

OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE UN RESIDUO DE LA INDUSTRIA AZUCARERA

Reinier Feyt Leyva*, Gretel Villanueva Ramos**

*Facultad de Química-Farmacia, UCLV, **Centro de Análisis de Procesos, UCLV

El trabajo está encaminado a la producción de un biocombustible renovable: Biodiesel, partiendo del aceite presente en un residuo de la industria azucarera: la cachaza; empleando para la extracción del aceite nafta comercial, y como agente transesterificante etanol extrafino. Se realizó una búsqueda bibliográfica para seleccionar la variante de producción más factible, así como las materias primas para llevar a cabo el proceso, donde el aceite de cachaza, el etanol y el catalizador etóxido de sodio fueron las variantes más atractivas. Se valoró la posibilidad de realizar la extracción con solvente en dos etapas con corrientes cruzadas, resultando de esta un aumento de la producción de aceite y de los rendimientos por litro de solvente usado. Se determinó la metodología para llevar a cabo la reacción de Transesterificación usando etanol con una pureza de 96°GL y con relaciones de alimentación al Reactor Discontinuo con Agitación, de 3,5 y 15 moles de etanol/mol de aceite, resultando de esta última la formación de jabones durante la reacción. Además de la obtención de Biodiesel, como coproducto se obtienen los Alcoholes de Alto Peso Molecular (AAPM). La conversión del aceite resultó aceptable (73 %), y la diferencia con los valores reportados, se debe a la presencia de agua en el etanol.

Para evaluar la posibilidad del diseño de una Planta Demostrativa para la producción de Biodiesel, se llevó a cabo la simulación del proceso completo utilizando el Simulador Profesional HYSYS 3,2, empleando para ello los resultados obtenidos en el laboratorio. Se analizaron varias alternativas tecnológicas, con el fin de lograr cierta integración material energética del proceso.

Palabras clave: biodiesel, cachaza, transesterificación, simulación.

The work is directed to the production of a renewable biocombustible: Biodiesel, starting off of the oil in a residue of the sugar industry; using for the extraction of the oil commercial naphtha, and superfine ethanol like transesterificant agent. A bibliographical research was realized to select the variant of more feasible production, as well as the raw materials to carry out the process, where the oil, the ethanol and the sodium etoxide catalyst, were the most attractive variants. The possibility was valued of realizing the extraction with in two stages with cross current, being from this an increase of the oil production and the yields by liter of solvent. The methodology was determined to carry out the reaction of transesterification using ethanol with a purity of 96°GL and relations of feeding to the Discontinue Reactor with Agitation, of 3,5 and 15 mol of ethanol/mol of oil, being from this last soap formation during the reaction. Besides the obtaining of Biodiesel, as coproduct were obtained the Fatty Acid Alcohol (AAPM). The conversion of the oil was acceptable (73%), and the difference with the reported values, must to the water presence in the ethanol. In order to evaluate the possibility of the design of Demonstrative Plant for the production of Biodiesel, the simulation of the complete process was carried out using Professional Simulator HYSYS 3,2, using for it the results obtained in the laboratory. Several technological alternatives were analyzed, with the purpose of to obtain certain material integration energetic of the process.

Key words: biodiesel, slugg, transesterification, simulation.

Introducción

El Biodiesel es un producto que ha tomado relevancia a nivel internacional a partir de la crisis experimentada por los combustibles fósiles, producto de los problemas ambientales que traen consigo, de su escasez y su creciente precio en el mercado. Este combustible alternativo, desde sus

inicios y cada vez con mayor fuerza, ha despertado fuertes polémicas en todo el mundo, fundamentalmente acerca de las materias primas empleadas para su producción, algunas desventajas del proceso productivo y algunos inconvenientes en el funcionamiento del motor diesel. Se han estudiado diversas fuentes para la obtención del Biodiesel, la mayoría de las cuales atentan de una

