

# Aspectos de diseño de columnas de destilación

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

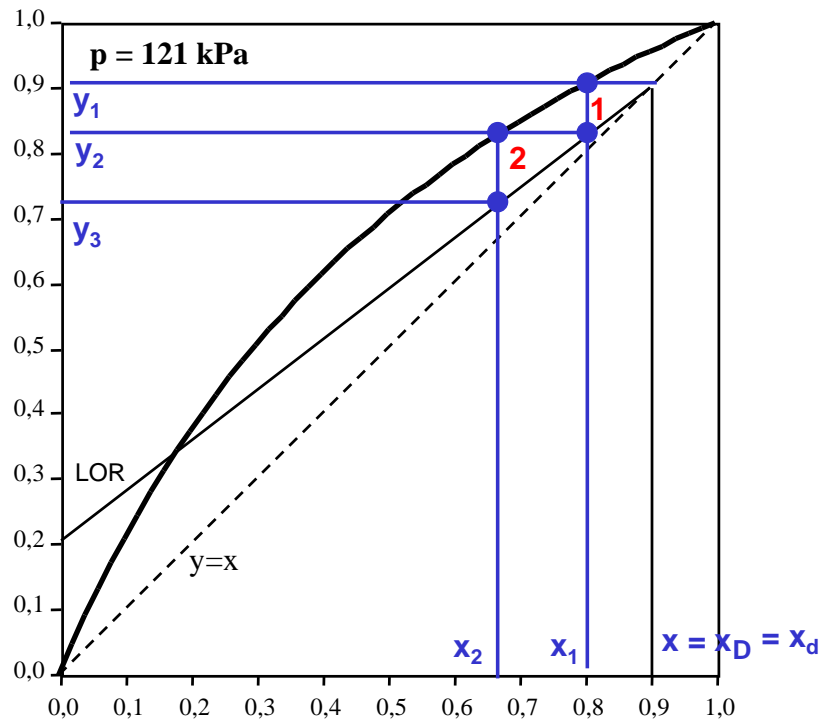
José Rebolledo Oyarce

1 de Abril de 2021

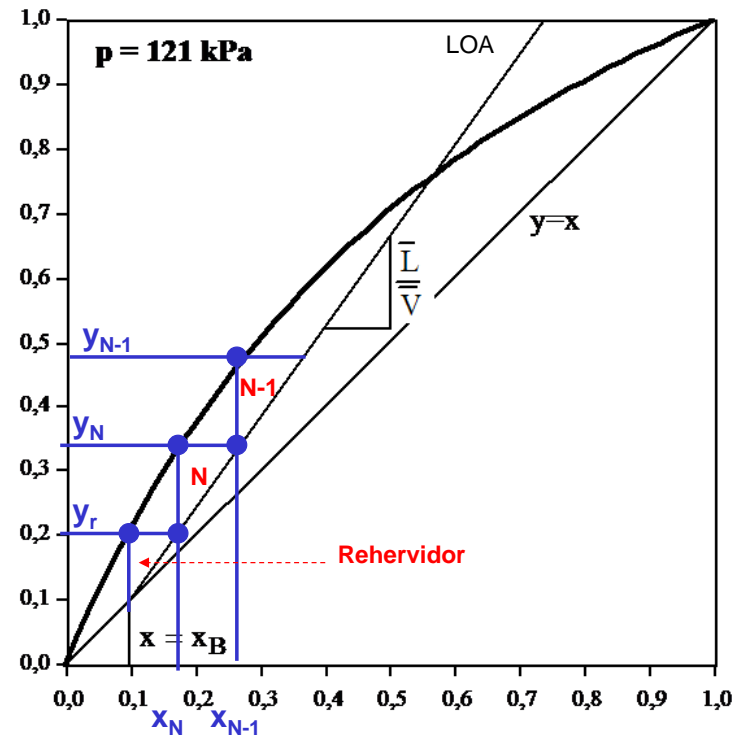


- Recordatorio de Clase Anterior
- Objetivos de la Clase
- Método McCabe y Thiele (continuación)
  - Línea  $q$
  - Flujo Optimo en una torre de Destilación
  - Concepto de Eficiencia

# Línea LOA y LOR



LOR



LOA

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

Recordemos:

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

---

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

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:

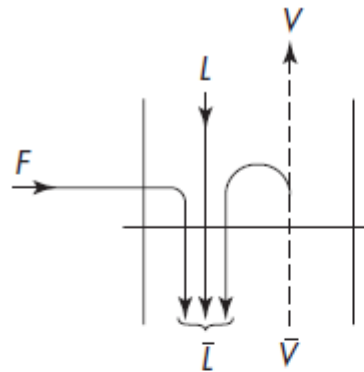
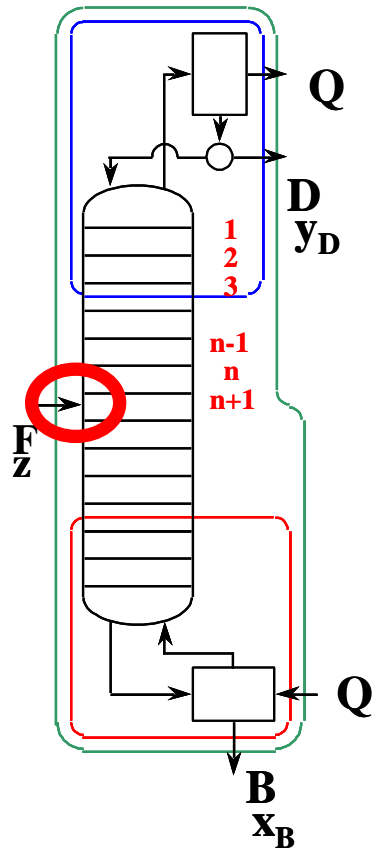
$$y \cdot (1 - q) \cdot F = -q \cdot F \cdot x + F \cdot z$$

Línea q: Intersección de LOR y LOA

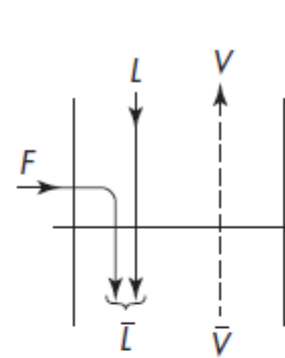
$$y = -\frac{q}{1 - q} \cdot x + \frac{1}{1 - q} \cdot z$$

# Los distintos tipos de alimentación: la línea q

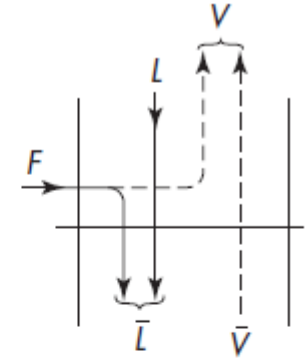
$$q = \frac{\text{moles de líquido de alimentación a sección de agotamiento}}{\text{moles alimentados}}$$



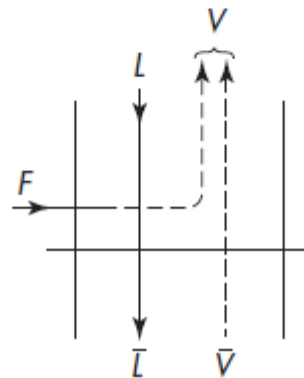
Líquido subenfriado



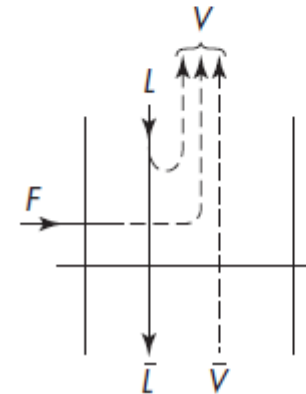
Líquido pto. burbuja



Mezcla líquido-vapor



Vapor pto. rocío



Vapor sobrecalentado

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 ( $z$ )

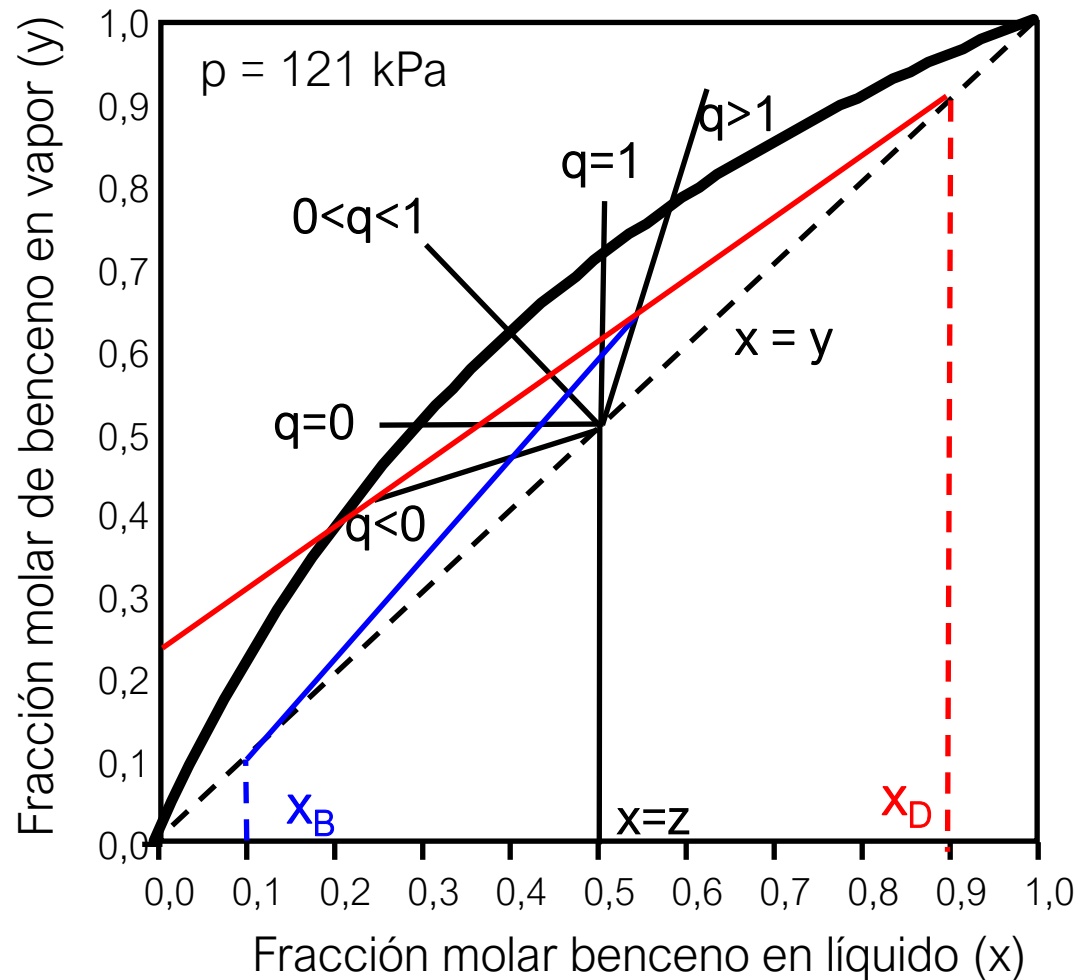
$$y = -\frac{q}{1-q} \cdot x + \frac{1}{1-q} \cdot z$$

