

# Obtención de biodiesel a partir de aceite desechado de frituras

Elías Abularach Asbún, David Amurrio Derpic

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana San Pablo, calle M. Marquez s/n esq. Parque J. Trigo, Tupuraya, Cochabamba

e-mail: eliasabularach@gmail.com

## Resumen

El complejo tratamiento que se realiza a los aceites para poder descartarlos sin que afecten al medio ambiente, la capacidad productiva de etanol que tiene Bolivia y la búsqueda de alternativas para controlar el calentamiento global son tres razones por las que el presente trabajo determinó las condiciones más adecuadas para la producción experimental de biodiesel utilizando aceite desechado de frituras y etanol. Este objetivo se alcanzó probando tres procedimientos: la transesterificación, la esterificación ácido-básica y la desacidificación directa del aceite. Luego se analizó el rendimiento energético por medio de un balance de energía. También se realizó una evaluación de costos y una estimación de la cantidad de aceite desechado (7.390 L/mes). Las pruebas realizadas mostraron que el mejor procedimiento fue la esterificación ácido-básica porque presentó una viscosidad de 8,92 mm<sup>2</sup>/s muy similar a la del biodiesel (7,50 mm<sup>2</sup>/s). El balance de energía generó un valor de relación de output/input de 6,00, lo que indica que es un combustible renovable y energéticamente viable. En la parte de los costos experimentales, se determinó un precio de 4,75 Bs/L que es superior al costo del diesel boliviano (3,72 Bs/L) pero inferior al costo internacional. De manera que, si Bolivia produce biodiesel, podría ahorrar 18 millones de dólares (que equivale al 8,6% del costo destinado para la importación).

Palabras clave: Biodiesel, aceites desechados, etanol, metanol, ácidos grasos libres, esterificación, transesterificación, balance de energía, input y output

## 1 Introducción

La obtención de combustibles a partir de diferentes tipos de biomasa, y en especial aquellos de cultivos, han sido explorados por mucho tiempo. En los últimos años la atención a estos productos, principalmente los biocombustibles, ha aumentado notablemente debido a varios factores, como las alzas y la inestabilidad en el precio de los hidrocarburos y la esperanza de reducir los impactos ambientales del cambio climático, que obligan a buscar fuentes alternativas de energía [6].

El presente trabajo se enfocará en el biodiesel que se define como un biocombustible líquido obtenido a partir de aceites vegetales, grasas animales o aceites desechados de frituras, por medio del proceso de transesterificación. La colza, el girasol y la soya son las materias primas más utilizadas [8].

La aplicación principal del biodiesel es como combustible para motores de vehículos a diesel. El biodiesel puede usarse puro o mezclado en diferentes proporciones con el diesel, debido a que sus propiedades son muy similares [6].

Además, ayuda con el cumplimiento del Protocolo de Kyoto debido a que las emisiones de dióxido de carbono se reducen casi en su totalidad porque existe un ciclo cerrado con el cultivo. Sus emisiones contaminantes son en promedio un 50% inferiores a las del diesel tradicional, y de esta manera se disminuye el impacto sobre el cambio climático que es considerado una de las amenazas más serias para el medio ambiente por los efectos nocivos en la salud pública, las cosechas, la pesca, los suelos y el aire. Es decir, el medio ambiente en su conjunto e indirectamente las infraestructuras humanas [10].

Actualmente, los aceites desechados de frituras son fácilmente recuperables en el departamento de Cochabamba y llegan a 7.380 L/mes (dato basado en las encuestas que se realizaron en los 9 establecimientos más grandes). Estos aceites provocan un problema en su disposición final, ya que, si se los vierte al alcantarillado, generan problemas en el tratamiento de los desechos líquidos domésticos y si se los vierte libremente, afectan al ambiente. Sin embargo existe una forma de utilizarlos y revalorarlos, y es que se realice la producción de biodiesel.

Por otro lado, en Bolivia se produce etanol y no así metanol (insumo principal para la producción de biodiesel), por lo que es una idea interesante realizar pruebas con etanol para ver si se logra producir biodiesel. Además, el etanol es menos tóxico que el metanol.

Por último, nuestro país no abastece la demanda nacional con su propio diesel. Por lo que la importación (cerca del 34% de la demanda nacional de diesel) de este combustible es un aspecto importante en el país y la producción de biodiesel sería una interesante alternativa a dicha escasez [7]. Además, podría ayudar a reducir la contaminación atmosférica por el material particulado en la ciudad de Cochabamba y a mitigar el calentamiento global.

Por estas razones, el presente trabajo tiene por objetivo determinar las condiciones más adecuadas para la producción de biodiesel utilizando aceite desechado de frituras, evaluar si es un combustible renovable mediante un balance energético de su ciclo de vida y analizar su viabilidad mediante un análisis de costos.

## 2 Metodología

### 2.1 Acondicionamientos de la materia prima y los insumos

Para el acondicionamiento del aceite desechado (materia prima) se realizó las operaciones de filtrado, desgomado y secado.

La operación de filtrado es necesaria debido a que los aceites desechados de frituras contienen inicialmente sólidos suspendidos. Dicha operación se realizó a temperatura ambiente y se utilizó tres tamices de 200 $\mu\text{m}$ , 180 $\mu\text{m}$  y 75 $\mu\text{m}$ , que se ordenaron de mayor a menor tamaño para formar un filtro.

El desgomado tiene por objetivo eliminar sustancias coagulables y separables por hidratación, que son descartadas en forma de una masa gomosa. Estas gomas tales como sales, minerales, proteínas, fosfatos y otros, son la parte que corresponde a la fracción no glicerina de los aceites. Es por esta razón que se emplea agua (de preferencia destilada) en una proporción del 20% del volumen inicial del aceite para la extracción de dichos compuestos.

Por último, se realizó el secado donde se eliminó el agua captada por el aceite por medio de la elevación de la temperatura entre 90 y 100°C a 0,75 atmósferas, por 15 minutos.

Otro requisito importante para producir biodiesel es que el alcohol (insumo) se encuentre con una pureza del 99,5% o mayor, prácticamente libre de agua, para disminuir la posibilidad de formación de jabón. En el caso del metanol se realizó una destilación fraccionada a partir de un alcohol de grado técnico del 70% de pureza. En el caso del etanol, primero se realizó una destilación fraccionada a partir de un alcohol comercial para disminuir el contenido de agua en el alcohol y obtener un 96% de pureza. Después de esta destilación se utilizó un método de secado con óxido de calcio (CaO) donde se agregó 250 g de CaO por litro de etanol y se dejó en reflujo por 6 horas para tener mayor contacto alcohol-óxido de calcio. Finalmente, se procedió a realizar una nueva destilación fraccionada para obtener un etanol de 99,6% de pureza.

### 2.2 Búsqueda de las condiciones óptimas y producción del biodiesel

El aceite, debidamente filtrado, desgomado y secado fue enseguida sometido a una valoración de sus ácidos grasos libres con el propósito de identificar el procedimiento más adecuado para la transformación en biodiesel.