forma u otra al desarrollo alimenticio de los países, principalmente los menos desarrollados, que dependen en gran medida de la agricultura, disparando los precios de los granos y semillas, además elevan los costos de producción de los alimentos grandemente; esta es la causa fundamental de la crítica de los detractores de este combustible. Ante esta situación, ha habido una ligera tendencia a la búsqueda de aceites provenientes de materias primas alternativas a los granos comestibles, entre las que se encuentran el uso de aceites de freír usados, algunas grasas animales, el cultivo de plantas resistentes a las condiciones extremas del clima y el suelo, de manera que no se afecte la disponibilidad de las tierras para la siembra de cultivos destinados a los alimentos. La búsqueda de estos sustratos más baratos, requiere complejos procesos de purificación para disminuir el contenido de humedad y de acidez, lo que hace que el proceso sea muchas veces no rentable /1/. Es por ello que desde hace dos años, en la Facultad de Química-Farmacia de la UCLV, se desarrolla un proyecto de aprovechamiento de residuales sólidos de la industria azucarera que incluye la posibilidad de obtención de Biodiesel y coproductos a partir del aceite de cachaza /2/. De esta manera se utiliza un residuo de la industria azucarera para la obtención de un combustible renovable, con muchas potencialidades de ser aprovechado en la reducción del combustible consumido por los propios medios de transporte de la empresa azucarera, donde se inserte una planta para su producción, teniendo un elevado impacto económico, ambiental y por supuesto social. El aceite de la caña, es una fuente de ácidos grasos que no ha sido objeto de atención a nivel mundial para la producción de este combustible renovable, los ésteres de ácidos grasos presentes pueden ser transformados mediante una reacción química a alquil-ésteres (Biodiesel). La cantidad de aceite presente en la cachaza oscila alrededor del 12 % peso /3,4/ y presenta algunas ventajas para su empleo como sustrato pues su costo es muy bajo debido a que provienen de un residuo agroindustrial, tiene bajo contenido de ácidos grasos libres que pueden perjudicar la reacción y presenta una gran disponibilidad en nuestro país. Una de las limitaciones en la producción de Biodiesel, está dada por los altos precios de los aceites convencionales

y por las etapas de purificación de los productos secundarios. La utilización del aceite de cachaza como fuente para la producción de Biodiesel es una forma de obtener un biocombustible sin utilizar como materia prima fuentes de alimentos, ni emplear tierras para el cultivo de materias primas con este fin. El objetivo general del trabajo, es obtener la metodología para la obtención de Biodiesel a partir de aceite de cachaza y etanol extrafino a nivel de laboratorio, y valorar la posibilidad del diseño de una planta demostrativa basándonos en los resultados encontrados en el laboratorio.

Fundamentación teórica

Según la definición de American Standards for Testing and Materials (ASTM), el concepto de Biodiesel es: Ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales y que se emplea en los motores de ignición por compresión (motores diesel) o en calderas /5/. Otros autores lo definen como un combustible alternativo producido a partir de materias de base renovables, como los aceites vegetales, es un combustible líquido no contaminante y biodegradable. Químicamente son ésteres de metilo o de etilo, con cadenas largas de ácidos grasos /6/, ver figura 1. El Biodiesel se produce a partir de los aceites vegetales y animales convirtiendo estos a ésteres de etilo, a través de una reacción química denominada transesterificación, usando etanol o metanol en presencia de un catalizador básico o ácido. La Transesterificación (o alcoholólisis) de un éster es un intercambio parcial de grupos mediante una reacción reversible catalizada por una pequeña cantidad de etóxido de sodio, representado por el equilibrio de la ecuación 1 /7/.

La reacción se lleva a cabo entre 25 y 80 °C, con agitación mecánica, y empleando un exceso de alcohol para que la reacción se verifique en el sentido de la formación de productos, aumentando la conversión alcanzada en el equilibrio /8, 7, 9/, aunque existen diferentes vías de producción con diferentes tipos de materias primas y catalizadores, como enzimas, resinas de intercambio iónico, catalizadores sólidos, y fluidos supercríticos /10/.

de los problemas con el etanol es que para lograr un tiempo de reacción rápido y altas conversiones, se requiere alta pureza del mismo, pues la presencia de agua en la reacción ocasiona problemas secundarios /1/.

En la figura 3 se representa las etapas generales para la producción de biodiesel a

partir de catálisis básica, empleando aceite de cachaza, etanol e hidróxido de sodio como catalizador. La etapa de extracción del aceite de cachaza se realizó mediante un proceso de lixiviación empleando como solvente nafta comercial, la cual es evaporada posteriormente para su recirculación.

