

## **ESTUDIO DE LA OPERACIÓN DE RECTIFICACIÓN DISCONTINUA EN SISTEMAS MULTICOMPONENTES**

**Flores, Hugo Alberto**, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral,  
hflores@fiq.unl.edu.ar

**Paganelli, María Laura**, Facultad de Ingeniería Química - Universidad Nacional del Litoral,  
lali.p90.mlp@gmail.com

**Gross, Martín Sebastián**, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral,  
mgross@fiq.unl.edu.ar

### **Resumen**

El presente trabajo se basó en el análisis teórico y práctico de la rectificación discontinua multicomponente. El estudio de esta operación implica el desarrollo de métodos de cálculo rigurosos, no incorporados a la curricula de la asignatura Transferencia de Materia y Operaciones. Para ello, se trabajó llevando a cabo experiencias en una columna de contacto continuo con relleno desordenado, a los fines de poder desarrollar un modelo teórico de cálculo, para comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los predichos en la bibliografía.

La experiencia, primero permitió determinar el número de etapas teóricas, y luego estudiar la influencia de las variables de operación en la separación; comparando los resultados obtenidos experimentalmente con los cálculos teóricos.

Se utilizó una adaptación del método short cut para sistemas multicomponentes, en el que se supone que una columna de destilación discontinua puede ser considerada como una columna continua, de alimentación cambiante en cada instante.

Se concluyó que existe una concordancia razonable entre los valores experimentales y los teóricos. A partir de ello, se hizo una propuesta didáctica de incorporación de esta experiencia a la enseñanza de grado de la asignatura Transferencia de Materia y Operaciones, no sólo en los aspectos teóricos, sino en el desarrollo de experiencias, elaborando una propuesta de trabajo práctico. Ambas herramientas didácticas se implementarán en el segundo semestre del presente año.

**Palabras clave**— *rectificación discontinua multicomponente, modelo teórico de cálculo, enseñanza en Transferencia de Materia y Operaciones.*

### **1. Introducción**

La destilación discontinua es la operación unitaria más antigua utilizada para la separación de mezclas líquidas. Es utilizada en muchas industrias químicas, como producción de bebidas alcohólicas, aceites esenciales, química fina, productos farmacéuticos y productos especiales con alto valor añadido [1].

Se prefiere esta forma de trabajar, propia de la destilación batch, ya que es una operación muy flexible, y permite separar cualquier mezcla de una forma rápida y óptima.

Otra ventaja que presenta la destilación batch es que los componentes de una mezcla pueden separarse, trabajando adecuadamente, a través de una sola columna, mientras que en destilación continua para separar  $n$  componentes es necesario disponer de  $(n - 1)$  columnas.

La destilación batch es una operación no estacionaria donde las variables que definen el proceso (concentraciones, tiempo, hold-up, masa de destilado, etc.) son función del tiempo. Matemáticamente la destilación batch queda definida por un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales y una serie de ecuaciones algebraicas que no siempre son fáciles de resolver de una forma rápida.

El objetivo de la mayoría de grupos que están investigando sobre la destilación batch es plantear modelos matemáticos que puedan definir al máximo el proceso de destilación. Dentro de los modelos, debemos diferenciar los modelos simplificados (short-cut), de los modelos más rigurosos.

La simulación rigurosa del comportamiento de una columna de rectificación discontinua en un sistema multicomponente implica el desarrollo de un proceso de resolución e integración de todas las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de la columna. La otra alternativa es utilizar los métodos short-cut, que permiten una simulación del comportamiento del equipo sobre la base de ciertos supuestos, lo cual permite obtener resultados rápidos y concretos.

Por ello, este trabajo utiliza un método rápido para simular el comportamiento de una columna de destilación discontinua, considerando la operación de destilación discontinua como una operación de destilación continua de corta duración y utilizar el método Fenske – Underwood – Gilliland (FUG) [2] para estimar las variaciones del destilado y residuo, con la finalidad de tener un método simple y sencillo para estudiar el comportamiento de las diversas alimentaciones que se quieran procesar en un proceso de rectificación discontinua

Un modelo será válido si se ha podido contrastar experimentalmente. Por lo tanto, una vez obtenidos los resultados teóricos, se llevaron a cabo experiencias para comparar los valores obtenidos de la práctica y compararlos con los predichos teóricamente.

