

Método del punto de burbuja para las separaciones de multicomponentes en etapas múltiples

En este guion experimental se va aplicar el método riguroso del punto de burbuja para la separación de multicomponentes de Wang-Henke a la columna de destilación PIGNAT, el sistema termodinámico es binario, el de ETOH-H₂O, ya muy estudiado pero un corto tiempo se pasará a sistemas de multicomponentes utilizando la columna de destilación de platos perforados QVF ubicada en el piso inferior del laboratorio.

Cuando se opera la columna PIGNAT se pueden conocer las temperaturas digitales en las 17 etapas de la columna que son: 15 platos, el condensador total y el hervidor parcial, también se conocen las composiciones de las corrientes de los destilados que bajan del domo y de los fondos o residuos del hervidor utilizando el método por densimetría. No se pueden muestrear las mezclas de vapores ascendentes ni las mezclas líquidas que bajan por las etapas de la columna.

1.- PROBLEMA

Aplicar el método teórico para la separación de multicomponentes del punto de burbuja de Wang-Henke a la columna de destilación PIGNAT para calcular en el régimen permanente las composiciones del destilado y de los residuos, las temperaturas de las etapas, las composiciones y flujos de las corrientes de las interetapas del líquido y del vapor, las cargas térmicas del condensador total y del hervidor parcial.

Reportar los errores porcentuales de las composiciones molares del destilado y de los residuos obtenidos experimentalmente y los conseguidos con las fórmulas del modelo del punto de burbuja:

$$\text{Error porcentual (del destilado)} = \frac{x_{\text{molar del modelo}} - x_{\text{molar experimental}}}{x_{\text{molar experimental}}} \times 100$$

$$\text{Error porcentual (de los residuos)} = \frac{x_{\text{molar del modelo}} - x_{\text{molar experimental}}}{x_{\text{molar experimental}}} \times 100$$

Condiciones de operación para la torre:

Programar la bomba dosificadora de alimentación en las posiciones 50/50 para alimentar al hervidor de la columna una solución de etanol-agua entre el 30-35% en masa, programando una relación de reflujo $R = 1/2$, trabajar la columna a condiciones no adiabáticas y no isotérmicas a presión atmosférica del laboratorio, la temperatura de alimentación será la ambiental.

2.- PARTE EXPERIMENTAL

2.1 MATERIALES REQUERIDOS

- Un densímetro con escala de 0.9 a 1.0 g / mL **(El espacio entre las marcas no numeradas es de 0.001), utilizarlo para la solución de alimentación**
- Un densímetro con escala de 0.7 a 1.0 g / mL **(El espacio entre las marcas no numeradas es de 0.005)**
- Un densímetro con escala de 0.7 a 0.8 g / mL **(El espacio entre las marcas no numeradas es de 0.001)**
- Un densímetro con escala de 0.8 a 0.9 g / mL **(El espacio entre las marcas no numeradas es de 0.001)**
- Dos probetas para densímetro
- Dos probetas graduadas de 500 mL de plástico
- Dos cronómetros
- Un embudo grande de plástico
- Una cubeta de plástico

2.2 SUSTANCIAS

- Un garrafón con etanol industrial
- Un garrafón con agua destilada
- Mezcla de etanol-agua entre el 30 - 35 % de concentración en masa
- La bitácora, libreta número 6 para la torre de destilación

2.3 SERVICIOS AUXILIARES

- Energía eléctrica
- Agua de enfriamiento

2.4 MEDIDAS DE HIGIENE Y SEGURIDAD

- Evite derrames de mezcla, si esto ocurre, seque de inmediato
- No permitir trabajos de mantenimiento cerca del equipo que generen chispas por soldadura con planta eléctrica o autógena

2.5 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

COMPONENTE	SERVICIO	ESPECIFICACIONES
Columna de destilación	Separar los componentes de una mezcla	Marca de la torre: Pignat Tipo: De platos con una campana de borboteo Material de construcción: Vidrio Longitud: 91.5 cm