La técnica empleada consistió en diluir una muestra de 1 ml de aceite en 10 ml de alcohol isopropílico y titular con una solución de hidróxido de potasio 0,01 M utilizando fenolftaleína como indicador. El título se detectó cuando la solución cambió a color rosado permanente.

Teniendo la fracción de ácidos grasos libres, se consideró tres procedimientos: la transesterificación directa, la esterificación ácida-básica y la desacidificación directa.

### 2.2.1 Primer proceso: la transesterificación directa

La idea central en este proceso es que una cantidad catalítica de hidróxido puede favorecer la reacción de transesterificación del aceite. Operativamente consistió en preparar una solución diluida de hidróxido en etanol (preveviendo una relación de etanol - aceite de 4:1). La solución se mezcló con el aceite y se elevó la temperatura a 68°C durante una hora bajo agitación comprendida entre 500 y 600 rpm. Luego de dejar decantar por 12 horas para separar el biodiesel y la glicerina, se procedió a la recuperación de etanol y al lavado del biodiesel.

### 2.2.2 Segundo proceso: la esterificación acida-básica

Este proceso consistió en 2 etapas. La primera fue una etapa ácida en la cuál los ácidos libres son esterificados por el etanol. La segunda etapa aprovechó las propiedades catalíticas del hidróxido para realizar la transesterificación del aceite.

En la primera etapa o etapa ácida se calentó el aceite hasta 65°C y se agregó 40 % del etanol total a utilizarse. La agitación se mantuvo entre 500 y 600 rpm y al cabo de cinco minutos se agregó ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) con 95% de pureza en relación de 1 ml por litro de aceite a procesar. Al finalizar una hora de reacción, se apagó el calentamiento pero se mantuvo la agitación por una hora más. Después de 8 horas de decantación, se efectuó la segunda etapa o etapa básica donde primero se diluyó el hidróxido con el 60% del etanol que no se utilizó en la primera etapa. El reactor se mantuvo bajo agitación entre 500 y 600 rpm a 68°C por 2 horas y luego de dejar reposar por 12 horas adicionales, se decantó el jabón y la glicerina formados

### 2.2.3 Tercer proceso: la desacidificación directa

La idea central consiste en eliminar los ácidos grasos libres bajo forma de jabón y luego proceder a una transesterificación catalizada por hidróxidos con el aceite restante. Operativamente el proceso consistió en preparar una solución de hidróxido (según la cantidad que indicó la valoración de ácidos grasos libres) con agua destilada (7,3 veces la cantidad de hidróxido) y se agitó hasta que el hidróxido se disolvió por completo en el agua destilada. La solución se mezcló con el aceite a temperatura ambiente y luego se dejó reposar por 12 horas para que el jabón formado con los ácidos grasos libres, decante. Después, se procedió a la producción de biodiesel como si fuera una transesterificación alcalina con el aceite que quedó en la parte superior (aceite desacidificado).

Para encontrar las condiciones óptimas para la transesterificación alcalina con hidróxidos se realizaron pruebas con 50 ml de aceite acondicionado y se alternó entre el hidróxido de sodio (NaOH) y el hidróxido de potasio (KOH) bajo las condiciones establecidas en la tabla 1.

**Tabla 1.** Condiciones para los ensayos a realizarse en la transesterificación alcalina.

Condición a determinar	Ensayos realizados		Parámetro de referencia
<b>Tipo y concentración del catalizador</b>	NaOH	Concentraciones de 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,2; 1,5 y 1,7 M.	Estabilidad de las fases y la ausencia de jabón
	KOH	Concentraciones de 0,5; 0,6 y 0,7 M	
<b>Tiempo de reacción</b>	20, 40, 60 y 90 minutos		Viscosidad y formación de glicerina
<b>Temperatura de reacción</b>	20, 40 y 68 °C		Viscosidad
<b>Relación alcohol/aceite</b>	4, 5, 6 y 9 mol/mol		Viscosidad

Para la esterificación ácida – básica se realizó pruebas con 50 ml de aceite acondicionado utilizando hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH) y las condiciones establecidas en la tabla 2.

**Tabla 2.** Condiciones para los ensayos a realizarse en la esterificación ácida – básica.

Condición a determinar	Ensayos realizados		Parámetro de referencia
<b>Tipo y concentración del catalizador</b>	NaOH	Concentraciones de 0,8; 1 y 1,2 M	Estabilidad de las fases y la ausencia de jabón
	KOH	Concentraciones de 0,8; 1 y 1,2 M	
<b>Tiempo de reacción</b>	Ver tabla 3		Viscosidad y formación de glicerina
<b>Temperatura de reacción</b>	20, 40 y 68 °C		Viscosidad
<b>Relación alcohol/aceite</b>	4, 5, 6 y 9 mol/mol		Viscosidad

**Tabla 3.** Condiciones de tiempo de reacción para determinar el tiempo óptimo

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
<b>Etapá ácida</b>	--- h ---	--- h ---	--- h ---
<b>Temperatura de 68°C</b>	1,5	2,0	2,0
<b>Temperatura ambiente (20°C)</b>	1,0	1,0	0,5
<b>Etapá básica</b>	2,0	3,0	2,5

Por último, para la desacidificación directa con hidróxido se realizaron ensayos para determinar la eficiencia. En caso de obtener un valor mayor a 90% se empezaría con las pruebas que se indican en la tabla 1, sino sólo serviría como referencia para comparar con los otros procedimientos la calidad del producto obtenido y los valores del balance de energía.

Una vez establecidas las condiciones óptimas del procedimiento para la producción de biodiesel con etanol, se realizó una comparación entre la producción de biodiesel con etanol y metanol. Para la producción de biodiesel con metanol se utilizó la transesterificación por catalizador básico propuesta por Knothe [8] y para aquel con etanol se utilizó el mejor procedimiento encontrado.

Finalmente, para ambos casos se determinó la viscosidad (la cual sería el parámetro de conversión de aceite en biodiesel) con un viscosímetro de tipo bola descendiente. Se obtuvo la densidad con ayuda del picnómetro y el poder calorífico se cuantificó con la bomba calorimétrica, con el objetivo de verificar el producto que se había obtenido.

#### Análisis de resultados

Para el balance de energía [4] se hizo un recuento de todos los flujos de energía en la producción del biodiesel, incluyendo los costos energéticos de producción de los insumos y su transporte. Por tratarse de aceite desechado, no se consideró el costo energético requerido para la producción del aceite, pero sí se consideró el costo energético relacionado con la eliminación de los aceites usados.

El cálculo de la energía total que el combustible produjo fue determinado experimentalmente en una bomba calorimétrica y determinada según la ecuación [1]:

$$\sum m_e \cdot H_e + q = \sum m_s \cdot H_s \quad [\text{Ecuación 1}]$$

La relación de energía  $r_e$  se calculó con la ecuación [2]:

$$r_e = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{\sum m_s \cdot H_s}{\sum m_e \cdot H_e} \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Los flujos que se tomaron en cuenta son:

- Como salida (output), está la energía producida por el biocombustible (su poder calorífico, es decir, su calor de reacción) y la energía economizada del tratamiento que se realiza al aceite desechado.
- Para los flujos de input se hizo una revisión bibliográfica considerando la energía del gas usado en la recolección del aceite, la energía del acondicionamiento de la materia prima, la energía de la agitación del reactor, la energía utilizada en la fabricación del alcohol y del catalizador, la energía del combustible utilizado para mantener el reactor a una temperatura de reacción, la energía utilizada en la etapa de recuperación del alcohol, la energía utilizada en la etapa del lavado y la energía utilizada para la supervisión del proceso.