Verificada la coherencia razonable entre los valores teóricos y prácticos, se sistematizó esta práctica, a los fines de incorporar los conceptos teóricos desarrollados a la enseñanza de la asignatura Transferencia de Materia y Operaciones, de las carreras de Ingeniería Química e Ingeniería en Alimentos de la Facultad de Ingeniería Química, desarrollando además una experiencia práctica.

## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1. Marco teórico:**

Una columna de destilación discontinua consiste de un equipo de contacto continuo gas – líquido (torre rellena o de platos), un hervidor y un condensador total.

Los problemas de cálculo relacionados con este tipo de operación apuntan a una simulación y no a un diseño, por las razones ya expuestas (versatilidad y posibilidad de manejar distintas alimentaciones).

Por ello, se necesita conocer el caudal de vaporización a manejar por el equipo y el número de etapas teóricas del mismo.

Para la primera información, primero se debe llevar a cabo el cálculo del caudal máximo del equipo, que depende de la capacidad del equipo de contacto continuo y de los equipos de transferencia de calor (hervidor y condensador)

Una vez determinado el caudal máximo, se debe evaluar cuál es el caudal de operación en el cual se obtiene la mayor eficiencia de funcionamiento, es decir mayor cantidad de etapas teóricas.

Una vez determinado el caudal de operación gaseoso y el número de etapas teóricas del equipo, se debe desarrollar una mecánica de cálculo a los fines de evaluar el comportamiento de la columna en lo referente a capacidad de separación.

Para simular el comportamiento de la columna de rectificación discontinua se utilizarán las siguientes suposiciones [2]:

- Volatilidad relativa constante
- Flujo equimolecular en toda la columna
- Acumulación despreciable en cada plato y en el condensador total
- Equilibrio termodinámico de las corrientes de vapor y líquido que abandonan cada etapa teórica

Cuando se trabaja con mezclas binarias, el problema se resuelve utilizando métodos gráficos; cuando se opera con mezclas multicomponentes, se trabaja con la hipótesis que la operación discontinua puede ser representada como un serie de operaciones de destilación continua de corta duración, y utilizar los métodos rápidos de cálculo para estimar las composiciones de los productos obtenidos.

El método utilizado se basa en asumir que la operación de destilación discontinua se puede representar por una serie sucesiva de destilaciones continuas cuya alimentación varía en saltos discretos de composición. Estas destilaciones continuas pueden resolverse empleando el método corto FUG, para estimar las composiciones de destilado en destilaciones continuas multicomponentes. Se utiliza el esquema propuesto por Galindez y Fredenslund [3], se comienza con una carga inicial  $L_0$  de composición  $x_{L0}$  a tiempo  $t_0$ . Luego de un pequeño intervalo de tiempo  $\Delta t = t_1 - t_0$ , a tiempo  $t_1$ , el hervidor tendrá una carga  $L_1$  de composición  $x_{L1}$ .

En la situación equivalente de una columna de destilación continua, la alimentación  $F$  es la carga inicial del hervidor,  $L_0$ , y la corriente de fondo  $W$  es la carga final  $L_1$ .

Planteando un balance de masa total en el condensador:

$$G' = L' + D' \quad (1)$$

La relación de reflujo viene definida por:

$$R = \frac{L'}{D'} \quad (2)$$

Entonces:

$$D' = \frac{G'}{R + 1} \quad (3)$$

En la columna continua, para un dado instante de tiempo el balance integral de materia total:

$$F = W + D \quad (4)$$

Y los balances de masa para cada componente 'i':

$$F \cdot x_{Fi} = W \cdot x_{wi} + D \cdot x_{Di} \quad (5)$$

Haciendo uso de la analogía entre las operaciones discontinua y continua, se puede escribir:

$$x_{L1} = \frac{L_0 \cdot x_{L0} - D \cdot x_D}{L_1} \quad (6)$$

Las composiciones iniciales de destilado se calculan a reflujo total.

El número mínimo de etapas se calcula mediante la ecuación de Fenske:

$$N_{min} = \frac{\log \left[ \left( \frac{x_{Di}}{x_{wi}} \right) \left( \frac{x_{WCP}}{x_{DCP}} \right) \right]}{\log \alpha_{i,CP}} \quad (7)$$

despejando la composición de destilado:

$$x_{Di} = x_{Li} \cdot \left( \frac{x_{DCP}}{x_{LCP}} \right) \cdot \alpha_{i,CP}^{N_{min}} \quad (8)$$

Dónde: i indica el componente en estudio, CP indica el componente de referencia clave pesado,  $x_D$  y  $x_L$  indican la composición de destilado y residuo respectivamente y  $\alpha_{i,CP}$  es la volatilidad relativa del componente en estudio respecto al clave pesado

La composición de la sustancia de referencia se puede calcular de la siguiente manera:

$$x_{DCP} = \frac{x_{LCP}}{\sum_{i=1}^n x_{Li} \cdot \alpha_{i,CP}^{N_{min}}} \quad (9)$$

Las composiciones iniciales del destilado a reflujo total se calculan con la ecuación (9), luego las composiciones de destilado para  $t > t_0$  se calcularán con la ecuación (8).