		Diámetro interno: 5.08 cm Presión de operación: Atmosférica
Bomba dosificadora	Suministrar mezcla de alimentación	Bomba de pulsaciones Gasto de diseño 16 L/h Motor eléctrico: 110 V / 2 fases / 60 Hertz Material interno: Acero inoxidable
Condensador total	Cambia de fase vapor a líquido	Material interno: acero inoxidable. Coraza: De vidrio
Intercambiador de calor	Enfriador de fondos	Material interno: Acero inoxidable. Coraza: De vidrio
Intercambiador de calor	Enfriador de destilado	Material interno: Acero inoxidable. Coraza: De vidrio:
Manómetro diferencial	Registra la caída de presión entre la atmósfera y la base de la columna.	Tipo: En "U" Material: Vidrio, con regleta graduada de metal
Rotámetro	Cuantifica el flujo del agua de enfriamiento	Escala: 0 – 400 L / h Material: Acrílico
Banco de resistencias del hervidor	Suministra energía para la ebullición de la mezcla de alimentación	Potencia: 480 watts 220 V / 3 fases/ 60 Hz
Hervidor parcial	Vaporiza la mezcla de alimentación	Capacidad 10 L Material: vidrio Resistencias de calentamiento: De tungsteno con perilla de reóstato del 0 – 8 posiciones de calentamiento
Enfriadores de tubos concéntricos	Abaten la temperatura de salida del hervidor y de los condensados	Material: Acero inoxidable Coraza: De vidrio