La cantidad de aceite desechado utilizado se cuantificó por medio de la ecuación [3]:

$$Q = k * Q_{utilizada} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde:

$Q$  = Cantidad de aceite desechado

$Q_{utilizada}$  = Cantidad de aceite utilizado

$k$  = Constante de recuperación de aceite con valores entre 0,78 y 0,75.

### 3 Resultados

#### 3.1 Acondicionamientos de la materia prima y los insumos

La cantidad filtrada fue de 13,11 kg de aceite y se logró recuperar 13,10 kg (99,92%). El contenido de sólidos fue de 10,40 g (0,08%). En el desgomado se descartó una emulsión que pesó 185,40 g (1,41%) de los 13,10 kg de aceite filtrado.

Las pérdidas en la operación de filtrado fueron de 96,10 g (0,75%) y la cantidad de aceite limpio y seco fue de 12,82 kg (97,77%). En total se determinó que el 2,24% fueron las pérdidas en las diversas operaciones de acondicionamiento.

La densidad del aceite desechado presentó un valor de 0,92 g/mL y la viscosidad, un valor promedio de 49,04 mm<sup>2</sup>/s.

En la destilación del metanol se trabajó a una temperatura de 57°C durante 3,5 horas. Al final de la destilación se recuperó 79 mL de metanol anhidro (99,99%) de los 114 ml con los que se trabajó. La eficiencia del proceso fue del 96,45%.

Para el caso del etanol se utilizó 500 mL de alcohol de grado técnico de 95% de pureza para la primera destilación. La temperatura de trabajo fue de 71° C por 2,5 horas. Al final de la destilación se recuperó 472 mL (94,4% de eficiencia) de etanol de 96% de pureza. Luego se agregó 125 g de óxido de calcio (CaO) y se colocó en un reflujo por un lapso de 6 horas con el objetivo de retirar el agua contenida por el azeotropo agua-alcohol. Por último, se realizó otra destilación donde se obtuvo 450 mL (90% de eficiencia) de etanol con el 99,6% de pureza.

#### 3.2 Búsqueda de las condiciones óptimas y producción del biodiesel

Según Pelly [11], para tratar un aceite por transesterificación, éste debe presentar un valor de pH mayor o igual 2,6 en la valoración de ácidos grasos libres (AGL). Caso contrario, se debería utilizar una esterificación ácida – básica para la obtención de biodiesel. El pH del aceite desechado por medio de la valoración de AGL presentó un resultado de 2,32.

### 3.2.1 Transesterificación directa.

Como el valor del pH se encontraba cerca al 2,6 se probó la transesterificación con hidróxido, donde primero se buscó la concentración óptima del catalizador con hidróxido de sodio (NaOH). Los valores de 0,5 a 1 M mostraron coágulos gelatinosos al finalizar el proceso y los valores de 1,2 a 1,7M presentaron formación de jabón sólido. Entonces, se dedujo que el NaOH no era un buen catalizador para realizar una transesterificación con etanol y por esta razón se cambió el catalizador por hidróxido de potasio (KOH).

Las pruebas con KOH no mostraron formación de coágulos en ninguna de las concentraciones, pero sí presentaron una pequeña producción de glicerina que era insignificante. Sin embargo, el producto era jabón líquido y no biodiesel. Por ende, se encontró que este catalizador sirve para la transesterificación en caso de utilizar etanol.

### 3.2.2 Esterificación ácida-básica

Debido a la formación de jabón se descartó la transesterificación y se empezó con una esterificación ácida-básica de relación alcohol/aceite de 4 y con las condiciones indicadas anteriormente. Al final del proceso se apreció una separación de tres fases.

Se midió la viscosidad de la fase superior y de la fase central. No se midió la viscosidad de la fase inferior (un volumen de 18 mL) debido a que se comprobó que era jabón formado por la presencia de ácidos grasos libres del aceite.

La fase superior tenía un volumen de 15 mL; después de la recuperación del alcohol, quedó en 8 ml, y presentó una viscosidad de 25,03 mm<sup>2</sup>/s que indicó que no era biodiesel. La fase central tenía un volumen de 47 ml y dio una viscosidad de 39,46 mm<sup>2</sup>/s que más parecía ser aceite y no biodiesel.

Ya que la esterificación consiguió disminuir la viscosidad, no presentaba formación de coágulos y la separación de las fases fue fácil, se llevó a cabo pruebas de variación de temperatura, tiempo de reacción y relación alcohol – aceite. Además se realizó una prueba con hidróxido de sodio para ver si funcionaría con este nuevo procedimiento.

En la prueba de catalizador, para el caso del KOH se formaron tres fases (dos aceitosas y una de jabón). Las fases se recuperaban fácilmente y tenían un pH entre 6 y 7. La fase superior tenía un volumen de 21 mL, la fase central 41 mL y la inferior 18 mL(sin recuperar el alcohol).

Para el caso del NaOH se formaron dos fases, presentaban un pH de 7 pero no eran fáciles de recuperar, porque al realizar un movimiento o al querer vaciarlas a otro envase, estas se empezaban a mezclar.

Por tanto, el KOH es el catalizador alcalino que muestra mejores resultados cuando se utiliza etanol en la producción de biodiesel.

Luego, se realizó el ensayo para determinar la concentración óptima del catalizador. Se probaron concentraciones de 0,8; 1,0 y 1,2 M, donde la concentración que mejor

neutralizó la solución ácida fue de 1,2 M (pH entre 6 y 7). La concentración de 1 M tenía un pH de 4 y en su fase jabonosa se formaban pequeñas estructuras que atraparon el biodiesel.

Para los ensayos de determinación de la temperatura de reacción, se hicieron pruebas con las temperaturas de 20 (temperatura ambiente), 40 y 68 °C.

En el ensayo a temperatura ambiente de 20°C se observó la presencia de dos fases. La solución tenía un pH de 7 y las fases se recuperaban fácilmente. La fase superior presentó una viscosidad de 17,93 mm<sup>2</sup>/s. Después de dos semanas de sedimentación, la muestra a temperatura ambiente presentó glicerina y jabón en la fase inferior. La nueva viscosidad de la fase superior era de 14,19 mm<sup>2</sup>/s.

El ensayo a temperatura de 40°C mostró la formación de tres fases que eran fáciles de recuperar pero existía mucha pérdida debido a que la fase central y jabonosa presentaba formación de estructuras lo que la volvía más voluminosa.

Sin embargo, en el ensayo a 68°C se formaron tres fases. La fase superior de 8 ml de volumen, una intermedia de 64 ml y una inferior (jabonosa) de 8 ml (sin recuperación del alcohol). Las viscosidades de la fase superior e intermedia fueron de 4,49 mm<sup>2</sup>/s y 20,54 mm<sup>2</sup>/s respectivamente. Las fases se podían recuperar fácilmente y el pH era de 6 a 7.

