

SUBPRODUCTOS GENERADOS
EN EL PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A
PARTIR DE ACEITE DE
TEMPATE

CLAUDIA LEIVA BAUTISTA

Primera Edición. 2011

338.9

S211d Leiva Bautista, Claudia

sv Subproductos generados en el proceso de producción
de biodiesel a partir de aceite de tempate / Claudia
Leiva Bautista. – 1ª ed, -- San Salvador, El Salv. :
UFG Editores, 2011.
80 p. ; 14 cm.

ISBN 978-99923-47-25-6

1. Combustibles sintéticos. 2. Combustible diesel.
3. Ingeniería química. I Título

BINA/jmh

Ing. Mario Antonio Ruiz Ramírez
Rector de la Universidad Francisco Gavidia

Oscar Martínez Peñate
Coordinador UFG-Editores

Publicado y Distribuido por la Editorial Universidad Francisco Gavidia

Derechos Reservados

© Copyright

Según la Ley de Propiedad Intelectual



EDITORIAL UNIVERSIDAD FRANCISCO
GAVIDIA
UFG - Editores
Edificio Administrativo UFG, 3^{er} Nivel,
Condominio Centro Roosevelt, 55 Av. Sur.
San Salvador, El Salvador Centroamérica
Tel. 2209-2856
E-mail: investigacion@ufg.edu.sv
Website: www.ufg.edu.sv

TABLA DE MATERIAS

1. Introducción.....	9
1.1 Objetivos de la investigación.....	9
1.2 Descripción del problema.....	9
1.3 Justificación.....	10
1.4 Metodología de la investigación.....	10
2. Fundamentación teórica.....	11
2.1 Generalidades sobre el biodiesel.....	11
2.2 <i>Jatropha curcas</i>	16
2.3 Materias primas en la producción de biodiesel.....	22
2.4 Propiedades del biodiesel según normas Europea y U.S.A	28
2.5 Variables de operación en la producción de biodiesel.....	30
2.6 Descripción del proceso de producción de biodiesel.....	30
2.7 Estequiometría de la reacción de transesterificación.....	36
2.8 Descripción del proceso de extracción de aceite vegetal...	39

3. Desarrollo experimental.....	44
3.1 Pruebas de producción de biodiesel.....	44
3.2 Formulación para el proceso.....	45
3.3 Balance de materia.....	46
3.4 Balance de energía.....	49
3.5 Análisis de calidad del biodiesel.....	53
3.6 Rendimiento en la producción de biodiesel.....	54
3.7 Consumo de materia prima e insumos.....	55
3.8 Caracterización y aplicaciones de los subproductos del proceso de producción de biodiesel.....	56
4. Aspectos económicos y financieros.....	63
4.1 Costo de producción de semilla de tempate.....	63
4.2. Análisis de precio del aceite de tempate.....	65
4.3. Costo de producción de biodiesel.....	67

Conclusiones.....	68
Notas y bibliografía.....	69
Anexos.....	71
Anexo A. Determinación del contenido de ácidos grasos libres e índice de acidez en muestras de aceite y biodiesel.....	71
Anexo B. Balance de materia en la producción de biodiesel.....	72
Anexo C. Balance de energía en la producción de biodiesel.....	77

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Objetivos de la investigación.

- Realizar los balances de masa y energía en la producción de biodiesel.
- Investigar la caracterización y aplicaciones de los subproductos del proceso de producción de biodiesel.
- Investigar sobre los aspectos económicos y financieros en la producción de biodiesel.

1.2 Descripción del problema.

El Salvador es totalmente dependiente para su desarrollo de la importación de hidrocarburos, la importación anual de estos productos ascendió en el año 2000 a un total de 15.6 millones de barriles, de los cuales, 3.5 millones de barriles correspondieron a importaciones de diesel, estos últimos junto con la producción nacional de la refinería fueron destinados a suplir un consumo final de 4.8 millones de barriles de diesel. Ante la actual situación de alza en los precios del petróleo, resulta evidente que la importación de éste y sus productos derivados representan una carga significativa en la balanza comercial de El Salvador. Desde el punto de vista de la estructura del consumo final cabe señalar que el 42,5% del consumo nacional de diesel fue destinado al transporte, siendo este utilizado en vehículos de carga y del transporte colectivo principalmente.

Cuadro 1.1 Estructura Sectorial del Consumo Final de Diesel (Año 2005)

Sector	Consumo estimado Galones/año	Porcentaje del Consumo final
Estaciones de Servicio	120,308.332	62.01
Consumidores Industriales	71,743.501	36.98
GOES	1,959,624	1.01
Totales	194,011.457	100 %

Fuente: Ministerio de Economía

Por otra parte debe señalarse que el consumo de hidrocarburos produce además una variedad de efectos nocivos para el medio ambiente, tanto local como global. Particularmente el consumo de diesel en motores vehiculares, conduce a la emisión de gases nocivos tales como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas de hollín e hidrocarburos no quemados y contribuye a las emisiones netas de dióxido de carbono, principal gas responsable del llamado efecto invernadero.

1.3 Justificación.

Las razones expuestas en el apartado anterior, apuntan a la necesidad de reducir el consumo de hidrocarburos derivados del petróleo, implementando medidas para disminuirlo y procurando satisfacer la demanda energética nacional con fuentes alternativas de energía, menos lesivas a la economía nacional y al medio ambiente. Una de las alternativas viables es la sustitución de los combustibles derivados del petróleo, por otros combustibles producidos a partir de cultivos renovables tales como los biocombustibles, especialmente, el biodiesel. Sustitución que puede ser tanto parcial como total y no requiere de modificaciones significativas de los sistemas de distribución. Así mismo los vehículos actualmente en circulación requerirían de mínimas modificaciones y en su mayor parte de ninguna, para utilizar estos combustibles o sus mezclas.

1.4 Metodología de la investigación.

- Búsqueda de información en la base de datos EBSCO, internet, bibliotecas especializadas.
- Visitas de campo a empresas productoras de biodiesel.
- Realización de experimentos en el laboratorio de biocombustibles.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

2.1. Generalidades sobre el biodiesel.

2.1.1. Definición.

El biodiesel es un biocombustible sintético líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, nuevos o usados, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del petrodiesel o gasóleo obtenido del petróleo.

El biodiesel puede mezclarse con gasóleo procedente del refinado de petróleo en diferentes cantidades. Se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla: B100 en caso de utilizar sólo biodiesel, u otras notaciones como B5, B15, B30 o B50, donde la numeración indica el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla.

El aceite vegetal, cuyas propiedades para la impulsión de motores se conocen desde la invención del motor diesel gracias a los trabajos de Rudolf Diesel, ya se destinaba a la combustión en motores de ciclo diesel convencionales o adaptados. A principios del siglo XXI, en el contexto de búsqueda de nuevas fuentes de energía y la creciente preocupación por el calentamiento global del planeta, se impulsó su desarrollo para su utilización en automóviles como combustible alternativo a los derivados del petróleo.

