

## LA SIMULACIÓN Y LA EXPERIMENTACIÓN A ESCALA PILOTO PARA LA ENSEÑANZA EN INGENIERÍA QUÍMICA

**María del C. Pramparo**, UNRC, mpramparo@ing.unrc.edu.ar  
**Guadalupe Abrile**, UNRC, guadalupeabril@gmail.com  
**Guillermo Boccolini**, UNRC, guiye2912@gmail.com  
**Pablo Fiezzi**, UNRC, fiezzi50@gmail.com  
**Sol Sassatelli**, UNRC, solsassa@hotmail.com  
**Leisa Magallanes**, UNRC, lmagallanes@ing.unrc.edu.ar  
**Lorena Tarditto**, UNRC, ltarditto@ing.unrc.edu.ar  
**María Fernanda Gayol**, UNRC, mgayol@ing.unrc.edu.ar

### Resumen

Se fomentó el uso de la simulación en la enseñanza de Ingeniería Química con alumnos avanzados en la carrera, verificando el comportamiento de un simulador comercial mediante la realización de una destilación batch a escala piloto. En una primera etapa, se separó una mezcla binaria etanol-agua y luego, en dos etapas posteriores, se analizó la destilación de etanol-agua con agregado de congéneres y la obtención de aceite esencial concentrado de orégano. Se utilizó la simulación para estudiar el proceso, y fijar las condiciones de operación de planta piloto, determinando la composición de las muestras al finalizar cada experiencia. En este trabajo se logró separar una mezcla binaria etanol-agua al 70% en volumen en la columna de destilación. Durante el proceso en planta piloto se realizaron varias tomas de muestra en el calderín y en el depósito del producto destilado; la columna de destilación permite variar condiciones de presión, caudal y temperatura para así obtener distintas concentraciones de destilado y residuo en un tiempo determinado. Mediante esta propuesta se logró realizar un trabajo grupal, con práctica de reuniones profesionales, intercambiando ideas, solucionando cuestiones a resolver y desarrollando un práctico en tres etapas. Se espera que este trabajo se tome a modo de ejemplo y se implemente en distintas asignaturas específicas de la carrera de Ingeniería Química.

### *Palabras clave*

*Destilación discontinua, congéneres, aceites esenciales*

### 1. Introducción

La destilación es una de las operaciones de separación convencionales estudiadas en la carrera de Ingeniería Química. En particular, se estudia la destilación batch en donde los procesos de producción constan de etapas discontinuas (el equipo se carga, se procesa el material y descarga) operando intermitentemente, en estado no estacionario. Son muy flexibles, permitiendo producir varios productos con la misma instalación. La mezcla se carga en un calderín y se le transmite calor por medio de un serpentín o a través de la pared del recipiente hasta que el líquido alcance la temperatura de ebullición y se vaporiza una parte de la carga. En el método más sencillo de operación, los vapores pasan directamente desde el calderín hasta el condensador. El vapor que en un determinado momento sale del calderín está en equilibrio con el líquido existente en el calderín, pero como el vapor es más rico en el componente más volátil, las composiciones del líquido y el vapor no son constantes [1].

Además del aprendizaje de las herramientas teóricas disponibles para el estudio, diseño y análisis de la operación, resulta un aporte de importancia en la asimilación de conocimientos

probar la teoría a escala piloto, en equipos vidriados, para tomar contacto visual con los fenómenos que allí ocurren, además de poner en juego la creatividad para ponerlo en marcha, hacerlo funcionar y optimizar el proceso [2].

En esta base se propone a un grupo de alumnos un problema abierto de ingeniería a resolver aplicando los recursos disponibles. Dicho trabajo está orientado a estudiantes avanzados en la carrera de Ingeniería Química y se desarrolla a lo largo de un año en tres etapas. En una primera instancia se aplica la destilación batch a una mezcla binaria compuesta por etanol-agua. En una segunda etapa, la mezcla es multicomponente formada por etanol y alcoholes superiores o congéneres producto de las fermentaciones alcohólicas. En la última etapa, el sistema de estudio son aceites esenciales obtenidos a partir del orégano [3].

Los alumnos buscan información, planifican las experiencias y usan softwares de simulación de procesos (ProII, Chemcad) para encontrar las condiciones tentativas de operación. La simulación de procesos es una herramienta eficaz y efectiva para el análisis, la síntesis y la optimización de procesos [4], [5]. Mediante esta propuesta se busca que los alumnos realicen un análisis integral del proceso, basado en los balances de masa y energía. Es decir, que sean capaces de identificar las variables que influyen sobre un proceso con varios equipos de uso común en industrias químicas, modificarlas y tomar decisiones o plantear alternativas en función de requisitos de producción. Las condiciones de operación obtenidas en la simulación se aplicarán en el trabajo de planta piloto con el equipo experimental, de donde surgen correcciones al modelo de simulación utilizado. Se establecen ciclos de simulación–experimentación hasta que se encuentran valores óptimos de las variables estudiadas [6], [7], [8].