En los ensayos de tiempo de reacción, se tomó en cuenta la tercera fase (jabonosa) para determinar cual ensayo era mejor, debido a que en esta fase se encontraba también la glicerina, y en teoría, si se deja reaccionar más tiempo, existe mayor formación de glicerina.

El ensayo 1 a 68 °C, presentó tres fases y tenía un pH de 7. La fase jabonosa era de 8 ml, próximo al valor teórico de glicerina el cual es 4,5 mL. Los resultados más aceptables se encontraron en los ensayos 2 y 3, porque existió una tercera fase más compacta en relación a la del ensayo 1 y tenía un volumen de 6,5 mL. Pero el ensayo 3 a 20°C, mostró el mejor resultado, debido a que presentó una tercera fase donde la glicerina tenía un volumen de 2,5 mL y se separó de la fase jabonosa.

Luego se realizó ensayos de búsqueda de la relación alcohol/aceite. En las relaciones de 6 y 9 no existió formación de glicerina o jabón. La relación de 4 se realizó en el primer ensayo donde se formaron estructuras que atrapaban el biodiesel y con la relación de 5 se determinó una viscosidad de 22,99 mm<sup>2</sup>/s y se obtuvo un poco de jabón y glicerina. Por estos resultados se pudo afirmar que la mejor relación era la de 5.

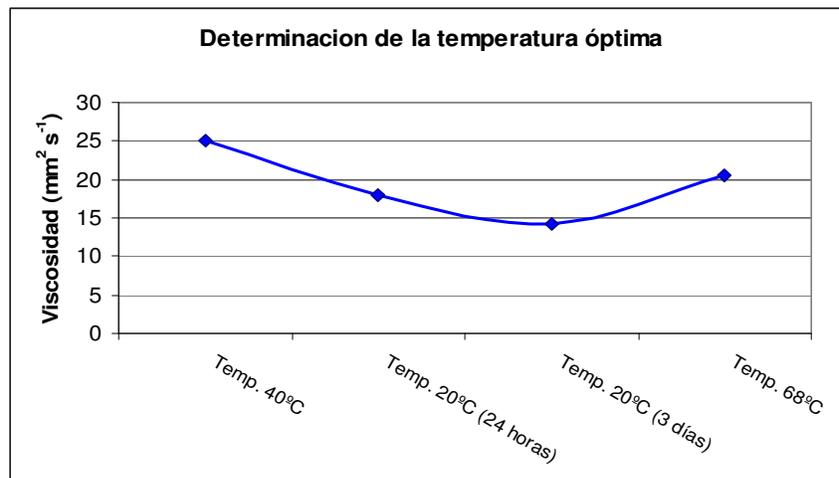
Por otro lado, las relaciones 6 y 9 presentaron dos fases, una fase superior y otra inferior. Los valores de la viscosidad en la fase superior eran de 4,86 mm<sup>2</sup>/s y 4,24 mm<sup>2</sup>/s pero era muy alcohólica. Los datos de viscosidad de la fase inferior fueron de 35,89 mm<sup>2</sup>/s y 33,95 mm<sup>2</sup>/s.

Finalmente, se realizó ensayos con las condiciones óptimas halladas y después de 3 días de decantación, la viscosidad promedio fue de 8,92 mm<sup>2</sup>/s con una densidad promedio de 0,881 g/mL y un poder calorífico de 29.786,9 kJ/kg. La explicación del

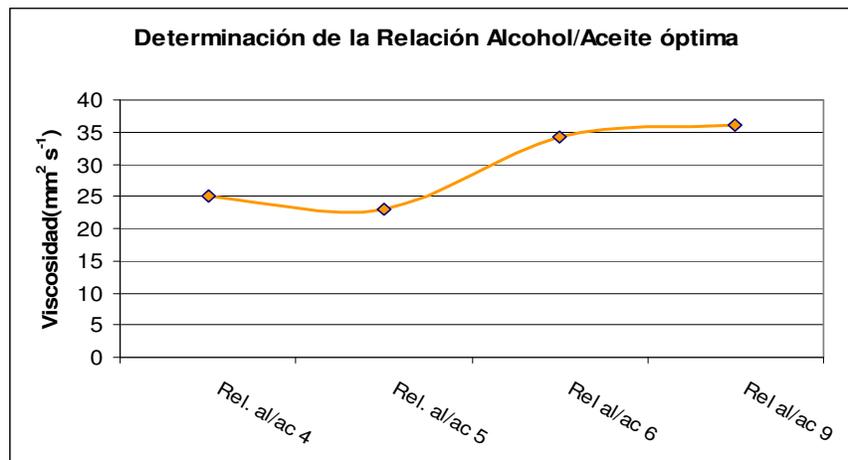
valor elevado de la viscosidad es por la presencia de hidróxidos en las cadenas de esteres (biodiesel).

Para tener una visión global de los resultados de la esterificación, se presenta la figura 1, donde se muestra los valores promedio de viscosidad determinados en los ensayos, y el valor de la viscosidad con los puntos óptimos elegidos.

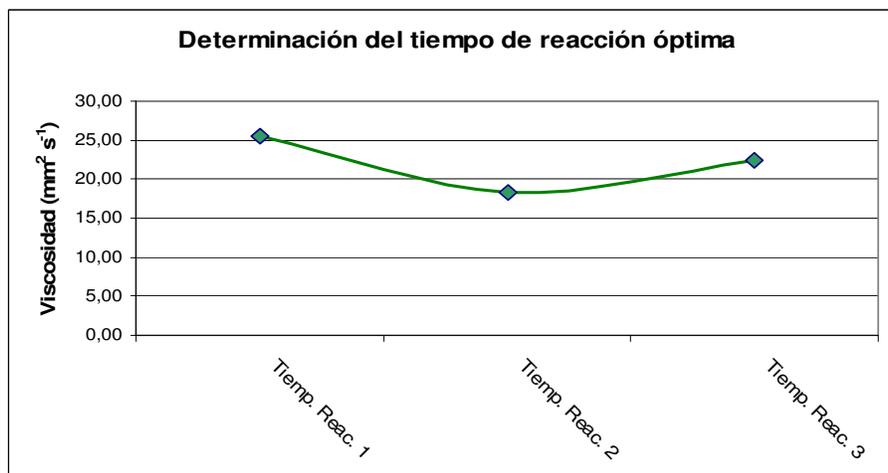
Debido a que no se obtuvo un valor de viscosidad (nuestro parámetro de conversión) del biodiesel dentro de rango ( $1,9 - 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) se intentó el último procedimiento que es el de la desacidificación directa con hidróxido.



**Figura 1:** Se muestran las viscosidades promedio obtenidas en los ensayos de temperatura establecidos en la tabla 2, donde el punto óptimo es la inflexión en la curva.



**Figura 2:** Se muestran las viscosidades promedio obtenidas en los ensayos de relación alcohol/aceite establecidos en la tabla 2, donde el punto óptimo es la relación al/ac 5.