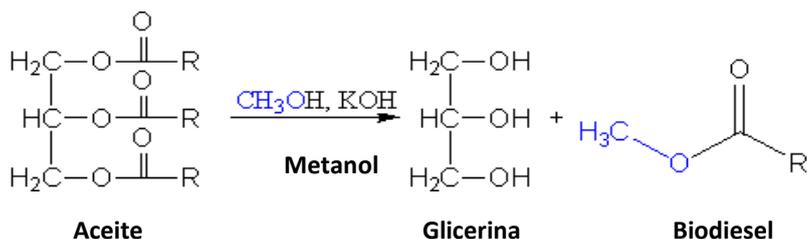
El biodiesel descompone el caucho natural, por lo que es necesario sustituir éste por elastómeros sintéticos en caso de utilizar mezclas de combustible con alto contenido de biodiesel.

2.1.2. Reacciones de síntesis

El biodiesel se describe químicamente como compuestos orgánicos de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga y corta.

El proceso de transesterificación consiste en combinar el aceite (normalmente aceite vegetal) con un alcohol ligero, normalmente metanol, y un catalizador alcalino como hidróxido de sodio o de potasio. El producto principal es el biodiesel, además deja como residuo de valor añadido propanotriol (glicerina) que puede ser aprovechada por la industria cosmética, entre otras. En la figura siguiente se muestra la reacción de transesterificación.

Figura 2.1. Reacción de transesterificación



2.1.3. Mezclas

Las mezclas de biodiesel y diesel convencional basada en hidrocarburos son los productos más habitualmente distribuidos para su uso en el mercado del gasóleo al por menor. Gran parte del mundo utiliza un sistema conocido como la "B", factor que indica la cantidad de biodiesel en cualquier mezcla de combustible: el combustible que contiene 20% de biodiesel tiene la etiqueta B20, mientras que el biodiesel puro se denomina B100. Las mezclas de 20 por ciento de biodiesel con 80 por ciento de diesel de petróleo (B20,) en general se puede utilizar en motores diesel sin modificar. El biodiesel también puede ser utilizado en su forma pura (B100), pero pueden requerir algunas modificaciones del motor para evitar problemas de mantenimiento y rendimiento.

2.1.4 Aplicaciones

El biodiesel puede ser utilizado en estado puro (B100) o puede ser mezclado con diesel de petróleo en la bomba de inyección diesel. El biodiesel tiene diferentes propiedades disolventes y degrada juntas de caucho natural y de las mangueras en los vehículos (en su mayoría vehículos fabricados antes de 1992). El biodiesel rompe los depósitos de residuos en las líneas de combustible, donde se ha utilizado el petrodiesel. Como resultado, los filtros de combustible pueden ser obstruidos con partículas si se hace una transición rápida de biodiesel puro. Por lo tanto, se recomienda cambiar los filtros de combustible en los motores y calentadores poco después de cambiar a una mezcla de biodiesel.

2.1.5 Ventajas

- El biodiesel disminuye de forma notable las principales emisiones, como son el dióxido de carbono y las partículas sólidas, en los motores diesel de los vehículos.
- La producción de biodiesel supone una alternativa de uso del suelo que evita los fenómenos de erosión y desertificación a los que pueden quedar expuestas aquellas tierras agrícolas que, por razones de mercado, están siendo abandonadas por los agricultores.
- El biodiesel supone un ahorro de entre un 25% a un 80% de las emisiones de CO₂ producidas por los combustibles derivados del petróleo, constituyendo así un elemento importante para disminuir los gases invernadero producidos por el transporte.
- Por su mayor índice de octano y lubricidad reduce el desgaste en la bomba de inyección y en las toberas.
- No tiene compuestos de azufre por lo que no los elimina como gases de combustión.

- El biodiesel también es utilizado como una alternativa de aceite para motores de dos tiempos, en varios porcentajes; el porcentaje más utilizado es el de 10/1.
- El biodiesel también puede ser utilizado como aditivo para motores a gasolina (nafta) para la limpieza interna de estos.

2.1.6 Inconvenientes

- Debido a su mejor capacidad solvente con respecto al petro diesel, los residuos existentes son disueltos y enviados por la línea de combustible, pudiendo atascar los filtros, caso que se da únicamente cuando se utiliza por primera vez después de haber estado consumiendo diesel mineral.
- Tiene una menor capacidad energética, aproximadamente un 3% menos, aunque esto, en la práctica, no es tan notorio ya que es compensado con el mayor **índice cetano**, lo que produce una combustión más completa con menor compresión.
- Ciertas hipótesis sugieren que se producen mayores depósitos de combustión y que se degrada el arranque en frío de los motores, pero esto aún no está documentado.
- Otros problemas que presenta se refieren al área de la logística de almacenamiento, ya que es un producto hidrófilo y degradable, por lo cual es necesaria una planificación exacta de su producción y expedición. El producto se degrada notoriamente más rápido que el petrodiesel.
- Hasta el momento, no está claro el tiempo de vida útil del biodiesel; algunos sostienen que posee un tiempo de vida muy corto (meses), mientras que otros afirman que su vida útil llega incluso a 10 años o más. Pero todos concuerdan que depende de su manipulación y almacenamiento.

- El rendimiento promedio para **oleaginosas como girasol, maní, arroz, algodón, soja o ricino** ronda los 900 litros de biodiesel por hectárea cosechada. Esto puede hacer que sea poco práctico para países con poca superficie cultivable; sin embargo, la gran variedad de semillas aptas para su producción (muchas de ellas complementarias en su rotación o con subproductos utilizables en otras industrias) hace que sea un proyecto sustentable. No obstante, se está comenzando a utilizar la jatrofa para producir aceite vegetal y posteriormente biodiesel. La jatrofa puede cultivarse incluso en zonas desérticas.

2.1.7 Procesos industriales

En la actualidad existen diversos procesos industriales mediante los cuales se puede obtener biodiesel. Los más importantes son los siguientes:

- Proceso base-base, mediante el cual se utiliza como catalizador un **hidróxido**. Este hidróxido puede ser **hidróxido de sodio** (sosa cáustica) o **hidróxido de potasio** (potasa cáustica).
- Proceso ácido-base. Este proceso consiste en hacer primero una esterificación ácida y luego seguir el proceso normal (base-base), se usa generalmente para aceites con alto índice de acidez.
- Proceso supercrítico. En este proceso ya no es necesaria la presencia de catalizador, simplemente se hace a presiones elevadas en las que el aceite y el alcohol reaccionan sin necesidad de que un agente externo como el hidróxido actúe en la reacción.
- Procesos enzimáticos. En la actualidad se están investigando algunas enzimas que puedan servir como aceleradores de la reacción aceite-alcohol. Este proceso no se usa en la actualidad debido a su alto coste, el cual impide que se produzca biodiesel en grandes cantidades.