Finalmente, los alumnos presentan el informe escrito con la idea que hagan la práctica de presentarlo en el formato de un “paper” y respetando los ítems habituales que contienen tales artículos. El trabajo se concluye con una discusión grupal de cierre, de tipo “charla técnica entre colegas” para analizar los problemas y se responden diferentes inquietudes que presentan. Con la realización de este trabajo se espera que se implemente la simulación como herramienta en distintas asignaturas específicas de la carrera de Ingeniería Química, como Balances de Masa y Energía, Operaciones Unitarias, Tecnología de Servicios, Proyecto Industrial, logrando integrar conocimientos teóricos y prácticos en una situación real a escala piloto.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la simulación de los tres procesos de destilación mencionados y los resultados experimentales de una de las etapas: la destilación binaria. Además se discuten las conclusiones sobre la aplicación de un software de simulación comercial de manera complementaria y paralela a la experimentación.

### **1.1 Primera etapa: destilación batch de mezcla binaria**

La primera etapa desarrollada consta de una mezcla binaria compuesta por agua y etanol. La separación de mezclas binarias se realiza a nivel industrial en diferentes procesos. En la destilación, la separación se produce por un fenómeno fisicoquímico en donde, por la acción del calor y la diferencia de los puntos de ebullición provoca la separación de los compuestos, aunque normalmente la eficiencia de separación no es del 100%, debido a la presencia de mezclas azeotrópicas [9], [10], [11].

### **1.2 Segunda etapa: destilación batch de mezcla multicomponente**

Durante el desarrollo de las fermentaciones alcohólicas, además de etanol, siempre se genera una pequeña fracción de otros componentes que forman una mezcla compleja constituida principalmente por alcoholes superiores y en mucho menor medida por ácidos y ésteres derivados de los alcoholes más abundantes. Estos constituyentes minoritarios presentes en la solución acuosa de etanol obtenida en la fermentación deben extraerse durante la etapa de rectificación porque aún en pequeñas proporciones poseen una toxicidad importante y degradan la calidad del alcohol etílico que se pretende obtener como producto final.

Los alcoholes superiores o congéneres presentan una variación cualitativa y cuantitativa muy amplia y se extraen junto a una fracción de etanol conformando los denominados aceites de Fusel [12].

### 1.3 Tercera etapa: destilación de aceites esenciales

Los aceites esenciales (aceites volátiles que son las esencias aromáticas concentradas de las plantas) y sus derivados, son ingredientes importantes que se utilizan en las industrias alimenticia, cosmética, farmacéutica y otras relacionadas. Son productos olorosos conocidos por poseer propiedades multifuncionales ya que son antibacterianos, antifúngicos y anti-inflamatorios. Convencionalmente se obtienen de las plantas mediante la extracción por arrastre con vapor de agua. Los extractos iniciales o aceites esenciales crudos así obtenidos pueden contener cientos de especies químicas individuales. Frecuentemente estos extractos deben ser procesados (fraccionados) para aislar sus componentes más valiosos (mezclas o componentes puros) de mayor calidad y con un valor agregado superior. La concentración de los componentes de interés se puede llevar a cabo por destilación fraccionada en vacío, por extracción de los componentes oxigenados con alcohol diluido u otros solventes, o por combinación de ambas. En el presente trabajo se utilizará como material de análisis aceite esencial de Orégano (*Origanum vulgare L.*) [3], [6], [13].

## 2.1 Materiales

Para llevar a cabo la simulación del proceso se utilizó el software comercial Chemcad 6.5.6. Para la experimentación en planta piloto se cuenta con un destilador batch Figmay (Figura 1) construido totalmente en vidrio pírex que consta de un recipiente de carga con dispositivo de calentamiento eléctrico incorporado (resistencia eléctrica) y una columna con relleno distribuido al azar (con anillos de vidrio tipo Raschig), equivalente a una altura total de seis platos teóricos. El reflujo es controlado por medio de un dispositivo magnético. El condensador y el subenfriador están acoplados en serie, utilizando agua de enfriamiento que circula en circuito cerrado, terminando en un recipiente acumulador de destilado. Se dispone de un sistema electrónico de comando (tablero) donde se fija la secuencia de programas a seguir por el equipo monitoreado por medio de sensores de las siguientes variables: temperatura de cabeza y de fondo, relación de reflujo, potencia suministrada y nivel de vacío.

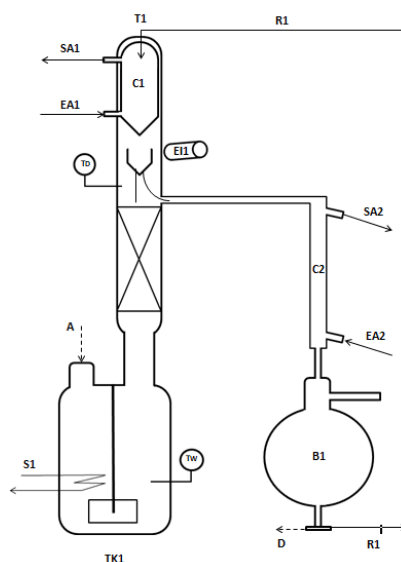


Figura 1: Esquema del equipo de destilación batch a escala piloto.

