

# CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA UN AGENTE MATERIAL DE SEPARACIÓN EN UN PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE ETANOL POR DESTILACIÓN EXTRACTIVA

## SELECTION CRITERIA FOR A SEPARATION MATERIAL AGENT IN AN ETHANOL DEHYDRATION PROCESS BY EXTRACTIVE DISTILLATION

Derly Lorena López Navarro\*

Recibido: 2 de marzo de 2018

Aceptado: 31 de octubre de 2018

### Resumen

Los procesos de separación no convencionales son implementados en las industrias para la comercialización de ciertos productos. Durante los últimos años ha aumentado el interés sobre fuentes combustibles renovables, debido a las preocupaciones ambientales con respecto a la emisión de gases contaminantes generados en la quema de combustibles fósiles. Actualmente, la deshidratación de etanol con fines carburantes es uno de los procesos más utilizados industrialmente, puesto que el etanol es un compuesto con bastante demanda en el mercado por sus propiedades fisicoquímicas y porque es un compuesto proveniente de materia prima biológica renovable que promete una sostenibilidad ambiental y económica. La destilación extractiva con solvente es usada comercialmente para la producción de etanol anhidro, que parte de una mezcla azeotrópica etanol-agua, en la que el solvente hace que la separación de la mezcla azeotrópica se pueda llevar a cabo en una columna de destilación. Por ello se debe tener en cuenta ciertos criterios de selección para elegir el agente material de separación adecuado para la mezcla que se quiere separar, que en este caso es la mezcla etanol-agua. Este artículo presenta los criterios que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar un agente material de separación o *entrainer* para una mezcla especificada; igualmente, aquí se presenta por medio de una matriz de selección, en la que se tendrán en cuenta algunos de los criterios para la selección de un posible agente material de separación para la mezcla etanol-agua.

**Palabras clave:** agente material de separación, criterios de selección, destilación extractiva, etanol anhidro.

### Abstract

The unconventional separation processes are implemented in the industries for the commercialization of certain products. During the last years, interest in renewable fuel sources has increased, due to environmental concerns regarding the emission of polluting gases generated in the burning of fossil fuels. Currently, the dehydration of ethanol for fuel purposes is one of the most industrially used processes, since ethanol is a compound with a lot of demand in the market due to its physicochemical properties and because it is a compound from renewable biological raw material, promising sustainability

---

\* Estudiante de Ingeniería Química. Semillero de investigación en Procesos de Separación no Convencionales (GPS), línea de investigación Procesos de Separación sin Reacción, Fundación Universidad de América, Bogotá D. C., Colombia. derly.lopez@estudiantes.uamerica.edu.co

environmental and economic. The extractive distillation with solvent is commercially used for the production of anhydrous ethanol; starting from an ethanol-water azeotropic mixture, in which the solvent causes the separation of the azeotropic mixture to be carried out in a distillation column. For this reason, certain selection criteria must be taken into account in order to choose the suitable separation material for the mixture to be separated, which in this case is the ethanol-water mixture. This article presents the criteria that must be taken into account when selecting a separation material agent or entrainer for a specified mixture; it is also presented here by means of a selection matrix, in which some of the selection criteria will be taken into account, a possible material separating agent for the ethanol-water mixture.

**Keywords:** Separating material agent, selection criteria, extractive distillation, anhydrous ethanol.

## INTRODUCCIÓN

La separación de líquidos y gases en sus componentes constitutivos es una de las principales operaciones unitarias en la industria química, alimentaria y farmacéutica. Existen varios métodos de separación por destilación, como la destilación simple, parcial, instantánea, rectificación, destilación azeotrópica y extractiva. La destilación extractiva es uno de los procesos más importantes, ya que combina dos procesos al mismo tiempo, la destilación y la extracción (Hilal, Yousef y Langston, 2002).