2.6 DIAGRAMAS Y FOTOGRAFÍAS

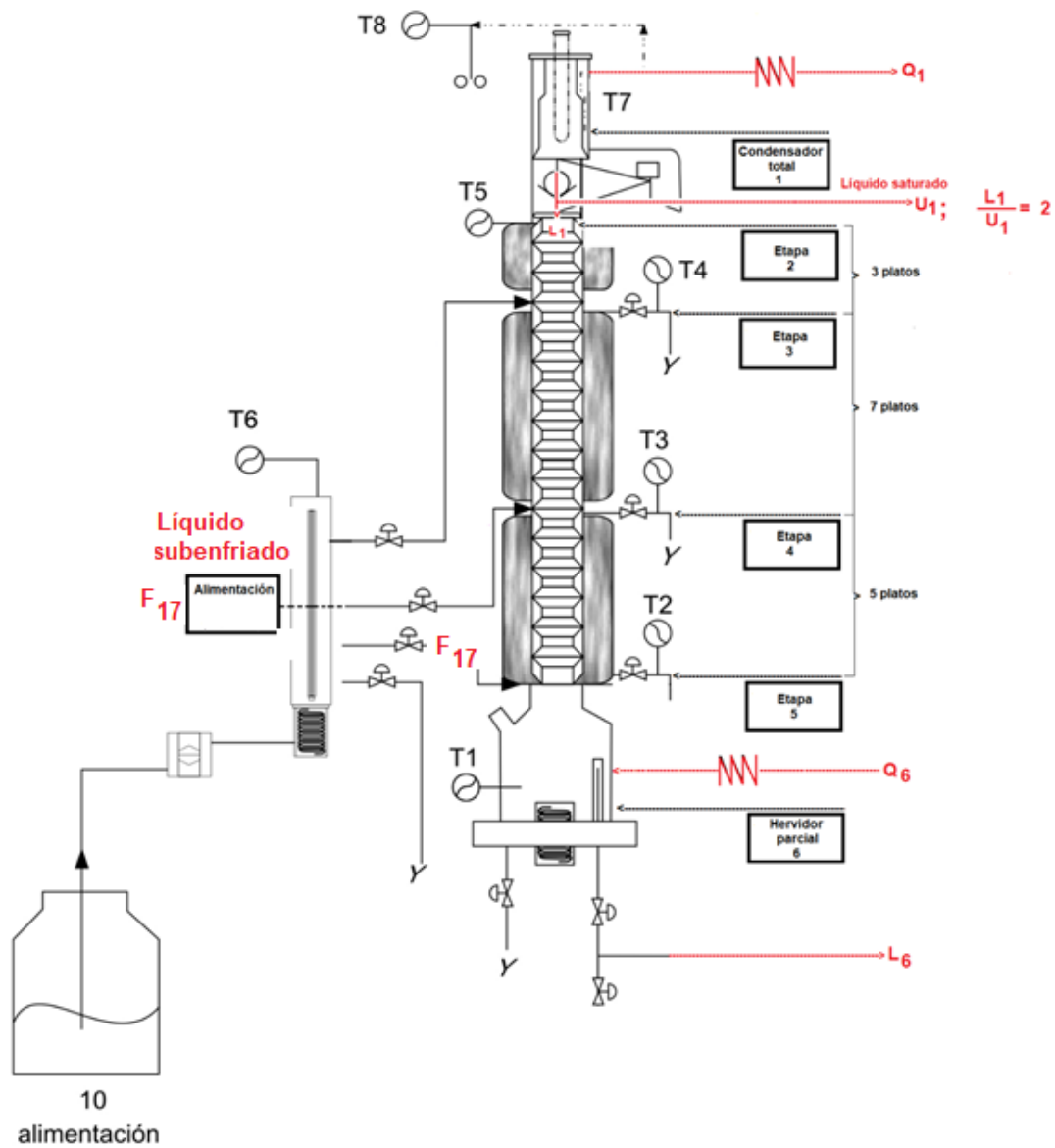
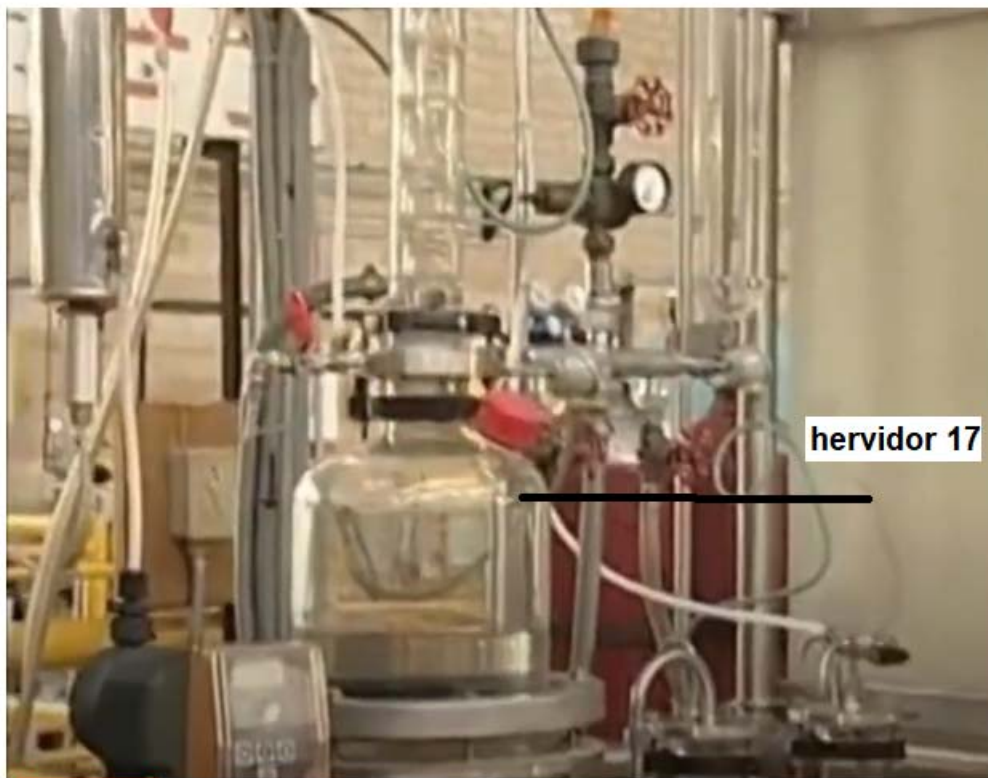


Figura 1.- Diagrama de la torre de destilación de 17 etapas; 15 platos, un condensador total y un hervidor parcial con alimentación en el hervidor 17





Fotografía 1 de la torre de destilación de 17 etapas; 15 platos, un condensador total y un hervidor parcial en la posición 17

