

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Tucumán

Escuela de Posgrado

Tecnologías de deshidratación de bioetanol

Ing. Daniel Horacio Valdeón

Trabajo Final Integrador para optar al Grado Académico
Superior de Especialista en Ingeniería Bioenergética

Tutora: Dra. Ing. Paula Zulema. Araujo

San Miguel de Tucumán

Año 2018

RESUMEN

La industria sucroalcoholera es uno de los pilares de la economía en la provincia de Tucumán. En el 2006 se sancionó la ley 26.093 de promoción de biocombustibles fijando un porcentaje de 5 % de etanol en las naftas. Después en 2016 se dictó el decreto N°543/2016 que estable un 12 % de bioetanol en naftas. Este impulso desencadenó un incremento significativo en la producción de bioetanol en la provincia de Tucumán.

El objetivo de este trabajo es presentar un análisis de las principales tecnologías de deshidratación utilizadas industrialmente para la obtención de alcohol carburante. Las tecnologías de deshidratación de etanol que existen son: Destilación extractiva, destilación a dos presiones, destilación azeotrópica, tamices moleculares, etc. Entre estas se aborda con mayor profundidad a los procesos de destilación azeotrópica, que involucra procesos de equilibrio líquido-vapor y tamices moleculares, procesos que consisten en la deshidratación de etanol en donde el agua queda retenida en los tamices moleculares. Se presentan los diagramas de flujo de los procesos de separación con los respectivos balances de materia y energía empleando datos de bibliografía, teniendo como objetivo establecer la relación de consumo energético por unidad de volumen de etanol deshidratado.

Finalmente, se presenta una comparación de estas dos tecnologías remarcando sus ventajas y debilidades, desde una visión operacional, energética y económica, proponiendo que la deshidratación por tamices moleculares, es potencialmente, el proceso con mayor perspectiva en la industria de la región.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 4 |
| El bioetanol en la Argentina | 4 |
| Proceso de producción de bioetanol..... | 6 |
| DEFINICION DEL PROBLEMA..... | 9 |
| Azeótropo binario etanol-agua..... | 9 |
| Tecnologías aplicadas en Tucumán y en el NOA..... | 11 |
| MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN DE ETANOL..... | 13 |
| Destilación azeotrópica..... | 13 |
| Tamices moleculares..... | 16 |
| Comparación de los métodos de destilación..... | 19 |
| CONCLUSIONES..... | 20 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 21 |

INTRODUCCIÓN

El bioetanol en la Argentina

Actualmente, se considera al etanol como un ejemplo exitoso del cambio del paradigma “fuentes fósiles de energía” a “biocombustibles”. Entre los diferentes combustibles alternativos (bioetanol, biodiesel, biobutanol, biometano, biohidrógeno, etc), el etanol es uno de los más adecuados para los motores de explosión, Henry Ford en 1896, propuso el uso del bioetanol en motores del tipo Otto (Mele y col., 2011), iniciativa que tomo fuerza en el siglo XX durante la década de los 70 por la crisis del petróleo (Garolera, 2016). Puede usarse directamente hidratado al 96% (v/v) en motores con algunas modificaciones o en mezcla nafta-etanol anhidro en motores convencionales (Mesquita, 2009). Además, se produce a partir de fuentes renovables y no contiene las impurezas presentes en productos derivados del petróleo, tales como compuestos azufrados y aromáticos cancerígenos, principales fuentes de contaminación de las grandes áreas metropolitanas.

La producción de etanol en Argentina se fue incrementando en la última década. En el 2009 la producción de etanol era 23.000 m³ y en el 2017 se produjo en todo el territorio nacional más de 1 millón de metros cúbicos. Hasta el 2011 se producía exclusivamente a partir de caña de azúcar, en el 2012 empiezan a aparecer las primeras plantas a partir de maíz. En la actualidad la producción de etanol se hace 50% a partir de caña y 50 % a partir de maíz.

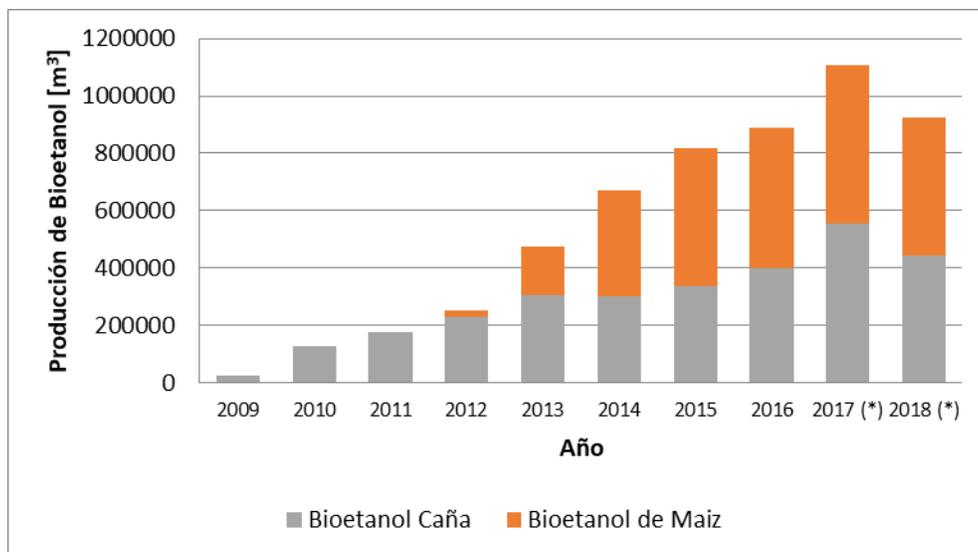


Figura 1: Producción de bioetanol en la Argentina desde 2009 al 2018 a partir de caña de azúcar y de maíz. (*) valores provisionales. (<http://datos.minem.gob.ar/dataset/estadisticas-de-biodiesel-y-bioetanol>)