Para el diseño de un proceso de destilación extractiva se necesita tener en cuenta varios aspectos significativos, como elección de un agente material de separación, desarrollo o determinación de datos necesarios para el proceso (condición azeotrópica o curvas de residuo), simulación por ordenador, pruebas a pequeña escala, etc. (Yee, Eng y Manan, 2000). La presencia del agente material de separación o entrainer a una concentración relativamente alta altera la volatilidad de uno de los componentes más que el otro, por lo que la separación de los componentes de la mezcla azeotrópica se puede realizar en la columna de destilación. Para el caso de la mezcla etanol-agua, el entrainer puede aumentar la volatilidad del etanol más que la del agua, por lo que se obtiene etanol como producto de destilado en la columna; pero si, por el contrario, se aumenta la volatilidad del agua más que la del etanol, el agua se obtendría como producto de destilado en la columna de destilación (Kumar, Singh y Parasad, 2010).

Por lo general el agente material de separación es alimentado en la parte superior de la columna de destilación, encima de la corriente de alimentación de la mezcla azeotrópica, por lo que permanece en la fase líquida y garantiza el contacto con los componentes clave a lo largo de la columna. El agente material de separación se retira como producto de fondos, junto con uno de los componentes que se quiere separar, y se envía a una segunda columna recuperadora operada bajo vacío.

Para la selección del agente material de separación se tienen en cuenta varios criterios relevantes de selección, como solubilidad, toxicidad y costos; igualmente, se implementa una matriz de selección, la cual se realiza de manera cualitativa y cuantitativa, de tal manera que se pueda obtener un posible agente material de separación que cumpla con los criterios de selección para la mezcla que se va a trabajar, que en este caso es etanol y agua.

## METODOLOGÍA

Varios solventes modifican la forma de la curva del equilibrio líquido-vapor y eliminan el azeótropo; entre estos solventes se encuentran algunos glicoles, aminas, fenoles hidrofóbicos, parafinas y tiofenos (Uyazán, 2004). Un agente material de separación para un proceso de destilación extractiva debe tener

algunas o todas las características que se describen a continuación (Treybal, 1988):

- Alta selectividad o habilidad para alterar el equilibrio líquido-vapor de la mezcla original que permita su fácil separación, pero que utilice pequeñas cantidades del disolvente.
- Elevada capacidad para disolver los componentes de la mezcla que van a separarse. Con frecuencia sucede que las sustancias que son completamente inmiscibles con la mezcla son muy selectivas; sin embargo, si no se pueden lograr concentraciones suficientemente elevadas del disolvente en la fase líquida, la capacidad para la separación no puede desarrollarse completamente.
- Baja volatilidad para prevenir la evaporación del *entrainer* con el producto principal, lo que mantiene la concentración elevada en la fase líquida. Son especialmente útiles las sales no volátiles.
- Separabilidad, es decir, el *entrainer* debe poder separarse con facilidad de la mezcla a la cual se adicionó, en particular, no debe formar azeótropos con las sustancias originales.

### Parámetros de elección de un agente material de separación

La selección del agente de arrastre se puede basar en su capacidad de modificar la volatilidad relativa del sistema. Sin embargo, la decisión final debe basarse en una evaluación económica de todas las variables y criterios involucrados, considerados junto con la selectividad del agente de arrastre, con el fin de determinar las condiciones que reduzcan al mínimo los costes de inversión de capital y de operación (Gómez y Gil, 2009).

Con el propósito de seleccionar un agente de arrastre, es necesario conectar diferentes elementos, tales como bases de datos, heurísticas y rutinas numéricas. Gómez y Gil (2009) recomiendan seguir los siguientes pasos:

- *Selección de clases.* Los componentes de la alimentación podrían ser clasificados por su polaridad y formación de enlaces de hidrógeno.
- *Selección de grupos químicos similares.* El *entrainer* podría crear diferencias de polaridad entre los componentes de la alimentación. En este caso los parámetros de solubilidad pueden ser usados. En la destilación extractiva el agente de arrastre debe maximizar una solubilidad de los componentes y minimizar la solubilidad de los otros componentes de la mezcla.
- *Propuesta útil de agentes de arrastre.* Una primera selección de los posibles agentes materiales de separación está controlada por diferentes factores, como, por ejemplo, límites superior e inferior del punto de ebullición, miscibilidad con los otros componentes de la mezcla, azeotropía entre el agente de arrastre y las otras sustancias, reacciones, etc. En este paso la herramienta más importante puede ser la heurística, aproximaciones empíricas, métodos numéricos, métodos de contribución de grupos y bases de datos.
- *Adecuada clasificación de entrainer.* Los beneficios de los agentes de arrastre se clasifican de acuerdo con las siguientes características:
  - Selectividad de *entrainer*
  - Cambio de volatilidad relativa
  - Miscibilidad
  - Productos de destilado y residuo
  - Formación de azeótropos con la alimentación azeotrópica