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 ( $z$ )

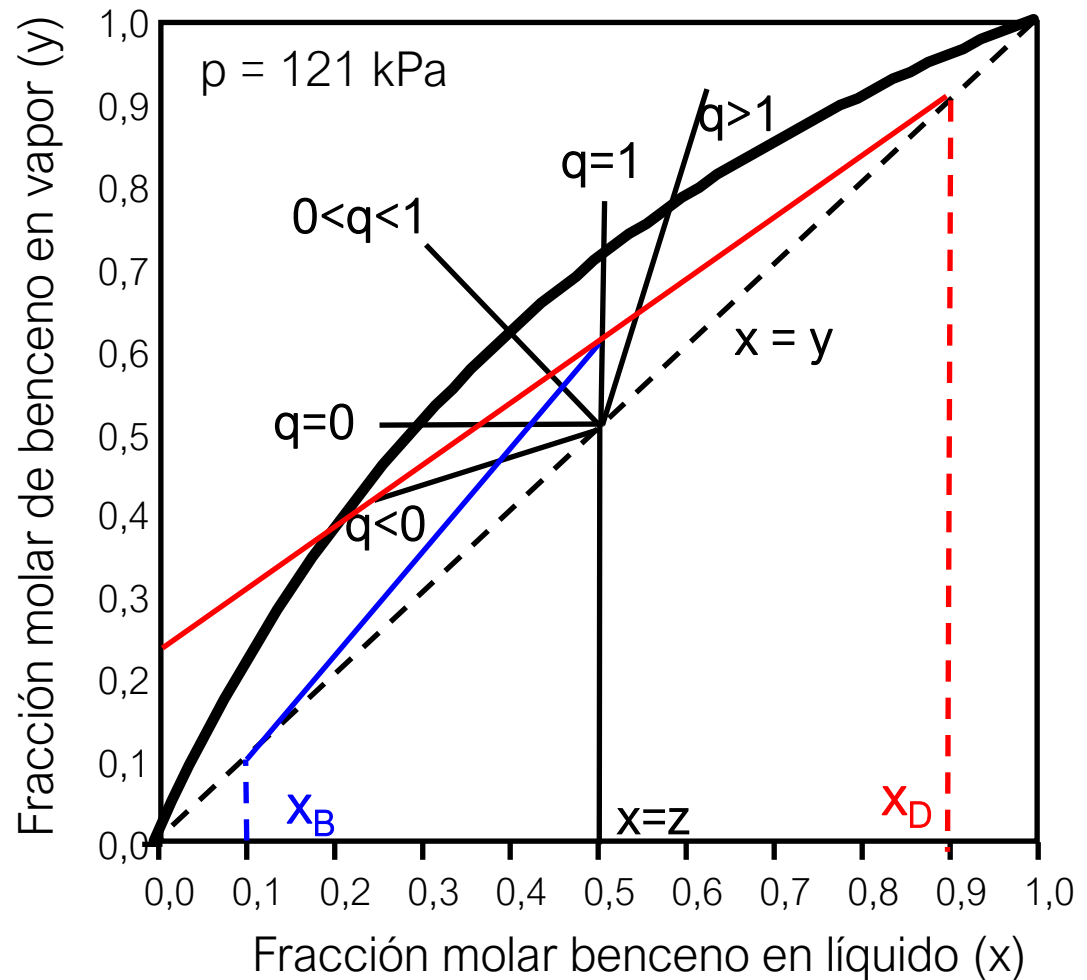
$$y = -\frac{q}{1-q} \cdot x + \frac{1}{1-q} \cdot z$$

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



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)

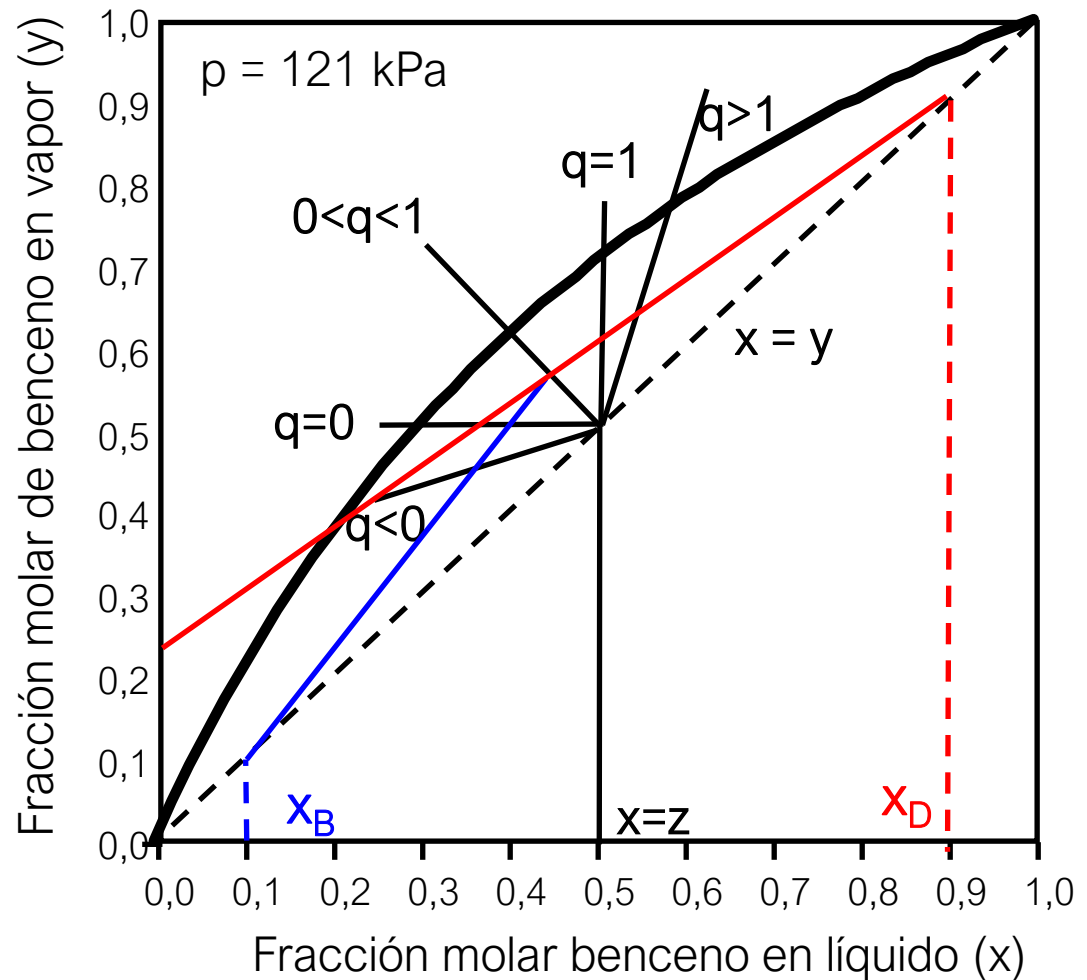
$$y = -\frac{q}{1-q} \cdot x + \frac{1}{1-q} \cdot z$$

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)

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



# 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

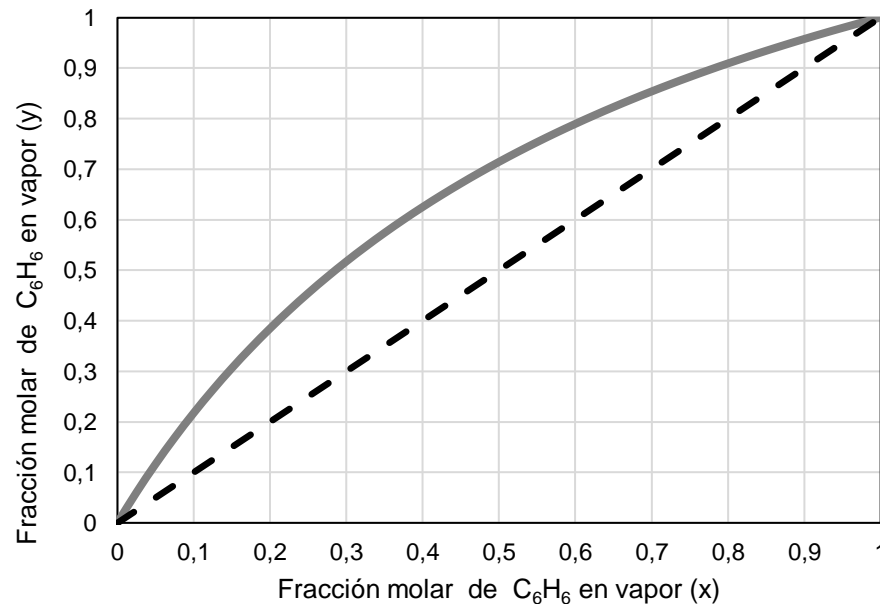
# Objetivos de la Clase

- Continuar aprendiendo el método de McCabe y Thiele.
- Comprender los criterios que rigen la definición del flujo óptimo.
- Conocer y aplicar los conceptos de eficiencia de una operación.