Fuente: elaboración propia.

## 2.2 Metodología

### 2.2.1 Primera etapa: destilación batch de mezcla binaria

Primero se simuló el proceso de destilación mediante la utilización del software comercial Chemcad 6.5.6 teniendo en cuenta las condiciones impuestas por el equipo para la práctica posterior. Para la mezcla binaria, se fijó una relación 70% etanol y 30% agua. Los datos del pote de carga se completaron adoptando una presión de 1atm y 25°C de temperatura. Se especificó en el simulador que la columna consta de seis platos teóricos. La separación se realizó con una relación de reflujo de 2. En el reboiler se entregó 1300 kcal/hr y se usó como criterio de parada el tiempo de operación (2 hs).

Culminada la etapa de simulación se procedió con la realización práctica de la destilación. Primero se cargó la mezcla preparada con la misma composición utilizada en la simulación en el pote de carga, se comenzó la circulación del agua refrigerante, la entrega de calor y se programó la primera etapa desde el tablero electrónico. Esto representa la puesta en marcha de la columna con reflujo total. Se esperó hasta alcanzar una temperatura de 75°C en el pote de carga y luego se programó la operación de destilación con las condiciones utilizadas en el simulador, como la relación de reflujo y el tiempo de operación, durante el cual se monitorea la temperatura de forma periódica. Se tomaron siete muestras cada 30 minutos aproximadamente tanto del calderín como del depósito del producto destilado, las que fueron guardadas en tubos de ensayo con tapa, para luego medir concentraciones empleando un refractómetro.

### 2.2.2 Segunda etapa: destilación batch de mezcla multicomponente

Se simuló el proceso de destilación con el software Chemcad 6.5.6 y luego de varias pruebas se seleccionó una de ellas como la más factible de ser llevada a cabo experimentalmente, la que fue utilizada en el presente trabajo. Los datos del pote de carga se encuentran en la Tabla 1. Se utilizó una presión de 1 atm y 25°C de temperatura. También se fijó, como parámetro de operación, un arranque a reflujo total. Como características de la columna se cargaron seis platos teóricos y se trabajó en dos etapas. En la primera etapa se utilizó una relación de reflujo de 3 y 3 horas de operación. En la segunda etapa la relación de reflujo fue de 5 y 4 horas de operación.

Tabla 1: Carga inicial del destilador batch.

| Compuesto         | Cantidad (kg) |
|-------------------|---------------|
| Etanol            | 4,4           |
| Agua              | 3,1           |
| Propanol          | 1,0           |
| 3 metil 1 butanol | 1,5           |

Fuente: elaboración propia.

### 2.2.3 Tercera etapa: destilación batch de aceites esenciales

Se simularon diversos escenarios con la mezcla Timol, p-Cimeno y Pineno para estudiar su separación a baja presión en distintas condiciones operativa. Estos compuestos son típicos del aceite esencial de orégano en estudio, y se utilizan como representativos de la mezcla: el timol es el compuesto de valor a concentrar en el residuo, y los otros dos (terpenos) se pretende que se destilen y recojan en el acumulador de destilado.

El timol representa aproximadamente un 77% de la fracción de “pesados” de la mezcla real. La concentración de la mezcla inicial y las características de la columna fueron las mismas en todas las simulaciones indicadas, 58 % en peso de Timol, 23% de p-Cimeno y 19% de Pineno.

El objetivo fue realizar un estudio paramétrico con una misma mezcla de partida, de manera de obtener un aceite esencial con una concentración de 99 % p/p de timol.

Los métodos termodinámicos seleccionados son [14], [15]:

- Cálculo de la constante de Equilibrio K: dado que se trabajó a muy bajas presiones, se eligió la Presión de vapor ideal.
- Cálculo de la Entalpía: por recomendación del manual de ayuda de Chemcad 6.5.6 se adoptó SRK.

Se realizaron simulaciones a reflujo constante y se simularon dos casos diferentes:

- Caso 1: 1 Paso de operación.
- Caso 2: 2 Pasos de operación.

En ambos casos se trabajó con distintas presiones en el hervidor y distintas relaciones de reflujo, con el objetivo de obtener las condiciones óptimas de pureza de los componentes y menor gasto de energía.

El objetivo de las simulaciones con un único paso de operación (caso 1) fue obtener datos de tiempo para la recuperación del componente más volátil y así comparar los resultados obtenidos con los del caso 2 y elegir la mejor condición de operación. Para el caso 2 se trabajó con la siguiente estrategia: el primer paso de operación se realizó a una baja relación de reflujo, a un tiempo fijo, con el objetivo de recuperar la mayor cantidad del componente más volátil, en el menor tiempo posible y con el menor gasto de energía.

En la segunda etapa, se trató de alcanzar los valores deseados de timol en el hervidor.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Primera etapa: destilación batch de mezcla binaria

##### 3.1.1 Simulación

Teniendo en cuenta las condiciones de operación establecidas, se muestran los resultados obtenidos en el simulador, Figura 2 y 3 respectivamente.

