

## ***SIMULACIÓN DE LA DESTILACIÓN POR CAMBIO DE PRESIÓN PARA OBTENER ETANOL DESHIDRATADO***

### ***SIMULATION OF THE DISTILLATION BY PRESSURE REDUCTION TO OBTAIN ANHYDROUS ETHANOL***

*Yeney Lauzurique Guerra<sup>1\*</sup>, Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas<sup>1</sup>  
y Osney Pérez Ones<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Grupo de Análisis de Procesos, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE). Ave 114 #11901 e/ Ciclovía y Rotonda, La Habana, Cuba.

Recibido: Junio 23, 2016; Revisado: Julio 14, 2016; Aceptado: Agosto 24, 2016

---

#### **RESUMEN**

En este trabajo se evaluó la destilación por cambio de presión mediante el simulador de procesos HYSYS v3.2. Al no contar con datos en la bibliografía consultada para realizar la simulación se empleó el programa “STATGRAPHICS Centurión” XVI para obtener una superficie de respuesta que permitiera definir las condiciones óptimas de operación. Se escogió para trabajar el paquete de propiedades basado en el modelo de Margules. Se obtuvo una composición molar de etanol deshidratado de 0,9917. Se analizaron los perfiles de temperatura, flujos molares de líquido y vapor y composición de la columna de deshidratación. Se determinó la influencia de los parámetros de operación en la eficiencia de la tecnología simulada analizando un caso de estudio. Según la evaluación económica de la tecnología, su implementación no es económicamente ventajosa con los precios y costos actuales principalmente debido a los elevados consumos energéticos y costos de construcción de la torre. Este resultado contribuye a la búsqueda de otras tecnologías que sean ventajosas desde el punto de vista económico.

**Palabras clave:** deshidratación, etanol deshidratado, simulación.

---

Copyright © 2016. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

---

\* Autor para la correspondencia: Yeney Lauzurique, Email: [yeney1988@gmail.com](mailto:yeney1988@gmail.com)

## **ABSTRACT**

In this work the distillation by pressure reduction was evaluated through the HYSYS v3.2 process simulator. Due to the lack of data in the consulted bibliography to perform the simulation, the STATGRAPHICS Centurion XVI software was used to obtain a response surface that would define optimal operating conditions. The property package selected to work was based on the Margules model. An anhydrous ethanol molar composition of 0.9917 was obtained. Temperature profiles were analyzed as well as liquid and vapor molar flows and dehydration column composition profiles. The influence of operating parameters on the efficiency of simulated technology was determined by analyzing one case study. According to economic evaluation, the implementation of this technology is not economically profitable; taking into account current prices and costs mostly due to high energy consumption and construction costs of the tower. This result contributes to the pursuit of other profitable technologies from the economic point of view.

**Key words:** dehydration, anhydrous ethanol, simulation.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Con el crecimiento de la población, la extensión de la producción industrial y el uso masivo de tecnologías, comenzó a crecer la preocupación por el agotamiento de las reservas de petróleo y el deterioro ambiental. Desde entonces, se impulsó el desarrollo de energías alternativas basadas en recursos naturales renovables y menos contaminantes, como la luz solar, el agua y la bioenergía proveniente de los biocombustibles.

Entre los biocombustibles más empleados a nivel mundial se tienen: el biodiesel, el biogás y el bioalcohol.

Dentro de los bioalcoholes, el etanol es el que más auge ha cobrado en los últimos años. Su mezcla con gasolina o petróleo proporciona un combustible de mejor calidad, principalmente porque es utilizado para oxigenar la gasolina. Esto permite un mayor completamiento de las reacciones de oxidación de los hidrocarburos y reduce las emisiones de monóxido de carbono (Pereiro, 2012).

Para emplear el etanol como combustible es necesario deshidratarlo, de esta manera se evitan algunos problemas, como por ejemplo, la corrosión en los motores de combustión interna.