La estimación de equilibrio de fases binario y ternario utilizando métodos de contribución de grupos o modelos de coeficiente de actividad se puede usar para ver las diferencias entre los agentes

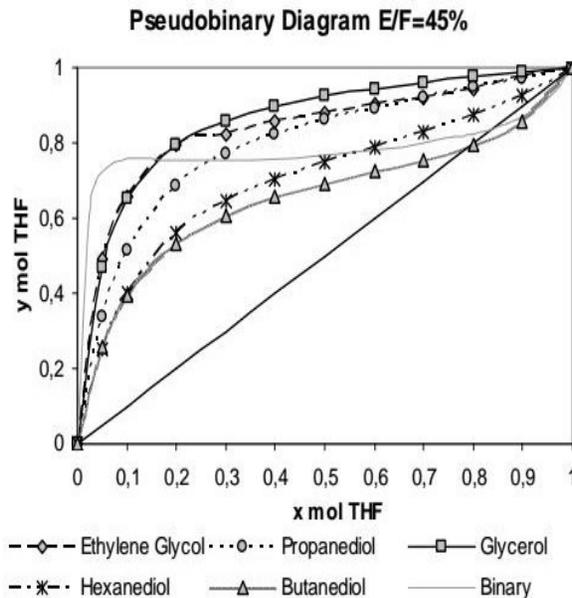
de arrastre. Los diagramas ternarios y mapas de curva de residuo, así como diagramas binarios y pseudobinarios, son útiles para decidir qué agente de arrastre es la mejor para el proceso.

### Curvas de residuo

Una curva de residuo es un gráfico de la composición del residuo líquido en equilibrio de lotes de una sola etapa inmóvil con el tiempo y a una presión dada. En un proceso Bath, los componentes más volátiles se van evaporando y la concentración de los menos volátiles se incrementa con el tiempo; igualmente, la temperatura incrementará con el tiempo. Las curvas de residuo representan este factor con una flecha en la dirección de incremento de temperatura; además de esto, las curvas de residuo nunca se cruzan (Turton, Whiting y Shaeiwitzl, 2008). Las curvas residuales son una de las herramientas más sencillas para comprobar si un agente material de separación es adecuado o no, ya que debe haber por lo menos una curva de residuo que conecte las dos sustancias puras a separar.

### Diagramas pseudobinarios

Los diagramas pseudobinarios son obtenidos a partir del equilibrio teniendo en cuenta la fracción molar fija del *entrainer*, que es representativa del perfil interno en la columna de destilación extractiva, donde la composición molar es aproximadamente constante en todas las etapas. Estos diagramas son una herramienta útil que representan cómo la volatilidad relativa se ve afectada por el uso de un agente material de separación (Gómez y Gil, 2009). Los cambios de las volatilidades relativas dependen en gran medida de la relación solvente/alimentación.



**Figura 1.** Diagrama pseudobinario a 45 % de relación S/F.

*Fuente:* Gómez y Gil (2009).

La figura 1 es un ejemplo tomado del trabajo de Gómez y Gil (2009), en el que se observa el comportamiento de las volatilidades relativas cuando se implementan diferentes agentes materiales de separación para el sistema THF-agua.

## Otros aspectos

El costo del *entrainer* es un factor importante a evaluar, ya que es determinante en la viabilidad económica del proceso. Otro factor que también se debe tener en cuenta como criterio de selección, al igual que los factores de seguridad industrial, es el carácter corrosivo o tóxico del *entrainer* (como en el caso del etilenglicol). Cabe mencionar que todos los agentes materiales de separación mostrados en la tabla 1 tienen un punto de ebullición alto; por lo tanto, su concentración en la fase de vapor es baja (Gómez y Gil, 2009).