En la figura 1 se observa como fue en aumento la producción de Bioetanol en el país a partir de caña de azúcar y de maíz. En el territorio nacional se encuentran en operación 16 destilerías de las cuales 12 usan como materia prima la caña de azúcar y 4 maíz. En la región del NOA la producción de etanol es a partir de caña y cuenta con 12 destilerías, donde cerca del 70% están ubicadas en la provincia de Tucumán. En la tabla 1 de presentan la producción de etanol anhidro entregado por todas las destilerías de Tucumán. (Datos proporcionados por la Estación Experimental Obispo Colombres).

Tabla 1. Bioetanol entregado por las destilerías de la provincia de Tucumán en el 2017. (Datos proporcionados por la Estación Experimental Obispo Colombres)

| Tucumán | |
|--|--------------------------------|
| Destilería | Volumen [m³] |
| Cía. Bioenergética La Florida S.A. | 121.480 |
| Bioatar S.A. | 42.004 |
| Bioenergía Santa Rosa S.A. | 35.516 |
| Bio Trinidad S.A. | 31.659 |
| Bioenergía La Corona S.A. | 31.046 |
| Fronterita Energía S.A. | 28.482 |
| Energías Ecológicas de Tucumán S.A. | 20.193 |
| Bioenergética Leales S.A. | 14.557 |
| Sub Total | 324.937 |

A partir de abril de 2016, a través del Decreto Reglamentario N°543/2016, se incrementó el porcentaje obligatorio de bioetanol en naftas a 12% en volumen, en el marco de las Leyes N° 26093 y 26334 de Regulación y Promoción de la Producción de Biocombustibles (MHFP 2016)

Proceso de producción de bioetanol

El etanol es un alcohol primario, Tiene un punto de ebullición 78,6 [°C], densidad a 20°C 789 [kg/m³], conductividad térmica a 20°C 0,19 [W/m.K], viscosidad dinámica a 20°C 1,221 [mPa.s], capacidad calorífica másica 2,412 [kJ/kg°C], punto de inflamación 18,3 [°C], etc. Se produce principalmente a partir de la fermentación de hidratos de carbono. Ciertos microorganismos, en condiciones dadas, metabolizan los azúcares liberando al medio etanol y CO₂. La complejidad de la fermentación viene dada por el tipo de materia prima que se fermenta. Si se utiliza caña de azúcar y/o subproductos de ésta, la fermentación es directa. Mientras que, si se emplean hidratos de carbono más complejos, tal como el almidón, derivado del maíz, es necesario hidrolizarlo primero para poder llevar a cabo la fermentación. Independientemente de la materia prima utilizada se obtiene una mezcla etanol-agua con una concentración 8-12 % (v/v). A continuación, esta mezcla ingresa a un proceso de separación, destilación

convencional, donde se obtiene etanol azeotrópico de 89% en fracción molar (a 1 atm de presión).

Para poder realizar el corte con nafta se necesita mayor pureza, de esta manera, se requieren métodos de separación que rompan el azeótropo etanol-agua, entre ellos, la destilación extractiva, la destilación azeotrópica, la destilación a dos presiones y los tamices moleculares son los procesos más investigados y empleados a escala industrial.

En la figura 2 se esquematiza un proceso típico de obtención de bioetanol a partir de la fermentación de melaza.