Existen diversas tecnologías para deshidratar mezclas de compuestos orgánicos valiosos a nivel industrial. Dentro de ellas se encuentran la destilación por cambio de presión, la destilación azeotrópica, la destilación extractiva, la adsorción con tamices moleculares y la pervaporación (Ríos y Marín, 2011), (Álvarez y col., 2012), (Gil y Rodríguez, 2014). El primer esquema que históricamente se propuso para la deshidratación de etanol corresponde a la utilización de muy bajas presiones para modificar el equilibrio líquido-vapor de las soluciones acuosas de etanol desplazando el punto azeotrópico de tal manera que permitiera obtener un destilado con contenidos mínimos de agua (Quintero y col., 2007).

En este trabajo se evalúa la destilación por cambio de presión desde el punto de vista técnico y económico para determinar si es ventajosa su implementación en Cuba.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

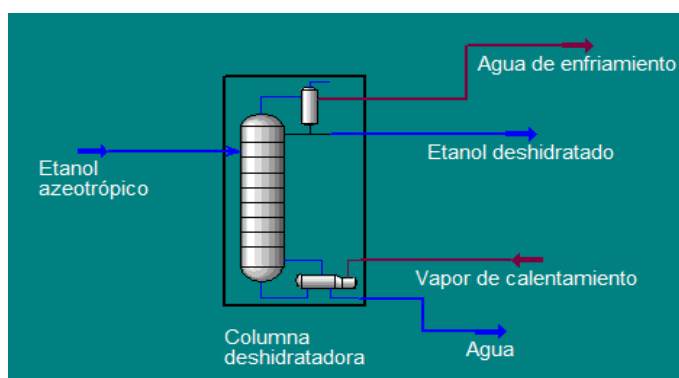
La simulación del esquema tecnológico se realizó usando el simulador de procesos HYSYS v3.2. Se emplearon mezclas de etanol-agua como fluido de trabajo.

Para seleccionar el paquete de propiedades se calculó la composición molar de etanol en la corriente de etanol deshidratado mediante el empleo de varios modelos recomendados en la bibliografía consultada. Posteriormente se verificó el porcentaje de desviación en relación a los resultados experimentales (0,9900). En la Tabla 1 se aprecia que los modelos 1, 2 y 3 presentan errores relativos mayores que 5% , sin embargo, aunque en los modelos 4 y 5 los errores relativos son menores, en ningún caso se obtiene etanol deshidratado pues el valor de la composición molar de etanol es menor que 97%. Solamente al emplear el paquete de propiedades basado en el modelo de Margules se pudo obtener etanol deshidratado y por ello fue el modelo seleccionado.

**Tabla 1.** Selección del paquete de propiedades

<i>Número</i>	<i>Modelo</i>	<i>Composición molar de etanol</i>	<i>Error relativo (%)</i>
1	NRTL	0,8825	10,86
2	Wilson	0,9237	6,69
3	Van Laar	0,9389	5,16
4	UNIFAC	0,9455	4,49
5	UNIQUAC	0,9478	4,26
6	Margules	0,9795	1,06

En la Figura 1 se muestra el esquema de simulación. El etanol proveniente de la columna rectificadora ingresa a uno de los platos de la columna deshidratadora. Esta columna debe operar en condiciones de muy baja presión, para deshidratar el etanol.



**Figura 1.** Esquema de simulación de la tecnología de destilación por cambio de presión

En la Tabla 2 se muestran los datos correspondientes a la corriente de etanol azeotrópico. Es importante señalar que se adoptaron estos valores para realizar la comparación técnica y económica de esta tecnología con otras tecnologías simuladas anteriormente por los autores.

**Tabla 2.** Datos de la corriente de etanol azeotrópico

<i>Parámetros</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
Flujo molar de etanol azeotrópico	kmol/h	244,64
Fracción molar de etanol en el etanol azeotrópico	-	0,8850
Fracción molar de agua en el etanol azeotrópico	-	0,1150
Fracción de vapor de etanol azeotrópico	-	0,0000
Presión del etanol azeotrópico	kPa	101,3

En la bibliografía consultada no se reportaron datos que permitieran llevar a cabo la simulación de la tecnología; por ende, se decidió realizar la simulación teniendo en cuenta las características del proceso. Según (Montoya y Quintero, 2005) para obtener un producto de alta pureza es necesario utilizar columnas de deshidratación con un gran número de etapas (por encima de 40) y con altas relaciones de reflujo; además para poder desplazar el azeótropo es obligatorio trabajar a presiones inferiores a 6 kPa.