Si la columna está equipada con un condensador total, este no se contabiliza como un plato de la zona de enriquecimiento, un condensador parcial o un hervidor parcial contribuyen cada uno como un plato más en el número de platos presentes en la columna

2.7 DESARROLLO EXPERIMENTAL

ARANQUE DEL EQUIPO

- a.- Preparar en el recipiente de alimentación, una mezcla de etanol-agua entre el 30 y 35% en masa de etanol. Anotar su valor en la Tabla de resultados experimentales.
- b.- Abrir la válvula de suministro del agua de enfriamiento al equipo
- c.- Alimentar al condensador de destilados un flujo de agua de 400 L / h, utilizar el rotámetro correspondiente. Alimentar agua a los enfriadores de fondos y de destilados.
- d.- Accionar el botón de alimentación de energía eléctrica que se encuentra en la parte posterior del equipo, moverlo de la posición **O** a la posición **I**, después accionar el botón negro a **ON** que se encuentra atrás del equipo.

- e.- Quitar el seguro del paro de urgencia girando la perilla a la derecha
- f.- Oprimir el control de marcha general
- g.- Observar la parte frontal de la bomba y operar la perilla del llenado del pistón y las flechas para el número de pulsaciones. Obtener las posiciones 50 / 50, que proporcionan el flujo de alimentación.
- h.- Abrir la segunda válvula de la salida del precalentador (contando de arriba hacia abajo) para alimentar a la columna la mezcla a la sección de platos 2
- i.- Encender la bomba para alimentar la mezcla hasta lograr un nivel de diez centímetros por arriba de las resistencias de calentamiento del hervidor, en este momento suspender la alimentación.
- j.- Calentar la mezcla del hervidor, girando la perilla del tablero de control de calentamiento de 2 en 2 cada 10 segundos hasta llegar a la posición 8 de la perilla.
- k.- Operar la columna a reflujo total durante 20 min aproximadamente, a partir de que se generen vaporizaciones y destilados para asegurarse que en este lapso de tiempo se tenga el régimen permanente.
- L.- Elegir la relación de reflujo en el tablero de control, tomando en cuenta la tabla de tiempos recomendados por el fabricante. Consultar el anexo A
- LL.- Colocar el control de Reflujo / Destilado en la posición de Paro.
- m.- Reiniciar la alimentación al flujo establecido.
- n.- La temperatura de alimentación de la mezcla será a la temperatura ambiental, no accionar los controles del precalentador.
- ñ.- Abrir las válvulas de salida de los fondos del hervidor para que fluyan hacia el enfriador, así como también la de descarga al recipiente de fondos.

OPERACIÓN

- a.- Medir los flujos de destilado y fondos a los 20 minutos después de que se ha iniciado la operación de la torre, cerrando las válvulas de descarga al recipiente contenedor de cada líquido, y midiendo el tiempo que tarda en acumularse un volumen establecido en una probeta graduada. Anotar sus valores en la Tabla de Resultados Experimentales.
- b.- Medir la densidad de fondos y destilado para determinar las composiciones por densimetría usando la siguiente ecuación:

$$\% \text{masa} = -4606 \rho^3 + 11475 \rho^2 - 9909 \rho + 3038.1; \rho = \text{densidad (g / mL)}$$
- c.- Registrar todos sus datos en la Tabla de datos experimentales, hasta alcanzar el estado estacionario en la torre de destilación

PARO DEL EQUIPO

- a.- Apagar el calentamiento del hervidor, girando la perilla de control hasta llegar a la posición de cero y oprimir el botón de paro.
- b.- Apagar la bomba dosificadora.
- c.- Poner el seguro de paro de urgencia.
- d.- Colocar el control de suministro de energía al equipo en la posición "O"

- e. - Apagar el suministro de energía al equipo.
- f.- Cerrar la válvula de suministro de agua de enfriamiento al equipo y las que alimentan agua al condensador y a los enfriadores.