**Figura 3:** Se muestran las viscosidades promedio obtenidas en los ensayos de tiempo óptimo de reacción establecidos en la tabla 3, donde el punto óptimo es la inflexión en la curva.

### 3.2.3 Desacidificación directa

En la primera etapa se obtuvo un rendimiento del 77,5% debido a que se eliminó 18 ml de jabón de los 80 ml de aceite con los que se trabajó.

En la producción de biodiesel, se trabajó con 62 mL de aceite (aceite recuperado de la primera parte), donde se determinó que existían dos fases, una inferior con glicerina (aproximadamente 1,5 mL de glicerina) y una superior de 62 mL de volumen que parecía ser biodiesel.

Entonces, se recuperó el alcohol, donde se obtuvo 10 mL de etanol y 52 mL de biodiesel, con un rendimiento del 83,8% y el rendimiento global del proceso fue del 80,6%. La viscosidad de la fase superior fue de 12,66 mm<sup>2</sup>/s, la densidad de 0,874 g/ml y un poder calorífico de 28.572,92 kJ/kg. También se preparó biodiesel con metanol para fines de comparación. Los valores brutos obtenidos en la elaboración de biodiesel con metanol fueron de 16 mL de glicerina y 109 mL de biodiesel. Para la recuperación del metanol, se instaló un sistema de destilado. De la fase de glicerina se consiguió en promedio 4,6 mL de metanol y 11,4 mL de la glicerina. La glicerina teórica era de 12,33 mL. Esto significa un rendimiento promedio del 92,45% y de la fase de esteres se obtuvo en promedio 4,4 mL de metanol y 104,6 mL de biodiesel sin lavar. En total se obtuvo 9 mL de metanol recuperado de los 12,5 mL teóricos, lo que significa un rendimiento de recuperación global del 72%.

Por último, se realizó el lavado del biodiesel con 20 mL de agua destilada. Al final del lavado, se obtuvo una pérdida en promedio de 4,6 mL (emulsión que fue retirada con el agua de lavado) y 100,1 mL de biodiesel. Si en teoría se debería producir 103,8 mL de biodiesel, el rendimiento promedio del proceso fue del 96,43%. Entre las propiedades del biodiesel producido con metanol se determinó una densidad de 0,8993 g/mL a 15°C, la viscosidad con un valor promedio de 5,72 mm<sup>2</sup>/s a 40° C y el poder calorífico con un valor de 34.090,6 kJ/kg.

#### 4 Análisis y discusión de resultados

La tabla 4 muestra los flujos de energía con sus respectivos costos energéticos que fueron detectados para el caso de la producción con metanol y, la tabla 5, la energía producida por el biodiesel y la energía usada en el tratamiento de los aceites desechados con metanol.

En las energías de entrada (input) que se muestran en la tabla 4, se tiene el transporte, que es el valor de la cantidad de energía que se utiliza para producir diesel basado en Pimentel [12] y la distancia fue determinada suponiendo una recolección de la materia prima de los locales que podrían proveer de aceite usado.

En el acondicionamiento se tiene la operación de filtrado, donde se tomó en cuenta la energía que un ser humano necesitaría para hacer dicha actividad. Según Guyton [5] sería un valor de 6.000 cal/día que es la energía que un ser humano gasta cuando realiza esfuerzos físicos. Del mismo autor, se consultó la energía de supervisión humana dando un valor de 2.000 cal/día en caso de que un ser humano tenga un trabajo casi sedentario. Estos valores se corroboraron con los valores de Pimentel [12].

Sheehan *et al.* [13] diferenciaron entre tener una energía eléctrica para la agitación y otra para calentar el reactor, así que el valor para la agitación era de 1.040,04 kJ/h y para calentar era de 1.440,00 kJ/h. Esta diferencia también se tomó en cuenta para este estudio, donde la energía de la operación de secado (en el acondicionamiento) y la energía para mantener el reactor a una cierta temperatura tomaron un valor de 1.440,00 kJ/h.

En cambio, para la operación de desgomado (en el acondicionamiento), al igual que el de agitación y el lavado en el proceso tomó un valor de 1.040,04 kJ/h y se consideró como si sólo fuera una máquina que proporcionaba agitación para que exista una buena mezcla.

La energía para producir un litro de metanol y un kilogramo de hidróxido de sodio se basaron en Pimentel [12] dando un valor de 680,00 kcal/l para el metanol y 2.810,00 kcal/kg para el hidróxido, valores que se corroboraron con Sheehan [13].

En la energía de salida (output), para el biodiesel se usó el valor de 34.090,60 kJ/kg que es el poder calorífico que se determinó en el laboratorio y para la energía que costaría tratar el aceite desechado con bioreactores se tomó un valor de 1440,00 kJ/h basado en García [3].

La energía neta que el biodiesel entrega es de 33.008,80 kJ que es la diferencia entre el output y el input (ver expresión 1 en la metodología) y la relación de energía es de 7,11 (ver expresión 2 en la metodología). Según Donato [1] este valor es real, debido a que no se ha considerado la energía (input) de la producción del cultivo porque la materia prima es el desecho de los restaurantes, pero los mismos autores establecieron que si se tomara en cuenta el cultivo, la relación de energía estaría entre 4 y 1,3.

**Tabla 4.** Energía utilizada para producir biodiesel con metanol

	Valor	Unidades	Input		Energía total	Tipo de energía
			Cantidad usada	Unidades		
					--- kJ --	
Transporte	0,83 <sup>1</sup>	kcal/km	35,00 <sup>a</sup>	km	-	Combustible
					121,55	
<b>ACONDICIONAMIENTO</b>						
Filtrado	6.000,00 <sup>2</sup>	cal/día	0,50 <sup>b</sup>	h	0,52	Humana
Desgomado	1.040,40 <sup>3</sup>	kJ/h	0,50 <sup>c</sup>	h	520,20	Eléctrica
Secado	1.440,00 <sup>4</sup>	kJ/h	1,00 <sup>d</sup>	h	1.440,00	Eléctrica
<b>PROCESO</b>						
Alcohol (metanol)	680,00 <sup>5</sup>	kcal/L	0,25 <sup>e</sup>	L	711,28	Proceso de producción
Catalizador (NaOH)	2.810,00 <sup>6</sup>	kcal/kg	3,50 <sup>f</sup>	g	41,15	Proceso de producción
Agitación	1.040,40 <sup>7</sup>	kJ/h	1,00 <sup>g</sup>	h	1.040,40	Eléctrica
Mantener el reactor a temperatura de 58 °C	1.440,00 <sup>8</sup>	kJ/h	1,00 <sup>h</sup>	h	1.440,00	Eléctrica
Lavado	1.040,40 <sup>9</sup>	kJ/h	0,08 <sup>i</sup>	h	86,70	Eléctrica
Supervisión humana	2.000,00 <sup>10</sup>	cal/día	10,00 <sup>j</sup>	h	0,35	Humana
<b>Total</b>					<b>5.402,15</b>	

<sup>1</sup> Pimentel y Patzek, 2005; <sup>2</sup> Guyton y Hall, 2006; <sup>3</sup> Sheehan, *et al.*, 2005; <sup>4</sup> Sheehan, *et al.*, 2005; <sup>5</sup> Pimentel y Patzek, 2005; <sup>6</sup> Pimentel y Patzek, 2005; <sup>7</sup> Sheehan, *et al.*, 2005; <sup>8</sup> Sheehan, *et al.*, 2005; <sup>9</sup> Sheehan, *et al.*, 2005 y <sup>10</sup> Guyton y Hall, 2006.