# Impacto de la alimentación en el número de plato

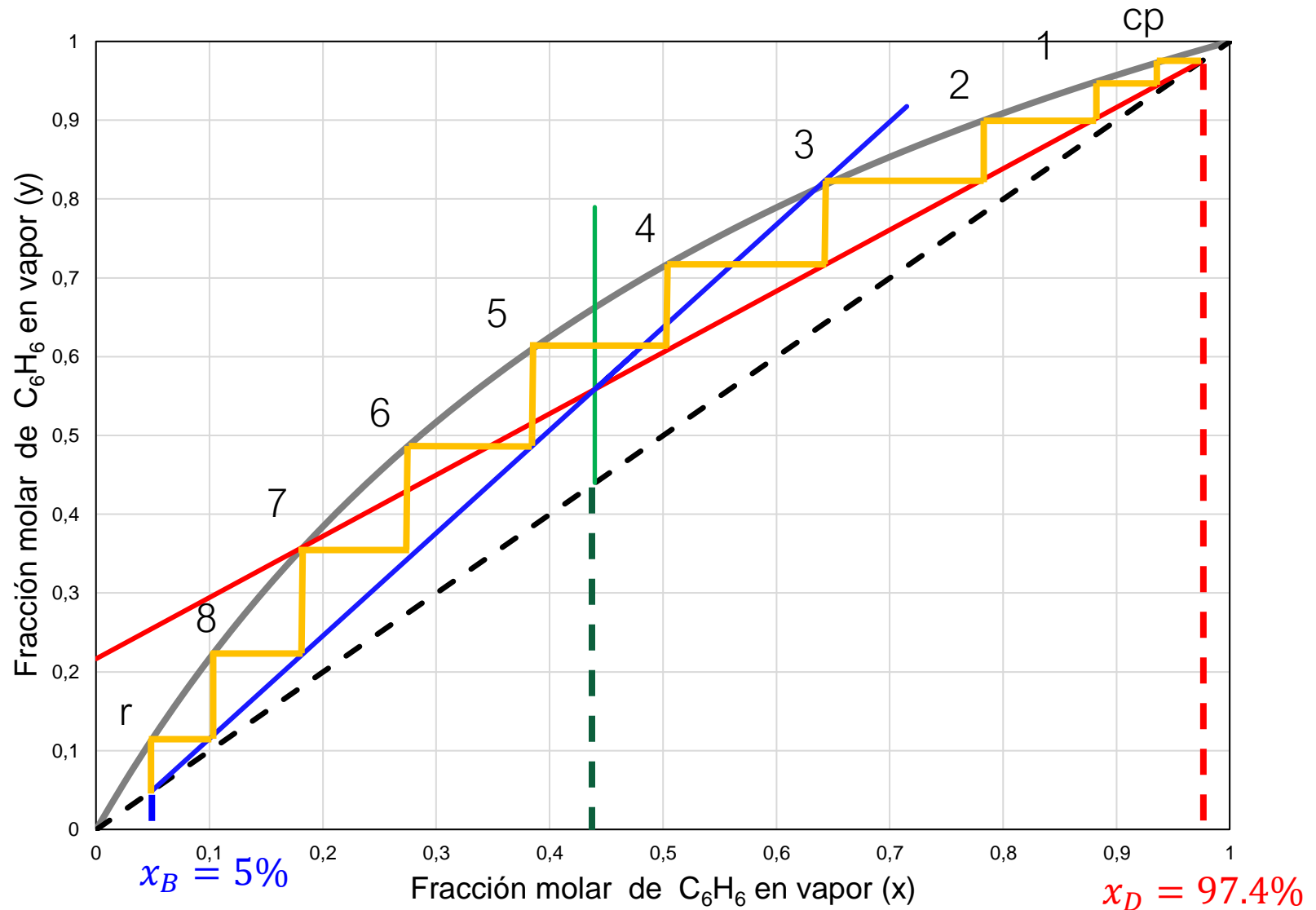
Se va a diseñar una columna de fraccionamiento continuo para separar 30 000 kg/h de una mezcla de 44% molar de benceno y un producto destilado que contiene 97.4% molar de benceno y un producto residual de al menos 95% molar de tolueno. Se utilizará una relación de reflujo de 3.5 moles por 1 mol de producto usando un condensador parcial. La alimentación tiene una temperatura de ebullición de 95 °C a la presión de 1 atm. Haga el análisis:

- Si la alimentación es un líquido a su temperatura de ebullición
- Si la alimentación es un líquido a 20 °C (calor específico = 0.44 cal/g °C y  $\lambda = 89.7$  cal/g, ambos valores de la mezcla, y temperatura de burbuja de la alimentación igual a 95 °C)
- Si la alimentación es una mezcla de dos tercios de vapor y un tercio de líquido.



# Impacto de la alimentación en el número de plato

Caso 1: Si la alimentación es un líquido a su temperatura de ebullición



# Impacto de la alimentación en el número de plato

Caso 2: Si la alimentación es un líquido a 20 °C (calor específico = 0.44 cal/g °C y  $\lambda$  = 89.7 cal/g, ambos valores de la mezcla, y temperatura de burbuja de la alimentación igual a 95 °C)

$$q = 1 + \frac{0.44(95 - 20)}{89.7} = 1.37$$

Línea q:

$$y = -\frac{q}{1 - q} \cdot x + \frac{1}{1 - q} \cdot z = -\frac{1.37}{(1 - 1.37)}x + \frac{0.44}{(1 - 1.37)} = 3.702x - 1.189$$

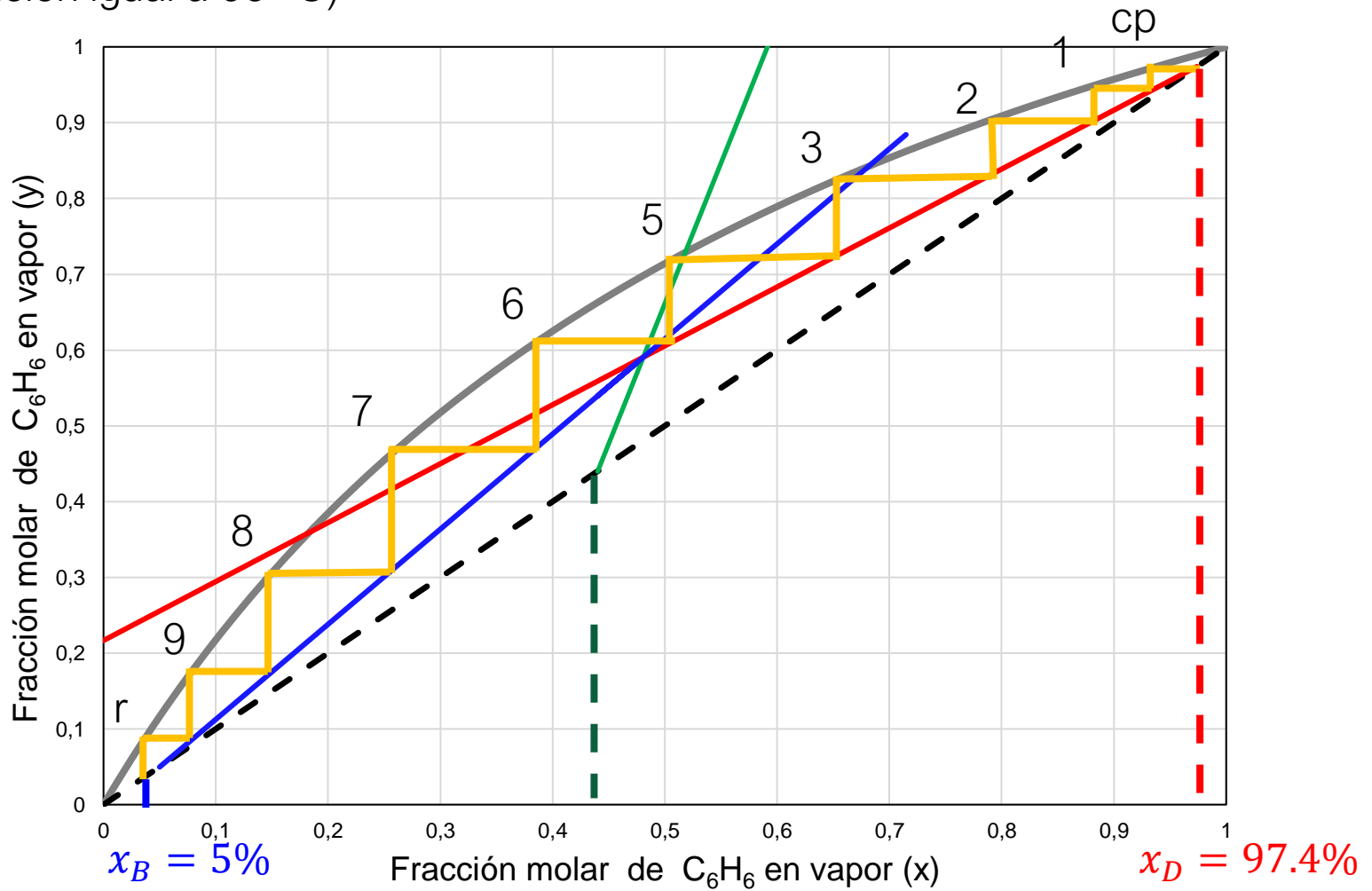
Punto de Intersección entre LOR y Línea q:

$$\frac{R_D}{R_D + 1}x + \frac{x_D}{R_D + 1} = 3.702x - 1.189 \quad \rightarrow \quad x = 0.48 \quad ; \quad y = 0.59$$



# Impacto de la alimentación en el número de plato

Caso 2: Si la alimentación es un líquido a 20 °C (calor específico = 0.44 cal/g °C y  $\lambda = 89.7$  cal/g, ambos valores de la mezcla, y temperatura de burbuja de la alimentación igual a 95 °C)



# Impacto de la alimentación en el número de plato

Caso 3: Si la alimentación es una mezcla de dos tercios de vapor y un tercio de líquido.

$$q = \frac{1}{3}$$

Línea q:

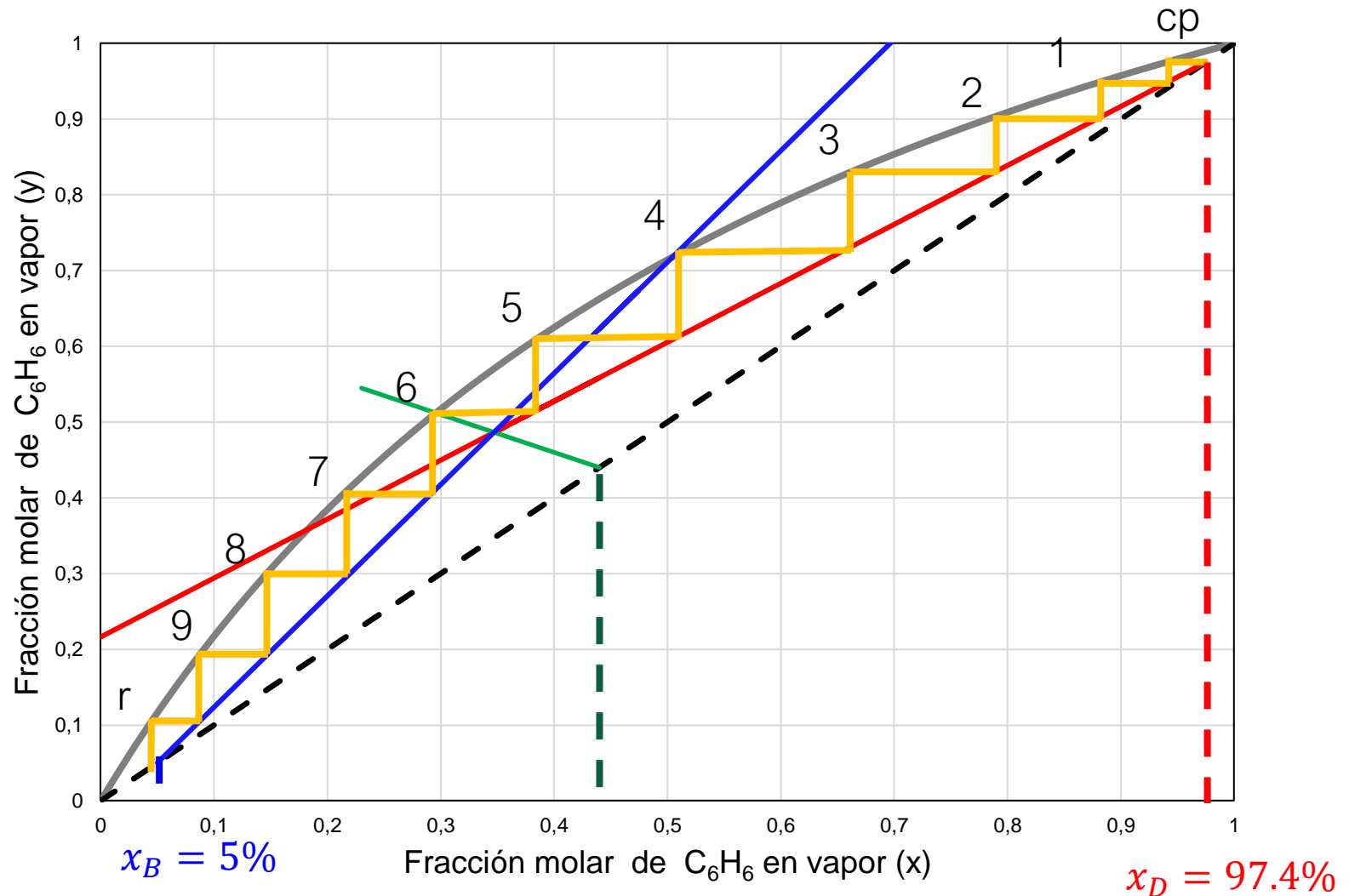
$$y = -\frac{q}{1-q} \cdot x + \frac{1}{1-q} \cdot z = -\frac{\frac{1}{3}}{\left(1 - \frac{1}{3}\right)} x + \frac{0.44}{\left(1 - \frac{1}{3}\right)} = -0.5x + 0.66$$

Punto de Intersección entre LOR y Línea q:

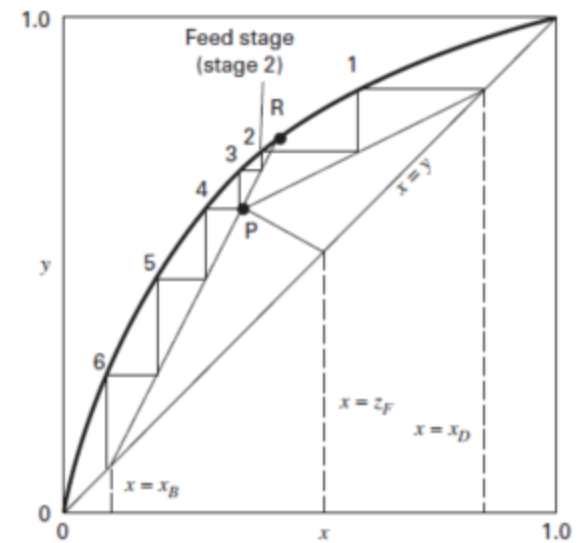
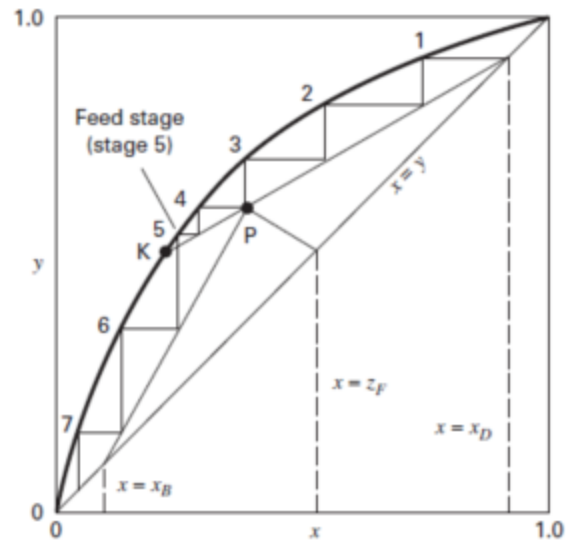
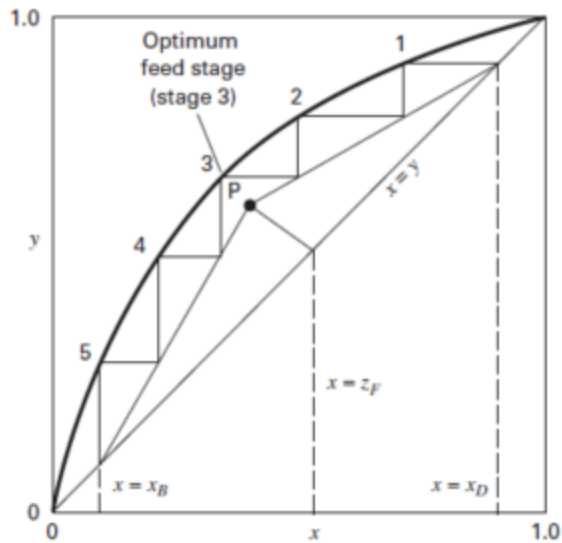
$$\frac{R_D}{R_D + 1} x + \frac{x_D}{R_D + 1} = -0.5x + 0.66 \rightarrow x = 0.34 \quad ; \quad y = 0.486$$

# Impacto de la alimentación en el número de plato

Caso 3: Si la alimentación es una mezcla de dos tercios de vapor y un tercio de líquido.



# Localización óptima de alimentación



# Reflujo total y número mínimo de platos

Recordando la ecuación que define el término de volatilidad relativa en una mezcla ideal binaria es:

$$\alpha_{AB} = \frac{\frac{y_A}{x_A}}{\frac{y_B}{x_B}} \rightarrow y = \frac{\alpha_{AB} x}{1 + (\alpha_{AB} - 1)x}$$

# Reflujo total y número mínimo de platos

Y Si consideramos el caso de reflujo total, tenemos que el término  $D$  es igual a cero y  $L/V = 1$ , con ello la Línea de Operación en la zona de Rectificación es:

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

∴ Tenemos una línea de operación que tiene un ángulo de  $45^\circ$  en el diagrama  $xy$

Entonces, para el plato  $N+1$  cualquiera tenemos que se da lo siguiente:

$$\frac{y_{A,N+1}}{y_{B,N+1}} = \alpha_{AB} \frac{x_{A,N+1}}{x_{B,N+1}} \rightarrow \frac{y_{N+1}}{1 - y_{N+1}} = \alpha_{AB} \frac{x_{N+1}}{1 - x_{N+1}}$$

# Reflujo total y número mínimo de platos

Entonces, para el plato  $N+1$  cualquiera tenemos que se da lo siguiente:

$$\frac{y_{A,N+1}}{y_{B,N+1}} = \alpha_{AB} \frac{x_{A,N+1}}{x_{B,N+1}} \quad \rightarrow \quad \frac{y_{N+1}}{1 - y_{N+1}} = \alpha_{AB} \frac{x_{N+1}}{1 - x_{N+1}}$$

Entonces si lo hacemos para los N platos de la columna obtenemos que:

$$\begin{aligned}\frac{x_D}{1-x_D} &= \alpha_{AB} \frac{x_1}{1-x_1} \\ \frac{x_1}{1-x_1} &= \alpha_{AB} \frac{x_2}{1-x_2} \\ &\vdots \\ \frac{x_{n-1}}{1-x_{n-1}} &= \alpha_{AB} \frac{x_n}{1-x_n} \\ \frac{x_n}{1-x_n} &= \alpha_{AB} \frac{x_B}{1-x_B}\end{aligned}$$

## Reflujo total y número mínimo de platos

Entonces si lo hacemos para los N platos de la columna obtenemos que:

[illegible]

Con ellos tenemos:

$$\frac{x_D}{1 - x_D} = (\alpha_{AB})^{N_{min}+1} \frac{x_B}{1 - x_B}$$

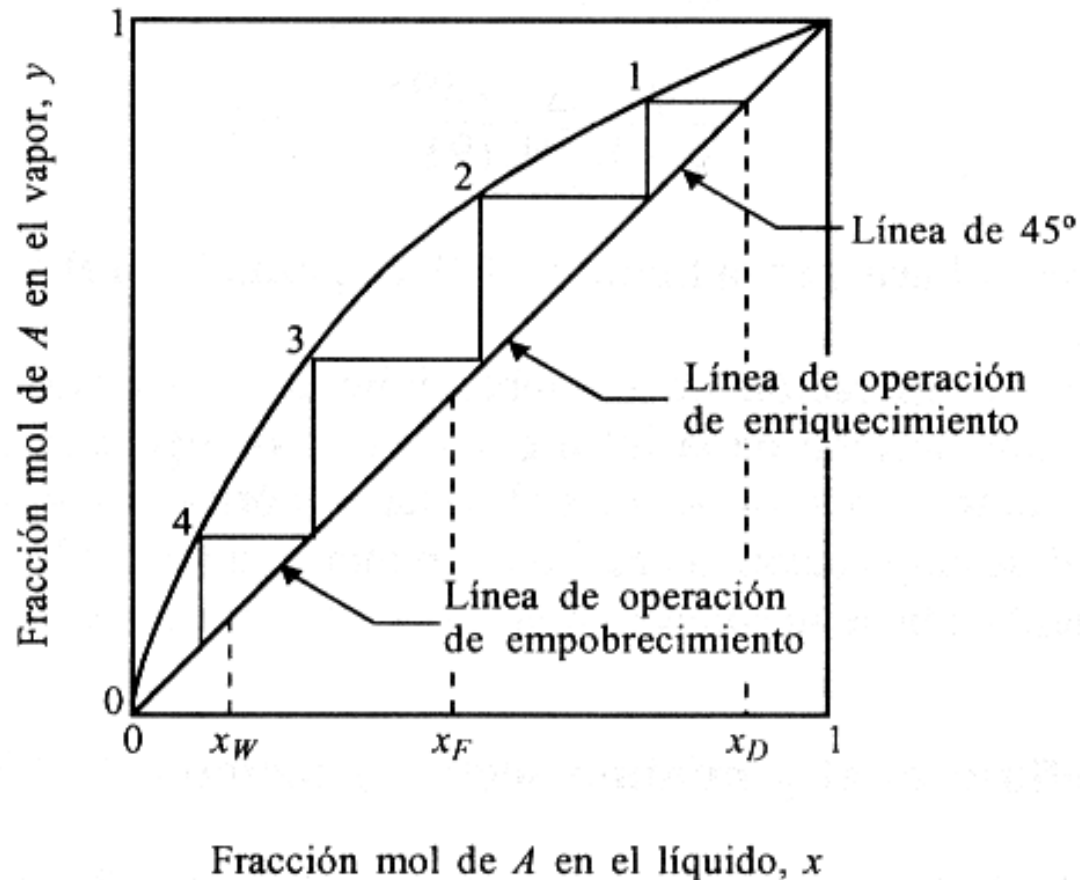
$$N_{min} = \frac{\ln \left[ \frac{x_D(1-x_B)}{x_B(1-x_D)} \right]}{\ln \alpha_{AB}} - 1$$