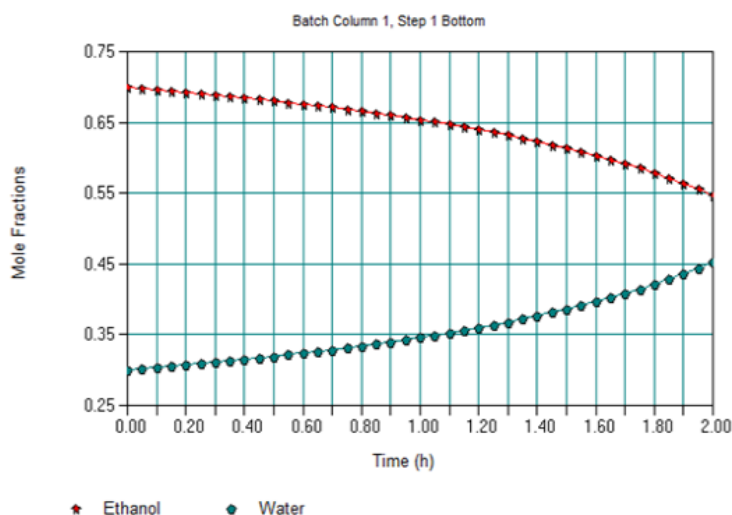


Figura 2: Fracción molar de etanol y agua en el fondo de la columna en función del tiempo.

Fuente: Chemcad 6.5.6.

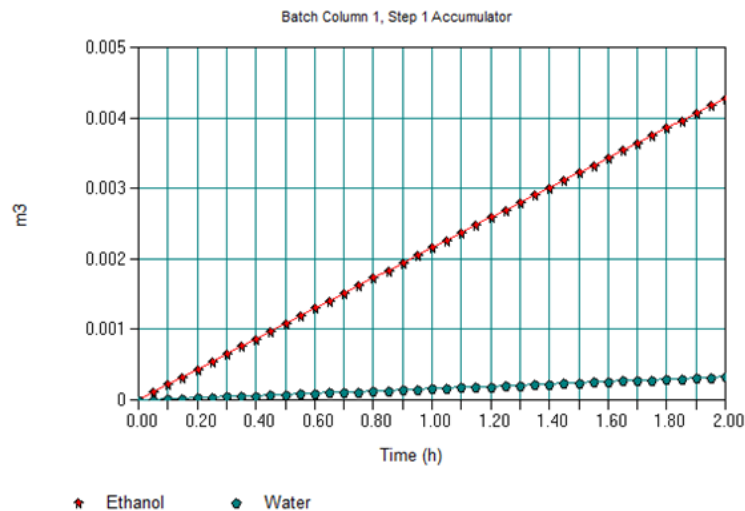


Figura 3: Volumen de etanol y agua acumuladas en el destilado en función del tiempo.  
Fuente: Chemcad 6.5.6.

### 3.1.2 Experimentación

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en la experiencia a escala piloto con las condiciones de operación utilizadas.

Tabla 2: Resultados obtenidos en la experiencia a escala piloto para el destilado. °GL: grados Gay Lussac.

| Tiempo (min) | Volumen (L) | Concentración (°GL) | Fracción másica |
|--------------|-------------|---------------------|-----------------|
| 15           | 0,235       | 93,4                | 0,934           |
| 20           | 0,499       | 93,0                | 0,930           |
| 45           | 1,015       | 93,0                | 0,930           |
| 75           | 2,005       | 93,0                | 0,930           |
| 90           | 2,470       | 93,0                | 0,930           |
| 105          | 2,920       | 92,9                | 0,929           |
| 120          | 3,438       | 92,7                | 0,927           |

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.3 Discusión de resultados

Se obtuvo de forma experimental aproximadamente un 25% menos de destilado que en la simulación, dado que en la simulación no se tuvieron en cuenta las pérdidas de calor de los equipos. Por lo tanto, se utilizarán estos datos para estimar las pérdidas en un 25% en futuras experiencias.

## 3.2 Segunda etapa: destilación batch de mezcla multicomponente

### 3.2.1 Simulación

En las Figuras 4 y 5 se observa la evolución en el tiempo de la cantidad de cada componente en el fondo de la columna.

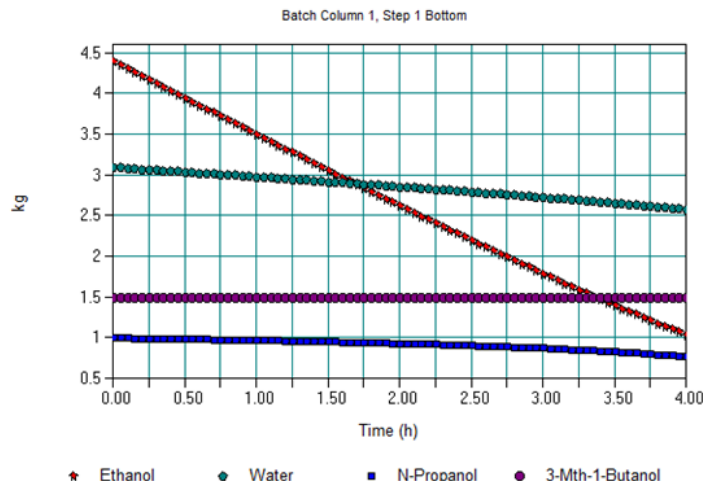


Figura 4: Evolución de la cantidad de cada componente en el tiempo en la primera etapa.  
Fuente: Chemcad 6.5.6.