Una ecuación conveniente que relaciona el  $N_{min}$  con el número real de etapas, es la ecuación de Eduljee:

$$\frac{N - N_{min}}{N + 1} = 0,751 - \left( \frac{R - R_{min}}{R + 1} \right)^{0,5668} \quad (10)$$

por lo que será necesario conocer la relación de reflujo mínimo, la cual se calcula con la ecuación de Underwood:

$$R_{min} = \frac{\left( \frac{x_{D,CL}}{x_{L,CL}} \right) - \alpha_{CL,CP} \cdot \left( \frac{x_{D,CP}}{x_{L,CP}} \right)}{\alpha_{CL,CP} - 1} \quad (11)$$

donde CL es componente clave liviano.

Reemplazando (8) y (9) en (11):

$$R_{min} = \frac{\alpha_{CL,CP}^{N_{min}} - \alpha_{CL,CP}}{(\alpha_{CL,CP} - 1) \cdot \sum_{i=1}^n x_{Li} \cdot \alpha_{i,CP}^{N_{min}}} \quad (12)$$

## 2.2. Técnica operatoria

### 2.2.1. Equipamiento utilizado

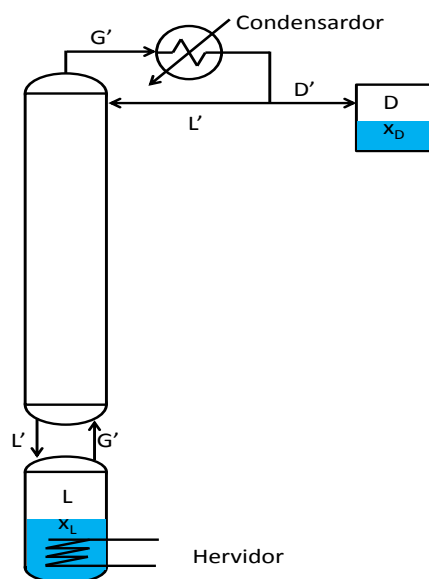
La columna, de 4 cm de diámetro y 95 cm de altura útil de relleno, anillos de acero inoxidable de 6 mm de altura, 5mm de diámetro interno y 6mm de diámetro externo, colocados al azar.

El hervidor es un balón de vidrio de dos litros de capacidad, calefaccionado con una manta que suministra una potencia calefactora de 800W. El condensador es un equipo de doble tubo, refrigerado con agua de enfriamiento

El sistema de recolección de destilado consta de dos balones de 250 ml de capacidad que pueden conectarse alternativamente a través de una llave de tres vías.

Para regular la relación de reflujo se utilizó un electroimán, que al activarse (o desactivarse) durante periodos de tiempo preestablecidos mediante un temporizador automático con relé, permite que el condensado producido se retorne a la columna o retire como producto destilado.

El flujo de líquido que retorna a la columna, reflujo, que circula en contracorriente con el vapor que asciende, llega finalmente de nuevo al hervidor. En este trayecto de descenso esta fase líquida se va empobreciendo en las sustancias más volátiles que componen la mezcla, mientras que por el contrario, el vapor en su recorrido ascendente, se va enriqueciendo en los componentes más volátiles que constituyen la mezcla. Por lo tanto, en el hervidor a medida que transcurre el tiempo la composición se va modificando hasta eliminar de manera total o parcial las sustancias más volátiles. En la Figura 1 se muestra un esquema del sistema de rectificación discontinua.



**Figura 1:** Esquema de la columna de rectificación discontinua.

### *2.2.2. Experiencias llevadas a cabo*

En primer lugar, se realizaron experiencias a reflujo cero con el fin de determinar los caudales limitantes de trabajo, teniendo en cuenta las capacidades de la columna, hervidor y condensador. Para esas experiencias se utilizó una mezcla binaria de alcohol etílico y agua.