En busca de las condiciones óptimas de operación se analizaron las variables que más influían sobre la composición molar de etanol en la corriente de etanol deshidratado. Estas variables son: presión de trabajo en la columna deshidratadora, número de platos, razón de reflujo y plato de alimentación del etanol azeotrópico. Es importante destacar que el flujo molar de etanol deshidratado se mantuvo constante (210 kmol/h); por esta razón no se consideró en el análisis.

Una vez que se definieron las variables se empleó el programa “STATGRAPHICS Centurión” XVI para ajustar un modelo por regresión múltiple que describa la relación entre la composición molar de etanol y las cuatro variables independientes.

Al verificar el cumplimiento de los requisitos del ajuste por mínimos cuadrados, se analizaron las variables significativas estadísticamente.

En función de obtener una superficie de respuesta que permitiera definir las condiciones óptimas de operación se procesaron los datos por un diseño factorial D-óptimo a partir de una lista candidata procedente de un diseño factorial completo multinivel de dos variables (razón de reflujo y plato de alimentación) con seis niveles, es decir 36 corridas totales. La fracción del diseño contó con 11 corridas.

### **2.1 Caso de estudio**

Con el objetivo de analizar la influencia que tiene la variación del flujo molar de la corriente de etanol azeotrópico sobre los parámetros característicos del proceso se realizó el estudio de un caso. El intervalo de flujo analizado representa el intervalo con mayor frecuencia de trabajo.

Caso: Efecto de la variación del flujo molar de la corriente de etanol azeotrópico desde 210 hasta 310 kmol/h sobre el flujo molar y la composición molar de etanol en la corriente de etanol deshidratado, el consumo de vapor de calentamiento en el rehervidor y el consumo de agua de enfriamiento en el condensador de la columna.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los datos empleados para ajustar el modelo estadísticamente se obtuvieron de casos de estudios realizados previamente mediante el simulador HYSYS v3.2.

Al analizar la significación estadística de los coeficientes del modelo lineal ajustado que describe la relación entre la composición molar de etanol y las cuatro variables independientes, se observó que la presión de trabajo y el número de platos en la columna deshidratadora no son variables estadísticamente significativas, en el intervalo de trabajo estudiado, con un nivel de confianza del 95%, esto se debe a que ambas variables presentan el valor-P mayor que 0,05; por tanto se decidió eliminar los dos términos del modelo.

Al eliminar las variables que no son estadísticamente significativas se obtuvo un nuevo modelo. En este caso el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0029, que corresponde a la variable Plato de alimentación, dado que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95%.

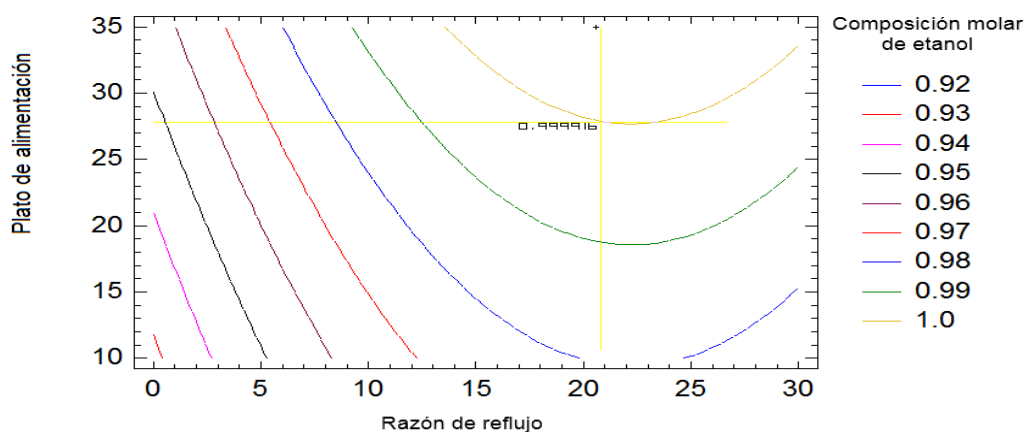
En la Tabla 3 se muestra el análisis de varianza para la composición molar de etanol en el experimento diseñado, considerando la posibilidad de interacciones entre las variables. En este caso, tres efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 3.** Análisis de varianza para la composición molar de etanol