**Tabla 1.** Preselección de los agentes materiales de separación, matriz de preselección cualitativa

Entrainer	Toxicidad	Punto de ebullición (°C)	Azeótropo	Solubilidad	Corrosivo
Benceno	Sí, cancerígeno	80.1	Sí	Solventes no polares	No
<b>Glicerol</b>	<b>Manejo estándar</b>	<b>287.71</b>	<b>No</b>	<b>Agua y alcohol</b>	<b>No</b>
<b>Etilenglicol</b>	<b>Sí</b>	<b>197.09</b>	<b>No</b>	<b>Disolventes polares</b>	<b>No</b>
Fenol	Sí (organismos acuáticos)	181.93	Sí (agua)	Moderada en agua, grande en sustancias alcalinas	Sí
<b>1.3-propanodiol</b>	<b>No</b>	<b>213-215</b>	<b>No</b>	<b>Soluble en agua y etanol</b>	<b>---</b>
1.6 Hexanodiol	Baja	253-260	No	Sí	No
<b>1.4 Butanodiol</b>	<b>No</b>	<b>230</b>	<b>No</b>	<b>Sí</b>	<b>No</b>
Dietilenglicol	Toxicidad aguda	245	No	Miscible en agua	No
Trietilenglicol	Sí (organismos acuáticos)	285	No	Miscible en agua y alcohol	No
Butildiglicol	Toxicidad aguda	230	No	Miscible en agua y etanol	No

Fuente: Merck Millipore (s. f.).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Preselección del agente material de separación

Según la tabla 1, hay cuatro posibles agentes materiales de separación (subrayados de color rojo) para el azeótropo binario etanol-agua; igualmente, en la tabla se analizan algunos aspectos relevantes mencionados en esta sección de manera cualitativa. Los cuatro posibles agentes materiales de separación que se preseleccionaron en la matriz mostrada (ver tabla 1) son etilenglicol, glicerol, 1.3- propanodiol y 1.4-butanodiol. La matriz de preselección que se evidencia en la tabla 1 también se realizó de manera cuantitativa, basándonos en la matriz de análisis Pugh, de tal manera que se pueda justificar y/o rectificar la preselección de los posibles agentes materiales de separación para la separación del azeótropo binario (ver tabla 2).

**Tabla 2.** Selección del agente material de separación, matriz de selección cuantitativa

Entrainer	Toxicidad	Azeótropo	Solubilidad	Corrosivo	Punto de Ebullición	Total
Benceno	-1	-1	-1	0	-2	-23
Glicerol	+1	0	0	0	+2	14
Etilenglicol	0	0	0	0	0	0
Fenol	0	-1	-1	-1	-1	-18
1,3 propanodiol	+2	0	0	--	+1	13
1.6 Hexanodiol	+1	0	-1	0	+2	10
1.4 Butanediol	+2	0	-1	0	+1	9
Dietilenglicol	-1	0	0	0	+1	1
Trietilenglicol	0	0	-1	0	+2	6
Butildiglicol	-1	0	-1	0	+1	-3

Fuente: Pugh (1991).

En la tabla 2 se buscó que el valor ponderado de la matriz fuera alto y que se cuente con los datos del solvente para poder realizar análisis posteriores. La línea base de comparación será el etilenglicol como agente material de separación, debido a que es el solvente más estudiado en los procesos de destilación extractiva. Por otro lado, la alternativa actual se evalúa con respecto a la línea de base como mejor (+1), igual (0) o peor (-1).

También es posible utilizar escalas de clasificación más finas; por ejemplo, usar 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3 para crear una escala de siete puntos (Pugh, 1991). A las características evaluadas para cada posible *entrainer* se les otorgaron un peso según su importancia, teniendo como criterios los referentes teóricos más mencionados. De esta manera se estableció una escala de calificación, tal como se observa en la tabla 3.