Posteriormente, y establecido el valor de caudal de vapor limitante, se llevaron a cabo experiencias a distintos valores, a los fines de evaluar el número de etapas teóricas y la altura equivalente de etapa teórica de la columna.

Posteriormente se reiteraron las experiencias trabajando con una mezcla multicomponente de alcoholes.

### *2.2.3. Mediciones efectuadas*

En primer lugar, se realizaron experiencias a reflujo nulo con el fin de conocer mediante volúmenes de destilado y tiempo de operación los caudales de vapor para las distintas posiciones que permite la perilla de regulación de la manta calefactora. Para esta experiencia se utilizó una mezcla incógnita alcohol-agua contenida en el balón hervidor.

Luego de la obtención de los distintos caudales de vapor se procedió con el cálculo de las relaciones de reflujo que permite el sistema instalado. Para ello se trabajó nuevamente a reflujo cero y se midieron tanto los volúmenes de destilado como los tiempos de acción del electroimán, para una potencia de manta calefactora constante para la misma mezcla incógnita alcohol-agua que la utilizada para el cálculo de los caudales.

Como última parte del trabajo se realizaron corridas en la torre de mezclas de etanol y agua de distintas composiciones iniciales con el fin de obtener muestras de destilado y residuo para su posterior análisis.

Para la toma de muestras se utilizaron pipetas de 1 mL y 5 mL con sus respectivas propipetas, para la extracción por cabeza y residuo respectivamente; y frascos pequeños de vidrio oscuro con tapón de plástico o tapa a rosca, según disponibilidad. Las corridas en la torre se realizaron a reflujo total para simplificar los cálculos posteriores. Las muestras obtenidas se analizaron por cromatografía líquida de alta presión (HPLC).

Las experiencias mencionadas se repitieron con una mezcla de alcoholes (metanol y etanol) y agua.

### *2.2.4. Cálculos teóricos*

Paralelamente se procedió con el estudio teórico del proceso de destilación. Se comenzó con el análisis de una mezcla binaria etanol y agua de composición propuesta a fin de comparar el número de etapas teóricas (Netp) y la altura equivalente de etapa teórica (Hetp) de la torre obtenidas de ambas formas (experimental y teóricamente).

Posteriormente, se repitió el estudio con una mezcla ternaria etanol, metanol y agua, de composición propuesta, con el objetivo de obtener los mismos parámetros que para la mezcla binaria para su posterior verificación experimental.

### 3. Resultados y Discusión:

#### 3.1. Resultados

##### 3.1.1. Sistema etanol agua

###### 3.1.1.1. Resultados experimentales

Con los resultados de las muestras analizadas se llevó a cabo el cálculo del  $N_{etp}$  y el  $H_{etp}$  para las distintas composiciones iniciales. Para el cálculo de los mismos se utilizaron las siguientes ecuaciones:

- Para el cálculo de la altura equivalente de etapa teórica ( $Z = 95$  cm):

$$H_{etp} = \frac{Z}{N_{etp}} \quad (13)$$

Donde Z es la altura de la torre.

Tabla 1: resultados experimentales

	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Alimentación	100 mL etanol 96% 600 mL H <sub>2</sub> O dest.	100 mL etanol 96% 600 mL H <sub>2</sub> O dest.	200 mL etanol 96% 500 mL H <sub>2</sub> O dest.
Calefacción	100%	80%	100%
Composiciones obtenidas	$X_{D1}=0,80$ $X_{W1}=0,04$	$X_{D1}=0,95$ $X_{W1}=0,24$	$X_{D1}=0,95$ $X_{W1}=0,25$
	$X_{D2}=0,81$ $X_{W2}=0,01$	$X_{D2}=0,94$ $X_{W2}=0,21$	$X_{D2}=0,95$ $X_{W2}=0,23$
	$X_{D3}=0,80$ $X_{W3}=0$		$X_{D3}=0,96$ $X_{W3}=0,19$
Resultados	$N_{etp} = 5$ $H_{etp} = 19cm$	$N_{etp} = 6$ $H_{etp} = 15,83cm$	$N_{etp} = 5$ $H_{etp} = 19cm$

Fuente: Elaboración propia

###### 3.1.1.2. Resultados teóricos

Como se dijo anteriormente, se realizó en paralelo un análisis en base a un modelo teórico propuesto, con el fin de comparar los resultados experimentales con los mismos para verificar su aproximación.