- Método de reacción Ultrasónica. En el método de reacción ultrasónica, las ondas ultrasónicas causan que la mezcla produzca y colapse burbujas constantemente. Esta cavitación proporciona simultáneamente la mezcla y el calor necesarios para llevar a cabo el proceso de transesterificación. Así, utilizando un reactor ultrasónico para la producción del biodiesel, se reduce drásticamente el tiempo, temperatura y energía necesaria para la reacción. De ahí que el proceso de transesterificación puede correr en línea en lugar de utilizar el lento método de procesamiento por lotes. Los dispositivos ultrasónicos de escala industrial permiten el procesamiento de varios miles de barriles por día.

2.2 *Jatropha Curcas* (Tempate).

2.2.1. Generalidades.

Conocida como "piñón de tempate" o "jatrofa", es una *Euphorbiaceae* que tiene propiedades medicinales, nativa de América Central, fue difundida a Asia y África por comerciantes portugueses, como planta para cercar y hoy en día se ha expandido por el mundo entero.

Las semillas contienen un aceite no comestible, que se puede utilizar directamente para aprovisionar de combustible lámparas y motores de combustión o se puede transformar en *biodiesel*, mediante un proceso de transesterificación. Además se usa para fabricar jabones. Un colorante también se puede derivar de la semilla.

Resiste en un alto grado la sequía y prospera con apenas 250 a 600 mm de lluvia al año. El uso de pesticidas no es importante, gracias a las características pesticidas y fungicidas de la misma planta. La planta puede vivir hasta 50 años.

La *Jatropha* resiste altas temperaturas y sequías, al tiempo que protege y fertiliza el suelo. El secreto que hace a la *Jatropha* resistente a todo es su veneno.

En lugares desérticos donde no pone una raíz ni la mala hierba, la *Jatropha* es capaz de crear, con sus arbustos que alcanzan los seis metros, auténticos bosques verdes. Más de ocho meses de sequía al año y temperaturas que rondan los 40 grados no marchitan a la *Jatropha*.

La erosión del suelo por el viento y el agua tampoco hace mal a la *Jatropha*. Y no sólo eso, gracias a ella, el suelo erosionado vuelve a ser fértil. Extensiones de tierra hasta ahora inservibles podrían ser cultivadas, creando puestos de trabajo y beneficios a países con pocos recursos.

2.2.2. Origen

Es una oleaginosa de porte arbustivo con más de 3500 especies agrupadas en 210 géneros. Es originaria de México y Centroamérica, pero crece en la mayoría de los países tropicales. Se la cultiva en América Central, Sudamérica, Sureste de Asia, India y África.

2.2.3. Morfología vegetal

- Es un arbusto que crece más de 2 m de altura, con corteza blanco grisácea y exuda un látex translucido.
- Los tallos crecen con discontinuidad morfológica en cada incremento.
- Normalmente se forman cinco raíces, una central y cuatro periféricas.
- Las hojas normalmente se forman con 5 a 7 lóbulos acuminados, pocos profundos y grandes con pecíolos largos de 10 a 15 cm y de igual ancho. Árbol con hojas caducas.



Frutos del Tempate

- Las inflorescencias se forman terminalmente en el axial de las hojas en las ramas. Ambas flores, masculinas y femeninas, son pequeñas (6-8 mm), verdoso amarillo en el diámetro y pubescente. Cada inflorescencia rinde un manojo de aproximadamente 10 frutos ovoides o más. El desarrollo del fruto necesita 90 días desde la floración hasta que madura la semilla. Tarda dos años en florecer y producir semillas.
- Son cápsulas drupáceas y ovoides. Al inicio son carnosas pero dehiscentes cuando son secas. Las frutas son cápsulas inicialmente verde pero volviéndose a café oscuro o negro en el futuro. Las semillas están maduras cuando el fruto cambia de color del verde al amarillo.
- La fruta produce tres almendras negras, cada una aproximadamente de 2 centímetro de largo y 1 centímetro en el diámetro.

2.2.4. Fisiología vegetal

Colocada la semilla en el tubete con el sustrato adecuado y con una buena humedad, la germinación toma 5 días. Se abre la cáscara de la semilla, sale la radícula y se forman 4 raíces periféricas pequeñas. La germinación es epigea (cotiledones surgen sobre la tierra). Poco después que las primeras hojas se han formado, los cotiledones marchitan y se caen.



Arbusto de Tempate

2.2.5. Período Vegetativo o Ciclo Productivo.

Es una planta perenne, cuyo ciclo productivo se extiende de 45 a 50 años. Es de crecimiento rápido y con una altura normal de 2 a 3 m. En condiciones especiales llega hasta 5 m. El grosor del tronco es de 20 cm con crecimiento desde la base en distintas ramas.

2.2.6. Hábitat.

No requiere un tipo de suelo especial. Se desarrolla normalmente en suelos áridos y semiáridos. Responde bien a suelos con Ph no neutros. La *Jatropha* crece casi en cualquier parte, incluso en las tierras cascajosas, arenosas y salinas, puede crecer en la tierra pedregosa más pobre, inclusive puede crecer en las hendeduras de piedras

Climáticamente, la *Jatropha Curcas* L. se encuentra en los trópicos y subtropicos, Resiste normalmente el calor aunque también soporta bajas temperaturas y puede resistir hasta una escarcha ligera. Su requerimiento de agua es sumamente bajo y puede soportar períodos largos de sequedad. Habita en campos abiertos, como en parcelas nuevas – Es susceptible a inundaciones.

En el cuadro 2.1 se muestra los datos de producción de tempate, los cuales incluyen el costo agrícola, recolección, semilla, etc.



Las tres semillas extraídas de un fruto de tempate

Semilla de tempate

Cuadro 2.1. Costos de producción de Tempate

Costos de producción agrícola por Ha de Tempate

	1 año (\$/Ha)	2 año (\$/Ha)	3 año (\$/Ha)	4 año (\$/Ha)	5 año (\$/Ha)	6 año (\$/Ha)	7 año (\$/Ha)	8 año (\$/Ha)	9 año (\$/Ha)	10 año (\$/Ha)
Costo agrícola	1095.31	587.67	587.67	587.67	587.67	587.67	587.67	587.67	587.67	587.67
Recolección y otros	0	0	376.25	501.49	645	752.5	860	967.5	1075	1182.5
Totales	1095.31	587.67	963.92	1089.16	1232.67	1340.17	1447.67	1555.17	1662.67	1770.17
Total acumulado	1095.31	1682.98	2646.9	3736.06	4968.73	6308.9	7756.57	9311.74	10974.41	12744.58
P. semilla (kg-año)	-	-	3500	4665	6000	7000	8000	9000	10000	11000
Costo semilla (\$/kg-año)	-	-	0.275	0.233	0.205	0.191	0.181	0.173	0.166	0.161
Rentabilidad o pérdida (\$0.23/kg)	-	-	0.045	0.003	0.025	0.039	0.049	0.057	0.064	0.069
Rentabilidad o pérdida por Ha (\$)	1095.31	587.67	158.92	16.21	147.33	269.83	392.33	514.83	637.33	759.83
P. de aceite (\$/gal)	0	0	350	467	600	700	800	900	1000	1100

Fuente: Machuca (2007)