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Razón de reflujo	0,0005	1	0,0005	24,43	0,0026
B: Plato de alimentación	0,0002	1	0,0002	13,02	0,0113
AA	0,0002	1	0,0002	12,58	0,0121
Error total	0,0001	6	0,0000	-	-
Total (corr.)	0,0011	9	-	-	-

Considerando la posibilidad de interacciones entre las variables se ajustó un modelo que explica el 87,76% de la variabilidad de la composición molar de etanol. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0047; además el parámetro Durbin-Watson que examina los residuos, indica que no existe una correlación serial en los residuos ya que el valor-P (0,6467) es mayor que 0,05.

En la Figura 2 se observa el gráfico de contorno que permite seleccionar la mejor condición de trabajo para las variables razón de reflujo y plato de alimentación con respecto a la composición molar de etanol. Puede apreciarse que el valor óptimo es 0,9999; para obtener esta composición es necesario trabajar con una razón de reflujo de 21 y alimentar el etanol azeotrópico por el plato 28.

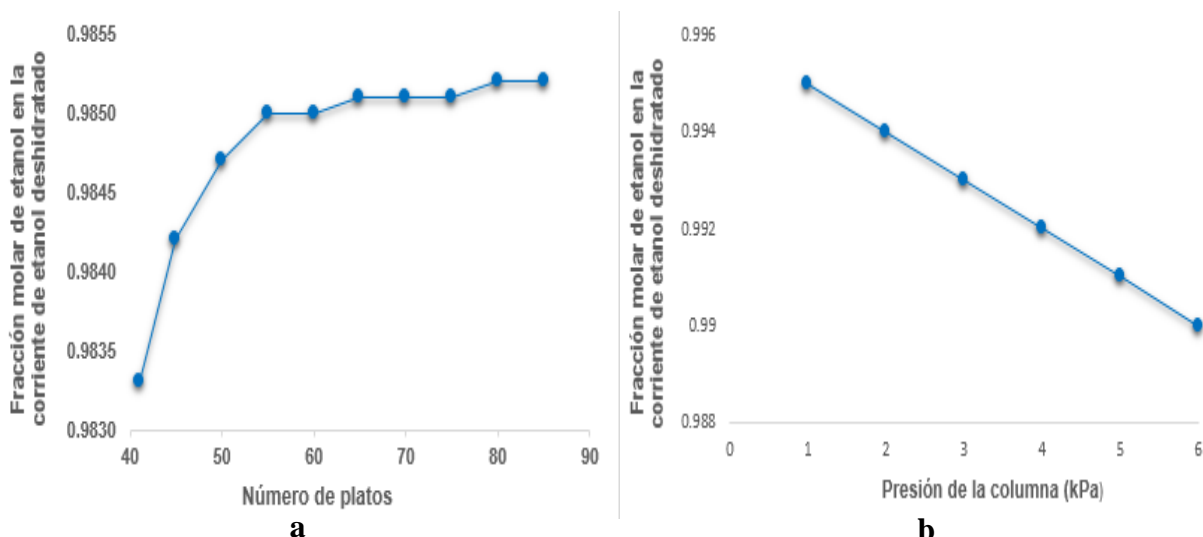


**Figura 2.** Contorno de la superficie de respuesta estimada

Como la presión de la columna y el número de platos no son parámetros significativos estadísticamente, se seleccionaron los valores teniendo en cuenta las características del proceso y la influencia de estos en la composición molar de etanol en la corriente de etanol deshidratado.