En primer lugar, se estudió un sistema binario real etanol, agua donde se propusieron las composiciones iniciales y finales; obteniéndose como resultados:

$$N_{etp} = 7 \text{ y } H_{etp} = 13,57cm$$

Se utilizó como metodología de cálculo el método gráfico simplificado, considerando válidas las hipótesis propuestas por el método Mc Cabe Thiele [1]

##### 3.1.2. Sistema ternario

###### 3.1.2.1. Resultados experimentales:

El análisis de las muestras obtenidas arrojó resultados bastante similares a los obtenidos en los análisis teóricos, tanto en la alimentación como en los productos obtenidos.

Sin embargo, algunas dificultades producidas en la evaluación de los primeros resultados motivados por tener que adecuar la columna cromatográfica a la nueva mezcla, impidieron completar los resultados.

Se muestra en la tabla 2 los valores obtenidos a los fines de su comparación:

Tabla 2: composiciones promedio de las muestras analizadas

	Metanol	Etanol	Agua
Destilado	0,94	0,04	0,02
Residuo	0,12	0,68	0,2

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2.2. Resultados teóricos:

En segundo lugar, se llevó a cabo el modelado teórico de un sistema ternario metanol, etanol, agua, donde también se propusieron las composiciones iniciales y además los rendimientos de separación; llegándose a los siguientes resultados:

$$N_{etp} = 9 \text{ y } H_{etp} = 10,56\text{cm}$$

La mecánica de cálculo propuesta fue la descrita en el marco teórico, utilizando los métodos rápidos de cálculo (FUG). Se detallan los resultados obtenidos:

Tabla 3: propiedades de las sustancias

	PM - Peso molecular ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	$\rho$ - Densidad ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
Metanol (M)	32	791,8
Etanol (E)	44	789
Agua (A)	18	1000

Fuente: Perry [4]

- Composición inicial:  $Z_M = 0,5$        $Z_E = 0,4$        $Z_A = 0,1$
- Base de cálculo:  $F = 100\text{mol}$

Se propone recuperar 90% de Metanol

$$\eta_M = 0.9 \Rightarrow d_M = \eta_M \cdot f_M \quad (14)$$

$$f_M = Z_M \cdot F = 0,5 \cdot 100\text{mol} = 50\text{mol} \Rightarrow d_M = 0,9(50\text{mol}) = 45\text{mol}$$

$$f_M = d_M + w_M \quad (15)$$

$$w_M = f_M - d_M = 50\text{mol} - 45\text{mol} = 5\text{mol}$$

Se propone recuperar 90% de Etanol

$$\eta_E = 0.9 \Rightarrow w_E = \eta_E \cdot f_E \quad (16)$$

$$f_E = Z_E \cdot F = 0,4 \cdot 100\text{mol} = 40\text{mol} \Rightarrow w_E = 0,9(40\text{mol}) = 36\text{mol}$$

$$f_E = d_E + w_E \quad (17)$$

$$d_E = f_E - w_E = 40\text{mol} - 36\text{mol} = 4\text{mol}$$

Como no existen datos del sistema ternario se lo considerará como ideal.



Se necesita conocer:

$$\alpha_{ij} = \frac{P_0}{P_T} \quad (18)$$

Para determinar las presiones de vapor de las sustancias puras, se aplica la ecuación de Antoine

$$\log P_i^0 = A - \frac{B}{C+T} \quad (19)$$

Tabla 4: valores de las constantes de Antoine

	A	B	C
Metanol	7,8783	1473,1	230
Etanol	8,04494	1554,3	222,65
Agua	8,07131	1730,63	233,426

Fuente: Perry[4]

$$R = \frac{1}{P_T} \sum x_i^F p_i^0 = \frac{1}{760mmHg} \sum [0,5(p_M^0) + 0,4(p_E^0) + 0,1(p_A^0)] = 1 \quad (20)$$

$$p_M^0 = 997,89mmHg \quad p_E^0 = 589,065mmHg \quad p_A^0 = 254,29mmHg \quad T = 72,02^\circ C$$

$$\alpha_{M/E} = 1.694 \quad \alpha_{E/E} = 1 \quad \alpha_{A/E} = 0,432$$

Se aplican las ecuaciones de Henstebeck:

$$\ln \frac{d_M}{w_M} = C_1 \ln \alpha_{M/E} + C_2 \quad (21)$$

$$\ln \frac{d_E}{w_E} = C_1 \ln \alpha_{E/E} + C_2$$

Despejando queda:

$$C_1=8,337 \quad C_2=-2,197$$

Con  $C_1$  y  $C_2$  conocidos, se calcula  $d_A$  y  $w_A$  haciendo uso de las ecuaciones (21)

$$\ln \frac{d_A}{w_A} = 8,337 \ln 0,432 - 2,197$$

$$f_A = d_A + w_A = 10mol$$

$$d_A = 9,99mol \quad w_A = 0,001mol$$

Ahora se calculan los caudales totales mediante:

$$D = \sum d_i = d_M + d_E + d_A = 45mol + 4mol + 9,999mol = 58,999mol \quad (22)$$

$$W = \sum w_i = w_M + w_E + w_A = 5mol + 36mol + 0,001mol = 41,001mol \quad (23)$$