**Tabla 3.** Rango de calificación para las características de selección del agente Material de separación

Peso	Toxicidad (4)	Azeótrop (5)	Solubilidad (4)	Corrosividad (4)	Punto Eb(5)
-2	---	---	No soluble	---	<100
-1	Toxicidad aguda	Forma	Moderada Solubilidad	Corrosivo	100-197
0	Tóxico	No forma	Soluble	No corrosivo	197.3
+1	Baja toxicidad	---	Soluble	---	198-253
+2	No tóxico	---	---	---	>253

Teniendo en cuenta la matriz de preselección de la tabla 1 y 2, se consideran cuatro posibles agentes materiales de separación, de los cuales se seleccionaron tres para realizar los demás análisis que se llevan a cabo a lo largo de este documento.

Uno de los criterios relevantes a la hora de seleccionar un agente material de separación es que este modifique el equilibrio alterando las volatilidades relativas de la mezcla original para que se lleve a cabo la separación. Esta característica puede ser calculada para cada posible agente material de separación, que es la manera en que se lleva a cabo la selección.

La relación de división (SR), fracción fraccionada (SF), recuperación o pureza que se puede lograr para el componente clave depende de una serie de factores. Para el caso más simple de una sola etapa de separación, estos factores incluyen: 1) las cantidades molares relativas de las dos fases que salen por el separador y 2) las propiedades termodinámicas, el transporte de masa y otras propiedades. Para

los separadores de multietapa, los factores adicionales son el número de etapas y sus configuraciones. Las relaciones que involucran estos factores son únicas para cada tipo de separador (Seader, Henley y Roper, 2010).

Una medida del grado relativo de separación entre dos componentes clave,  $i$  y  $j$ , es el factor de potencia o de separación,  $SP$ , definido en términos de las divisiones de componentes medidas por las composiciones de los productos (1) y (2) (Seader et ál., 2010).

$$SP_{ij} = \frac{C_i^{(1)}/C_i^{(2)}}{C_j^{(1)}/C_j^{(2)}} \quad (1)$$

Donde  $C$  es una medida de composición.  $SP$  se convierte fácilmente en las siguientes formas, en términos de fracciones fraccionadas o relaciones divididas.

$$SP_{ij} = \frac{SR_i}{SR_j} \quad (2)$$

$$SP_{ij} = \frac{SF_i/SF_j}{(1-SF_i)/(1-SF_j)} \quad (3)$$

Los valores alcanzables de  $SP$  dependen del número de etapas y de las propiedades de los componentes  $i$  y  $j$ . En general, los componentes  $i$  y  $j$  y los productos 1 y 2 son seleccionados de manera que si  $SP_{ij} > 1.0$ ,  $i$  se concentrará más en el producto 1 que en  $j$ , y si  $SP_{ij} < 1.0$ ,  $j$  se concentrará más en el producto 1 que en  $i$ . Entonces, un valor grande corresponde a un grado relativamente alto del factor de separación o separación, y un valor pequeño cercano a 1 corresponde a un bajo grado del factor de separación (Seader et ál., 2010).

Si el factor de separación entre dos especies en las dos fases es muy grande, un solo plato puede ser suficiente para llevar a cabo la separación entre ellos; en el caso contrario, múltiples etapas son requeridas. Por ejemplo, si una fase de vapor es llevada a un equilibrio con la fase líquida, el factor de separación es la volatilidad relativa de la volatilidad de un componente (componente clave ligero), con respecto al componente menos volátil (componente clave pesado). Si el factor de separación es 10 000, una separación cercana a la perfección es llevada a cabo en un solo plato de equilibrio. Si el factor de separación es únicamente 1.10, la separación requerirá de cientos de platos de equilibrio (Seader et ál., 2010).