Cuadro 2.2. Rendimiento de la semilla de Tempate

Densidad forestal	1,666 arbustos/Ha
Productividad por arbusto	3.6 kg semilla/arbusto
Recolección de semilla	5,998 kg semilla/Ha
Rendimiento	35% del peso de la semilla
Producción de aceite en peso	2,099.16 kg aceite/Ha-año
Producción de aceite en volumen	2.3068 m ³ de aceite/Ha-año
Producción de biodiesel	2.1914 m ³ B100/Ha-año

Fuente: Machuca (2007)

2.3 Materias primas en la producción de biodiesel.

2.3.1 Características importantes del aceite vegetal

- **Densidad:** esta es una propiedad muy importante para el proceso y es determinante en operaciones como agitación y bombeo, así como en los procesos de separación.
- **Viscosidad:** es una medida de la fricción interna entre moléculas, o de la resistencia a fluir de los líquidos.
- **Humedad:** el agua produce la hidrólisis de los triglicéridos. Reacciona con las uniones entre el glicerol y los ácidos grasos y las rompe produciendo ácidos grasos libres, monoglicéridos y diglicéridos o glicerol. La hidrólisis se acelera con altas temperaturas, presiones y una excesiva cantidad de agua.
- **Índice de acidez (IA):** es el número de mg de hidróxido necesario para neutralizar los ácidos grasos libres (es decir, que no se encuentran unidos a un glicérido) de 1 g de aceite.
- **Índice de peróxido (IP):** mide el grado de oxidación primaria que ha sufrido la grasa o aceite.

- **Índice de yodo (IY):** es el número de miliequivalentes o partes de yodo absorbido por 100 partes en peso de sustancia. Este valor da una idea del número de enlaces insaturados de los ácidos grasos en el aceite.
- **Índice de saponificación:** El valor o índice de saponificación de un aceite es el número de miligramos de hidróxido necesarios para saponificar 1g de aceite completamente.
- **Material insaponificable:** comprende todos los compuestos que contiene el aceite o grasa que no reaccionan con KOH para producir jabones, es decir, que no son ácidos grasos o glicéridos pero que son solubles en solventes orgánicos y no en agua

2.3.2 Parámetros de calidad del aceite vegetal.

El aceite que se utiliza para la reacción del biodiesel debe ser aceite con la mínima cantidad de impurezas, de agua y gomas, es decir aceite refinado. Para obtener biodiesel de buena calidad se necesita de un aceite crudo con los parámetros mínimos de calidad que se enumeran en el cuadro mostrado a continuación.

Cuadro 2.3. Parámetros de calidad del aceite vegetal

Propiedad	Unidades	Valor
Densidad aceite 20°C	Kg/m ³	< 960
Viscosidad 20°C	cP	< 1000
Humedad	% peso	< 2
Volátiles (no agua)	% peso	< 1
Impurezas insolubles	% peso	< 0.75
Índice de acidez	mg KOH	218
Índice de saponificación	mg KOH	235
Índice de yodo	mg I ₂	283
Material insaponificable	% peso	< 2

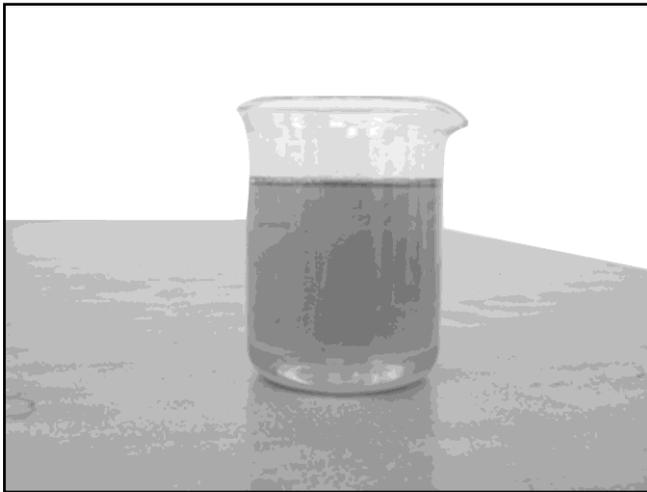
Fuente: Van Gerpen, 2004.

Si el aceite no cumple con estas especificaciones, puede en principio procesarse como biodiesel pero el rendimiento en la producción de biodiesel será menor.

Un índice de acidez alto indica una alta cantidad de ácidos grasos libres que reaccionan con el catalizador de la transesterificación formando jabones. Esta saponificación no sólo consume el catalizador necesario para la transesterificación, sino que además los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiesel.

Un índice de yodo alto indica una gran cantidad de insaturaciones, esto puede ser bueno en el sentido de que el punto de fusión del aceite (y del biodiesel producido) es más bajo, de otro lado un alto índice de yodo resultará para el biodiesel producido en un menor índice de cetano, propiedad importante en la combustión en el motor.

Además, las insaturaciones son los puntos en los que se oxida el aceite (y el biodiesel) dando lugar a peróxidos y a partir de estos a polímeros entre las distintas cadenas de ácidos grasos. Estos



Aceite de Tempate

polímeros, en el biodiesel, llevan a la formación de depósitos sólidos en el motor o al deterioro del aceite lubricante.

El índice de saponificación debe ser alto de modo que se tenga en lo posible un peso molecular de aceite bajo para mejorar el punto de fusión del mismo.

El material insaponificable consiste principalmente en aceites minerales, pigmentos, esteroides, tocoferoles y fosfolípidos. Los fosfolípidos en especial son emulsificantes que deben ser retirados, además al entrar en contacto con agua se hidratan y forman gomas que son perjudiciales en el proceso de producción porque taponan las tuberías y en caso de llegar al biodiesel pueden obstruir el sistema de combustión de los vehículos.

La humedad en el aceite debe ser removida pues esta favorece la hidrólisis de los triglicéridos y formación de diglicéridos y ácidos grasos libres con los perjuicios ya mencionados.

2.3.3 Características de los reactivos utilizados en la producción de biodiesel.

- **Alcohol**

Se puede utilizar metanol o etanol según la disponibilidad. En cualquier caso, el alcohol debe estar como mínimo en 97% en peso con agua y no debe tener desnaturizantes pues estos pueden interferir en la reacción.

- **Catalizador**

Se puede utilizar hidróxido de sodio o hidróxido de potasio cuando se trabaja con metanol y etanol respectivamente. El catalizador se alimenta a la planta productora de biodiesel, en estado sólido (escamas) y no debe contener humedad, tampoco puede tener grumos.

- **Ácido Fosfórico**

El ácido fosfórico para la neutralización del hidróxido de sodio, debe tener como mínimo una pureza del 85 % en agua.

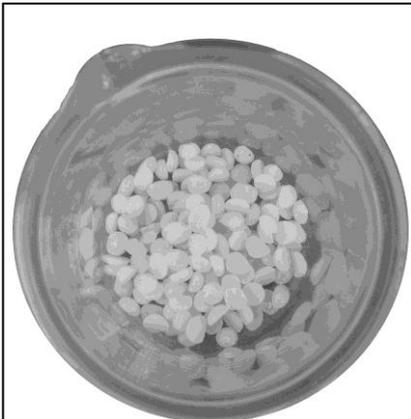
- **Ácido Sulfúrico**

El ácido sulfúrico para la esterificación ácida debe tener una pureza como mínimo del 98% en agua para evitar al máximo la adición de agua al proceso.