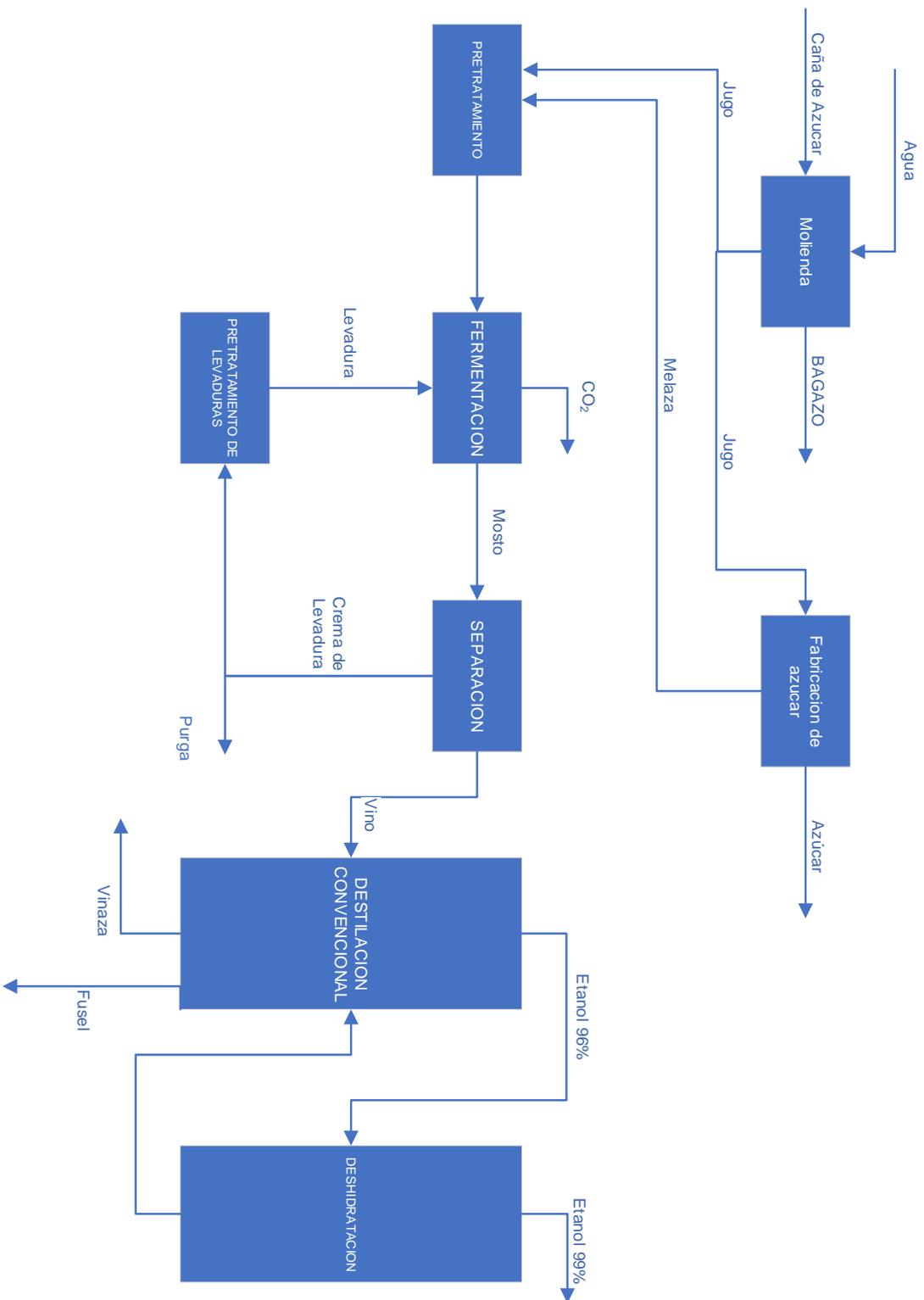


Figura 2: Esquema de producción de azúcar y etanol deshidratado.

DEFINICION DEL PROBLEMA

Azeótropo binario etanol-agua

Un azeótropo es una mezcla líquida, definida, de dos o más sustancias, que a una presión fija que posee un único punto de ebullición. En la figura 3 se graficó el diagrama de equilibrio liquido-vapor para el sistema etanol-agua (se utilizó para el cálculo de los coeficientes de actividad el modelo termodinámico NRTL) a presión constante de 101,3 kPa, modelo termodinámico de la fase vapor ideal.

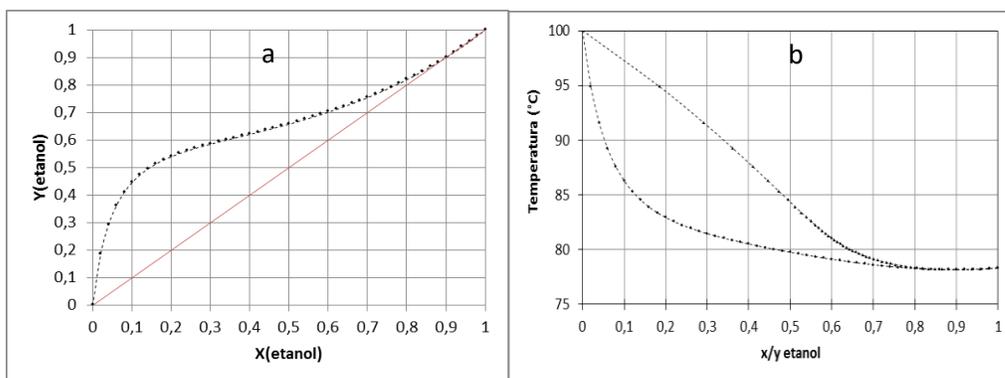


Figura 3 - Diagramas de equilibrio para el sistema binario etanol-agua a 101,3 kPa. a) diagrama x-y, b) diagrama T-x/y. (Datos obtenidos del software Aspen plus)

En el diagrama x-y (figura 3 a), se observa los equilibrios liquido-vapor para la mezcla binaria etanol-agua, a presión constante, a medida que la mezcla se acerca a la composición 0.89 no hay diferencia de composición entre el líquido y el vapor, el sistema se empieza a comportar como si fuera un componente puro. A su vez, en el diagrama T-x/y (figura 3 b), que presenta la temperatura de condensación (punto de rocío) y ebullición (punto de burbuja) de las mezclas binarias, se observa que a una concentración próxima a 0.89 y superior, tanto el líquido como el vapor se comportan como un nuevo componente. De estos dos

diagramas se observa que para una fracción molar de alcohol de 0,90 y punto de ebullición cercano a los 78 °C, el sistema binario se comporta como si fuera un componente puro, ósea presenta un **azeótropo** en esas condiciones de P y T.

Las columnas de destilación convencionales basan su capacidad de separación en la diferencia de volatilidades de los componentes, por lo cual sólo se logra una composición de 89% para el sistema etanol-agua. Para alcanzar la calidad en el alcohol para que sea compatible con las naftas, es necesario acoplar a estos procesos otros métodos de separación para romper o superar el azeótropo etanol-agua tales como:

- Destilación extractiva: En este proceso se adiciona un tercer componente también conocido como agente de separación o solvente, generalmente cerca de la cabeza de la columna, con el fin de modificar el equilibrio líquido-vapor de la mezcla inicial (Lee y col. 1985).
- Destilación azeotrópica: Consiste en añadir a la mezcla inicial una sustancia que modifica la volatilidad relativa de los demás componentes y da lugar a la formación de un nuevo azeótropo ternario, que involucra los tres componentes (Pham y col. 1990).
- Destilación utilizando dos presiones: En general, la presión afecta la composición del azeótropo y si el cambio de composición es suficientemente grande, un proceso de dos columnas usando dos presiones diferentes se puede usar para completar la separación de una mezcla binaria. (Wankat 2008)
- Adsorción con tamices moleculares: La deshidratación de etanol por tamices moleculares consiste en la absorción del agua en un absorbente selectivo, particularmente nano estructurados (Loy y col. 2015).
- entre otros.

Estos métodos permiten alcanzar una concentración de la mezcla etanol/agua a un 99% volumen, especificación mínima de la calidad del bioetanol establecida en la Res. 1295/2008 de nuestro país (<http://servicios.infoleg.gob.ar>).

Tecnologías aplicadas en Tucumán y en el NOA

En la tabla 2 se presenta un listado de los ingenios tucumanos y del noroeste argentino que producen alcohol carburante y las tecnologías de deshidratación que emplean.

Tabla 2. Tecnologías de deshidratación de etanol utilizadas en los ingenios del NOA

| Ingenio | Tecnología |
|---------------|---|
| Tabacal | Destilación azeotrópica con ciclohexano |
| Trinidad | Destilación azeotrópica con ciclohexano |
| La Corona | Destilación azeotrópica con ciclohexano |
| Santa Rosa | Destilación azeotrópica con ciclohexano |
| Concepción | Tamices |
| Fronterita | Destilación azeotrópica con ciclohexano |
| Leales | Tamices |
| La Florida | Tamices |
| Santa Barbara | Tamices |
| Ledesma | Destilación azeotrópica con ciclohexano |
| San Isidro | Destilación azeotrópica con ciclohexano |
| Rio Grande | Destilación azeotrópica con ciclohexano |

En la región de NOA se aplican principalmente deshidratación de etanol por tamices moleculares y destilación azeotrópica empleando ciclohexano como solvente. Por esto se continúa este trabajo realizando una descripción más profunda de estas dos metodologías.

MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN DE ETANOL

Destilación azeotrópica

La destilación azeotrópica consiste en añadir a la mezcla un solvente con un punto de ebullición intermedio, que modifica la volatilidad relativa de los componentes, y da lugar a la formación de un nuevo azeótropo ternario, que involucra los tres componentes (Makarov 2005) al mismo tiempo se, generan dos fases líquidas que permiten, de forma combinada, separar el etanol del agua. El solvente se selecciona teniendo en cuenta diferentes criterios: económicos, de eficiencia en la separación, de conservación de energía y de toxicidad. El n-pentano y el ciclohexano han demostrado tener los mejores rendimientos desde el punto de vista del consumo energético (Gil y col. 2012; Uyazan y col. 2004).

Esta técnica, aunque se usa ampliamente, ha perdido aceptación debido a su poca estabilidad y alto consumo de energía. El diagrama de flujo del proceso de destilación azeotrópica se muestra en la figura 4. El proceso cuenta con dos columnas y un decantador. Se alimenta con la mezcla azeotrópica etanol/agua procedente de una columna anterior de pre-concentración, y se agrega el solvente en el plato superior. De la parte inferior de la columna azeotrópica sale etanol con una concentración de agua menor al 1% en volumen, mientras que los vapores de salida de la parte superior de la columna, que corresponden a una mezcla con la composición igual o cercana a la del azeótropo ternario, se condensan y se envían a un separador líquido-líquido. La primera columna de destilación azeotrópica heterogénea está diseñada para obtener un producto de etanol de alta pureza en la parte inferior de la columna mientras se obtiene un mínimo de etanol, agua, azeótropo de ciclohexano en la parte superior de la columna. El azeótropo obtenido en la parte superior es heterogéneo y la corriente de vapor superior se condensa para formar dos fases líquidas en el decantador. Diagrama de equilibrio ternario Figura 5. La fase orgánica que contiene principalmente ciclohexano vuelve a la columna de destilación azeotrópica heterogénea. La fase acuosa se extrae del decantador para enviarse a la columna de recuperación de arrastre, donde en la

corriente de fondo se obtiene agua esencialmente pura y en la parte superior se elimina el ciclohexano para reciclar a la primera columna.