2.8 INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

DIMENSIONES DE LA COLUMNA Y CONDICIONES INICIALES DE ALIMENTACIÓN

<ul style="list-style-type: none"> • Posición en la perilla de calentamiento en el número 9 • Alimentación a la torre con la válvula intermedia del precalentador • Longitud de la sección empacada 91.5 cm
Densidad de la mezcla de alimentación $\rho_A =$ g / cm ³
Composición en % en masa $\% \text{masa} = - 4606 \rho_A^3 + 11475 \rho_A^2 - 9909 \rho_A + 3038.1$; $\% \text{ masa} = \frac{g \text{ ETOH}}{g \text{ mezcla}}$
Flujo de la alimentación de la mezcla a la columna, utilizando un flujo en la posición de la bomba de 50/50 = 0.143202 (L / min), valor calculado como referencia. 50/50 = L/min

PRUEBA EXPERIMENTAL RELACIÓN DE REFLUJO L / D = 1/2 ALIMENTACIÓN EN EL HERVIDOR 17

FLUJOS

	Fondos			Destilado		
Tiempo de operación para el RP (min)	Tiempo de llenado probeta (min)	Volumen probeta (L)	Flujo (L / min)	Tiempo de llenado probeta (min)	Volumen probeta (L)	Flujo (L / min)
20						

COMPOSICIONES

$\% \text{masa} = -4606 \rho^3 + 11475 \rho^2 - 9909 \rho + 3038.1$ Densidad $\rho = (\text{g / mL})$				
		Fondos		Destilado
Tiempo de operación para el RP (min)	Densidad de Fondos (ρ_F) (g /mL)	Composición Fondos % masa	Densidad de Destilado (ρ_D) (g /mL)	Composición Destilado % masa
20				

TEMPERATURAS

Tiempo de operación para el RP (min)	T1 Hervidor 17 (°C)	T2 Plato 16 (°C)	T3 Plato 11 (°C)	T4 Plato 4 (°C)	T5 Condensador 1 (°C)
20					

..

T6 Precalentamiento (de alimentación) (°C)	T7 Entrada de agua al condensador (°C)	T8 Salida de agua del condensador (°C)

Tiempos recomendados por el fabricante para la relación de $R = L/D$ en la columna de destilación

Relación de reflujo	Tiempo para el reflujo (s)	Tiempo para destilados (s)
2:1	8	4
2:1	10	5
1:2	4	8
1:2	5	10
3:1	9	3
3:1	12	4

INSTRUCCIONES

Consultar la “Guía de Cálculos de destilación por el método de Punto de Burbuja y el archivo “Deducciones de las ecuaciones para el punto de burbuja” que se encuentran en la plataforma AMyD y reproducidas a continuación utilizando la numeración de este archivo.

Ecuaciones utilizadas en el algoritmo de la matriz tridiagonal debido a Thomas y aplicado por Wang y Henke

$$A_j = V_j + \sum_{m=1}^{j-1} (F_m - U_m - W_m) - V_1 \quad ; \quad 2 \leq j \leq N \quad (16)$$

$$B_j = - \left[V_{j+1} + \sum_{m=1}^j (F_m - U_m - W_m) - V_1 + U_j + (V_j + W_j) K_{i,j} \right] \quad ; \quad 1 \leq j \leq N \quad (17)$$

$$C_j = V_{j+1} K_{i,j+1} \quad ; \quad 1 \leq j \leq N-1 \quad (18)$$

$$D_j = -F_j Z_{i,j} \quad ; \quad 1 \leq j \leq N \quad (19)$$

$$\begin{pmatrix} B_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & A_3 & B_3 & C_3 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & A_{N-2} & B_{N-2} & C_{N-2} & 0 \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 & A_{n-1} & B_{n-1} & C_{n-1} \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 & 0 & A_N & B_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{i,1} \\ x_{i,2} \\ x_{i,3} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{i,N-2} \\ x_{i,N-1} \\ x_{i,N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ D_{N-2} \\ D_{N-1} \\ D_N \end{pmatrix} \quad (20)$$