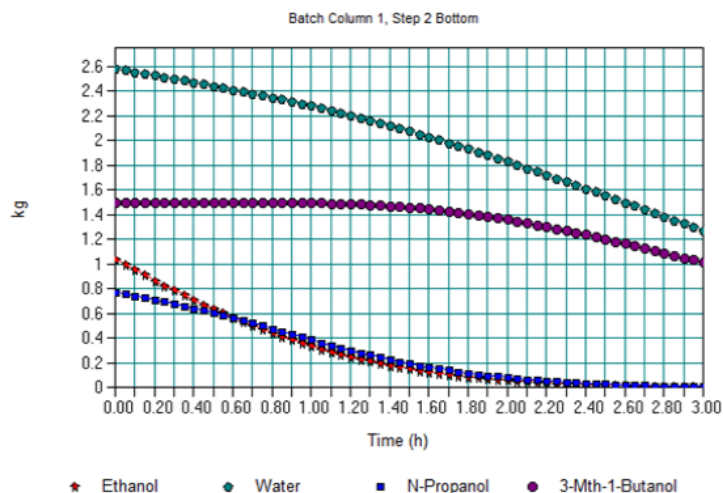


Figura 5: Evolución de la cantidad de cada componente en el tiempo en la segunda etapa.  
Fuente: Chemcad 6.5.6.

### 3.2.2 Discusión de resultados

A partir de las Figuras 4 y 5 se puede apreciar que transcurridas las dos etapas del proceso, la cantidad de etanol en el fondo es cero lo que indica que se ha eliminado totalmente por la parte superior de la columna, también se pudo apreciar que junto al etanol abandonó la columna el n-propanol, lo que da indicio de que si se obtienen estos compuestos por separado se debe colocar una segunda columna que haga posible su separación con un mayor grado de pureza.

## 3.3 Tercera etapa: destilación batch de aceite esencial de orégano

### 3.3.1 Simulación

En la Tabla 3 se muestran los valores de las variables más importantes obtenidas en las distintas pruebas de simulación para 2 pasos de operación, para una base de cálculo de 100 Kg inicial:

Tabla 3: Condiciones operativas y resultados para dos pasos de operación. Tiempo=3,25 hs

| P (mmHg) | X <sub>f</sub> | Re    | W (kg) | X <sub>w</sub> | ECOND (Kcal) | EHERV (Kcal) | ETOTAL (Kcal) |
|----------|----------------|-------|--------|----------------|--------------|--------------|---------------|
| 1        | 0,40           | 37    | 38,7   | 0,760          | 108451       | 108040       | 216491        |
|          |                | 39    | 38,7   | 0,760          | 114157       | 113745       | 227902        |
|          |                | 43    | 38,7   | 0,760          | 125157       | 125568       | 250725        |
|          |                | 47    | 38,7   | 0,760          | 136980       | 136569       | 273549        |
|          |                | 54    | 38,7   | 0,760          | 156950       | 156538       | 313488        |
|          |                | 60    | 38,7   | 0,760          | 174067       | 173655       | 347722        |
|          | 0,45           | 37    | 43,0   | 0,760          | 109868       | 109423       | 219292        |
|          |                | 39    | 43,2   | 0,847          | 115145       | 114709       | 229854        |
|          |                | 43    | 43,2   | 0,847          | 126656       | 126219       | 252875        |
|          |                | 47    | 43,2   | 0,847          | 138166       | 137730       | 275896        |
|          |                | 54    | 43,2   | 0,847          | 158308       | 157872       | 310180        |
|          |                | 60    | 43,2   | 0,847          | 175554       | 175138       | 350692        |
|          | 0,50           | 37    | 47,1   | 0,859          | 109868       | 109423       | 219291        |
|          |                | 39    | 47,2   | 0,926          | 116661       | 116193       | 232853        |
|          |                | 43    | 47,3   | 0,926          | 128332       | 127854       | 256186        |
|          |                | 47    | 47,3   | 0,926          | 139984       | 139516       | 279500        |
|          |                | 54    | 47,3   | 0,859          | 168310       | 157868       | 326178        |
|          |                | 60    | 47,3   | 0,900          | 176338       | 175885       | 352222        |
| 3        | 0,90           | 37    | 52,6   | 0,989          | 81314        | 80856        | 162170        |
|          |                | 39    | 52,6   | 0,989          | 85105        | 84647        | 169753        |
|          |                | 43    | 52,6   | 0,989          | 92688        | 92230        | 184919        |
|          |                | 47    | 52,6   | 0,990          | 100271       | 99813        | 200084        |
|          |                | 50    | 52,6   | 0,990          | 105998       | 105500       | 211498        |
|          |                | 54    | 52,6   | 0,990          | 113541       | 101607       | 215147        |
|          |                | 60    | 52,6   | 0,990          | 124915       | 124457       | 249372        |
|          |                | 37    | 52,6   | 0,989          | 81315        | 80856        | 162170        |
|          |                | 39    | 52,6   | 0,989          | 85105        | 84648        | 169753        |
|          |                | 43    | 52,6   | 0,989          | 92688        | 92230        | 184918        |
|          |                | 47    | 52,6   | 0,990          | 100271       | 99813        | 200084        |
|          |                | 50    | 52,6   | 0,990          | 105951       | 105500       | 211451        |
| 54       | 52,6           | 0,990 | 113541 | 113082         | 226623       |              |               |
| 60       | 52,6           | 0,990 | 124916 | 124457         | 249373       |              |               |
| 10       | 0,90           | 37    | 51,1   | 0,989          | 81314        | 80855        | 162169        |
|          |                | 39    | 51,1   | 0,989          | 85106        | 84647        | 169753        |
|          |                | 43    | 51,1   | 0,989          | 89017        | 89250        | 178267        |
|          |                | 47    | 51,1   | 0,990          | 100271       | 99813        | 200084        |
|          |                | 50    | 51,1   | 0,990          | 105958       | 105500       | 211458        |
|          |                | 54    | 51,1   | 0,990          | 113541       | 113083       | 226624        |
| 60       | 51,1           | 0,990 | 124915 | 124457         | 249372       |              |               |
| 100      | 0,58           | 37    | 51,1   | 0,989          | 111310       | 110824       | 222134        |
|          |                | 39    | 51,1   | 0,989          | 117182       | 116699       | 233881        |
|          |                | 43    | 51,1   | 0,989          | 128879       | 128392       | 257271        |
|          |                | 47    | 51,1   | 0,990          | 140591       | 140105       | 280695        |
|          |                | 50    | 51,1   | 0,990          | 149375       | 148889       | 29826         |
|          |                | 54    | 51,1   | 0,990          | 161888       | 16061        | 322489        |
| 60       | 51,1           | 0,990 | 178656 | 178169         | 356825       |              |               |