Para los cálculos de etapa de equilibrio, los factores de separación se definen formando relaciones de relaciones de equilibrio. Para el caso de líquido vapor, la volatilidad relativa entre los componentes  $i$  y  $j$  viene dada por:

$$\alpha_{ij} = \frac{K_i}{K_j} \quad (4)$$

**Tabla 4.** Factor de separabilidad para la mezcla binaria y la mezcla binaria con solventes

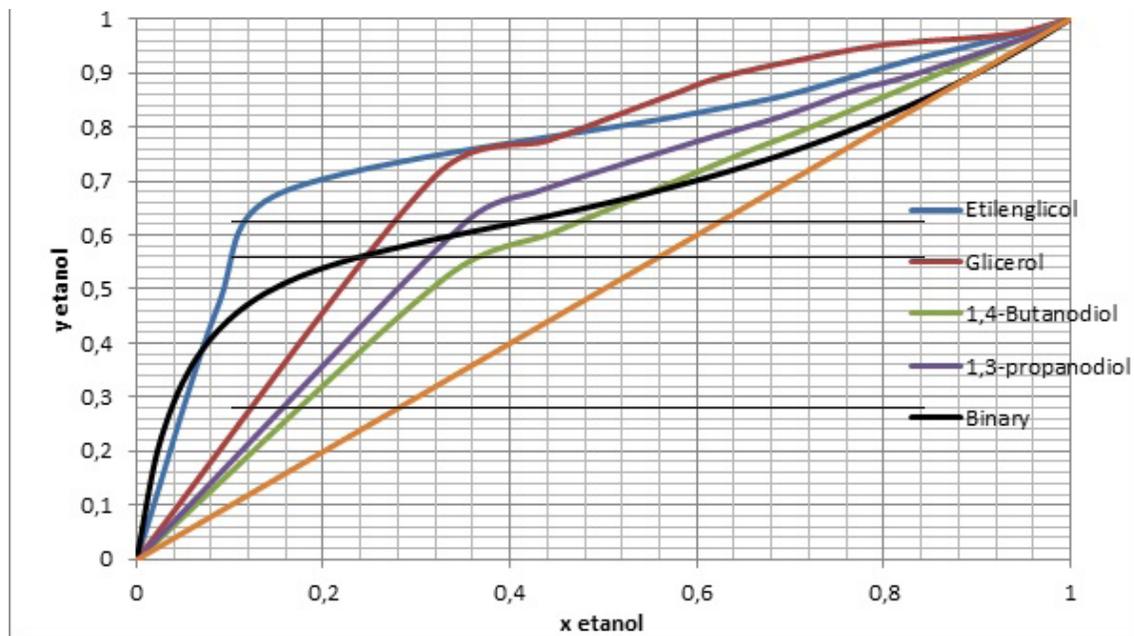
Mezcla azetrópica y mezcla azeotrópica con solvente	Volatilidad relativa
Etanol-agua	$\alpha_{ij} = 1.057$
Etanol-agua-etilenglicol	$\alpha_{ij} = 2.6393$
Etanol-agua-glicerol	$\alpha_{ij} = 2.6203$
Etanol-agua-1.3-propanodiol	$\alpha_{ij} = 1.43$
Etanol-agua-1.4-butanodiol	$\alpha_{ij} = 0.7421$

Nota. Datos generados en Aspen Plus V8.6.

Según los datos observados en la tabla 4, los cuales fueron obtenidos en el simulador Aspen Plus V8.6, los solventes que más modifican las volatilidades relativas de la mezcla azeotrópica etanol-agua son el etilenglicol y el glicerol.

Como se mencionó anteriormente, los diagramas pseudobinarios son una herramienta útil para la selección de un agente material de separación; además, permiten observar si el *entrainer* modifica el equilibrio de la mezcla que se quiere separar, rectificando que se pueda llevar a cabo la separación con dicho *entrainer*.

Se graficaron los datos experimentales tomados de Lee y Pahl (U.S. Patent n° 4559109, 1985) y Lei, Wang, Zhou y Duan (2002) del equilibrio con los cuatros posibles agentes materiales de separación (ver figura 1). El agente material de separación que modifica más el equilibrio líquido-vapor de la mezcla original es el etilenglicol, seguido del glicerol. Los dos solventes restantes preseleccionados también pueden alterar la volatilidad relativa de la mezcla; sin embargo, su efecto en el incremento de la volatilidad relativa de los componentes clave no es considerable en comparación con el etilenglicol y el glicerol, por lo tanto, si se implementara, por ejemplo, el 1.4-butanodiol se podría necesitar una gran cantidad de alimentación para romper el azeótropo (de Figueiredo, Guedes de Araujo, Vasconcelos y Britol, 2011).