Los valores obtenidos de las composiciones de la fase líquida en cada etapa de la ecuación matricial (20) se deben normalizar mediante la ecuación (21)

$$(x_{i,j})_{Normalizado} = \frac{x_{i,j}}{\sum_{i=1}^C x_{i,j}} \quad (21)$$

y para obtener los valores de la fase vapor en cada etapa se aplica la ecuación (3) utilizando los valores de las composiciones del líquido normalizadas obtenidas por la ecuación (21)

$$y_{i,j} = K_{i,j} x_{i,j} \quad (3)$$

Para evaluar la razón de equilibrio $K_{i,j}$ (i = representa un componente de la mezcla y j = representa una de las etapas de la columna) será necesario aplicar la K que dependa sólo de la temperatura y no simultáneamente (de la composición y de la temperatura de la mezcla) [4]

$$K_{\text{etanol}} := 1.35 \cdot 10^{-36} \cdot T^{\circ K^{14.22}}$$

$$K_{\text{agua}} := 2.043 \cdot 10^{-42} \cdot T^{\circ K^{16.24}}$$

Ahora se pueden obtener los valores de los vapores V_j que se desprenden de cada etapa, será necesario calcular:

- La entalpía de la alimentación de la mezcla a la columna
- Las entalpías de la fase líquida en cada etapa de la torre
- Las entalpías de la fase vapor en cada etapa de la torre
- Plantear un balance de energía para cada etapa de la columna, se encuentra resuelto en el archivo “Deducciones de las ecuaciones para el punto de burbuja” donde finalmente se obtienen las siguientes ecuaciones:

La ecuación final se puede escribir como :

$$\alpha_j V_j + \beta_j V_{j+1} = \gamma_j$$

Donde

$$\alpha_j = (HL_{j-1} - HV_j)$$

$$\beta_j = (HV_{j+1} - HL_j)$$

$$\gamma_j = \left[\sum_{m=1}^{j-1} (F_m - U_m - W_m) - V_1 \right] (HL_j - HL_{j-1}) + F_j (HL_j - HF_j) + W_j (HV_j - HL_j) + Q_j$$

$$Q_j = L_{j-1} \cdot H_{Lj-1} + V_{j+1} \cdot H_{Gj+1} + F_j \cdot H_{Fj} - (L_j + U_j) \cdot H_{Lj} - (V_j + W_j) \cdot H_{Gj}$$

La representación matricial de esta ecuación es:

$$\begin{pmatrix} \beta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \alpha_3 & \beta_3 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \alpha_4 & \beta_4 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \alpha_{N-3} & \beta_{N-3} & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & \alpha_{N-2} & \beta_{N-2} & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 & \alpha_{N-1} & \beta_{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_2 - \alpha_2 V_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma_{N-3} \\ \gamma_{N-2} \\ \gamma_{N-1} \end{pmatrix}$$

Al resolver la ecuación (21) se obtienen los valores de los vapores que se desprenden en cada etapa.

Otra forma equivalente es aplicar balances en cada etapa y llegar a la ecuación (22)

Plato (2)	Plato (3)	En general
$\alpha_2 V_2 + \beta_2 V_3 = \gamma_2$	$\alpha_3 V_3 + \beta_3 V_4 = \gamma_3$	$V_j = \frac{\gamma_{j-1} - \alpha_{j-1} V_{j-1}}{\beta_{j-1}} \quad (22)$
$V_3 = \frac{\gamma_2 - \alpha_2 V_2}{\beta_2}$	$V_4 = \frac{\gamma_3 - \alpha_3 V_3}{\beta_3}$	

CONTINUACIÓN

Calcular de la carga térmica del condensador Q1

$$Q_j = L_{j-1} \cdot H_{Lj-1} + V_{j+1} \cdot H_{Gj+1} + F_j \cdot H_{Fj} - (L_j + U_j) \cdot H_{Lj} - (V_j + W_j) \cdot H_{Gj}$$

Calcular la carga térmica del evaporador

$$Q_N = \sum_{j=1}^N (F_j HF_j - U_j HL_j - W_j HV_j) - \sum_{j=1}^{N-1} Q_j - V_1 HV_1 - L_N HL_N \quad (26)$$

Cálculo del líquido en su punto de burbuja que desciende de cada plato

En general se puede escribir como

$$L_j = V_{j+1} + \sum_{m=1}^j (F_m - U_m - W_m) - V_1 \quad (10)$$

Cálculo para conocer las temperaturas del modelo y poder compararlas con las temperaturas experimentales

Se aplica la ecuación (4.1)

$$\sum_{i=1}^C K_{i,j} x_{i,j} - 1 = 0 \quad (4.1)$$

El resultado de esta ecuación se obtiene por iteración en donde la temperatura obtenida T_j no es lineal.