<sup>a</sup> Obtenido por estimación; <sup>b</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación y realizando el vertido por una persona; <sup>c</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación; <sup>d</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación; <sup>e</sup> Cantidad utilizada en el trabajo de investigación; <sup>f</sup> Cantidad utilizada en el trabajo de investigación; <sup>g</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación; <sup>h</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación; <sup>i</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación y <sup>j</sup> Suponiendo sólo el control de temperatura y tiempo.

**Tabla 5.** Energía generada por el biodiesel producido con metanol

			Output		Energía total	Tipo de energía
	Valor	Unidades	Cantidad usada	Unidades		
Biodiesel	34.090,00 <sup>11</sup>	kJ/kg	1,00 <sup>k</sup>	kg	34.090,60	Poder calorífico
Aceite usado	1440,00 <sup>12</sup>	kJ/h	3,00 <sup>l</sup>	h	4320,00	Energía del tratamiento
<b>Total</b>					<b>38.410,60</b>	

<sup>11</sup>Valor obtenido con la bomba calorimétrica, <sup>12</sup> Valor basado en Garcia y Garcia, 2006, <sup>k</sup>Producción suponiendo 1 kg y <sup>l</sup> suponiendo que se realiza un tratamiento con bioreactores.

La tabla 6 muestra los flujos de energía con sus respectivos costos energéticos que fueron detectados para el caso de la producción con etanol utilizando una esterificación ácida – básica. La tabla 7 presenta la energía producida por el biodiesel y la energía usada en el tratamiento de los aceites desechados.

Sólo se aclararán los costos de energía de los flujos de etanol y el hidróxido de potasio, debido a que los valores de los demás flujos ya se determinaron anteriormente. Para conseguir etanol 99,6% puro se necesitó 340,00 kcal/L (para producir un litro de etanol es necesario 331,00 kcal/L y convertir el etanol de 95,0% a 99,6% de pureza requiere de 9,0 kcal/L) y para producir un kilogramo de hidróxido de potasio es necesario 3.260,00 kcal/kg, ambos valores se basaron en Pimentel [12] y se confirmaron con los valores de Sheehan [13].

La energía neta que se obtuvo del biodiesel producido por esterificación con etanol fue de 28.415,98 kJ (diferencia entre el output y el input) y la relación de energía fue de 6,00. Este valor es menor en relación al valor con la producción de metanol por que se necesita mayores tiempos de reacción.

**Tabla 6.** Energía utilizada para producir biodiesel con etanol mediante el procedimiento de esterificación ácida - básica

	Input					Tipo de Energía
	Valor	Unidades	Cantidad usada	Unidades	Energía total	
					--- kJ ---	
Transporte	0,83 <sup>1</sup>	kcal/km	35,00 <sup>a</sup>	km	121,55	Combustible
<b>ACONDICIONAMIENTO</b>						
Filtrado	6.000,00 <sup>2</sup>	cal/día	0,50 <sup>b</sup>	h	0,52	Humana
Desgomado	1.040,40 <sup>3</sup>	kJ/h	0,50 <sup>c</sup>	h	520,20	Eléctrica
Secado	1.440,00 <sup>4</sup>	kJ/h	1,00 <sup>d</sup>	h	1.440,00	Eléctrica
<b>PROCESO</b>						
Alcohol (Etanol)	340,00 <sup>5</sup>	kcal/L	0,61 <sup>e</sup>	L	860,93	Proceso de producción
Catalizador (KOH)	3.260,00 <sup>6</sup>	kcal/kg	4,40 <sup>f</sup>	g	60,02	Proceso de producción
Agitación	1.040,40 <sup>7</sup>	kJ/h	3,00 <sup>g</sup>	h	3.121,20	Eléctrica
Mantener el reactor a temperatura ambiente	0,00 <sup>8</sup>	kJ/h	0,00 <sup>h</sup>	h	0,00	Eléctrica
Lavado	1.040,40 <sup>9</sup>	kJ/h	0,08 <sup>i</sup>	h	86,70	Eléctrica
Supervisión	2.000,00 <sup>10</sup>	cal/día	10,00 <sup>j</sup>	h	0,35	Humana
<b>Total</b>					<b>5.691,27</b>	

<sup>1</sup> Pimentel y Patzek, 2005; <sup>2</sup> Guyton y Hall, 2006; <sup>3</sup> Sheehan, *et al.*, 2005; <sup>4</sup> Sheehan, *et al.*, 2005; <sup>5</sup> Pimentel y Patzek, 2005 y tomando en cuenta la purificación hasta el 95,6%; <sup>6</sup> Pimentel y Patzek, 2005; <sup>7</sup> Sheehan, *et al.*, 2005; <sup>8</sup> Pelly, 2005; <sup>9</sup> Sheehan, *et al.*, 2005 y <sup>10</sup> Guyton y Hall, 2006.

<sup>a</sup> Obtenido por estimación; <sup>b</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación y realizando el vertido por una persona; <sup>c</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación; <sup>d</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación; <sup>e</sup> Cantidad utilizada en el trabajo de investigación; <sup>f</sup> Cantidad utilizada en el trabajo de investigación; <sup>g</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación; <sup>h</sup> No se necesitaba temperatura para la agitación; <sup>i</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación y <sup>j</sup> Suponiendo sólo el control de temperatura y tiempo.

**Tabla 7.** Energía generada por el biodiesel producido con etanol

	Output					Tipo de energía
	Valor	Unidades	Cantidad usada	Unidades	Energía total	
Biodiesel	29.786,90 <sup>11</sup>	kJ/kg	1,00 <sup>k</sup>	kg	29.786,90	Poder calorífico
Aceite usado	1440,00 <sup>12</sup>	kJ/h	3,00 <sup>l</sup>	h	4320,00	Energía del tratamiento
<b>Total</b>					<b>34.106,90</b>	

<sup>11</sup> Valor obtenido con la bomba calorimétrica, <sup>12</sup> Valor basado en Garcia y Garcia, 2006, <sup>k</sup> Producción suponiendo 1 kg y <sup>l</sup> suponiendo que se realiza un tratamiento con bioreactores.

La tabla 8 muestra los flujos de energía con sus respectivos costos energéticos que se detectaron para el caso de la producción con etanol si se usa una desacidificación y la tabla 9 presenta la energía producida por el biodiesel y la energía usada en el tratamiento de los aceites desechados.