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- X<sub>F</sub>: Composición inicial de Timol en el hervidor



- $X_w$  : Composición final de Timol en el hervidor
- $W$ : Cantidad final de timol en el hervidor
- EHERV: Energía requerida en el hervidor
- ECOND: Energía requerida en el condensador
- ETOTAL: Energía total requerida
- $P$ : Presión de trabajo en el hervidor
- $Re$ : Relación de reflujo
- $t$ : Tiempo de destilación

En las Figuras 6 a 9 se muestra gráficamente la influencia de la relación de reflujo, la concentración inicial de timol y el tiempo de operación en la cantidad de timol obtenida en el calderín, su concentración y la energía total requerida (condensador + hervidor).

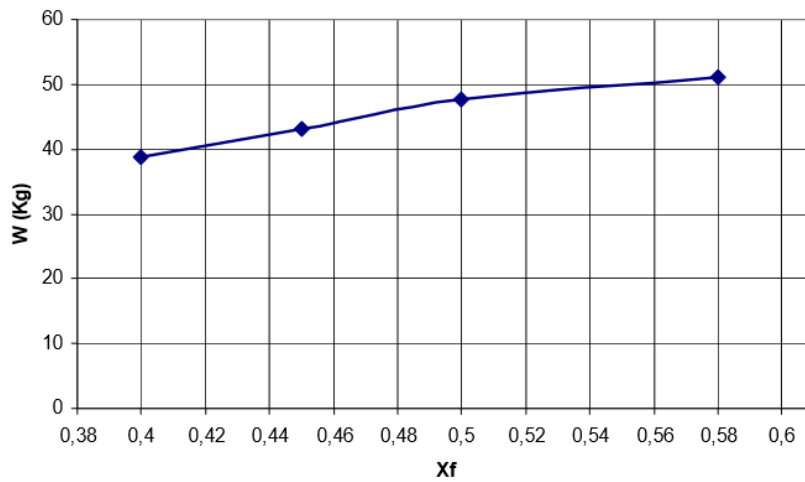


Figura 6: Variación de la cantidad de Timol  $W$  (kg) obtenida en el hervidor para distintas concentraciones iniciales ( $x_f$ ) y relación de reflujo de 37. (2 pasos – 1 mmHg)  
Fuente: elaboración propia.

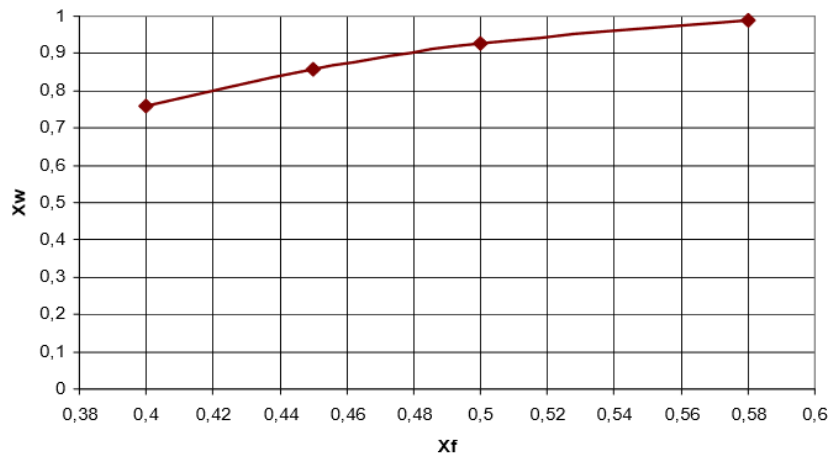


Figura 7: Variación de la concentración final de timol ( $x_w$ ) en el hervidor para diferentes concentraciones iniciales ( $x_f$ ) y relación de reflujo de 37. (2 pasos – 1 mmHg)  
Fuente: elaboración propia.