- **Hidróxido de Sodio**

El hidróxido de sodio utilizado para la neutralización debe ser lo más concentrado posible, se debe usar soda al 48 % en agua. Si se utiliza soda con menor porcentaje entrará más agua al proceso y será más lenta la evaporación de la misma afectando al proceso.

En el siguiente cuadro se muestran las características de los reactivos utilizados en la producción de biodiesel.



Hidróxido de sodio (catalizador alcalino).



Metanol o alcohol metílico.

Cuadro 2.4. Características de los reactivos utilizados en la producción de biodiesel.

Ácido Fosfórico		
Pureza (en agua)	% en peso	85
Densidad (20°C)	kg/m ³	1702
Viscosidad (20°C)	Pa·s	0,05
Presión de Vapor (20°C)	kPa	0,267
Ácido Sulfúrico		
Temperatura	°C	20
Pureza (en Agua)	% en peso	98
Densidad (20°C)	kg/m ³	1826,0
Viscosidad (20°C)	Pa·s	0,0197
Presión de Vapor	kPa	0,00000426
Hidróxido de Sodio líquido		
Temperatura	°C	20
Pureza (en Agua)	% en peso	48
Densidad (20°C)	kg/m ³	1512
Viscosidad (20°C)	Pa·s	0,078
Presión de Vapor	kPa	0,200
Metanol		
Pureza en Agua	% en peso	98
Temperatura	°C	65
Densidad (20°C)	kg/m ³	790,0
Viscosidad	Pa·s	0,00034
Presión de Vapor	kPa	103,370

Fuente: Van Gerpen, 2004.

2.4 Propiedades del biodiesel según las normas Europea y de Estados Unidos de América.

En el cuadro que se muestra a continuación, puede observarse los estándares establecidos por el C.E.N. (Comité Europeo de Normalización) en la norma aplicable al biodiesel EN 14214.

Para fines de comparación también se muestra los valores fijados por la norma vigente de los Estado Unidos ASTM D 6751-02 para el biodiesel.

Cuadro 2.5. Propiedades del biodiesel según las normas Europea y de Estados Unidos de América.

Parámetro	Unidad	Especificaciones	
		EN 14214-03	A.S.T.M D 6751 - 02
Contenido de esteres	% masa	Mín. 96,5	-----
Densidad a 15 °C	g/cm ³	0,86 – 0,90	-----
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	3,50 – 5,00	1,90 – 6,00
Punto de Inflamación	°C	Mín. 120	Mín. 130
Punto de obstrucción de filtro frío (P.O.F.F)	°C verano	Máx. 0	-----
	°C invierno	Máx. -20	-----
Azufre total	% masa	Máx. 0,001	Máx. 0,05
Residuo carbonoso Conradson al 100%	% masa	Máx. 0,05	Máx. 0,05
Número de cetano	----	Mín. 51	Mín. 47
Contenido en cenizas	% masa	Máx. 0,03	Máx. 0,02
Contenido en agua	mg/Kg.	Máx. 500	-----

Parámetro	Unidad	Especificaciones	
		EN 14214-03	A.S.T.M D 6751 -02
Agua y sedimentos	% volumen	-	Máx. 0,05
Corrosión al cobre (3h/50 °C)	Grado de Corrosión	Máx. 1	Máx. 3
Estabilidad a la oxidación	horas	Mín. 6	-----
Índice de acidez	mg KOH/g	Máx. 0,50	Máx. 0,80
Contenido en metanol	% masa	Máx. 0,20	-----
Contenido en monoglicéridos	% masa	Máx. 0,80	-----
Contenido en diglicéridos	% masa	Máx. 0,20	-----
Contenido en triglicéridos	% masa	Máx. 0,20	-----
Glicerol libre	% masa	Máx. 0,02	Máx. 0,02
Glicerol ocluido	% masa	Máx. 0,23	-----
Glicerol total	% masa	Máx. 0,25	Máx. 0,24
Índice de yodo	----	Máx. 120	-----
Fósforo	ppm.	Máx. 10	Máx. 10
Sales Metálicas (Na+K)	mg/Kg.	Máx. 5	-

Fuente: www.abcbiodiesel.com.ve

2.5 Variables de operación en la producción de biodiesel

Las variables de operación deben controlarse durante el proceso productivo de biodiesel. Estas variables son temperatura, y tiempo de operación. En el siguiente cuadro se muestra las variables mencionadas.

Cuadro 2.6. Variables de operación en la producción de biodiesel

Operación	Temperatura (°C)	Tiempo (h)
Calentamiento de aceite	40-45	0.5
Esterificación	40-45	1
Recuperación de metanol (esterificación).	65-70	2
Secado.	95-100	1
Preparación de metóxido	-	0.5
Transesterificación	50-55	1
Recuperación de metanol (transesterificación).	65-70	2
Lavado	-	1
Secado.	95-100	1-3

Fuente: elaboración propia.

2.6 Descripción del proceso general de producción de biodiesel.

- **Calentamiento del aceite:** este proceso tiene como fin fluidificar el aceite reduciendo su viscosidad. El aceite se calienta hasta una temperatura entre 40 °C y 45 °C, durante 30 minutos, con agitación constante.

- **Esterificación:** proceso que tiene por objetivo disminuir la acidez libre del aceite, convirtiendo los ácidos grasos libres en ésteres alquílicos (biodiesel). Es necesario cuando se tiene un aceite con una acidez mayor a 4% AGL (ácidos grasos libres). Cuando el contenido de ácidos grasos libres es igual o inferior a 4%, no es necesario realizar la esterificación, en este caso se realizará una simple neutralización con un álcali (Van Gerpen, *et al*, 2004). La esterificación consiste en una reacción química en la cual los ácidos grasos libres, responsables de la acidez, son transformados en ésteres mediante el uso de metanol como reactivo y ácido sulfúrico como catalizador, el cual provee un medio ácido para acelerar la reacción. Esta etapa se realiza a una temperatura entre 40 °C y 45 °C, durante 1 hora, con agitación constante.
- **Neutralización:** para realizar la esterificación se agrega ácido sulfúrico, el cual posteriormente se neutraliza con solución de hidróxido de sodio al 48%. Esta reacción de neutralización produce sulfato de sodio y agua.
- **Recuperación de metanol que no reaccionó en la esterificación:** el metanol se usa en exceso durante la esterificación para asegurar la transformación de los ácidos grasos libres en biodiesel. Siempre habrá una cantidad de metanol que no reacciona y es necesario recuperarlo para reutilizarlo en el proceso de esterificación. Mediante un proceso de evaporación y condensación se recupera el metanol que no reaccionó. Este metanol debe tener una concentración mínima de 90% en volumen de alcohol. Esta operación se realiza a una temperatura entre 65°C y 70°C, con agitación constante durante 2 horas. Para verificar la concentración del metanol se toman muestras cada 30 minutos y utilizando un alcoholímetro se mide su contenido de alcohol. Cuando este valor es inferior a 90% en volumen, el metanol se recolecta en un depósito diferente para no mezclarlo con el metanol de mayor concentración.