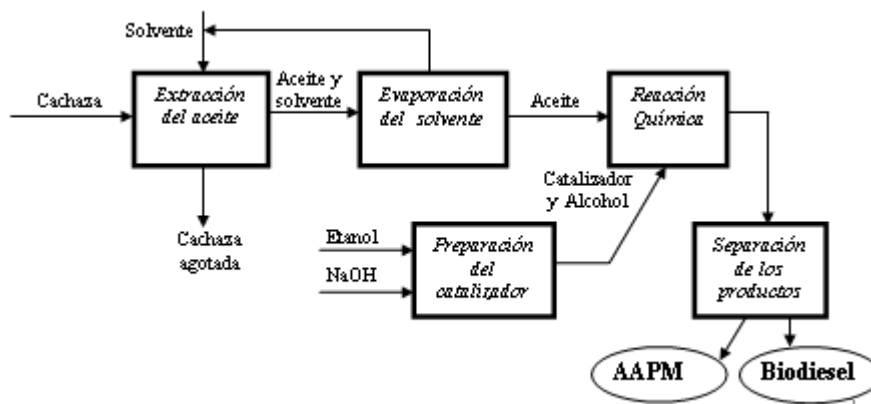


Fig. 3 Diagrama de bloques del proceso.

Métodos y condiciones experimentales

El trabajo en el laboratorio se basó en cuatro etapas fundamentales

- Determinación de las propiedades físicas de la cachaza
- Extracción del aceite con solvente orgánico
- Evaporación del solvente
- Reacción de transesterificación
- Separación de los productos

La humedad de la cachaza se determinó por el método de secado en una estufa hasta que el peso de las muestras se mantiene constante, se determinó además la densidad aparente de la cachaza así como la curva de humedad vs densidad, por métodos simples convencionales. Estas propiedades se determinaron para cálculos posteriores.

La extracción del aceite se realizó mediante un proceso de extracción sólido-líquido (lixiviación) empleando como solvente orgánico nafta comercial. Se realizó la extracción en una etapa y posteriormente en dos etapas en corrientes cruzadas con flujo fresco de cachaza en cada una. La extracción en una etapa se realizó en un recipiente enchaquetado de 5 L con control de tempera-

tura, mezclando 180 g de cachaza con 3,75 L de nafta. Con el objetivo de demostrar la capacidad extractiva del solvente y de concentrar este, en los dos últimos experimentos se realizó el proceso en dos etapas, logrando con esto enriquecer más la nafta antes de entrar en la etapa de evaporación del solvente, en este caso se trabajó con 360 g de cachaza en cada etapa y 7,50 L de nafta, para esto se empleó un recipiente enchaquetado de 10 L. Los parámetros óptimos para esta etapa, ya han sido encontrados por varios autores /4/. Los valores empleados fueron: temperatura de 75 °C, 1 atm, relación de alimentación 20,83 L de nafta por Kg de cachaza, tiempo de operación 1 h y velocidad de agitación de 700 rpm.

Luego de la etapa de extracción, se realiza una etapa de separación del solvente mediante una etapa de evaporación al vacío. Para lograr esto se empleó un Roto-evaporador al vacío donde la temperatura máxima alcanzada es de 65 °C, esto se debe a que la nafta tiene una temperatura de ebullición entre 138–178 °C, y al ser el aceite de cachaza un compuesto orgánico propenso a la descomposición térmica, al deterioro químico y a las consiguientes pérdidas de sus propiedades no

es posible realizar un proceso de evaporación a una temperatura mayor de 90-95 °C, por lo que se emplea este sistema de vacío, para separar completamente el aceite del solvente.

Para la reacción de transesterificación se empleó un reactor agitado discontinuo con control de temperatura. Los reactivos empleados fueron: etanol extrafino (96 °C), aceite de cachaza y etóxido de sodio como catalizador de la reacción. Para la preparación del catalizador se empleó NaOH anhidro (99 % pureza) y etanol extrafino en una proporción 0,0156 g de aceite por ml de etanol, la cantidad empleada del catalizador en la reacción fue de 3 ml de etóxido por g de aceite. La reacción se llevó a cabo en las siguientes condiciones: temperatura de 70 °C, 1 atm, tiempo de reacción 4 h, velocidad de agitación 200 rpm, las relaciones de alimentación del etanol y el aceite en base mol fueron 3,5 y 15 mol de etanol por mol aceite, esta última buscando aumentar la conversión en el equilibrio con un exceso superior de etanol. Estos parámetros de reacción fueron seleccionados en base a trabajos publicados en revistas de alto impacto relativos al estudio de la reacción de obtención de biodiesel /9, 10, 11/. En total se realizaron 4 experi-

mentos con réplicas cada una de ellos. Dos con una relación molar de etanol/aceite de 3,5 (experimento 1 y 3) y los otros dos con una relación molar de 15 (experimento 2 y 4).