## Ecuación de Fenske

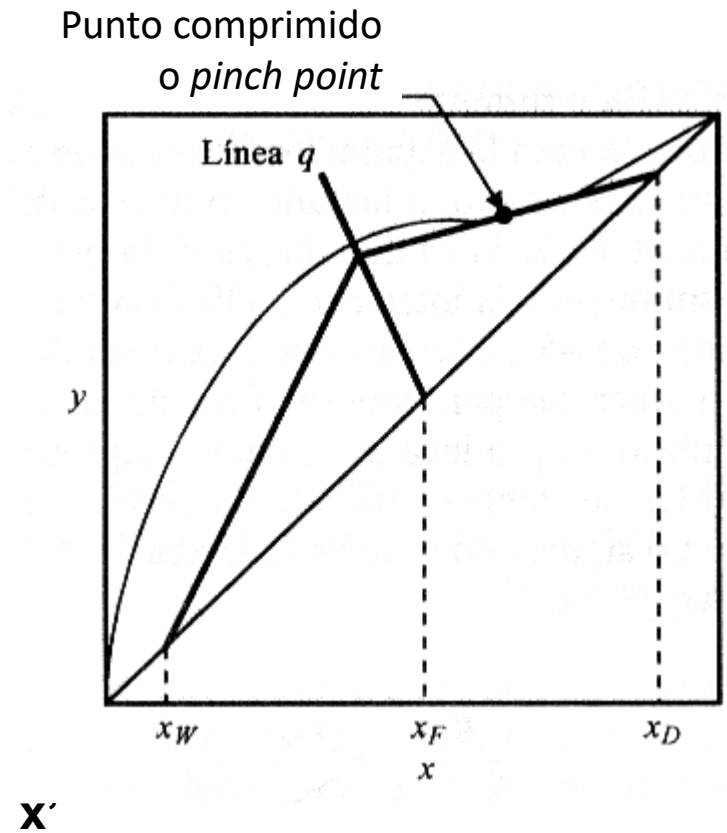
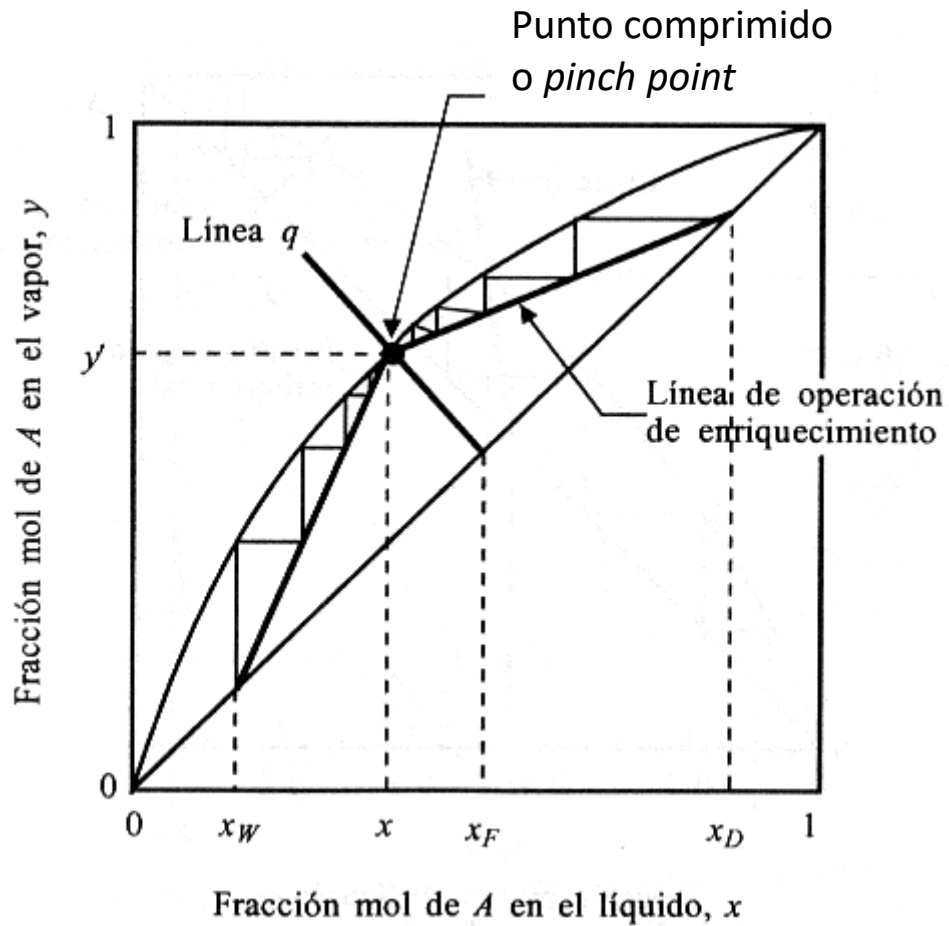


# Reflujo total y número mínimo de platos

Con ello, tenemos que en el diagrama se general nos siguientes escalones (platos ideales)



# Reflujo mínimo

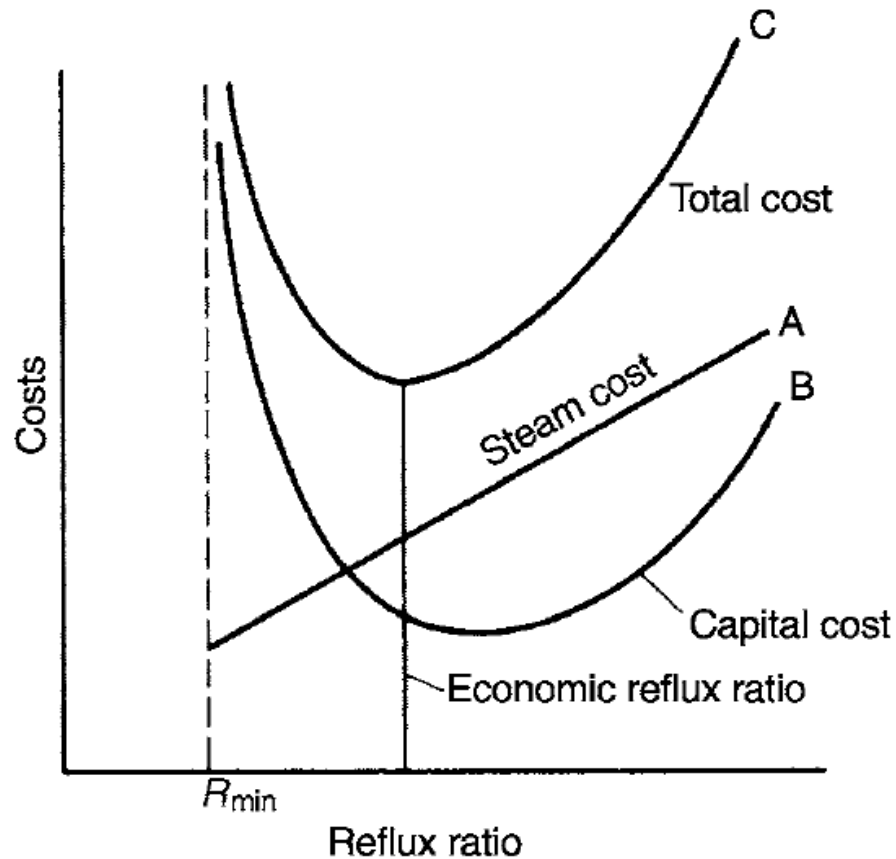


# Operación óptima de columna de destilación

**Table 7.3** Effect of Reflux Ratio on Annualized Cost of a Distillation Operation

$R/R_{\min}$	Actual $N$	Diam., ft	Reboiler Duty, Btu/h	Condenser Duty, Btu/h	Annualized Cost, \$/yr			Total Annualized Cost, \$/yr
					Equipment	Cooling Water	Steam	
1.00	Infinite	6.7	9,510,160	9,416,000	Infinite	17,340	132,900	Infinite
1.05	29	6.8	9,776,800	9,680,000	44,640	17,820	136,500	198,960
1.14	21	7.0	10,221,200	10,120,000	38,100	18,600	142,500	199,200
1.23	18	7.1	10,665,600	10,560,000	36,480	19,410	148,800	204,690
1.32	16	7.3	11,110,000	11,000,000	35,640	20,220	155,100	210,960
1.49	14	7.7	11,998,800	11,880,000	35,940	21,870	167,100	224,910
1.75	13	8.0	13,332,000	13,200,000	36,870	24,300	185,400	246,570

Adapted from an example by Peters and Timmerhaus [6].)



- Costo anual dominado por el costo del vapor (excepto para  $R_D$  mínimo)
- En el óptimo: costo de vapor  $\approx 70\%$  costo total
- Usualmente:  $R/R_{min} \approx 1.05$  para separaciones difíciles ( $\alpha = 1.2$ )  
 $\approx 1.5$  para separaciones fáciles ( $\alpha = 5$ )

# Límite de operación: velocidad de inundación

Límite superior de la velocidad del vapor en una columna está dado por el punto de inundación.