Nota: - Se recomienda resolver el problema 15.1 del autor [1].

3.- CUESTIONARIO

1. ¿Cuáles son los valores de las fracciones molares de las mezclas del vapor y del líquido que abandonan las 17 etapas de la columna cuando se programa una relación de reflujo $R = 1/2$?. Reportar las interpretaciones de los perfiles gráficos de estos valores.
2. ¿Cuáles son los valores de las fracciones molares del destilado y del residuo obtenidos por densimetría?, y ¿Cuáles con las fracciones molares que se

obtiene con las ecuaciones 20 y 21 del método del punto de burbuja?
Reportar los siguientes errores porcentuales:

$$\text{Error porcentual (del destilado)} = \frac{x_{\text{molar del modelo}} - x_{\text{molar experimental}}}{x_{\text{molar experimental}}} \times 100$$

$$\text{Error porcentual (de los residuos)} = \frac{x_{\text{molar del modelo}} - x_{\text{molar experimental}}}{x_{\text{molar experimental}}} \times 100$$

3. Comparar los valores experimentales de las temperaturas de los ocho termopares instalados en la columna con las temperaturas que se obtienen con la ecuación (4.1) mediante el cálculo de errores porcentuales. Reportar las interpretaciones de los perfiles gráficos de estos valores.
4. ¿Cuáles son los flujos molares de las mezclas del vapor y del líquido que abandonan las 17 etapas?. Reportar las interpretaciones de los perfiles gráficos de estos valores. También reportar las cargas térmicas en kcal/h del condensador y del hervidor de la columna; comentar el significado de cada una de estas cantidades.

4.- NOMENCLATURA

K_i = razón de equilibrio termodinámico entre fases
LA = Flujo volumétrico de la alimentación en L / h
LD = Flujo volumétrico del destilado en L / h
LF = Flujo volumétrico del fondo de la torre en L / h
 P°_i = Presión de vapor del componente i: atmósferas
 P_T = Presión total de operación: atmósferas
R = L/D = Relación de reflujo externo

5.- BIBLIOGRAFÍA

1. Henley, Ernest. J., J. y Seader, J. D. (2003). Operaciones de Separación por Etapas de Equilibrio en Ingeniería Química. Ediciones Repla, S. A., México .
2. Henley, Ernest. J., J. y Seader, J. D. (1998). Separation Process Principles, John Wiley & Sons. Inc, USA.
3. Pradeep B. Deshpande. (2016). Distillation Dynamics and Control. Instrument Society of America. USA. (colocación: TP156 D5 D47 (Biblioteca de la F. Q)
- 4.-Stanley M. Walas (1985).Phase Equilibria in Chemical Engineering. Butterworth-Heinemann. Publishing (USA) INC.

6.- APENDICES

6.1 Equilibrio termodinámico entre fases del sistema etanol-agua a presión de 586 mm Hg

x de equilibrio	y de equilibrio	T°C de equilibrio
0	0	
0.05	0.315	84.017
0.1	0.432	80.204
0.15	0.493	78.127
0.20	0.532	76.814
0.25	0.561	75.888
0.3	0.585	75.178
0.35	0.606	74.599
0.4	0.626	74.106
0.45	0.646	73.674
0.5	0.666	73.288
0.55	0.687	72.943
0.6	0.709	72.635
0.65	0.733	72.364
0.7	0.759	72.132
0.75	0.788	71.945
0.8	0.82	71.809
0.85	0.856	71.732
0.9	0.897	71.726
0.95	0.945	71.806
1.0	1.0	71.992