- **Secado:** es importante eliminar la humedad porque ésta puede reaccionar con el aceite y el hidróxido de sodio produciendo jabón el cual es un contaminante. El secado no se lleva a cabo si el contenido de humedad en el aceite es inferior a 2 % en peso respecto al aceite. El secado se efectúa a una temperatura entre 95°C y 100 °C, durante 1 hora.



Preparación de Metóxido

- **Preparación de metóxido:** consiste en disolver hidróxido de sodio en metanol puro. No es necesario el calentamiento porque la disolución del hidróxido de sodio es una reacción exotérmica, es decir, que se genera calor. Para preparar la disolución se mantiene la agitación durante 30 minutos.

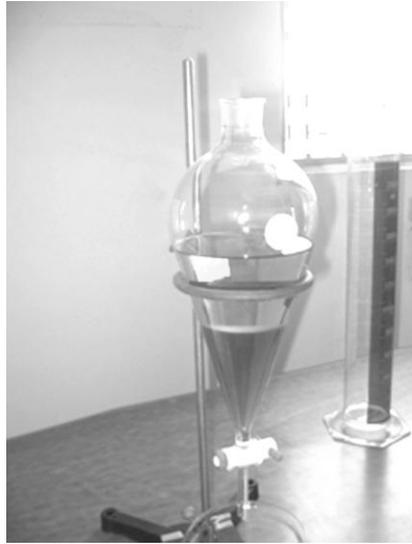
- **Transesterificación:** es la reacción química que produce el biodiesel. Consiste en agregar al aceite un exceso de metóxido (20% a 25% del peso de aceite). El metóxido tiene que usarse en exceso para asegurar el máximo rendimiento de la reacción de transesterificación. Esta etapa se realiza a una temperatura entre 50 °C y 55 °C, durante una hora, con agitación constante.



Transesterificación del aceite de Tempate.

- **Separación de la glicerina del biodiesel:** en la reacción de transesterificación se produce glicerina, éste es un subproducto del proceso, el cual se separa mediante decantación.

- **Neutralización:** durante la transesterificación se agrega hidróxido de sodio, el cual debe ser neutralizado con ácido fosfórico al 98%. Esta reacción de neutralización produce fosfato de sodio y agua.



Separación del biodiesel y glicerina.

- **Recuperación del metanol que no reaccionó en la transesterificación:** mediante un proceso de evaporación y condensación se recupera el metanol que no reaccionó. El objetivo de recuperar el metanol es para reutilizarlo posteriormente en otros procesos de producción de biodiesel.
- **Lavado:** El lavado del biodiesel se hace para eliminar el metanol, hidróxido de sodio y glicerina remanentes. También remueve el jabón, si acaso se formó durante la transesterificación del aceite.

El lavado se hace con agua potable. Se agrega un volumen de agua equivalente a un 20% del volumen de biodiesel. Se mezclan las soluciones y se deja en reposo para que se separen las capas. En la capa superior queda el biodiesel y en la inferior el agua. Se drena el agua sucia. Se repite el proceso varias veces (de 3 a 6 veces) o hasta que el agua de lavado salga cristalina. También se comprueba el pH (grado de acidez) del agua de lavado. Cuando el

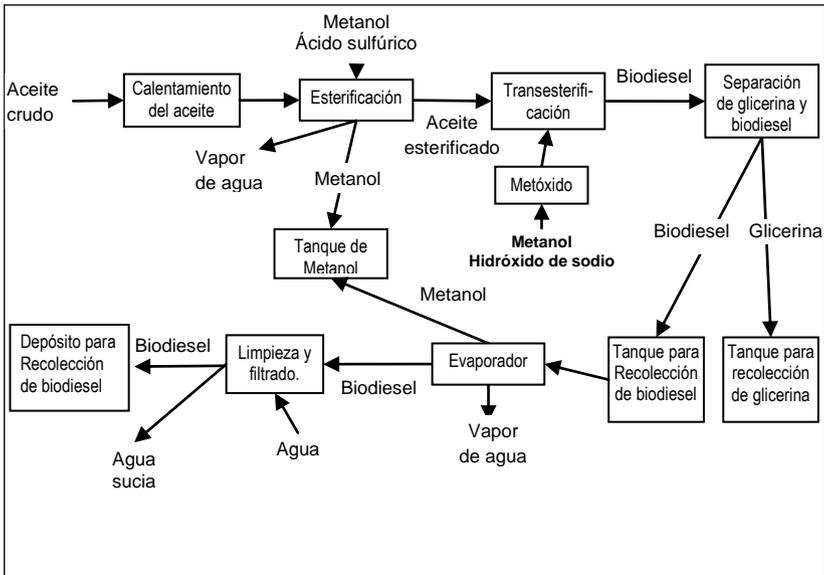
pH del agua es igual a 7.0 (pH neutro), el biodiesel está totalmente limpio. Se comprobó el pH utilizando papel indicador.

- Secado:** proceso mediante el cual se elimina la humedad del biodiesel. Este consiste en calentar el biodiesel a una temperatura entre 95 °C y 100 °C. Se debe controlar permanentemente la temperatura, para evitar que alcance la temperatura de ignición del biodiesel (130 °C).

El tiempo de secado, dependiendo de cuánta agua remanente exista, puede durar entre 1 a 3 horas.

En la figura 2.2 se muestra el diagrama de bloques del proceso de producción de biodiesel.

Figura 2.2. Diagrama de bloques del proceso de producción de biodiesel.



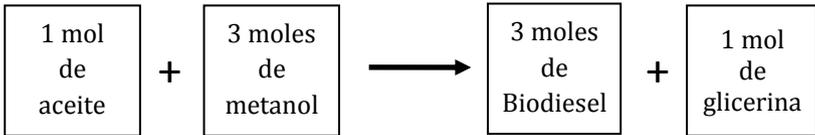
Fuente: elaboración propia.

2.7 Estequiometría de la reacción de transesterificación.

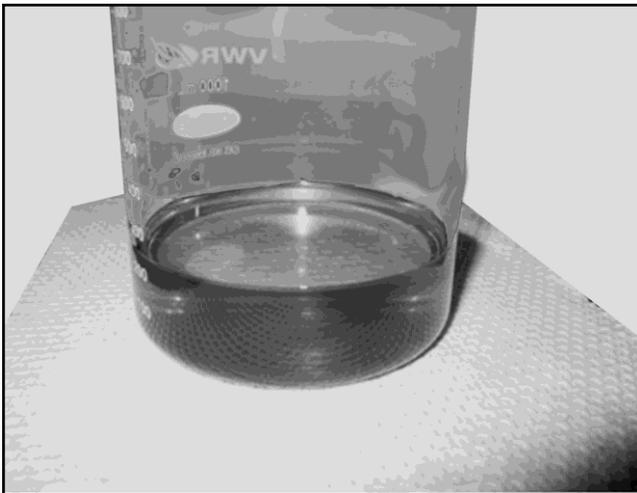
2.7.1 Generalidades.