Los productos de la reacción se dejan enfriar hasta una temperatura ambiente, y luego se le añade un solvente orgánico, que puede ser la nafta, para separar los alcoholes grasos obtenidos en la reacción. Posteriormente se filtran al vacío los alcoholes y se procede a un lavado de los mismos con etanol y otro lavado final con acetona. La fase líquida se lleva al Roto-evaporador para separar los restos de etanol que no reaccionó y la nafta añadida para extraer los alcoholes de alto peso molecular.

Resultados y discusión

Las propiedades de la cachaza resultaron ser: humedad de 13,25 %, densidad aparente de 141,92 Kg/m³, se determinó la curva de humedad vs densidad representada por la figura 4, además estudios de varios autores /13/, arrojaron que la cantidad de aceite presente en la cachaza es de 12 % base seca.

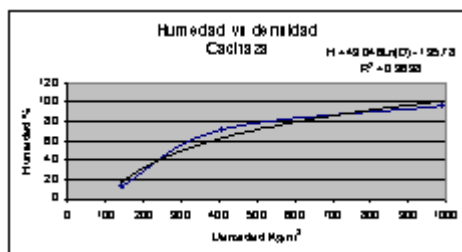


Fig. 4 Humedad vs densidad de la cachaza.

Los resultados obtenidos en la etapa de extracción, incluyendo a la evaporación del solvente se exponen en la tabla 1.

Tabla 1
Resultados obtenidos en la extracción del aceite

Experiencias	1	2	3	4*	5*
Cantidad de aceite extraído (g)	18,50	18,32	19,01	70,56	72,15
Rendimiento (g de aceite/g de cach.)	0,103	0,102	0,106	0,098	0,100
Rendimiento (g de aceite/L de nafta)	4,93	4,89	5,07	9,41	9,62
Pérdidas de solvente en extractor (%)	10,40	7,73	9,33	8,00	8,67
Pérdidas de solvente en evaporador (%)	14,88	15,90	17,35	15,22	15,00
Fración masa de soluto en nafta (%)	0,73	0,70	0,74	1,35	1,38
% de extracción	95,16	94,24	97,79	90,74	92,79
*Se realizaron con el equipo de 10L y en dos etapas en corrientes cruzadas					

El rendimiento dado en g de aceite/g de cachaza se comportó superior a los valores esperados y evidentemente los valores de las experiencias 4 y 5, son ligeramente inferiores a las primeras experiencias debido a que en la segunda etapa de extracción de estos experimentos, el solvente que se pone en contacto con la nueva partida de sólido tiene cierta cantidad de soluto disuelto, haciendo esto que la fuerza impulsora de la transferencia de masa (diferencia de concentración), sea menor en este caso, disminuyendo la capacidad extractiva del solvente. Por otra parte en el rendimiento expresado en g de aceite/L de cachaza, los valores mayores obtenidos en los experimentos 4 y 5 están acorde con el análisis anterior, y demuestran que con la misma cantidad de nafta en dos etapas es posible extraer casi el doble de lo extraído en una sola etapa, requiriéndose menor cantidad de solvente para obtener determinada cantidad de aceite influyendo esto en la reducción del costo de operación por concepto de ahorro de

solvente. Se determinó el porcentaje de extracción del aceite resultando una media de 94,14 %. Este es un valor superior al supuesto, el cual estaba entre 80-85 %. Es un resultado que valida los parámetros óptimos empleados para la misma y la mejora en cuanto a resultados obtenidos anteriormente probablemente se deba al mejor grado de agitación en el recipiente, la inclusión de un condensador de doble tubo para los vapores de solvente que se evaporan en el equipo, los cuales son recirculados nuevamente al mismo y al tratamiento aplicado a la cachaza antes de entrar al equipo (secado, reducción de tamaño y tamizado).

Los resultados que se obtuvieron a partir de la reacción del aceite de cachaza con etanol extrafino (96 °GL), en presencia de catalizador básico se muestran en la tabla 2, donde cada columna muestra la media de las dos réplicas realizadas de cada experiencia. Los experimentos 1 y 3, se realizaron con una relación molar de etanol/aceite de 3,5 y el 2 y 4 con una relación de 15.