6.2 Ecuaciones para las propiedades del sistema etanol-agua

1.- Si se conocen las densidades de la alimentación, de los fondos y de los destilados en gmol/cm^3 se pueden conocer los porcentos en masa

$$\%mA := -4606 \cdot \rho A^3 + 11475 \cdot \rho A^2 - 9909 \cdot \rho A + 3038.1 \quad \text{porcentaje en masa}$$

$$\%mD := -4606 \cdot \rho D^3 + 11475 \cdot \rho D^2 - 9909 \cdot \rho D + 3038.1 \quad \text{porcentaje en masa}$$

$$\%mF := -4606 \cdot \rho F^3 + 11475 \cdot \rho F^2 - 9909 \cdot \rho F + 3038.1 \quad \text{porcentaje en masa}$$

2.- Para el cálculo de las presiones de vapor

$$P_T := 586 \text{ mmHg} \quad T^{\circ}\text{K} := T^{\circ}\text{C} + 273.15$$

Constantes para presiones de vapor

(e) Etanol

$$A1 := 23.8442 \quad B1 := -2.8642 \cdot 10^3 \quad C1 := -5.0474 \quad D1 := 3.7448 \cdot 10^{-11}$$

$$E1 := 2.7361 \cdot 10^{-7}$$

(a) Agua

$$A2 := 29.8605 \quad B2 := -3.1522 \cdot 10^3 \quad C2 := -7.3027 \quad D2 := 2.4247 \cdot 10^{-9}$$

$$E2 := 1.809 \cdot 10^{-6}$$

Ecuaciones

$$P^{\circ}e := 10^{\left[A1 + \left(\frac{B1}{T^{\circ}\text{K}} \right) + C1 \cdot \log(T^{\circ}\text{K}) + D1 \cdot T^{\circ}\text{K} + E1 \cdot (T^{\circ}\text{K})^2 \right]} \quad \text{mmHg}$$

$$P^{\circ}a := 10^{\left[A2 + \left(\frac{B2}{T^{\circ}\text{K}} \right) + C2 \cdot \log(T^{\circ}\text{K}) + D2 \cdot T^{\circ}\text{K} + E2 \cdot (T^{\circ}\text{K})^2 \right]} \quad \text{mmHg}$$

Constantes para el calor latente fase gaseosa

$$A_{ee} := 43.122 \quad A_{aa} := 52.053$$

$$T_{c_{ee}} := 516.25 \quad T_{c_{aa}} := 647.13$$

$$n_{ee} := 0.079 \quad n_{aa} := 0.321$$

$$\left| \frac{\text{kJoules}}{\text{gmol}} \right|$$

Ecuación

$$\lambda = \Delta H_{\text{vap}} = A \cdot \left(1 - \frac{T^{\circ}\text{K}}{T_c} \right)^n \quad \frac{\text{kJoules}}{\text{gmol}}$$

Constantes para las capacidades caloríficas de la fase líquida

Cp del etanol

Cp del agua

$$A := 59.342$$

$$E := 92.053$$

$$B := 3.6358 \cdot 10^{-1}$$

$$F := -3.9953 \cdot 10^{-2}$$

$$C := -1.2164 \cdot 10^{-3}$$

$$G := -2.1103 \cdot 10^{-4}$$

Joules
gmol°K
Ecuaciones

$$C_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 \quad T = K, \quad y \quad C_p \text{ (Joule / gmol } ^\circ K)$$

$$C_p = E + F \cdot T + G \cdot T^2 + H \cdot T^3 \quad T = K, \quad y \quad C_p \text{ (Joule / gmol } ^\circ K)$$

Constantes para las capacidades caloríficas de la fase gaseosa

Cp del etanol

Cp del agua

$$A_e := 27.091$$

$$A_a := 33.933$$

$$B_e := 1.1055 \cdot 10^{-1}$$

$$B_a := -8.4186 \cdot 10^{-3}$$

$$C_e := 1.0957 \cdot 10^{-4}$$

$$C_a := 2.9906 \cdot 10^{-5}$$

$$D_e := -1.5046 \cdot 10^{-7}$$

$$D_a := -1.7825 \cdot 10^{-8}$$

$$E_e := 4.6601 \cdot 10^{-11}$$

$$E_a := 3.6934 \cdot 10^{-12}$$

Joules
gmol°K

Ecuación

$$C_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + E \cdot T^4$$

Donde: T= °K CP= joule/gmol °K