La estequiometría de la reacción de transesterificación permite calcular la cantidad de biodiesel y glicerina producidos, a partir de la cantidad de metanol que reaccionó con el aceite.

Para realizar los cálculos estequiométricos se debe partir de la ecuación estequiométrica, la cual indica la reacción química que se lleva a cabo. Esta se muestra a continuación.



Para asegurar el máximo rendimiento de la reacción anterior se debe usar el doble de metanol o sea, 6 moles. Por tanto, se duplica la cantidad de metanol, teniendo un exceso del 100%.



Biodiesel

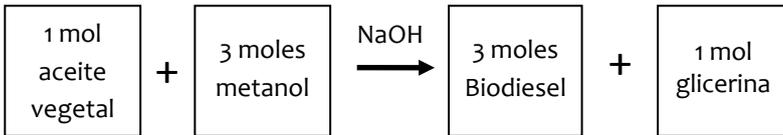
2.7.2 Cálculos estequiométricos.

Este procedimiento en general se aplica para cualquier cantidad de aceite vegetal.

Base: 0.5 L (500 mL) de aceite vegetal.

A partir de esta cantidad de aceite vegetal, se calculan las cantidades de los reactantes a utilizar.

La reacción química de transesterificación que se lleva a cabo es la siguiente:



- **Cálculo de la masa de aceite vegetal**

Densidad aceite vegetal: $d_a = 0.8988 \text{ kg/L}$

Volumen aceite vegetal: $v_a = 0.5 \text{ L}$

Masa aceite vegetal: $m_a = d_a v_a = (0.8988 \text{ kg/L})(0.5 \text{ L}) = 0.45 \text{ kg} = 450 \text{ g}$

- **Masa de hidróxido de sodio (NaOH) a utilizar:**

Se utiliza hidróxido de sodio como catalizador de la reacción química.

Utilizar 1% de hidróxido de sodio (basado en la masa de aceite).

Masa hidróxido de sodio: $m_{\text{NaOH}} = 0.45 \text{ kg aceite} \times 0.01 = 0.0045 \text{ kg} = 4.5 \text{ g}$

- **Cálculo de los moles de aceite:**

Peso molecular aceite: $PM_a = 885.46 \text{ g/mol}$

Masa de aceite: $m_a = 450 \text{ g}$

Moles de aceite = $m_a/PM_a = (450 \text{ g})/(885.46 \text{ g/mol}) = 0.51 \text{ mol}$

- **Moles de metanol a utilizar:**

Peso molecular del metanol (CH_3OH): $PM = 32.04 \text{ g/mol}$

Densidad del metanol: $d = 0.7914 \text{ kg/L}$

De acuerdo a la ecuación estequiométrica, deducimos que por cada mol de aceite vegetal se requiere 3 moles de metanol, por tanto, para 0.51 moles de aceite vegetal se requieren 1.53 moles de metanol, según el cálculo mostrado a continuación.

1 mol de aceite vegetal _____ 3 moles de metanol
 0.51 mol aceite vegetal _____ X

$$X = (0.51 \times 3) / 1 = 1.53 \text{ moles de metanol}$$

- **Masa de metanol a utilizar:**

masa = moles de metanol x $PM = 1.53 \text{ mol} \times 32.04 \text{ g/mol} = 49.02 \text{ g} = 0.049 \text{ kg}$

- **Volumen de metanol a utilizar:**

$V = m/d = 0.049 \text{ kg} / (0.7914 \text{ kg/L}) = 0.06194 \text{ L} = 61.94 \text{ mL}$

Para asegurar la reacción hay que duplicar el volumen de metanol. Por tanto, se utilizará $61.94 \text{ mL} \times 2 = 123.88 \text{ mL}$.

Volumen de metanol = 123.88 mL

2.8 Descripción del proceso de extracción de aceite vegetal.

2.8.1 Extracción del aceite de semillas oleaginosas

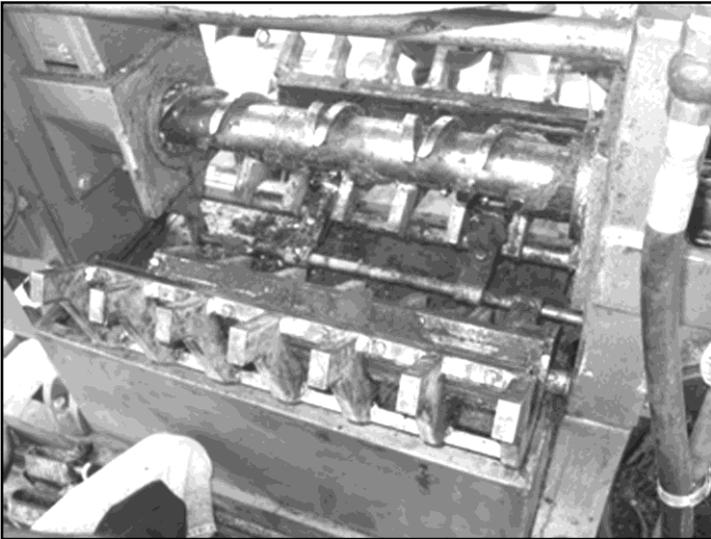
En principio se distinguen dos sistemas de extracción del aceite de semillas oleaginosas:

- a) Extracción mecánica.
- b) Extracción con disolventes.

Las semillas oleaginosas deben ser limpiadas y descascarilladas previamente. Después son troceadas y molidas antes de la extracción de su aceite por cualquiera de los dos sistemas citados.

2.8.2 Extracción mecánica.

En la extracción mecánica, las semillas molidas pasan a un acondicionador para obtener un producto homogéneo que pasa a la



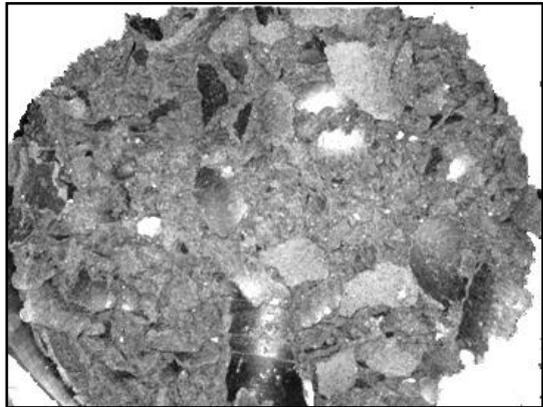
Prensa de tornillo donde se trituran las semillas de tempeate.
(Fundación Empresa y Desarrollo)

prensa de tornillo donde a elevadas presiones y en un solo paso se procede a la separación del aceite de la torta proteínica. El aceite obtenido es limpiado de impurezas groseras en un tamiz vibratorio. Gracias al sistema de vibraciones no es necesario parar para limpiar el tamiz, ya que las impurezas no se pegan a la superficie del tamizado. El abrillantamiento y limpieza final del aceite se llevan a cabo en el filtro, con lo que tenemos así un aceite crudo filtrado.