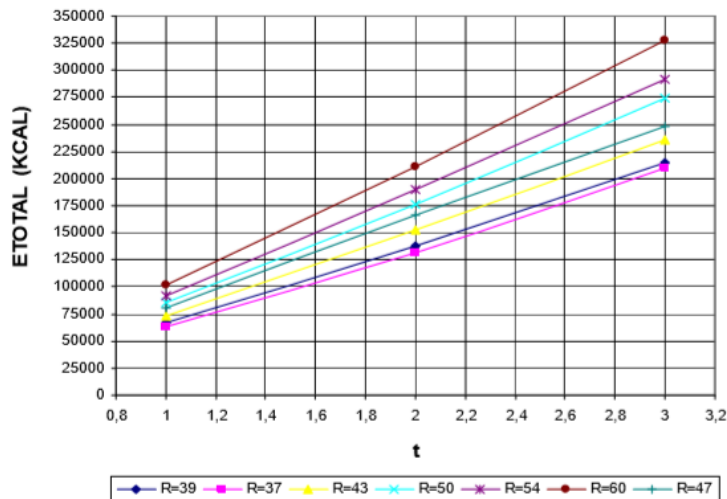


Figura 8: Variación de la cantidad de energía (ETOTAL (KCAL)) requerida según distintas relaciones de reflujo para distintos tiempos (t) de destilación. (1mmHg)  
Fuente: elaboración propia.

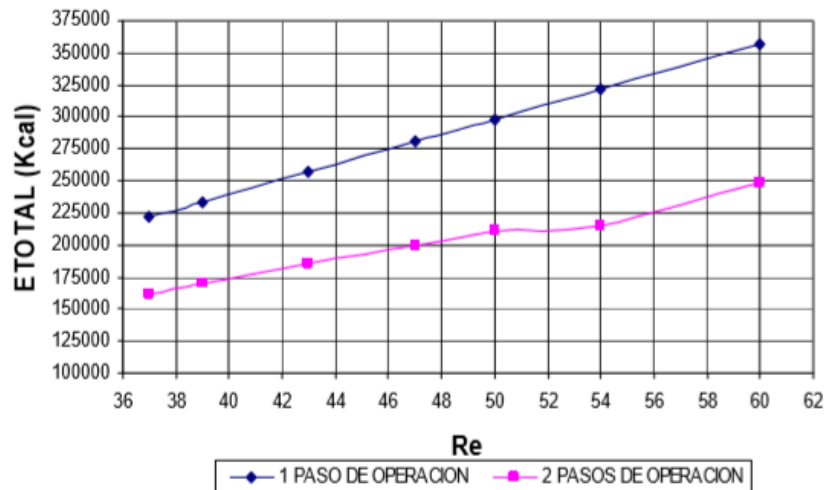


Figura 9: Variación de la cantidad de energía total requerida según distintas relaciones de reflujo para destilación en 1 y 2 pasos. (1 mmHg)  
Fuente: elaboración propia.

### 3.3.2 Discusión de resultados

Los resultados para un paso indican que el aumento de la presión en el hervidor no arroja cambios significativos en la concentración ni la cantidad de timol para una misma relación de reflujo. Tampoco es apreciable el aumento de energía total requerida en esas condiciones. Sin embargo, el aumento de la presión implica un aumento de la temperatura en el fondo de la columna, favoreciendo la degradación química e incrustaciones. Es deseable, entonces trabajar a la menor presión posible, aunque también aumentan los costos del equipo. Además, el aumento en el tiempo de destilación disminuye la cantidad de timol obtenida, aunque no de manera significativa, y aumenta su concentración en el hervidor. La relación de reflujo no tiene influencia en la cantidad de timol obtenida y de acuerdo con la Figura 6, se puede apreciar que a mayor concentración de timol inicial, se obtiene mayor cantidad de timol final en el hervidor, para un mismo tiempo de destilación.

En la Figura 7, se observa que un aumento en la concentración inicial de timol produce un aumento significativo en la concentración final.

A partir de esta situación y conjuntamente con el ítem anterior, se recomienda elegir una especie de orégano que posea un alto contenido de timol ya que al aumentar la concentración inicial aumenta tanto la cantidad final de timol obtenida como su concentración.

Para el caso de destilación batch en un solo paso, en la Figura 8, se observa que cuando aumenta la relación de reflujo, el gasto de energía total aumenta. Mientras que para la destilación en dos pasos, en la Figura 9, se aprecia que comparativamente con la destilación en un paso, se necesita aproximadamente un 40% menos de energía total para una misma relación de reflujo.

### **3.4 Resultados de la aplicación de la simulación como herramienta de enseñanza**

El resultado de esta metodología de trabajo en el proceso de enseñanza-aprendizaje resultó muy satisfactorio por cuanto los alumnos intervinientes lograron adquirir destrezas en el manejo práctico de equipamiento complejo de escala piloto, apoyándose en herramientas de simulación disponibles para facilitar y optimizar la realización de los procesos en estudio. Este tipo de integración y de organización consiguió una mayor motivación en los alumnos y una mayor profundidad de análisis y predisposición, lo que se pudo ver reflejado en los informes presentados y en la riqueza de sus opiniones vertidas en las distintas reuniones.

Por un lado, los estudiantes adquieren habilidades en el uso de un software muy empleado por las empresas en proyectos de ingeniería, otorgando ventajas competitivas en la búsqueda laboral a los futuros egresados. Además, lograron desarrollar una forma de razonamiento crítica para el estudio y optimización de procesos industriales, en base a los conocimientos y capacidades analíticas.

Por lo tanto, la utilización continua de un software comercial de simulación en las materias del plan de estudios, permite que los alumnos se afiancen en el manejo de esta herramienta y puedan aplicarla habitualmente en la resolución de problemas propios del ámbito profesional.

## **4. Conclusiones y recomendaciones**

En la primera etapa se llevó a cabo la parte experimental de la destilación batch con la ayuda aportada por la herramienta de simulación de procesos, que permitió asimilar los fenómenos en mayor profundidad y tomar contacto con la realidad a partir de los resultados simulados.

Se pudo realizar una recuperación del etanol hasta aproximadamente 93 °GL lo que es muy satisfactorio ya que esta concentración es la alcanzada para el alcohol etílico comercial de uso farmacéutico.

En la destilación batch de mezcla multicomponente con agregado de congéneres, dado que no sólo el etanol abandona la columna, si se desea obtener etanol y n-propanol por separado se deberá colocar una segunda columna para hacer posible la separación con mayor grado de pureza.

Como última experiencia, en la destilación batch de aceite esencial de orégano dado que la presión en el hervidor no arroja cambios significativos en la concentración ni la cantidad de timol para una misma relación de reflujo es deseable trabajar a la menor presión posible.

Por último, la aplicación de una herramienta de enseñanza como lo es la simulación de procesos es muy importante ya que le permite al estudiante una mayor asimilación de los conceptos teóricos-prácticos adquiridos durante el cursado de la carrera, desarrollando un criterio en la toma de decisiones ante diversos escenarios que pueden presentarse en la práctica profesional, teniendo en cuenta una relación de compromiso entre los requerimientos de calidad para un dado compuesto y las condiciones de operación.

## **5. Referencias**

[1] MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOT, P. (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química*.

- [2] TOSELLI, L; PRAMPARO, M; MARTINELLO, M. (2006). Elaboración de whisky mediante destilación discontinua: simulación aplicando CC-Batch. *Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Córdoba*.
- [3] ALIGIANNIS, N; KALPOUTZAKIS, E; MITAKU, S; CHINOU, I.B. (2001). Composition and antimicrobial activity of the essential oils of two *Origanum* species. *J. Agric. Food Chem.*; v. 49, p. 4168-4170
- [4] AUBERT, M; MIRO, S; TOSELLI, L; PRAMPARO, M. (2009). Simulación de un sistema continuo de destilación para la producción de neutral spirit a partir de uva fermentada. *9º Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos-CAIP2009, Uruguay*.
- [5] Chemstations. "ChemCad V6 Process Simulation Software". *User Guide, 2010*.
- [6] BIEGLER, L.T.; GROSSMANN, I.E.; WESTERBERD, A.W. (1997). *Systematic Methods of Chemical Process Design. Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering*.
- [7] SCHWEITZER HARRIOT, P.A. (1997). *Handbook of separation techniques for chemical engineers*.
- [8] LUYBEN, W.L. (1990). *Process modeling, simulation and control for chemical engineers*.
- [9] BERG, L. "Separation of ethanol for isopropanol by azeotropic distillation". US Patent 5.338.411, 1994.
- [10] KATZEN, R; MADSON, P; MOON, G. Ethanol distillation; the fundamentals. *The alcohol textbook, Nottingham University Press, United Kingdom, 1999*
- [11] KISTER, H. (1998). *Distillation operation*.
- [12] HENLEY, E. SEADER J. "Equilibrium-stage separations in chemical engineering". *Wiley & Sons, 1981*
- [13] DOUGLAS, J. (1988). *Conceptual design of chemical processes*.
- [14] KRISHNA, R; TAYLOR, R. (2003). *A nonequilibrium stage model of multicomponent separation processes*.
- [15] ROMAN, M; CATALAN, M. Modelos termodinámicos de equilibrio entre fases para la simulación de procesos de destilación vínica. *Tesis de licencia, Univ. De la Serena, 1999*.