Primeramente se fijó la cantidad de platos; como se aprecia en la Figura 3 (a) al aumentar el número de platos se produce un ligero incremento de la composición molar de etanol deshidratado, que no resulta significativo; es por ello que en aras de lograr mayores beneficios económicos se decidió trabajar con 41 platos.

En la Figura 3 (b) se puede observar que al variar la presión de 1 kPa a 6 la diferencia en la composición molar de etanol deshidratado tampoco es significativa, por lo que se decidió trabajar a 5 kPa partiendo de la idea de que para lograr el desplazamiento del azeótropo es necesario trabajar por debajo de 6 kPa y que cuanto más baja sea la presión se incurre en mayores gastos económicos debido a las condiciones requeridas para mantener el vacío.



**Figura 3.** Comportamiento de la fracción molar de etanol en la corriente de etanol deshidratado cuando: a) varía el número de platos y b) varía la presión de la columna

En la Tabla 4 se muestran los datos en la columna de deshidratación que se incorporaron al simulador para llevar a cabo la simulación de la destilación por cambio

de presión. En la Tabla 5 se puede observar los principales resultados obtenidos en la simulación.

**Tabla 4.** Datos en la columna de deshidratación

<i>Parámetro</i>	
Presión en la columna deshidratadora (kPa)	5
Número de platos	41
Razón de reflujo	21
Plato de alimentación	28

**Tabla 5.** Resultados de las principales corrientes

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Etanol deshidratado</i>	<i>Fondo</i>
Fracción de vapor	-	0,0000	0,0000
Temperatura	°C	17,66	20,56
Presión	kPa	5,00	5,00
Flujo molar	kmol/h	210	34,69
Fracción molar (etanol)	-	0,9917	0,2391
Fracción molar (agua)	-	0,0083	0,7609

Al estudiar el perfil de temperatura de la columna deshidratadora se observó un incremento de este parámetro desde 17,66°C hasta 22,56°C. Para el análisis se tuvo en cuenta que la columna cuenta con 41 platos más el condensador y el rehervidor. De igual manera se pudo apreciar al analizar el perfil de flujos molares de líquido y vapor en la columna deshidratadora, un aumento de líquido en el plato 28, debido a que es el plato de alimentación a la columna, por otro lado, al trabajar con un condensador total, se evidenció que por el tope de la columna no emerge vapor, solo líquido.

Con respecto al perfil de composición en la columna deshidratadora se pudo observar que a la salida del rehervidor hay una corriente con alto contenido de agua, mientras que, a la salida del condensador existe una corriente con alto contenido de etanol.

En la Figura 4 se aprecia que al aumentar el flujo molar de la corriente de etanol azeotrópico en aproximadamente un 48%, el consumo de agua de enfriamiento y vapor de calentamiento en el condensador y rehervidor respectivamente, se mantienen prácticamente constantes al igual que el flujo molar de etanol deshidratado que alcanza valores entre 209,9 y 210 kmol/h. Sin embargo, la composición molar de etanol en la corriente de etanol deshidratado aumenta en un 12,12%. Por ende, es conveniente trabajar a valores superiores a 210 kmol/h de etanol azeotrópico, ya que se obtiene un producto de mayor pureza.

State	State 1	State 2	State 3	State 4	State 5
Etanol Azeotrópico - Molar Flow [kgmole/h]	210.000	235.000	260.000	285.000	310.000
Agua de enfriamiento - Heat Flow [kJ/h]	2.025e+008	2.023e+008	2.023e+008	2.023e+008	2.023e+008
Vapor de calentamiento - Heat Flow [kJ/h]	2.008e+008	2.002e+008	1.998e+008	1.999e+008	1.993e+008
Comp Mole Frac (Ethanol)	0.8850	0.9903	0.9919	0.9921	0.9923
Etanol deshidratado - Molar Flow [kgmole/h]	209.998	210.002	210.008	209.983	209.986

**Figura 4.** Tabla de resultado del caso de estudio (Obtenida con el HYSYS)

Otro de los parámetros calculados a partir de los resultados obtenidos en la simulación con HYSYS, fue el consumo de facilidades auxiliares. Para ello se utilizó la herramienta de trabajo Microsoft Excel.