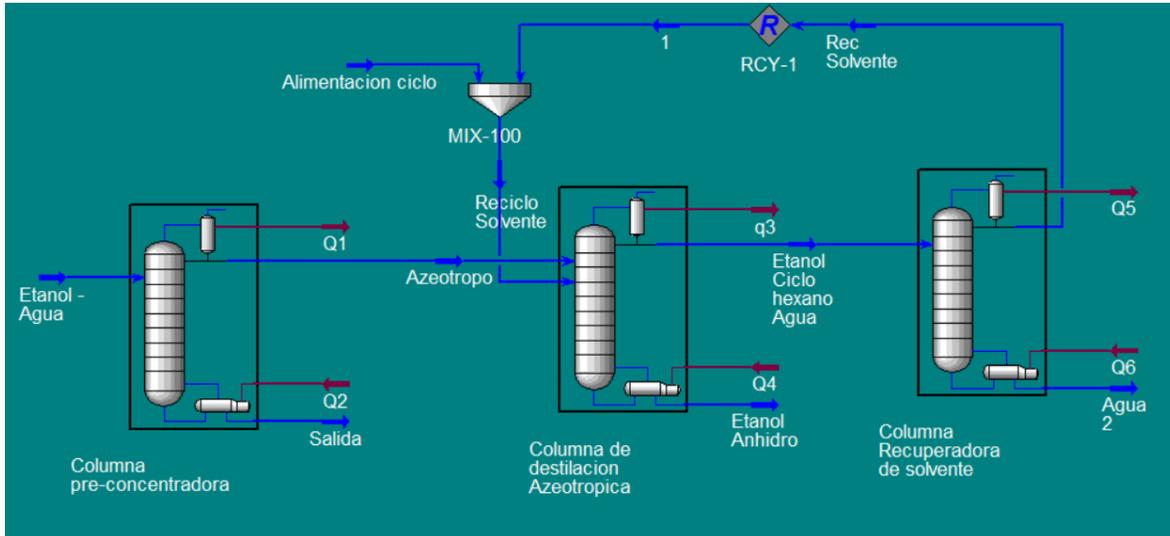


Figura 4 - Esquema general de la destilación azeotrópica heterogénea.

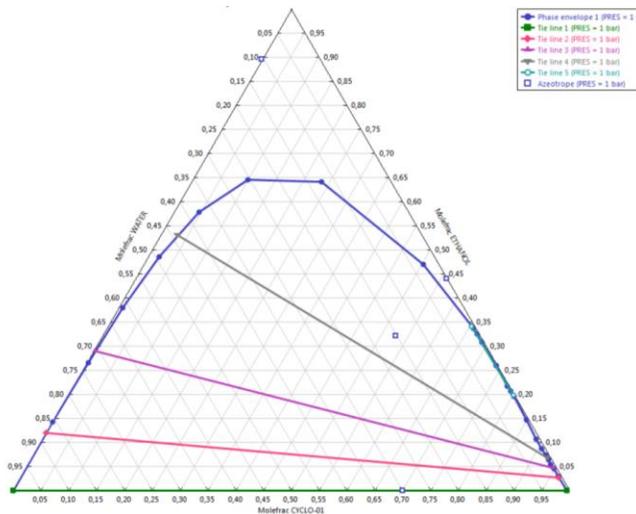


Figura 5 - Diagrama ternario para el sistema etanol-agua-ciclohexano a 25°C y 101,3 kPa. (Grafico realizado en el software Aspen plus)

Los resultados obtenidos muestran que es posible producir etanol anhidro utilizando ciclohexano como agente de arrastre con alta recuperación molar de

etanol. A medida que la concentración de vapor superior se aproxima al azeótropo heterogéneo ternario, mejora la separación en la columna de deshidratación. A medida que el caudal de reflujo orgánico y la velocidad de flujo de reciclado aumentan la concentración de etanol en los fondos de la columna de deshidratación, mejora el rendimiento de la separación, pero aumenta el consumo de energía en el sistema.

Balance de masa del sistema y energía.

Bastida y col. (2010) presentan un estudio por simulación de los procesos de deshidratación de etanol. En la tabla 2 se presenta el balance de materia de sistema mientras que en la tabla 3 se presenta el balance de energía del sistema simulado por Bastida, tomando una alimentación con etanol azeotrópico con un caudal 244,64 kmol/h (13 m³/h).

Tabla 2. Flujos de materia y concentraciones en un sistema destilación azeotrópica. Bastida y col. (2010)

| Corriente | Flujo | Fracción molar | | |
|------------------------------------|---------------|----------------|--------|-----------------------|
| | | Etanol | Agua | Ciclohexano |
| Alimentación | 244.64 kmol/h | 0.885 | 0.115 | 0 |
| Reflujo del separador liviano | 284.41 kmol/h | 0.0768 | 0.0029 | 0.9205 |
| Alimentación de ciclohexano | 0.855 kmol/h | 0 | 0 | 1 |
| Reflujo de la columna recuperadora | 282.37 kmol/h | 0.7099 | 0.2105 | 0.0785 |
| Reflujo del separador pesado | 310.49 kmol/h | 0.6456 | 0.2819 | 0.0723 |
| Salida de la columna azeotrópica | 217.37 kmol/h | 0.9959 | 0.0001 | 0.0039 |
| Salida de la columna 2 | 28.12 kmol/h | 0.0007 | 0.9993 | 1.0*10 ⁻²⁰ |

Tabla 3. Flujos energía en un sistema destilación azeotrópica. Bastida y col. (2010)

| Columna | Trabajo del hervidor | Trabajo del condensador |
|--------------|----------------------|-------------------------|
| 1 | 6580.15 kW | -6651.78 kW |
| 2 | 4335.95 kW | -4082.61 kW |
| Total | 10918.1 kW | -10734.39 kW |

Se consume 50.43 kWh/kmol de etanol en el hervidor y 49.59 kWh/kmol de etanol en condensador.

Tamices moleculares

Los tamices moleculares son materiales granulares, duros, esféricos, o cilíndricos fabricados a partir de materia prima tales como aluminosilicatos, arcillas, vidrios porosos, carbones microporosos, zeolitas, entre otros. Para la deshidratación del etanol se utiliza un tamiz en el cual el diámetro medio de los caminos intersticiales es de 3 Å (figura 6), esto debido a que la molécula de agua tiene un diámetro menor a este valor, mientras que la de etanol es mayor. Los tamices moleculares pueden absorber agua alrededor del 22% de su propio peso (Kumar y col. 2010). Primero se concentra la solución etanol-agua hasta concentraciones próximas al azeótropo luego el producto se deshidrata, a alta presión, utilizando tamices moleculares, y el adsorbente, en forma paralela y a baja presión, se regenera por desorción todo en fase gaseosa (Frolkova y Raeva 2010). La deshidratación de etanol por tamices moleculares ofrece ventajas tecnológicas, como: diseño simple del proceso; larga vida útil de hasta cinco años; facilidad de regeneración y alta eficiencia. Esto último es debido a la alta capacidad de adsorción y gran velocidad de difusión del agua (Frolkova y Raeva 2010).

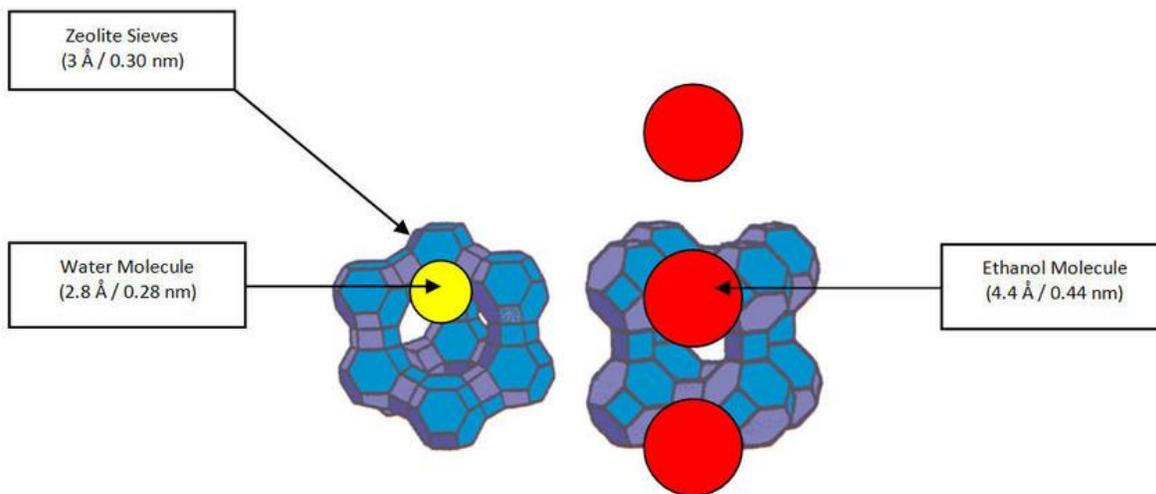


Figura 6. Diagrama esquemático del tamiz molecular el tamaño de poro y las dimensiones de las moléculas (Nilesh y col. 2016).

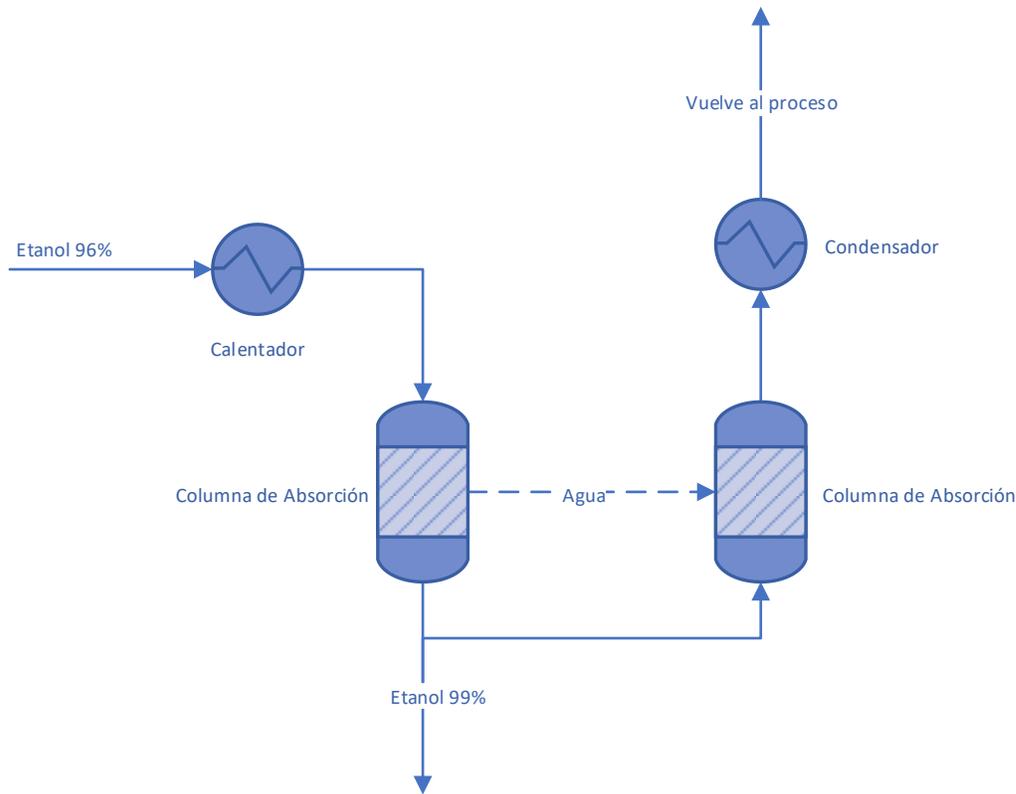


Figura 7. Esquema del proceso de deshidratación por tamices moleculares.

La deshidratación por tamices moleculares funciona mediante ciclos de deshidratación / regeneración; cuando un lecho está en un ciclo de deshidratación, el otro se está regenerando. En la figura 7 se muestra el esquema del proceso. En el primer lecho se pasa vapor de etanol azeotrópico desde la columna rectificadora que se ha calentado previamente en un vaporizador, para aumentar la presión hasta 2.72 atm. La regeneración se realiza recirculando el 15% de los vapores de etanol anhidro al segundo lecho, para eliminar la humedad acumulada en el ciclo de deshidratación anterior. El caudal neto del etanol anhidro producido es inferior al obtenido en las operaciones basadas en destilación azeotrópica. Esto se debe al alto reciclo de etanol requerido para regenerar el segundo lecho, que a su vez afecta de manera importante la eficiencia del proceso y aumenta el consumo total

de energía requerido para producir un kilogramo de etanol. Además, es importante tener en cuenta la energía involucrada en la bomba de vacío utilizada en el ciclo de regeneración y la energía necesaria para redestilar la solución diluida de etanol obtenida en la etapa de regeneración (Uyasan y col. 2006, Bastida y col. 2010).

Balance de materia y energía

También se presenta el estudio realizado por Bastida y col. (2010). En las tablas 4 y 5 se muestran los balances de materia y energía respectivamente.

Tabla 4. Flujos de materia y concentraciones de un sistema de tamices moleculares. Bastida y col. (2010)

| Corriente | Flujo | Fracción Molar | |
|---------------------------|---------------|----------------|-------|
| | | Etanol | Agua |
| Alimentación | 244.64 kmol/h | 0.885 | 0.115 |
| Salida del primer tamiz | 216.82 kmol/h | 0.998 | 0.002 |
| Agua retenida | 27.82 kmol/h | 0.008 | 0.992 |
| Salida de la recuperación | 60.339 kmol/h | 0.541 | 0.459 |
| Flujo de etanol | 184.30 kmol/h | 0.998 | 0.002 |
| Entrada segundo tamiz | 32.52 kmol/h | 0.998 | 0.002 |

Tabla 5. Flujo de energía de un sistema de tamices moleculares. Bastida y col. (2010)

| Columna | hervidor | condensador |
|---------|-----------|-------------|
| 1 | 133.93 kW | -136.00 kW |

Se consume 0.72 kWh/kmol de etanol en el hervidor y 0.74 kWh/kmol de etanol en condensador.

Comparación de los métodos de deshidratación

De todas las tecnologías disponibles para deshidratación de etanol, en el NOA se utilizan la destilación azeotrópica y los tamices moleculares.

Operacionalmente, la deshidratación por tamices moleculares es un proceso mucho más simple, trabajando con una batería de columnas de absorción se coordina el funcionamiento de ciclos de absorción y regeneración, permitiendo que el proceso pueda producirse globalmente en forma continua. Los tamices moleculares, propiamente dichos, tienen una vida útil de 10 años, aproximadamente, lo que justifica su inversión. Además, no requiere de la incorporación de compuestos químicos al proceso.

La deshidratación de etanol por destilación azeotrópica es un proceso más antiguo y muy conocido. La operación, si bien es más compleja por tratarse de dos columnas en serie, es un proceso continuo lo cual lo hace más compatible con la producción de etanol. La incorporación de un tercer componente hace que sean más estrictos los controles de calidad tanto por el producto como para reducir las pérdidas del mismo.

Desde un punto de vista energético, el consumo de energía por metro cúbico de etanol producido es casi 70 veces menor en los tamices moleculares. Bastidas y col. (2010) realizaron una estimación de los costos de equipos para plantas de deshidratación de etanol para un caudal de 312 m³/h. Para una planta de destilación azeotrópica, consideran este caudal de producto, se estima un costo de capital 3 millones de dólares, mientras que para la instalación de la planta de tamices moleculares ronda en los 2.4 millones de dólares.

CONCLUSIONES

El bioetanol es uno de los biocombustibles producidos en la Argentina que se plantea como una alternativa de energías renovables a los combustibles fósiles. Es un combustible que puede ser producido por casi cualquier biomasa que contenga azúcar.

Debido a que la mezcla etanol-agua presenta un azeótropo de mínima, a la concentración molar de 0,89 de etanol a 78.2 °C y a 1 atm de presión, es necesario realizar posterior a la fermentación de los mostos un proceso de concentración del etanol hasta la mezcla azeotrópica y posteriormente realizar un proceso de deshidratación para la obtención de alcohol 99,5%.

Estos procesos de deshidratación pueden ser destilación extractiva, pervaporación, destilación a dos presiones, destilación azeotrópica, tamices moleculares, etc.

Las etapas de deshidratación fueron mejorando desde el punto de vista operacional, ambiental y económico, para poder lograr cubrir la demanda de calidad y de cantidad del etanol deshidratado. A partir del análisis realizado de la bibliografía vinculada con la destilación azeotrópica y el uso de tamices moleculares para la deshidratación de etanol como aditivo en nafta. Se concluye que la alternativa que actualmente se está incorporando en la industria sucrocroalcolera tucumana, la deshidratación a partir de tamices moleculares, es la que mejor respuesta da para evitar el uso de un tercer producto químico, la vida útil de los tamices moleculares es larga (10 años) y finalmente, los tamices moleculares, son un proceso sumamente simple y de bajo requerimiento energético. La única desventaja, a tener en cuenta, es el manejo de un alto vacío en la etapa de recuperación de los tamices.

Bibliografía.

- Bastidas, Paola A., Iván D. Gil, and Gerardo Rodríguez. "Comparison of the main ethanol dehydration technologies through process simulation." European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 20th. 2010.
- Frolkova, A. K.; Raeva, V. M., «Bioethanol dehydration: state of the art,» Theoretical foundations of chemical engineering, vol. 44, nº 4, p. 545–556, (2010).
- Garolera, M. «ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN TUCUMÁN» Trabajo Final Integrador para optar al Grado Académico Superior de Especialista en Ingeniería Bioenergética, FRT, UTN, (2016).
- Gil, I.D.; Gómez, J.M.; Rodríguez, G., «Control of an extractive distillation process to dehydrate ethanol using glycerol as entrainer» Computers and Chemical Engineering, vol. 39, pp. 129-142, (2012).
- Kumar, S., Singh, N., & Prasad, R. (2010). Anhydrous ethanol: A renewable source of energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(7), 1830-1844.
- Lee, F.; Pahl, R., « Solvent screening study and conceptual extractive distillation process to produce anhydrous ethanol from fermentation broth,» Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., vol. 24, nº 1, pp. 168-172, (1985).
- Loy, Y.Y.; Lee, X.L.; Rangaiah, G. P., «Optimization and economic evaluation of bioethanol recovery and purification processes involving extractive distillation and pressure swing adsorption,» Elsevier, Separation and Purification Technology, pp. 413-418, (2015).
- Makarov, V. V.; Petrykin, A. A.; Skvortsov, E. A., Byull. Izobret, nº 34, (2005).
- Mele, F. D.; A. Kostin; G. Guillén-Gosálbez; L. Jiménez. 2011. Multiobjective Model for More Sustainable Fuel Supply Chains. A Case Study of the Sugarcane Industry in Argentina. Industrial & Engineering Chem. Res. 50: 4939–4958.
- Mesquita, D. L. 2009. O processo de construção da tecnologia flexfuel no Brasil: uma análise sob a ótica da "plataforma de negócio (business platform). Tesis de maestría. Universidade Federal de Lavras
- MHFP (Ministerio de Hacienda y Finanzas Públicas), 2016. Informes de Cadenas de Valor: Azúcar.1 (3). <https://www.economia.gob.ar/peconomica/docs/SSPE_Cadena_Valor_Azucar.pdf> (31/08/2017).
- Nilesh, P.P., Vilas, S.P., Shashikant, L. B. Molecular sieve dehydration: a major development in the field of ethanol dehydration to produce fuel ethanol. Asian Journal of Science and Technology. 07. 2897-2902. (2016).
- Pham, H.N.; Doherty, M.F., «Design and synthesis of heterogeneous azeotropic distillations I Heterogeneous phase diagrams,» Chem. Eng. Sci., vol. 45, pp. 1823-1836, (1990).

- Uyazán, A. M.; Gil, I. D.; Aguilar, J. L.; Rodríguez, G.; Caicedo, L. A., «Deshidratación de etanol,» Ingeniería e investigación, vol. 24, nº 3, pp. 49-59, (2004).
- Uyazán, A. M.; Gil, I. D.; Aguilar, J.; Rodríguez, G.; Caicedo, L. A., «Producción de alcohol carburante por destilación extractiva: Simulación del proceso con glicerol» Ingeniería e Investigación, vol. 26, nº 1, pp. 45-50, abril (2006).
- Wankat, P.C., Ingeniería de procesos de separación, Segunda ed., Pearson Prentice hall, p. 225, (2008).