**Tabla 8.** Energía utilizada para producir biodiesel con etanol mediante el procedimiento de desacidificación

	Input		Cantidad usada	Unidades	Energía total	Tipo de Energía
	Valor	Unidades				
Transporte	0,83 <sup>1</sup>	kcal/km	35,00 <sup>a</sup>	km	121,55	Combustible
<b>ACONDICIONAMIENTO</b>						
Filtrado	6.000,00 <sup>2</sup>	cal/día	0,50 <sup>b</sup>	h	0,52	Humana
Desgomado	1.040,40 <sup>3</sup>	kJ/h	0,50 <sup>c</sup>	h	520,20	Eléctrica
Secado	1.440,00 <sup>4</sup>	kJ/h	1,00 <sup>d</sup>	h	1.440,00	Eléctrica
<b>PROCESO</b>						
Alcohol (Etanol)	340,00 <sup>5</sup>	kcal/L	0,61 <sup>e</sup>	L	860,93	Proceso de producción
Catalizador (KOH)	3.260,00 <sup>6</sup>	kcal/kg	4,40 <sup>f</sup>	g	60,02	Proceso de producción
Agitación	1.040,40 <sup>7</sup>	kJ/h	1,00 <sup>g</sup>	h	1.040,40	Eléctrica
Mantener el reactor a temperatura de 68 °C	1.440,00 <sup>8</sup>	kJ/h	1,00 <sup>h</sup>	h	1.440,00	Eléctrica
Lavado	1.040,40 <sup>9</sup>	kJ/h	0,08 <sup>i</sup>	h	86,70	Eléctrica
Supervisión	2.000,00 <sup>10</sup>	cal/día	10,00 <sup>j</sup>	h	0,35	Humana
<b>Total</b>					<b>5.570,67</b>	

<sup>1</sup> Pimentel y Patzek, 2005; <sup>2</sup> Guyton y Hall, 2006; <sup>3</sup> Sheehan, *et al.*, 2005; <sup>4</sup> Sheehan, *et al.*, 2005; <sup>5</sup> Pimentel y Patzek, 2005 y tomando en cuenta la purificación hasta el 95,6%; <sup>6</sup> Pimentel y Patzek, 2005; <sup>7</sup> Sheehan, *et al.*, 2005; <sup>8</sup> Pelly, 2005; <sup>9</sup> Sheehan, *et al.*, 2005 y <sup>10</sup> Guyton y Hall, 2006.

<sup>a</sup> Obtenido por estimación; <sup>b</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación y realizando el vertido por una persona; <sup>c</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación; <sup>d</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación; <sup>e</sup> Cantidad utilizada en el trabajo de investigación; <sup>f</sup> Cantidad utilizada en el trabajo de investigación; <sup>g</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación; <sup>h</sup> No se necesitaba temperatura para la agitación; <sup>i</sup> Tiempo calculado según el trabajo de investigación y <sup>j</sup> Suponiendo solo el control de temperatura y tiempo.

Finalmente, la energía neta que se obtuvo del biodiesel producido por desacidificación con etanol fue de 27322,60 kJ (diferencia entre el output y el input) y la relación de energía es de 5,90.

El análisis de costos se realizó reescalando de nivel experimental a una producción de 1.000 litros. En la tabla 10 se encuentra el precio para producir biodiesel con metanol y en la tabla 11 aquel precio de producir biodiesel con etanol.

**Tabla 9.** Energía generada por el biodiesel producido con etanol

	Valor	Unidades	Output		Energía total	Tipo de energía
			Cantidad usada	Unidades		
Biodiesel	28.572,92 <sup>11</sup>	kJ/kg	1,00 <sup>k</sup>	kg	28.572,92	Poder calorífico
Aceite usado	1440,00 <sup>12</sup>	KJ/h	3,00 <sup>l</sup>	h	4320,00	Energía del tratamiento
<b>Total</b>					<b>32.572,92 kJ</b>	

<sup>11</sup>Valor obtenido con la bomba calorimétrica, <sup>12</sup> Valor basado en García y García, 2006, <sup>k</sup> Producción suponiendo 1 kg y <sup>l</sup> suponiendo que se realiza un tratamiento con bioreactores.

Los precios de los reactivos a grado técnico fueron: un barril de 160 L de etanol a 1.100 Bs, un barril de 160 L de metanol a 11.200 Bs, una bolsa de 52 kg de NaOH a 3.120 Bs y una bolsa de 52 kg de KOH a 4680 Bs. Estos precios se obtuvieron de dos empresas locales, siendo estos los mismos en ambas empresas. El precio del aceite se consiguió en el restaurante Frankffurt.

Por último, los precios de electricidad y agua se obtuvieron de la empresa ELFEC y SEMAPA, respectivamente, y el costo del gas natural vehicular se lo sacó de la página web de la superintendencia de hidrocarburos.

Al final, se determinó que a nivel experimental el costo de un litro de biodiesel producido con metanol es de 20,07 Bs/l y producido con etanol de 4,75 Bs/l. La principal diferencia se debe al costo de los alcoholes, ya que Bolivia produce etanol, es más barato mientras que el metanol es importado.

**Tabla 10.** Costo de producir biodiesel con metanol

Insumo	Cantidad	Unidades	Precio unitario	Cantidad usada	Unidades	Precio total
						-- Bs --
Metanol	1	L	70,00	0,25	L	17,64
NaOH	1	kg	60,00	3,50	g	0,21
Aceite	1	L	0,50	1,00	L	0,50
Costos de:						
Agua	1	m <sup>3</sup>	5,65	400,00	mL	0,23*
Electricidad	1	kWh	0,65	2,00	kWh	1,31
Gas (GNV)	1	m <sup>3</sup>	1,66	0,25	m <sup>3</sup>	0,41
<b>Costos totales</b>						<b>20,07</b>

\* Precio en centavos

Fuente: En base a consultas de precio en empresas locales

**Tabla 11.** Costos de producir biodiesel con etanol

<b>Insumo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad usada</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio total</b>
						- Bs -
Etanol	1	L	7,00	0,30	L	2,05
KOH	1	kg	90,00	4,40	g	0,39
Aceite	1	L	0,50	1,00	L	0,50
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	L	75,00	1,00	mL	0,07
Costos de:						
Agua	1	m <sup>3</sup>	5,65	400,00	mL	0,23*
Electricidad	1	kWh	0,65	2,00	kWh	1,31
Gas (GNV)	1	m <sup>3</sup>	1,66	0,25	m <sup>3</sup>	0,41
<b>Costos totales</b>						<b>4,75</b>

\* Precio en centavos

Fuente: En base a consultas de precio en empresas locales

A nivel regional, los países que registran el precio del diesel más bajo son Bolivia 3,72 Bs/l, Ecuador a 2,55 Bs/l (0,36 \$/l) y Venezuela a 0,35 Bs/l (0,05 \$/l), gracias a que el Estado entrega importantes subsidios a los combustibles y en los últimos años ha mantenido el precio constante [9].

En el caso particular de Bolivia, cada año la autoridad competente desembolsa entre 200 y 230 millones de dólares en subsidios para la industria, manteniendo el precio interno del petróleo por debajo de los 30 dólares/barril [9].

Sin embargo, si Bolivia produce biodiesel tendría un ahorro de 18 millones de dólares/año, lo que equivale al 8,16% del dinero necesario para sustituir la importación, además de la ventaja ambiental de tratar aceites desechados y generar energía útil.