Con estos caudales, se calcula las composiciones de residuo y destilado usando:

$$x_D^j = \frac{d_j}{D} \quad (24) \quad x_W^j = \frac{w_j}{W} \quad (25)$$

$$x_D^M = \frac{d_M}{D} = \frac{45 \text{ mol}}{58,999 \text{ mol}} = 0,7627 \quad x_W^M = \frac{w_M}{W} = \frac{5 \text{ mol}}{41,001 \text{ mol}} = 0,1219$$

$$x_D^E = \frac{d_E}{D} = \frac{4 \text{ mol}}{58,999 \text{ mol}} = 6,779 \cdot 10^{-2} \quad x_W^E = \frac{w_E}{W} = \frac{36 \text{ mol}}{41,001 \text{ mol}} = 0,878$$

$$x_D^A = \frac{d_A}{D} = \frac{45 \text{ mol}}{58,999 \text{ mol}} = 0,1695 \quad x_W^A = \frac{w_A}{W} = \frac{0,001 \text{ mol}}{41,001 \text{ mol}} = 2,439 \cdot 10^{-5}$$

Para verificar, se calcula temperatura de rocío y burbuja y el correspondiente  $\alpha_{ij}$  para cada una, haciendo uso de las ecuaciones (18) a (20)

- Temperatura de rocío  $y = x_D$

$$\log P_i^0 = A - \frac{B}{C+T} \quad x_i = \frac{760 y_i}{p_i^0} \quad \sum x_i = 1$$

$$p_M^0 = 1159,84 \text{ mmHg} \quad p_E^0 = 695,89 \text{ mmHg} \quad p_A^0 = 302,25 \text{ mmHg} \quad T = 76,2^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{M/E} = 1,667 \quad \alpha_{E/E} = 1 \quad \alpha_{A/E} = 0,434$$

- Temperatura de burbuja  $x = x_W$

$$\log P_i^0 = A - \frac{B}{C+T}$$

$$R = \frac{1}{P_T} \sum x_i^F p_i^0 = \frac{1}{760 \text{ mmHg}} \sum [0,1219(p_M^0) + 0,878(p_E^0) + 2,439 \cdot 10^{-5}(p_A^0)] = 1$$

$$p_M^0 = 1170,63 \text{ mmHg} \quad p_E^0 = 703,066 \text{ mmHg} \quad p_A^0 = 305,448 \text{ mmHg} \quad T = 76,37^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{M/E} = 1,665 \quad \alpha_{E/E} = 1 \quad \alpha_{A/E} = 0,4345$$

Ahora se calcula  $\alpha'_{ij}$

$$\alpha'_{ij} = \sqrt{\alpha_{ij}^R \cdot \alpha_{ij}^B} \quad (26)$$

$$\alpha'_{M/E} = \sqrt{\alpha_{M/E}^R \cdot \alpha_{M/E}^B} = 1,666$$

$$\alpha'_{E/E} = \sqrt{\alpha_{E/E}^R \cdot \alpha_{E/E}^B} = 1$$

$$\alpha'_{A/E} = \sqrt{\alpha_{A/E}^R \cdot \alpha_{A/E}^B} = 0,43425$$

Como  $\alpha'_{ij} \neq \alpha_{ij}$ , se recalculan las composiciones con este nuevo  $\alpha'_{ij}$  haciendo uso de las ecuaciones (21)

$$\ln \frac{d_M}{w_M} = C_1 \ln \alpha_{M/E} + C_2 \quad \ln \frac{d_E}{w_E} = C_1 \ln \alpha_{E/E} + C_2$$

$$\text{Despejando: } C_1 = 8,609 \quad C_2 = -2,197$$

Con estos valores se recalculan los caudales de cada componente para destilado y residuo, utilizando nuevamente las ecuaciones (21)