**Figura 2.** VLE del etanol-agua con los posibles solventes, generados en el simulador Aspen Plus V8.6.

El costo del agente material de separación es un factor importante a evaluar, ya que es determinante en la viabilidad económica del proceso; al respecto, el solvente más económico reportado en la literatura es el glicerol, seguido por el etilenglicol (de Figueiredo et ál. 2011).

**Tabla 5.** Costos de los posibles agentes materiales de separación

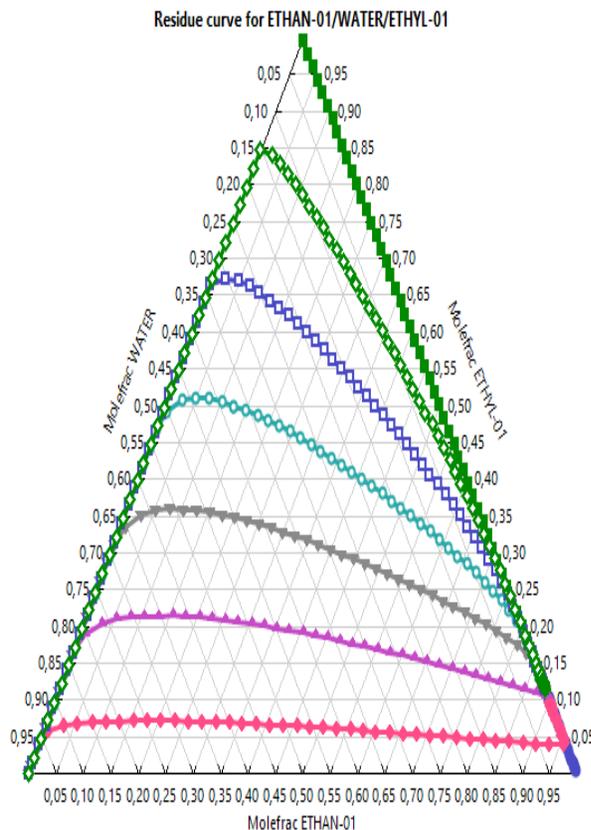
Agentes materiales de separación	Costo USD/kg
Etilenglicol	121.3-123.5
Glicerol	114.7
1.3-propanodiol	--
1.4-butanodiol	235-255.01

Según la tabla 5, en la cual se muestran los costos en 2014 de algunos de los agentes materiales que se preseleccionaron, el solvente más económico a la fecha es el glicerol, seguido por el etilenglicol.

En la figura 1 se muestra el diagrama ternario para el sistema etanol-agua-etilenglicol generado en el simulador Aspen Plus versión 8.6, en el que se implementó el modelo termodinámico NRTL, el cual se escogió para el sistema, teniendo en cuenta el árbol de decisión, referentes teóricos y datos experimentales reportados en la literatura.

Los mapas de curva de residuo son la herramienta más sencilla para corroborar si un agente material de separación es adecuado o no para la mezcla binaria, que en este caso es etanol y agua. Para corroborar lo mencionado, se debe observar en el mapa que las curvas de residuo unan los dos componentes de la mezcla binaria en sus puntos de pureza, es decir, si una curva de residuo une la concentración de etanol puro con la concentración de agua pura, esto implica que el primer agente

material de separación seleccionado, el etilenglicol, se puede implementar en la mezcla binaria para poder llevar a cabo la separación, tal como ocurre en la figura 2; por ende, teniendo en cuenta las curvas de residuo como criterio de selección, se corrobora que el etilenglicol es apropiado como posible agente material de separación.