En la Tabla 6 se muestran los consumos energéticos calculados a partir de los resultados obtenidos en la simulación; estos valores se deben fundamentalmente a las altas relaciones de reflujo que se necesitan para poder llevar a cabo la deshidratación del etanol.

**Tabla 6.** Consumos calculados a partir de los resultados obtenidos en la simulación

<i>Facilidades auxiliares</i>	<i>Unidad</i>	<i>Destilación por cambio de presión</i>
Agua de enfriamiento consumida	kg/h	1 933 110
Fuel oil consumido	kg/h	5 680
Electricidad consumida	kWh	156

En la determinación de los ingresos y egresos, se utilizaron los precios y costos de la organización empresarial AZCUBA planificados para el año 2015.

En la Tabla 7 se muestra un resumen de los cálculos económicos realizados y los resultados obtenidos en la evaluación económica de la tecnología estudiada, tomando como premisa que una planta de deshidratación de etanol trabaja 270 días de producción al año y 24 horas de operación al día, con una razón fraccional de impuestos de 0,35, una tasa de interés de 12 % y un tiempo de vida económica de los equipos de 10 años.

**Tabla 7.** Cálculos económicos

<i>Componentes</i>	<i>Destilación por cambio de presión</i>
Ingresos totales (\$/año)	62 724 184
Egresos totales (\$/año)	90 890 267
Ganancia económica (\$/año)	-28 166 083
Ganancia neta (\$/año)	-17 952 874

Como se aprecia no es ventajosa la implementación de esta tecnología con los precios y costos actuales, este resultado está asociado directamente con las dimensiones de la columna (altura y diámetro) y el número de platos y coincide con lo expresado por (Quintero y col., 2007).

#### **4. CONCLUSIONES**

1. Se empleó el programa “STATGRAPHICS Centurión” XVI para obtener una superficie de respuesta que permitiera definir las condiciones óptimas de operación para llevar a cabo la simulación de la tecnología. Estas corresponden a una columna de 41 platos, operando a 5 kPa, con una razón de reflujo de 21 y la alimentación del etanol azeotrópico por el plato 28. Con ello se logra una composición molar de etanol deshidratado de 0,9999.
2. El análisis económico arrojó egresos del orden de 90 890 267 \$/año e ingresos de 62 724 184 \$/año. Por consiguiente, la implementación de la destilación por cambio de presión con los indicadores actuales utilizados en la industria



azucarera no es atractiva, ya que presenta consumos energéticos y costos de capital elevados, asociados principalmente a la alta razón de reflujo y gran altura de la columna.

## **REFERENCIAS**

- Álvarez, R., Martínez, A., Arteaga, L., Simulación del proceso de deshidratación de etanol utilizando el software ASPEN-HYSYS v3.2., Centro Azúcar, Vol. 39, No. 2, Abril- Junio, 2012, pp. 31-40.
- Gil, I.D. and Rodríguez, G., Simulation of ethanol extractive distillation with mixed glycols as separating agent., Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 31, No. 1, January- March, 2014, pp. 259-270.
- Montoya, M., Quintero, J., Esquema tecnológico integral de la producción de bioetanol carburante., Trabajo de grado en la modalidad participación en proyecto de investigación., Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2005.
- Pereiro, A., Ionic liquids in separations of azeotropic systems., Journal of Chemical Thermodynamics, Vol. 46, 2012, pp. 2-28.
- Quintero, J., Montoya, M., Cardona, C., Sánchez, O., Evaluación de la deshidratación de alcohol carburante mediante simulación de procesos., Revista Facultad de Ciencia Agropecuarias, Vol. 5, No. 2, 2007, pp. 73-83.
- Ríos, L. y Marín, J., Equilibrio de fases para sistemas etanol - agua en presencia de polialcoholes y sales., Revista Dyna, Vol. 78, No. 165, Feb., 2011, pp.151-159.