Correlación empírica establece que la máxima velocidad de operación es proporcional a  $[(\rho_L - \rho_V)/\rho_V]^{1/2}$ , i.e.:

$$u_c = K_v \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}} \left( \frac{\sigma}{20} \right)^{0.2}$$

Donde:

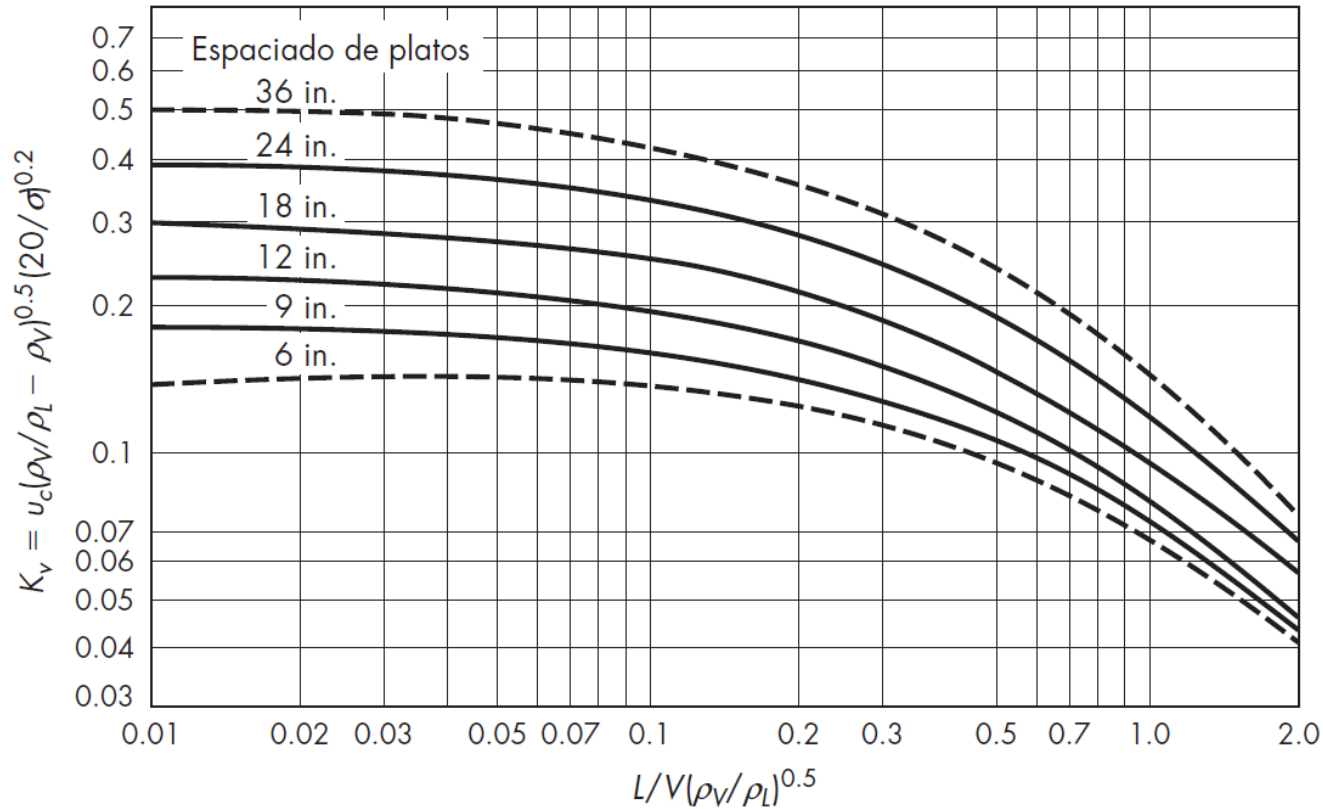
$K_v$  = Parámetro de Ajuste de la correlación

$\rho_L$ ,  
 $\rho_V$  = Densidad del líquido y vapor, respectivamente

$u_c$  = Máxima velocidad de vapor basada en el área de burbujeo

$\sigma$  = Tensión superficial del líquido

# Correlación gráfica que incluye efecto de tensión superficial



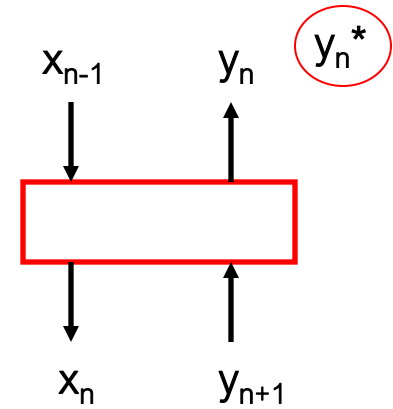
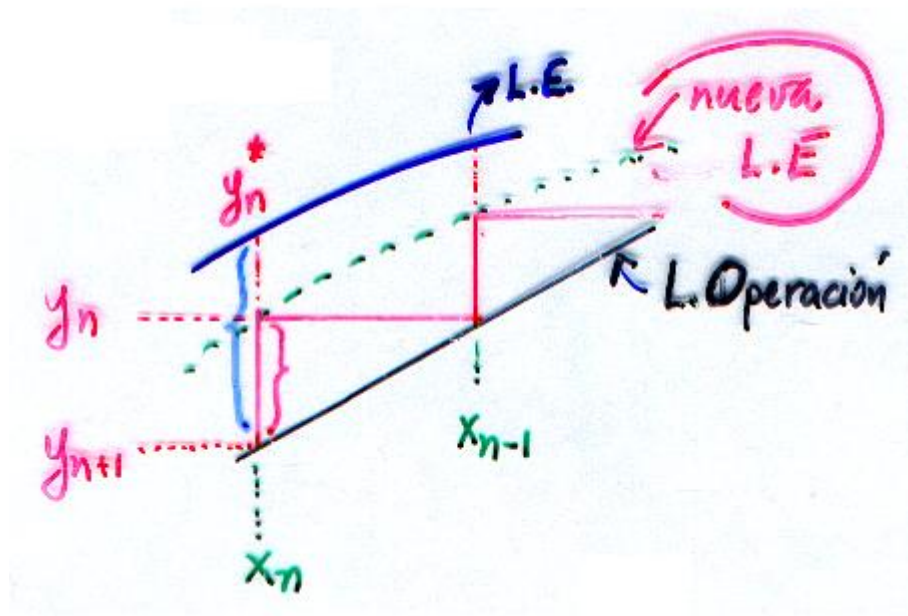
Valores de  $K_v$  para platos perforados en condiciones de inundación;  $L/V$  = relación entre las velocidades de flujo de masa de líquido a vapor,  $u$  está en pies por segundo y  $\sigma$  en dinas por centímetro. [J.R. Fair, *Petrol. Chem. Eng.*, 33(10):45, 1961. *Courtesy Petroleum Engineer.*]

Eficiencia Global (para toda la columna):

$$\eta_o = \frac{\# \text{ etapas ideales}}{\# \text{ etapas reales}}$$

Destilación de hidrocarburos  $\eta_o \approx 0.5 - 0.85$

# Eficiencia de Murphree (desviación de concepto de etapa ideal)



$$\eta_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

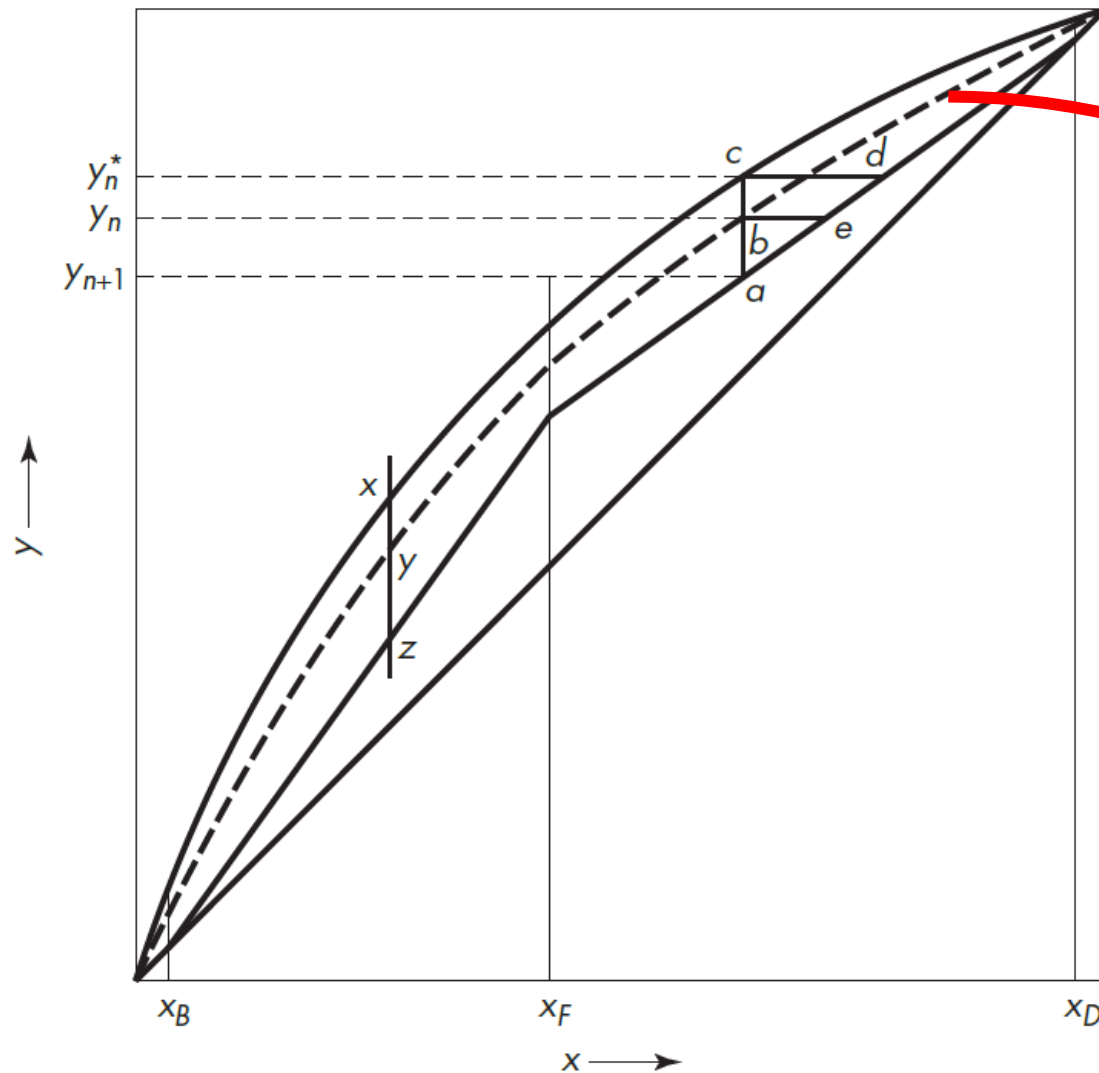
$y_n^*$  : composición del vapor en equilibrio con  $x_n$

Plato real: en vez de enriquecer desde  $y_{n+1} \rightarrow y_n^*$

$\rightarrow y_n$

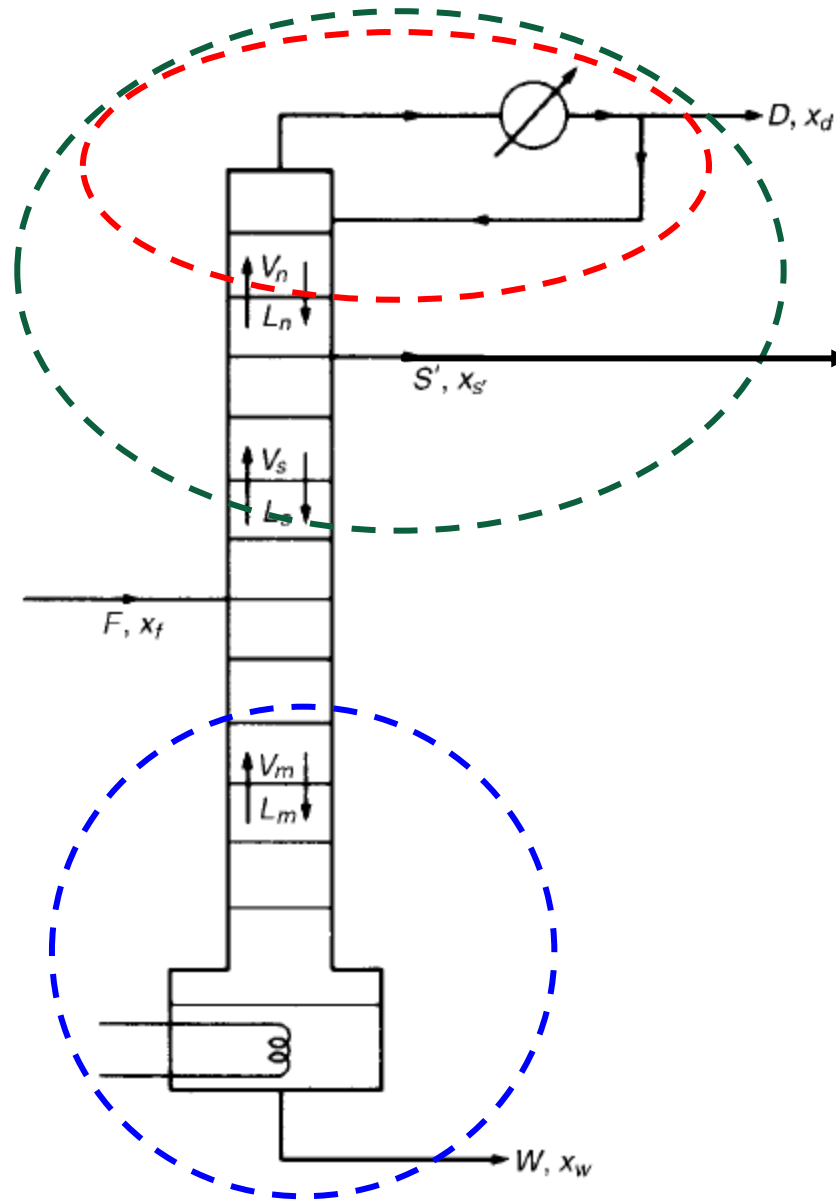


# Uso de la eficiencia de Murphree

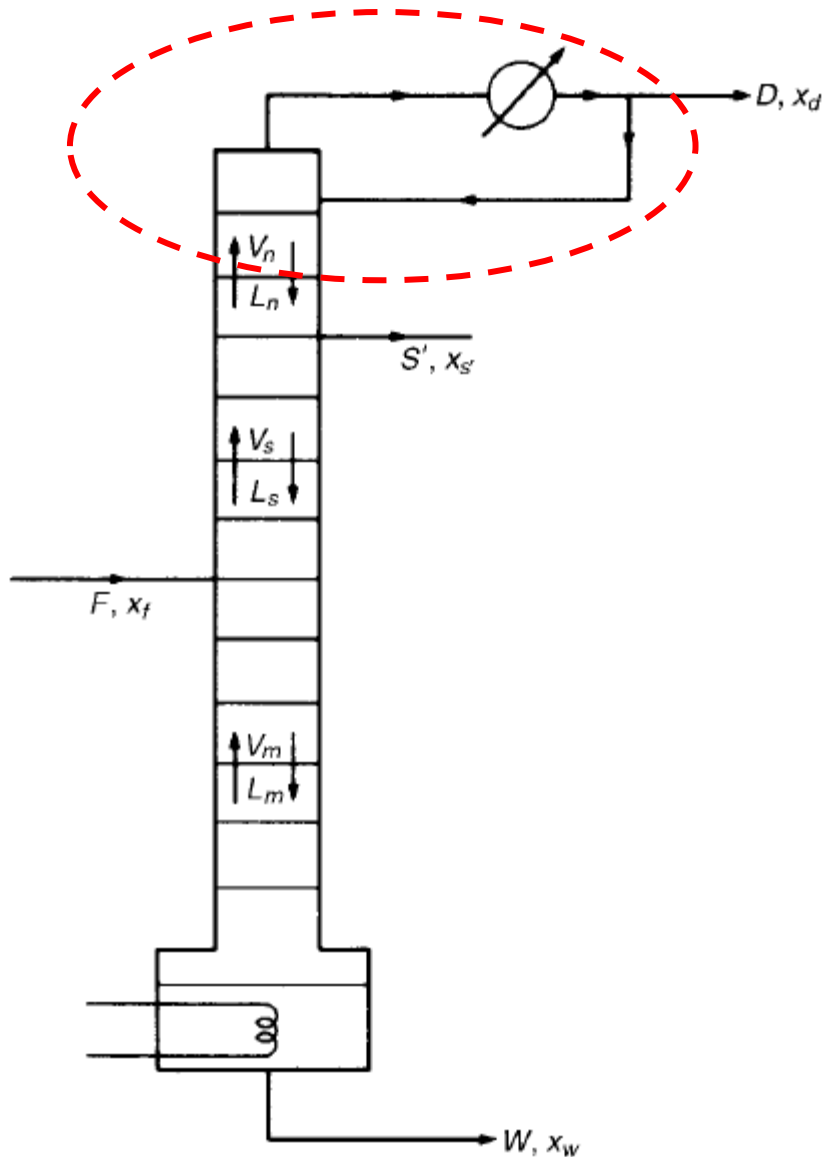


$$y_n = y_{n+1} + \eta_M(y_n^* - y_{n+1})$$

# Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



# Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



Balance de materia en la envolvente superior:

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

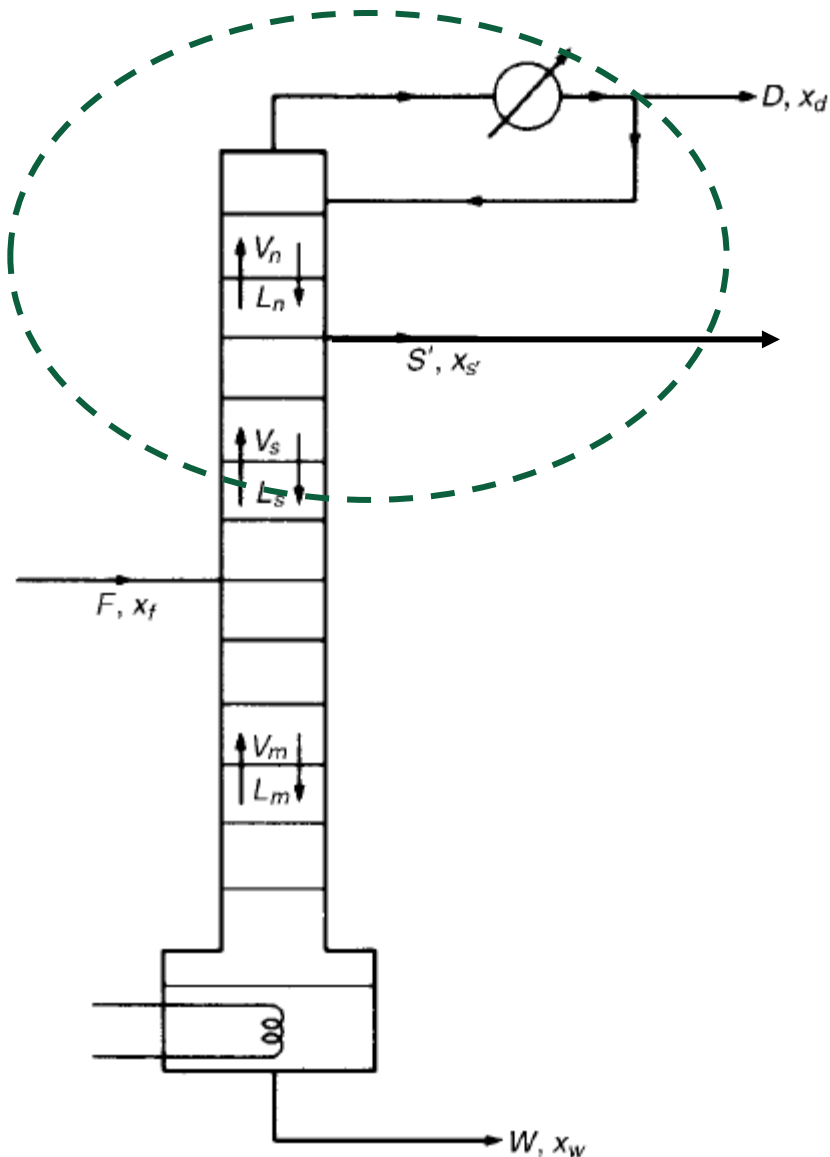
$$V_{n+1}y_{n+1} = L_nx_n + Dx_D$$

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

Y con el supuesto de Flujos molares constantes:

$$y_{n+1} = \frac{L}{V}x_n + \frac{D}{V}x_D$$

# Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



Balance de materia en la envolvente intermedia:

$$V_{s+1} = L_s + S' + D$$

$$V_{s+1}y_{s+1} = L_sx_s + S'x'_s + Dx_D$$

$$y_{s+1} = \frac{L_s}{V_{s+1}}x_n + \frac{S'x'_s + Dx_D}{V_{s+1}}$$

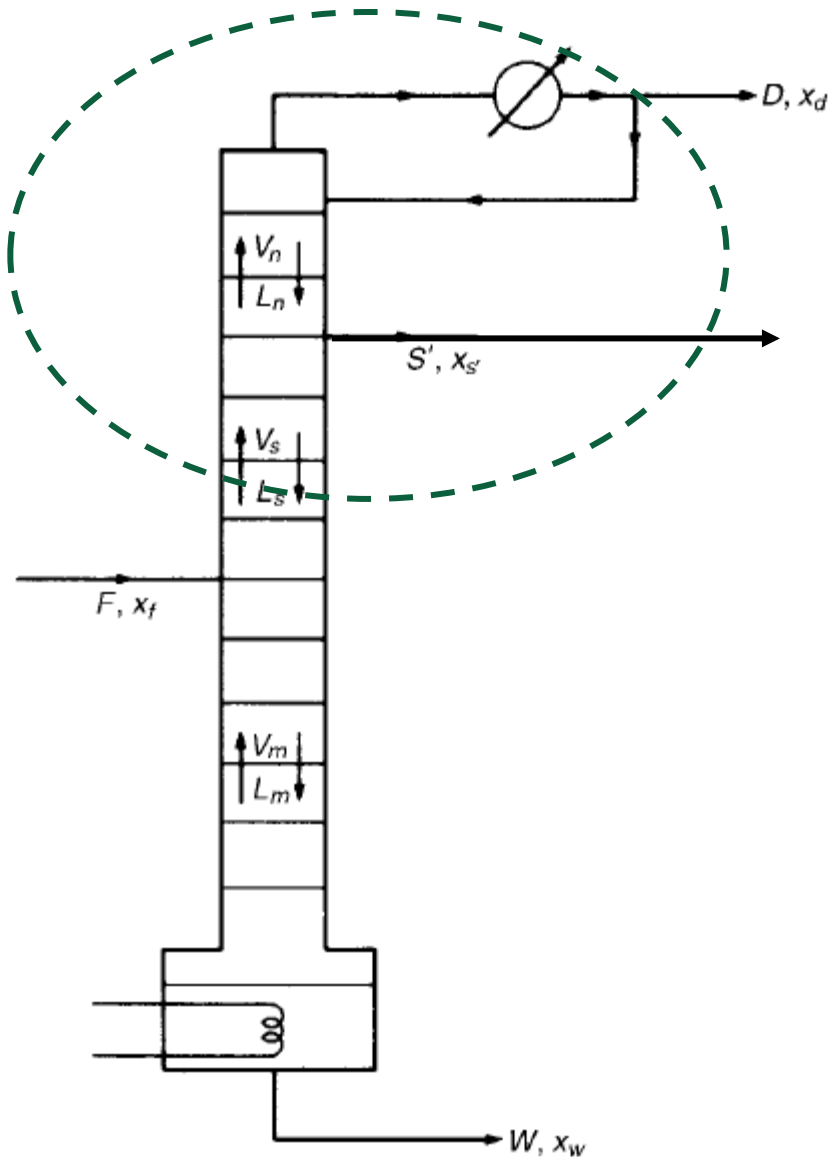
$$y_{s+1} = \frac{L_s}{V_{s+1}}x_n + \frac{S'x'_s + Dx_D}{V_{s+1}}$$

Pero tenemos que  $S'$  es liquido y no pasa por ningún otro proceso, por lo que:

$$L_s = L_n - S'$$

$$V_{s+1} = V_n$$

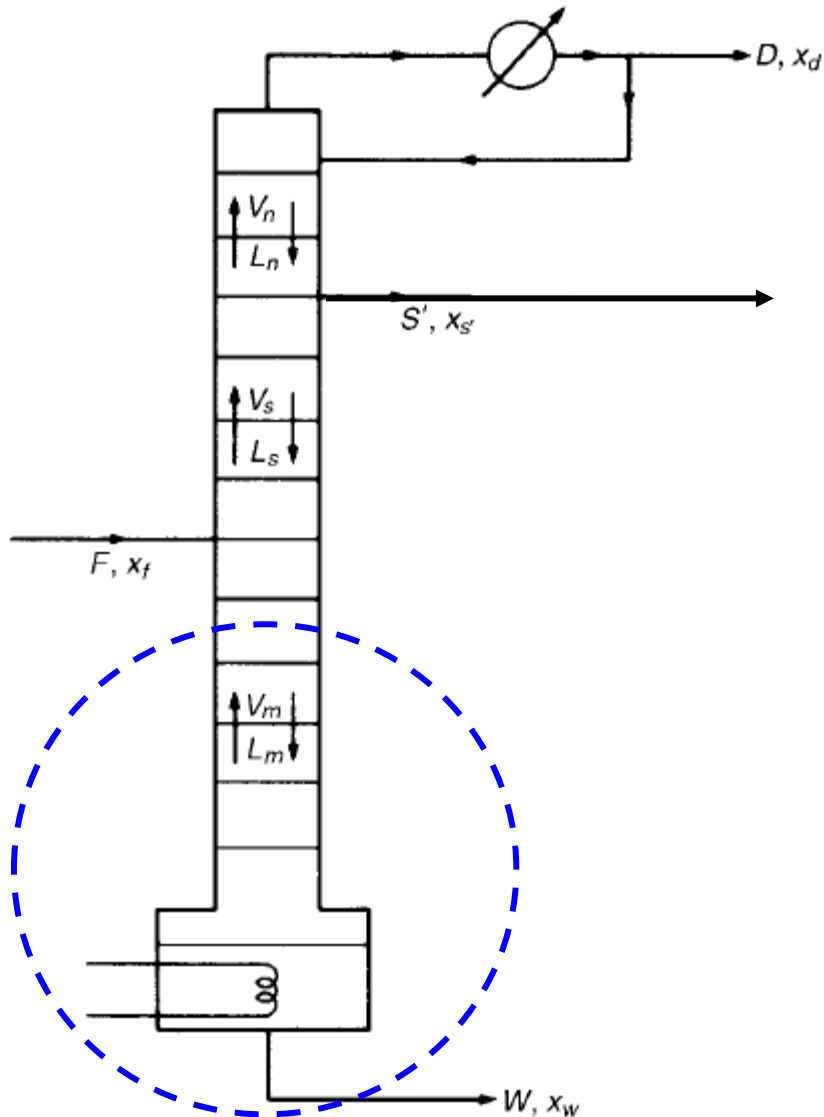
# Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



Considerando el supuesto de flujos molares constantes:

$$y_{s+1} = \frac{L - S'}{V} x_n + \frac{S' x'_S + D x_D}{V}$$

# Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



Balance de materia en la envolvente inferior:

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

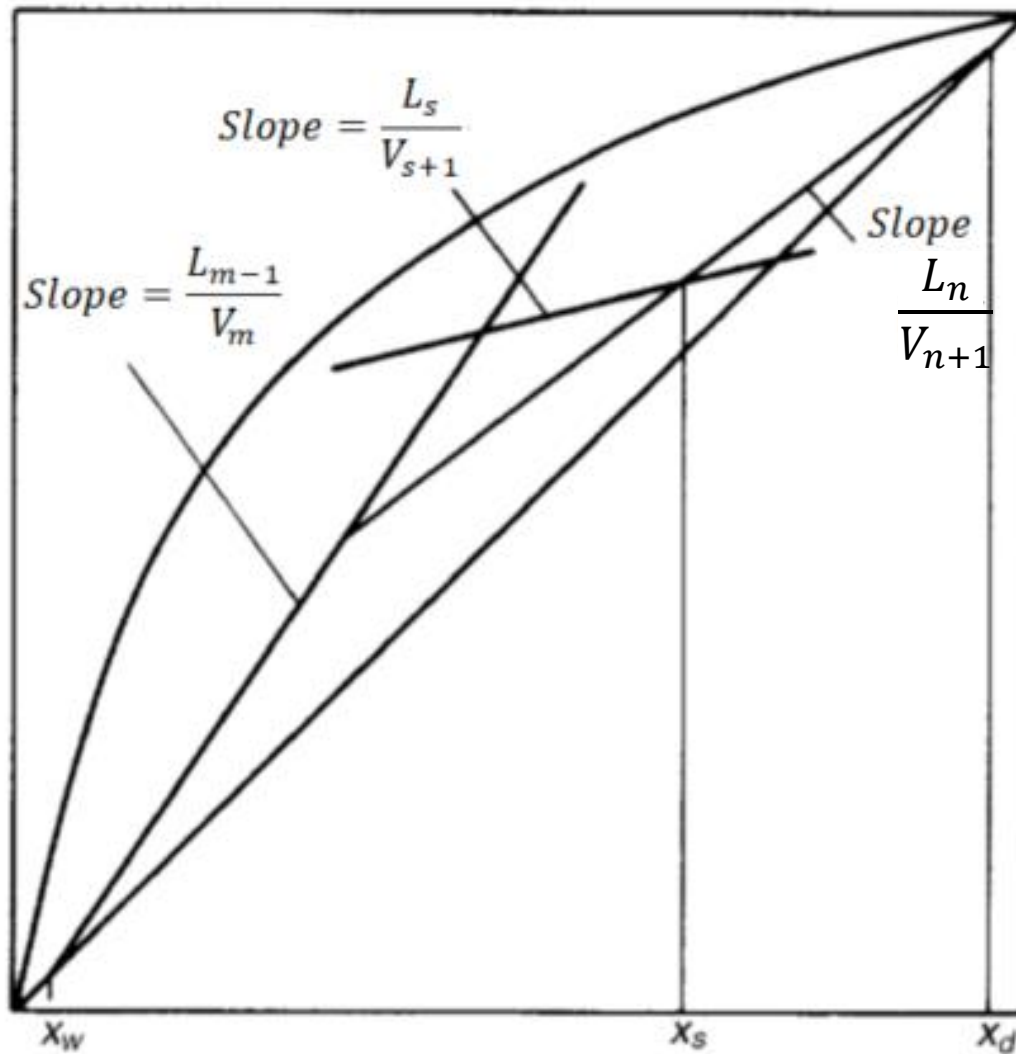
$$L_{m-1}x_{m-1} = V_my_m + Bx_B$$

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

Y con el supuesto de Flujos molares constantes:

$$y_{n+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}}x_{m-1} - \frac{B}{\bar{V}}x_B$$

# Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



- Aprender el método de McCabe y Thiele.
- Comprender los criterios que rigen la definición del flujo óptimo.
- Conocer y aplicar los conceptos de eficiencia de una operación.



# Aspectos de diseño de columnas de destilación

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

1 de Abril de 2021