**Figura 3.** Curvas de residuo para el sistema etanol-agua-etilenglicol, generadas en el simulador Aspen Plus v 8.6.

De los criterios que se han evaluado se selecciona el etilenglicol, ya que es un posible agente material de separación que no solo cumple con cada uno de los criterios evaluados, sino que también es uno de los solventes más implementados en los procesos de destilación extractiva, debido a que, según los referentes teóricos, promete bajos costos en el proceso.

## CONCLUSIONES

Para la selección del agente material de separación en un proceso de destilación extractiva se deben evaluar varios aspectos, como toxicidad, si forma o no un nuevo azeótropo con la mezcla original, si es soluble o no en cada uno de los componentes de la mezcla que se quiere separar, entre otros factores. Por otra parte, se tiene en cuenta el aspecto económico y ambiental a la hora de seleccionar el *entrainer*, con el fin de reducir costos de inversión de capital y operación.

Tal como lo determinó la metodología de evaluación de criterios de selección para la selección del *entrainer*, el etilenglicol es uno de los posibles mejores agentes materiales de separación para la destilación extractiva en la obtención de etanol anhidro como producto.

Las curvas de residuo son la herramienta o criterio más sencillo para corroborar si un agente material de separación es adecuado o no para la mezcla binaria, lo que se verifica con el diagrama ternario realizado en el simulador Aspen Plus versión 8.6 para la mezcla etanol-agua-etilenglicol. Según el simulador, el etilenglicol es adecuado para llevar a cabo la separación del etanol y el agua, ya que una curva de residuo une la concentración de etanol puro con la concentración de agua.

## AGRADECIMIENTOS

La autora expresa su gratitud al grupo de investigación en Procesos Separaciones no Convencionales (GPS), por el apoyo a la investigación.

## REFERENCIAS

- De Figueiredo, M., Guedes, B., De Araujo, J., Vasconcelos, L., y Brito, R. (2011). Optimal design of extractive distillation columns—a systematic procedure using a process simulator. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(3), 341–346. doi: 10.1016/j.cherd.2010.06.011
- Gómez, P., y Gil, I. (2009). Simulation of the tetrahydrofuran dehydration process by extractive distillation in aspen plus. *Latin American Applied Research*, 39, 275–284.
- Hilal, N., Yousef, G., y Langston, P. (2002). The reduction of extractive agent in extractive distillation and auto-extractive distillation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 41(8), 673–679. doi: 10.1016/S0255-2701(01)00187-8
- Kumar, S., Singh, N., y Prasad, R. (2010). Anhydrous ethanol: a renewable source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1830–1844. doi: 10.1016/j.rser.2010.03.015
- Lee, F., y Pahl, R. (1985). *U. S. Patent n.º 4559109. Dehydration of alcohol with extractive distillation*. Washington D. C.: Patent and Trademark Office.
- Lei, Z., Wang, H., Zhou, R., y Duan, Z. (2002). Influence of salt added to solvent on extractive distillation. *Chemical Engineering Journal*, 87(2), 149–156. doi: 10.1016/S1385-8947(01)00211-X
- Pugh, S. (1991). *Total design: Integrated methods for successful product engineering*. RU: Addison-Wesley.
- Merck Millipore. (s. f.). [Preselección de los agentes materiales de separación, matriz de preselección cualitativa]. Recuperado de <http://www.merckmillipore.com/CO/es>
- Seader, J., Henley, E., y Roper, D. (2010). *Separation process principles* (3.ª ed.). EE. UU.: John Wiley & Sons, Inc.
- Treybal, R. (1988). *Operaciones de transferencia de masa*. México: McGraw-Hill.
- Turton, R., Bailie, R., Whiting y Shaeiwitz, J. (2008). *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. (s. d.): Pearson Education.
- Uyazán, A., Gil, I., Aguilar, J., Rodríguez, G., Caicedo, M., y Luis, A. (2004). Deshidratación del etanol. *Ingeniería e Investigación*, 56(1), 49–59.
- Yee, F., Eng, L., y Manan, Z. (2018). Application of extractive distillation for the separation of benzene and cyclohexane mixture. Recuperado de <http://www.klmtechgroup.com/PDF/Articles/articles/Extractive-Distillation.PDF>