Por último, la tabla 12 muestra los restaurantes encuestados y la cantidad de aceite que utilizan por semana.

En total, se consume 9.840 L de aceite por mes. Según Fangrui [2] se producen cerca de 25% de pérdidas se deben al filtrado del aceite, entonces la cantidad desechada por mes sería de 7.380 L.

La cantidad de aceite desechado (7.380 L por mes) es un valor que resulta interesante para una empresa que brinda transporte provincial, porque si suponemos que un vehículo necesita cerca de 400 L por mes, se podría mantener cerca de 18 vehículos funcionando con biodiesel puro (B100), pero si se utiliza B20, el biocombustible disponible sería de 36.900 L por mes, pudiendo hacer funcionar cerca de 92 vehículos.

**Tabla 12.** Cantidad de aceite utilizado en los diversos restaurantes encuestados

<b>Restaurante</b>	<b>Cantidad</b>
	-- L/sem --
Dumbo	80
Globos	80
Frankffurt	80
Burger King	80
Pollos Panchitas	840
Súper Pollo	210
Pollos Choco	840
Pollo loco	210
La Chacha	40
	<b>2.460</b>

Adicionalmente, estos vehículos tendrían beneficios como mejor lubricación en el motor, una mayor independencia del combustible fósil (diesel) y ambientalmente se disminuiría la contaminación de material particulado, de dióxido de carbono y se eliminaría por completo los óxidos de azufre en las carreteras, de esta forma afectaría en menor proporción a los ecosistemas cercanos al camino.

## 5 Conclusiones

De los tres procedimientos probados, el que presentó mejores resultados al utilizar etanol como alcohol del proceso fue la esterificación ácida – básica bajo las siguientes condiciones:

Para la parte ácida se debe conservar una temperatura ambiente de 20°C, utilizar 1 mL de ácido sulfúrico con 151,25 mL de etanol por cada litro de aceite y mantener a una velocidad de agitación entre 500 y 600 rpm durante 3 horas.

En la parte básica, la solución A debe ser preparada con 10,8 g de KOH (hidróxido de potasio) diluidos en 151,25 mL de etanol (relación alcohol/aceite de 5 a 1). Se debe seguir con la temperatura de la parte ácida (20°C). La velocidad de agitación se debe mantener entre 500 y 600 rpm durante 1,5 horas. Por último, la mezcla se debe dejar reposar por 2 semanas.

Los valores del balance de energía fueron: para la producción con metanol, la cantidad de energía entregada por el biodiesel fue de 33.008,80 kJ/kg y la relación de energía es de  $r_e = 7,11$ . Para la producción con etanol, cuando se utilizó esterificación ácida – básica la energía entregada fue de 28.415,98 kJ/kg y la relación fue de  $r_e = 6,00$  y para la desacidificación directa la energía entregada fue de 27322,60 kJ/kg y la relación

$r_e = 5,90$ . Lo que determinó que, en todos los casos, sea una actividad energéticamente viable y se puede considerar, el biodiesel así producido, un combustible renovable.

La producción de biodiesel sería una interesante propuesta para el sector del transporte, debido a que los principales restaurantes de pollo frito y hamburguesas desechan una cantidad de 7.380 L de aceite por mes, que en la mayoría de los casos sólo se vierte a algún lugar sin realizar un tratamiento previo.

Sería interesante poder utilizar el biodiesel en Cochabamba porque nos ayudaría a controlar la cantidad de material particulado de la ciudad debido a la reducción de emisiones de combustión en motorizados y a revalorizar los aceites desechados generando una energía mecánica útil.

En relación a los costos, la fabricación de biodiesel no es viable, porque si se utiliza metanol, el precio sería de 20,07 Bs/L y con etanol sería de 4,75 Bs/L; pero, si se produce biodiesel, Bolivia tendría un ahorro de 18 millones de dólares/año, lo que equivale al 8,16% del dinero necesario para suplir la importación.

Finalmente, si se mira el futuro energético con optimismo, puede decirse que a medida que las formas tradicionales de generar energía (energía fósil que en mayor o menor grado son contaminantes de la biósfera) se agoten y sus precios se eleven, llegará un momento en que las energías no tradicionales (energía solar, energía de biomasa, energía eólica y otras), hoy costosas, podrán competir económicamente con las tradicionales.

Sin embargo, el biodiesel no es una solución al problema energético por sí solo. La cuestión de fondo no es sólo buscar un reemplazo para el petróleo, sino tratar de reducir el consumo energético y mejorar la eficiencia energética, y esto requiere un cambio de hábitos y de tecnología. El biodiesel puede ser sólo una solución parcial, y quizás temporal. Además, su producción y uso aún tienen barreras sociales, ambientales, técnicas y políticas que se debe superar.

## Referencias

- [1] Donato, A.; Huerga, I. y Hilbert, J. 2008. "Balance energético de la producción de biodiesel a partir de soja en la República Argentina". INTA. Argentina.
- [2] Fangrui, M. y Milford, A. 1999. "Biodiesel production: a review". Elsevier. *Bioresour. Technology*. N° 70
- [3] García, J. y García, A. 2006. *Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol*. Universidad Rey Juan Carlos del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME). Madrid. España.
- [4] Geankoplis, J. 1999. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Continental S.A., México D. F., México.
- [5] Guyton, A. y Hall, J. 2006. *Tratado de fisiología médica*. Elsevier. Madrid. España.

- [6] Hilbert, J. 2006. "Empleo de los biocombustibles en motores diesel" Instituto de Ingeniería Rural, En <http://www.biodiesel.com.ar>, (Verificado en 12/02/2008).
- [7] IBCE (Instituto Boliviano de Comercio Exterior). 2008. "Bolivia: Estudio de caso para la mesa redonda sobre biocombustibles sostenibles". En comercio exterior, IBCE, N° 163, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- [8] Knothe, G; Van Gerpen, J y Krahl, J. 2005. The Biodiesel Handbook. AOCS Press, Champaign, Illinois.
- [9] Marticorena, J. y Zúñiga, P. 2008. "Precio del diesel en Chile es el segundo más caro de Sudamérica". En [http://www.latercera.cl/contenido/26\\_17368\\_9.shtml](http://www.latercera.cl/contenido/26_17368_9.shtml), (29/01/2009).
- [10] Morris, E.; Pollack, A.; Mansell, E.; Lindhjem C.; Jia Y. and Wilson G. 2003. Impact of Biodiesel Fuels on AirQuality and Human Health. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Novato, California.
- [11] Pelly, M. 2005. "Haz tu propio biodiesel". Organización no Gubernamental "Journey to Forever" En [http://journeytoforever.org/es/biodiesel\\_fabricar.html](http://journeytoforever.org/es/biodiesel_fabricar.html), (03/01/2007).
- [12] Pimentel, D. y Patzek, T. 2005. "Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower". En Natural Resources Research. Vol. 14, No. 1.
- [13] Sheehan, J.; Camobreco, V. y Duffield, J. 2005. An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles. US Department Energy and US Department Agricultural. Colorado. Estados Unidos.
- [14] Van Gerpen, J.; Shanks, B. y Pruszko, R. 2004. Biodiesel production technology. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado.