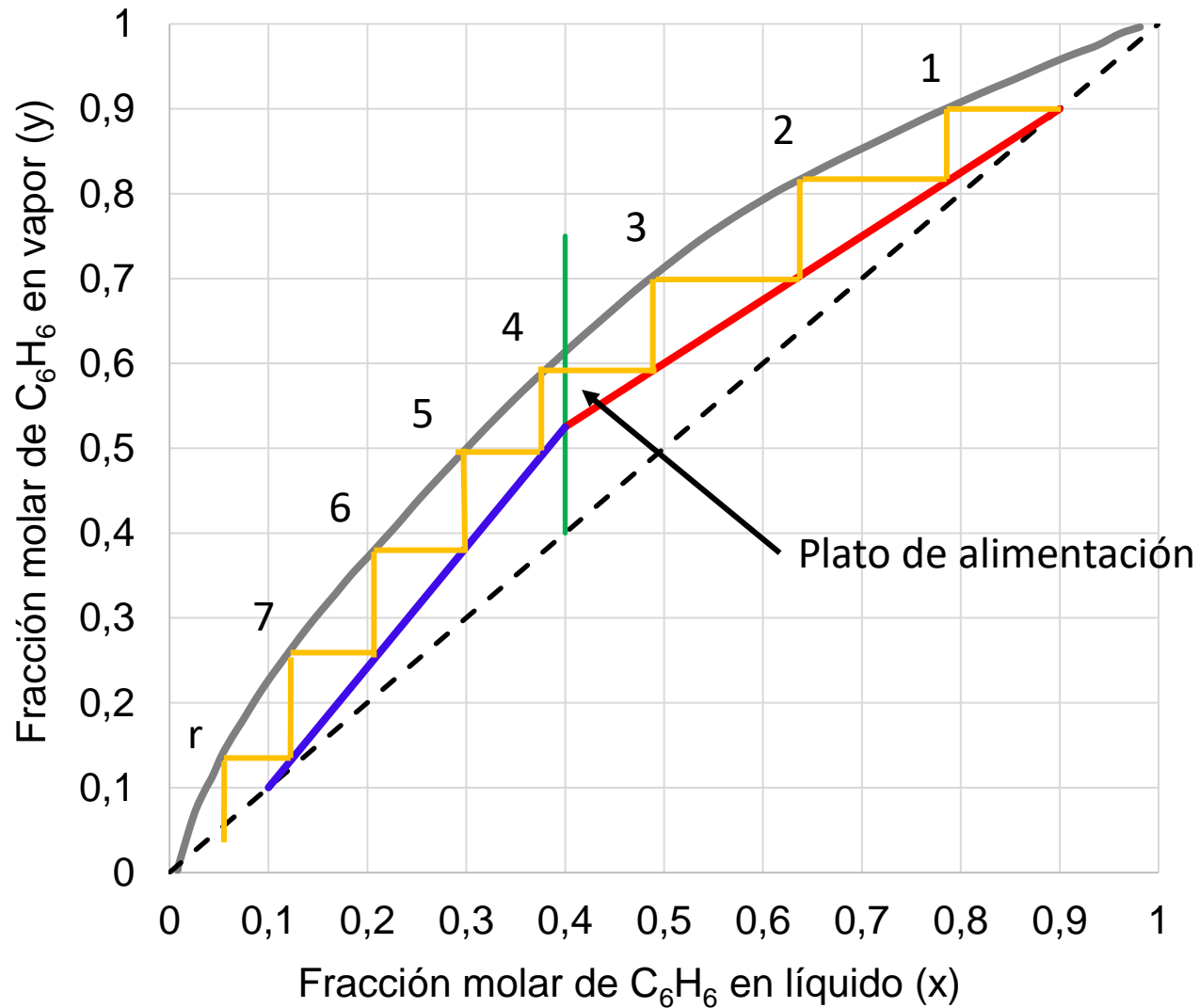
Se traza la línea de operación LOA considerando ambos puntos disponible

$$y = \frac{0.1 - 0.525}{0.1 - 0.4} \cdot (x - 0.1) + 0.1$$



# Veamos un ejemplo

Empezamos a trazar los platos del sistema



# Método de McCabe y Thiele

Pasos a seguir (normalmente) en la construcción de diagrama:

1. Localizar línea  $q$  (z y calidad de la alimentación, i.e.  $q$ )
2. Determinar intersección de LOR en  $x=0$  [ $x_D/(R_D + 1)$ ] y en  $x = y = x_D$
3. Trazar LOA (que pasa por  $x = y = x_B$ ) hasta intersectar línea  $q$
4. Comenzar construcción de escalones (fondo o por arriba)
5. Al acercarse a intersección de LOA y LOR realizar cambio de LO cuando se produzca el máximo enriquecimiento (escalón sea + grande):  $n^\circ$  mínimo de platos
6. Plato de alimentación queda siempre definido por tener un vértice en la LOR y el otro en la LOA
7. ¡Ojo ! Las posibles localizaciones del plato de alimentación

- Comprender el concepto de línea de operación en una columna de destilación.
- Determinar el número de etapas teórico requerido para realizar una destilación binaria considerando el supuesto de flujos molares constantes (método de McCabe y Thiele).

# Método de McCabe y Thiele

## IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

30 de Marzo de 2021