$$\ln \frac{d_A}{w_A} = 8,609 \ln 0,43425 - 2,197$$

$$f_A = d_A + w_A = 10 \text{ mol}$$

$$d_A = 8,45 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$$

$$w_A = 9,999 \text{ mol}$$

Con estos nuevos caudales de utilizan las ecuaciones (22) y (23) para recalcular los caudales totales de residuo y destilado

$$D = \sum d_i = d_M + d_E + d_A = 45 \text{ mol} + 4 \text{ mol} + 8,45 \cdot 10^{-4} \text{ mol} = 49,001 \text{ mol}$$

$$W = \sum w_i = w_M + w_E + w_A = 5 \text{ mol} + 36 \text{ mol} + 9,999 \text{ mol} = 50,999 \text{ mol}$$

$$x_D^M = \frac{d_M}{D} = \frac{45 \text{ mol}}{49,001 \text{ mol}} = 0,918$$

$$x_W^M = \frac{w_M}{W} = \frac{5 \text{ mol}}{50,999 \text{ mol}} = 9,8 \cdot 10^{-2}$$

$$x_D^E = \frac{d_E}{D} = \frac{4 \text{ mol}}{49,001 \text{ mol}} = 8,16 \cdot 10^{-2}$$

$$x_W^E = \frac{w}{W} = \frac{36 \text{ mol}}{50,999 \text{ mol}} = 0,7059$$

$$x_D^A = \frac{d_A}{D} = \frac{8,45 \cdot 10^{-4} \text{ mol}}{49,001 \text{ mol}} = 1,72 \cdot 10^{-5}$$

$$x_W^A = \frac{w_A}{W} = \frac{0,001 \text{ mol}}{50,999 \text{ mol}} = 0,196$$

Se calcula el número mínimo de etapas utilizando la ecuación (7) para estas nuevas composiciones

$$N_{min} = \frac{\log \left[ \left( \frac{x_{Di}}{x_{wi}} \right) \left( \frac{x_{wCP}}{x_{DCP}} \right) \right]}{\log \alpha'_{iCP}} = \frac{\log \left[ \left( \frac{0,918}{9,8 \cdot 10^{-2}} \right) \left( \frac{0,7059}{8,16 \cdot 10^{-2}} \right) \right]}{\log 1,666} = 8,61$$

Como se trabaja a reflujo total  $N_{min} = N_{op}$

Finalmente se calcula  $H_{etp}$  con la ecuación (13):

$$H_{ETP} = \frac{Z}{N_{op}} = \frac{95 \text{ cm}}{8,61} = 11 \text{ cm}$$

### 3.2. Discusión

Se observa concordancia razonable entre los métodos de cálculo propuestos y los resultados experimentales obtenidos, tanto en el análisis de una mezcla binaria como el de una multicomponentes.

### 4. Conclusiones y recomendaciones

Al observarse una concordancia razonable entre los resultados experimentales obtenidos y los predichos por los modelos teóricos, se pudo caracterizar los parámetros de la columna rellena, e incorporar la misma al equipamiento de laboratorio utilizado en la enseñanza de grado de las carreras de Ingeniería Química e Ingeniería en Alimentos.

Además, como resultado del presente trabajo, se redactó un apunte que se incorporará en el transcurso del próximo semestre al material de estudio suministrado a los estudiantes.

Se redactó además una guía de trabajos prácticos para implementarse también en el segundo cuatrimestre. No obstante ello, durante el presente período, los estudiantes tuvieron oportunidad de ponerse en contacto con el equipo estudiado, a fines de conocer el equipo, su funcionamiento y alternativas de operación.

Además, las experiencias citadas fueron llevadas a cabo por María Laura Paganelli, estudiante, co autora de este trabajo, en el transcurso de una práctica extracurricular llevada a cabo en el marco del reglamento de la Facultad de Ingeniería Química

La experiencia fue muy fructífera ya que no sólo contribuyó a afianzar los conceptos recibidos en el cursado de la asignatura, sino que además adquirió experticia en técnicas de investigación, como diseño de experiencias, toma de datos experimentales, análisis estadístico de los mismos, procesamiento y obtención de conclusiones, redacción de un informe final, etc. que sin duda contribuirán a su formación profesional.