Tabla 2
Resultados obtenidos de la reacción de transesterificación

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
Biodiesel	42,64 g	0	48,48 g	0
Alcoholes grasos (AAPM)	11,742 g	0	12,67 g	0
Formación de jabones	Despreciable	Inaceptable	Despreciable	Inaceptable
Conversión alcanzada (X_A)	72,44%	0	73,89%	0

Como resultado de las experiencias 1 y 3 se observó la formación de un sólido cristalino de color beige claro con similar apariencia que los alcoholes de alto peso molecular, obtenidos en trabajos anteriores, además el producto obtenido después de la evaporación, presentó una mejor fluidez que el aceite utilizado en la reacción. Por otra parte no se observó la presencia de jabones durante la reacción, siendo estas características, junto con la precipitación de los alcoholes grasos una señal de la verificación de la reacción de transesterificación. En la experiencia 2, la reacción no se verificó, debido a la formación de jabones que entorpecieron la transesterificación, consumiendo para ello el catalizador y los ácidos grasos presentes, se observó un aumento de la viscosidad, lo que impide el mezclado efectivo entre los reactantes y con ello el transcurso de la

reacción. La experiencia 4 se realizó para confirmar la experiencia 2, se disminuyó la cantidad de catalizador a la mitad, manteniendo constante la relación etanol/aceite, para evitar la formación de jabones por exceso de etóxido. En el experimento 4, se obtuvieron los mismos resultados que en el experimento 2; esto significa que la formación de jabones probablemente se deba a la presencia de agua debido al exceso de alcohol adicionado en la reacción, y no a la cantidad de catalizador añadida. El agua presente en la reacción, favorece la reacción de saponificación de aceite, la cual disminuye grandemente la conversión y a menudo puede ser fatal para esta, con la formación de jabones; así, los ácidos grasos libres presentes se están transformando en un producto de bajo valor e intervienen en la reacción. Mediante los resultados de los experimentos 1 y 3, es posible con-

cluir que se puede elaborar Biodiesel a partir de un alcohol de 96°GL utilizando un exceso de etanol de alrededor de 3,5 mol de etanol/mol de aceite, para asegurar conversiones altas en el equilibrio, siempre que no se sobrepase el límite máximo de exceso de etanol hallado (menor de 15 mol de etanol/mol de aceite). Las conversiones alcanzadas son menores que las esperadas (95-98 %), aunque estos valores, se alcanzaron con etanol anhidro, siendo esto (la presencia de agua), una de las causas de la disminución. El biodiesel obtenido se analizó con una técnica de cromatografía gaseosa, por un grupo de investigadores del Departamento de Química de la UCLV, arrojando excelentes resultados y comprobando que la mezcla obtenida estaba constituida por etil-ésteres.

Simulación de la planta demostrativa

El diseño y simulación de la planta se realizaron basándonos en una capacidad de procesamiento de 2 ton de cachaza diarias (250 kg/h). La simulación se realizó para realizar los balances de masa y energía de la planta demostrativa propuesta, basándonos en los resultados encontrados en el laboratorio, además para diseñar parte del equipamiento de la planta y para seleccionar la variante de producción más factible, basándonos en portadores energéticos y consumos materiales. Se utilizó para ello el software de proceso Hysys versión 3.2. A pesar de algunas diferencias esperadas entre los resultados de la simulación del proceso y la operación real del proceso, la mayoría de los actuales software de simulación de procesos, pueden arrojar información confiable de la operación del proceso, debido a que poseen gran cantidad de paquetes termodinámicos, una amplia librería de componentes, y técnicas avan-

zadas de cálculos /14/. El procedimiento para la simulación de un proceso está constituido fundamentalmente por la definición de los componentes químicos presentes en el sistema, seleccionar el modelo termodinámico más adecuado para el proceso a estudiar, determinar la capacidad de la planta, escoger las operaciones unitarias apropiadas para lograr las transformaciones requeridas y establecer las condiciones de las corrientes de entradas (flujos, temperaturas, presión, composición, etcétera). La mayoría de los componentes presentes en nuestro sistema se encuentran en la librería de Hysys, pero otros como, la cachaza, la nafta, el biodiesel y el aceite, no se encuentran, por lo que es necesario definir sus propiedades usando la herramienta de “Hypo Manager” con que cuenta Hysys para crear compuestos hipotéticos. El aceite puede tomarse, sin incurrir en grandes errores, que está constituido en su totalidad por el éster formado por el ácido linoleico y al alcohol graso octacosanol, pues es el que en mayor proporción se encuentra en la mezcla del aceite de cachaza, y es el escogido para representar al aceite de cachaza en la simulación con Hysys, por lo que el Biodiesel estará constituido por el etiléster correspondiente y el alcohol de alto peso molecular por el octocosanol /4, 15/.

El modelo termodinámico recomendado para la fase líquida es el modelo de actividad UNIQUAC y el NRTL, ya que se tienen compuestos altamente polares como el etanol y agua, en nuestro caso escogimos para la fase líquida el modelo UNIQUAC y para la fase vapor se seleccionó la ecuación de Peng-Robinson /14, 15/. Para la realización de los balances de masa y energía, así como para el diseño y simulación de la Planta, se emplearon los resultados encontrados a nivel de laboratorio, estos se presentan en la tabla 3. El proceso se simuló en estado estacionario.

Tabla 3
Datos para la Simulación

Etapa de extracción	
Flujo de cachaza	2 ton/d (250 kg/h)
Humedad de la cachaza	13,28
Densidad aparente	141,92 kg/m ³
Cantidad de aceite en cachaza	12 % base seca
Temperatura de extracción	75 C
Presión	1 atm
Relación de alimentación	10,04 kg de cachaza/kg Nafta
% de extracción	91,76 %
% pérdidas de solvente	8,33 %
2 etapas en corrientes cruzadas	
Etapa de evaporación	
Temperatura de evaporación	180 °C
Presión en evaporador	1 atm
Presión de vapor saturado	10 atm
Etapa de reacción química	
Temperatura	75 C
Tiempo de reacción	4 h
Presión	1 atm
Relación molar catalizador/aceite	0,1
Relación molar etanol/aceite	6
K: constante de equilibrio	7

En la figura 5 se representa el diagrama de flujo del proceso continuo de obtención de biodiesel a partir de aceite de cachaza. El equipamiento principal incluye reactor, columna de destilación, intercambiadores de calor, mezcladores, separadores. Debido a que no se dispone de información detallada del mecanismo cinético de la reacción de transesterificación del aceite de cachaza, un reactor simple de equilibrio fue usado para describir la reacción, con una constante de equilibrio de $K=7$, determinada en los experimentos realizados a nivel de laboratorio. En los intercambiadores de calor y en la columna de destilación se asumió una caída de presión nula, para cálculos más rigurosos se deberá calcular previamente una caída de presión en estos equipos.

En la parte inicial del proceso se mezcla la cachaza fresca con la nafta, en una relación tal que satisfaga las condiciones establecidas en la fase de laboratorio, para ello se emplea un modulo

llamado “Set” de las herramientas del Hysys, que permite calcular el valor de alguna propiedad de una corriente (en este caso el flujo) dada una relación preestablecida entre dos corrientes (SET-1). Debido a que Hysys no presenta un módulo de Lixiviación o extracción sólido-líquido, se emplea un modulo (Extracción del aceite) que permite resolver los balances materiales y energéticos, dando las condiciones de entrada y salida de manera que los grados de libertad del sistema sea cero y el sistema de ecuaciones sea soluble. De esta etapa sale la cachaza agotada con 2,15 kg/h de aceite y una corriente de aceite más nafta con 1 % de aceite, la cual pasa por uno de los intercambiadores de calor (E-101) para precalentarse antes de entrar al evaporador (Eva-100), la temperatura de esta corriente a la entrada del evaporador es de 174,6 °C. El evaporador está conformado por dos módulos de Hysys, un “Enfriador” (E-100) y un “Separador flash” (Eva-100), el vapor se conden-

sa en E-100 y el calor liberado pasa a través de la corriente energética “Evap” al Separador, donde se separa el aceite por el fondo y los vapores de nafta por el tope. En los vapores de nafta puede asumirse que no sale aceite (menos del 0,07 %), mientras que en el aceite (Aceite Salida) sale más del 80 % en nafta, por lo que se emplea un módulo de separación (X-100) para separar el resto de nafta contenida en el aceite, generándose una corriente (Aceite) compuesta por solo aceite de cachaza. Por otra parte los vapores de nafta son pasados por una batería de intercambiadores de tubo y concha para primero condensar los vapores en E-101, y luego enfriarlos hasta 25°C para su almacenamiento y recirculación al proceso, mediante E-102 y E-103. Este software tiene una herramienta muy potente que permite recircular corrientes en el proceso, este módulo tiene como nombre “Recycle” (Reciclo) y realiza los cálculos mediante prueba y error, hasta que los valores de la corriente que entra a él sean iguales a los que salen, en nuestro sistema se emplea este módulo para recircular la nafta luego de ser evaporada y enfriada (RCY-1), y además para recircular el etanol en exceso recobrado en la columna de destilación (RCY-2). La cantidad de nafta de reposición calculada es de 208,1 kg/h y la cantidad de etanol a reponer es de 1,726 kg/h. En el módulo MIX-103, se mezclan las corrientes de etanol recirculado y el etanol que es necesario reponer, luego esta corriente de etanol se mezcla con el catalizador básico NaOH; los módulos SET-2 y SET-3, se emplean para fijar las cantidades de etanol y de NaOH que entrarán al reactor de acuerdo a la cantidad de aceite de cachaza que se obtenga. Las relaciones de NaOH/aceite y etanol/aceite se fijaron por datos reportados en la bibliografía consultada, estos fueron: relación molar de NaOH/aceite = 0,01, y relación molar de etanol/aceite = 6. Antes de entrar al reactor los reactivos son mezclados en MIX-105 y entran al reactor (ERV-100) con un flujo de 31,87 Kg/h y una

temperatura de 103,5°C. Los productos de la reacción entran a la columna de destilación (T-100), para separar el alcohol que no reaccionó del biodiesel y los AAPM. La columna de destilación se simuló con el método riguroso para mezclas multicomponentes, pero antes se realizó una estimación inicial del número de platos, de la bandeja de alimentación y de la relación de reflujo, mediante un módulo de simulación de columnas de destilación simples por el método corto o “ShortCut”, empleando las ecuaciones de Fenske-Underwood-Gilliland para el cálculo de los parámetros anteriores, luego con los valores arrojados por el método corto se procede a simular la columna por un método riguroso. La columna de destilación tiene 5 platos teóricos, una relación de reflujo de 2, lo que asegura una buena separación de los componentes en la columna, en el destilado se logra recuperar el 99 % del etanol, y no presenta trazas de biodiesel, mientras que en el fondo de la columna los productos de la reacción (Biodiesel y AAPM) presentan un 0,22 % masa de etanol y un 0,35 % masa de agua. Finalmente se emplea un separador o “Splitter” para simular la separación de los AAPM y el Biodiesel, se obtiene un flujo de 10,89 kg/h de Biodiesel, con una composición másica de 99,1 % de Biodiesel, 0,5 % de etanol, 0,25 % de aceite y 0,15 % de NaOH, mientras que se obtienen 14,46 Kg/h de AAPM con 99,4 % de alcoholes grasos y 0,6 de agua. La simulación da un combustible (Biodiesel) con especificaciones muy cercanas a las de la ASTM (99,6 % de pureza), aunque se pudiera valorar la posibilidad de incorporar una operación neutralización del NaOH, para acercar la pureza del biodiesel a la especificada.

Todos los equipos en el diagrama trabajan a presión atmosférica, y los coeficientes de los parámetros de interacción desconocidos por Hysys, fueron estimados usando el modelo de UNIFAC equilibrio vapor-líquido (VLE).

Conclusiones

1. Resulta muy atractivo utilizar el aceite presente en la cachaza para la producción de biodiesel, debido a que esta constituye un residuo de la industria azucarera, a su gran disponibilidad, y al bajo costo de esta fuente de materias primas; el empleo de esta materia prima permite la obtención de un coproducto de alto valor agregado: los alcoholes de alto peso molecular. Además el empleo del alcohol etílico extrafino en la reacción presenta varias ventajas como son la utilización de otro recurso renovable, las diferentes propiedades que le confiere al biodiesel, la alta toxicidad del metanol y el menor costo del etanol frente al metanol.
2. El proceso de extracción del aceite cuando se lleva a cabo en dos etapas, permite un ahorro de solvente, así como ventajas desde el punto de vista energético.
3. Para la conversión del aceite de cachaza a biodiesel es posible emplear el método de catálisis básica, debido a que la materia prima no tiene un porcentaje elevado de ácidos grasos libres y se puede utilizar este método sin mayores dificultades y logrando valores adecuados de conversión.
4. Se demuestra que es posible obtener la misma cantidad de biodiesel trabajando con menos materia prima inicial, al mejorar los resultados obtenidos en el laboratorio. A partir de tratar 2 toneladas de cachaza diarias se producen 96 L de biodiesel y 116 Kg de alcoholes grasos.
5. La simulación con el software profesional Hysys, permitió evaluar varias alternativas con el fin de seleccionar la más factible económica y energéticamente, escogiéndose la que menores consumos de utilidades y menor costo de operación anual presentó: un condensador de nafta con precalentamiento de la alimentación al evaporador y dos enfriadores de nafta.
6. Mediante la simulación del proceso se obtuvieron los resultados de los balances de masa y energía, así como el diseño de algunos equipos del mismo.

7. Es posible la obtención de un biocombustible alternativo de forma sostenible, económicamente factible y ambientalmente compatible; sin comprometer la producción de alimentos ni de cultivos para los mismos, reutilizando un residuo de la industria azucarera.

Nomenclatura

Mezclador de nafta recirculada y nafta de reposición al proceso; MIX-102: Mezclador de la nafta que sale del evaporador y la que sale del separador; MIX-103: Mezclador de etanol recirculado y el etanol de reposición; MIX-104: Mezclador de NaOH y etanol; MIX-105: Mezclador del aceite y el etanol más el catalizador para la entrada del reactor; E-100: Condensador del vapor saturado a la entrada del evaporador de nafta (parte del módulo evaporador); E-101: Condensador de los vapores de nafta y precalentador de la alimentación al evaporador (tubo y concha); E-102 y E-103: Enfriadores de nafta con agua (tubo y concha); E-104: Enfriador de los productos del fondo de la columna de destilación; ERV-100: Reactor de equilibrio para la transesterificación; Eva-100: Evaporador de nafta; X-100: Separador de la nafta remanente en el aceite a la salida del evaporado; X-101: separador del Biodiesel y los AAPM; T-100: Columna de destilación para la separación del etanol que no reaccionó; RCY-1 y RCY-2: Módulos dedicados a realizar la operación de reciclaje en el proceso productivo; SET-1, SET-2 y SET-3: Módulos dedicados a fijar condiciones de ciertas corrientes de acuerdo a las condiciones de otras corrientes.

Bibliografía

1. Wenzel, B., Tait, M. y Kroumov, A. *Modelling Chemical Kinetics of Soybean Oil Transesterification Process for Biodiesel Production: An Analysis of Molar Ratio between Alcohol and Soybean Oil Temperature Changes on the Process Conversion Rate*, en *Bioautomation*, 5, 2006, 13-22.
2. Ley, N. *Contribución a los métodos de asimilar tecnologías, aplicado a un caso de producción de biocombustibles*, Tesis Doctoral, Santa Clara, Dpto de Ing. Química, UCLV, 2006.
3. VERA, M., *Proceso de extracción de fitoesteroles*

-
- y alcoholes de alto peso molecular a partir de la fracción aceite y la cachaza de la caña de azúcar, Facultad de Química - Farmacia, UCLV, 1999.
4. Villanueva, G., *Estudio de la obtención de la cera de cachaza y su caracterización*, Centro de Análisis de Procesos, UCLV, 2000.
 5. Martínez, M., *Utilización de aceites Vegetales usados para la Obtención de biodiesel*, Laboratorio de Procesos Químicos y Bioquímicos Integrados, Universidad Complutense de Madrid, 2003.
 6. Knothe, G., Dunn, R. y Bagby, M., "Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels" en *Bioresource Technology*, 59, 2002, 1-16.
 7. Brewster, R. Q. y McEwen, W. E., *Química orgánica*, Editorial Médico Quirúrgica, Buenos Aires, 1963.
 8. Fukuda, H., Kondo, A. y Noda, H., *Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils. Review*, en *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92, 2001, págs. 405-416.
 9. Canoira, L., Alcántara, R., y Carrasco, J., Biodiesel from Jojoba oil-wax: Transesterification with methanol and properties as a fuel" en *Biomass and Bioenergy*, 30, 76-81, 2006.
 10. Marchetti, J., Miguel, V. y Errazu, A., *Possible methods for biodiesel production*, en *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 2007, 1300-1311.
 11. Bouaid, A., Martínez, M. y Aracil, J., *A comparative study of the production of ethyl esters from vegetable oils as a biodiesel fuel optimization by factorial design*, en *Chemical Engineering Journal*, 134, 2007, 93-99.
 12. Meher, L., Vidya, D. y Naik, S., *Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review*, en *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, 2004, págs. 248-268.
 13. Villanueva, G., *Aspectos fundamentales acerca de las operaciones de extracción*, Centro de Análisis de Procesos, UCLV, 1991.
 14. Zhang, Y., Dube, M. A., McLean, D. D. y Kates, M., *Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment*, en *Bioresource Technology*, 89, 2003, págs. 1-16.
 15. Hyprotech Ltd. HYSYS.PLANT 2.2 documentation.
 16. Software Hysys v. 3.2. 2000.