## **5. Referencias**

- [1] TREYBAL, R. (1996). *Operaciones de Transferencia de Masa*. Madrid. Mc Graw Hill
- [2] ROMERO, P.; OTINIANO, C.; (2009); *Simulación del comportamiento de una columna de destilación utilizando métodos cortos*. Lima. Revista Peruana de Química e Ingeniería Química. p 52 – 58.
- [3] GALÍNDEZ, H.; FEDENSLUD, A.; *Comput. Chem Eng.* Vol 12 p 281 - 286
- [4] PERRY, R.; GREEN, D.; MELANCY, J.; (2001). *Manual del Ing. Qco. Vol I*. New York. Mc Graw Hill.

## **6. Anexo 1**

### **Trabajo práctico: destilación discontinua de una mezcla multicomponente**

#### **1. Objetivos del Trabajo Práctico**

Familiarizar al estudiante con el manejo de un equipo a escala laboratorio

Obtener y procesar información experimental del mismo

Procesar y tratar estadísticamente los datos relevados

Compara los resultados obtenidos con los predichos por los modelos teóricos

#### **2. Equipo a utilizar:**

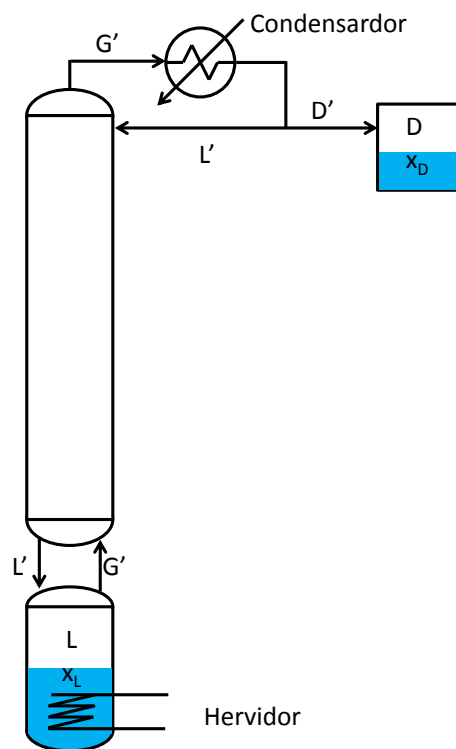
Se utilizará un equipo compuesto por piezas fabricadas en vidrio, con las partes de unión esmeriladas. El hervidor, en el cual se coloca la mezcla a destilar, consiste en un balón de vidrio de dos litros de capacidad, colocado sobre una manta calefactora marca Decalab (800W) como única fuente de energía. Consta de un núcleo de burbujeo en una de las bocas laterales del balón y un termómetro de alcohol en la otra.

La columna posee 4cm de diámetro y 95cm de altura, rellena con anillos de acero inoxidable de 6mm de altura, 5m de diámetro interno y 6mm de diámetro externo,

colocados al azar. En la parte superior de la columna hay un conducto por donde el vapor se traslada hacia el condensador ubicado en el tope del equipo; el líquido condensado cae por gravedad hacia un pequeño embudo que actúa como regulador de la relación de reflujo, ya que permite desviar a voluntad el camino a seguir por el fluido: ya sea retorno a la columna o al colector de destilado. Para esto se utiliza un electroimán, que al activarse (o desactivarse) durante periodos de tiempo preestablecidos mediante un temporizador automático con relé, inclina el embudo hacia la posición correspondiente. Luego de la descarga se ubica un condensador cuya operación es opcional y permite subenfriar el destilado.

El sistema de recolección de destilado consta de dos balones de 250 ml de capacidad que pueden conectarse alternativamente a través de una llave de tres vías.

El esquema es el siguiente:



**Figura 1: esquema de la columna de rectificación discontinua.**

### 3. Técnica Operatoria

#### 3.1. Preparación de solución a procesar

3.2. Colocar la misma en el balón y comenzar la calefacción y refrigeración en el condensador.

3.3. Trabajar a reflujo total hasta lograr estabilización de caudales de operación y temperaturas de trabajo.

3.4. Obtener muestras de los distintos productos a intervalos controlados de tiempo.

3.5. Detener la experiencia cuando se agote un porcentaje de la alimentación

### 4. Manejo de los datos experimentales

Las muestras se llevarán a analizar y se confeccionará una tabla con la evolución de las mismas en función del tiempo.

#### 5. Cálculo teóricos

Mediante el modelo propuesto en teoría, y considerando la concentración del hervidor como de alimentación, se calculará la composición teórica a obtener en el hervidor.

#### 6. Informe final

Se redactará un informe final donde conste una introducción teórica breve sobre el tema, técnica operatoria, información relevada, procesamiento de la misma y conclusiones finales