La torta proteínica separada en la prensa es descargada en un tornillo sinfín que alimenta una estación de pesado y ensacado, o unos rodillos trituradores de la torta proteínica. Esta torta proteínica puede ser desgrasada aún más en una planta de extracción por disolventes. También puede ser utilizada directamente como alimento de ganado o, si ha sido tratada higiénicamente, puede pasar a una instalación para obtención de proteínas para la alimentación humana.

2.8.3 Extracción con disolventes.

En el sistema de extracción por disolventes, se puede partir de las semillas oleaginosas o de la torta proteínica obtenida por el sistema de extracción mecánica, ya que aun contiene un 11-15% de aceite que se puede reducir al 2-4%.



Torta proteínica de tempate que es el residuo del prensado de la semilla.
(Fundación Empresa y Desarrollo)

Si partimos directamente de las semillas, estas deben ser limpiadas, descascarilladas y trituradas en unos rodillos, pasando entonces a un acondicionador para homogeneizar el rodillo, que pasa a un molino, con lo que se divide finamente, permitiendo así una mejor extracción del aceite en el extractor, donde un disolvente de las materias grasas arrastra a éstas, siendo separadas en el evaporador a la vez que se recupera el disolvente y vuelve al extractor.

La harina desengrasada es transportada a un separador de disolvente para eliminar trazas del mismo, aún presentes en la harina. El disolvente recuperado vuelve también al extractor.

2.8.4 Descripción del proceso de extracción de aceite vegetal.

El proceso comienza con el descascarado del fruto seco de la planta oleaginosa seleccionada, a partir de la cual se obtienen los granos que serán procesados. Seguidamente se colocan los granos a secar al sol durante varios días, cuando están secos se pesan en una báscula.

A continuación se introducen los granos en el calentador respectivo para ablandarlos, a una temperatura de 70°C durante una hora. Enseguida se introducen los granos a la prensa de tornillo o expeller donde son



Calentador donde se introduce las semillas para ablandarlas.
(Fundación Empresa y Desarrollo)

triturados para extraer el aceite. En esta etapa se obtiene el aceite y una torta que es el residuo de la cascarilla y pulpa prensadas. La torta se pesa para control y se almacena en sacos.

El aceite se transfiere hacia el tanque deshumidificador de aceite donde su temperatura se lleva a 100°C y se mantiene así durante una hora, con el objetivo de eliminar el exceso de agua.

A continuación el aceite pasa al filtro prensa para limpiarlo, ahí se retienen las partículas suspendidas provenientes del prensado.

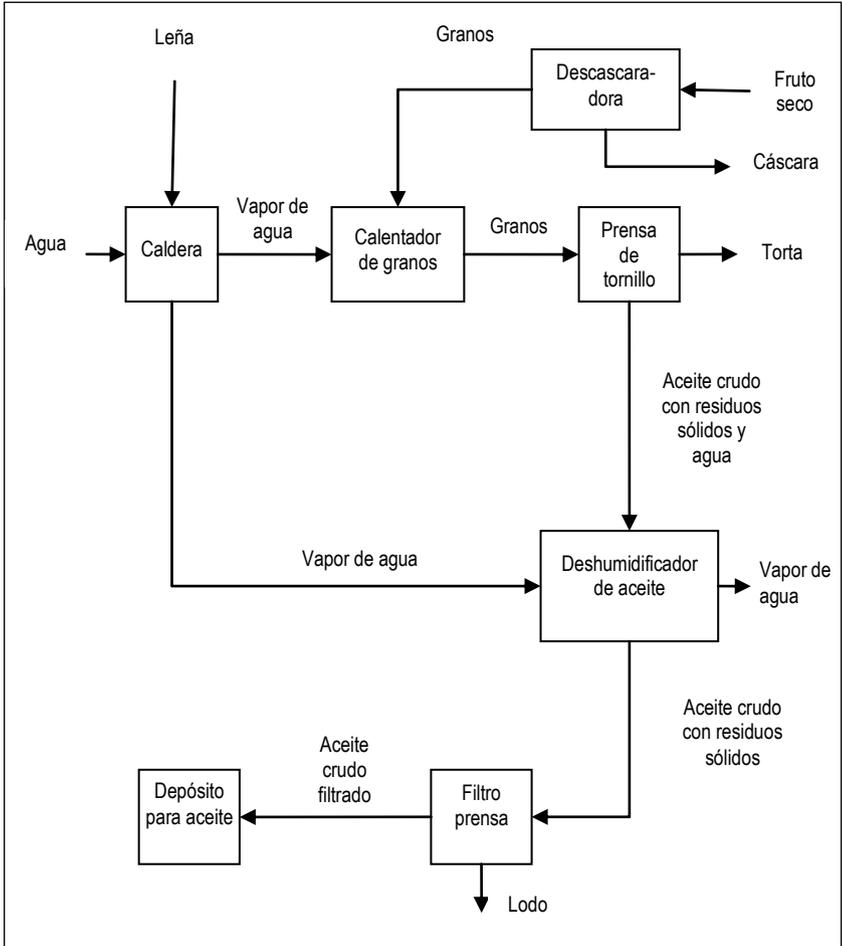
Finalmente el aceite filtrado se transfiere a un depósito y se pesa para llevar control del rendimiento de la operación.



Prensa filtro donde se filtra el aceite.
(Fundación Empresa y Desarrollo)

En la figura 2.3 se muestra el diagrama de bloques del proceso de extracción de aceite vegetal.

Figura 2.3. Diagrama de bloques del proceso de extracción de aceite vegetal.



Fuente: elaboración propia

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

3.1 Pruebas de producción de biodiesel.

Se realizaron cinco pruebas utilizando aceite de tempate como materia prima, metanol (alcohol) e hidróxido de sodio como catalizador.

Se realizó el proceso de transesterificación mediante una catálisis alcalina.

No fue necesario realizar la esterificación, porque el contenido de ácido grasos libres en el aceite fue menor al 4%. Únicamente se realizó una neutralización de los ácidos grasos libres utilizando hidróxido de sodio como reactivo.

En el siguiente cuadro se muestra el resumen de las pruebas realizadas donde se indican las cantidades de reactivos utilizados.

Cuadro 3.1

Lote	Aceite (L)	Metanol (L)	NaOH (Kg)
1	2.00E-01	8.00E-02	1.50E-03
2	2.00E-01	7.00E-02	1.80E-03
3	2.00E-01	4.00E-02	1.40E-03
4	2.00E-01	4.00E-02	1.50E-03
5	2.00E-01	4.00E-02	1.30E-03
Prom	2.00E-01	5.40E-02	1.50E-03

Fuente: elaboración propia.

3.2 Formulación para el proceso.

La formulación para el proceso se refiere a las cantidades de los diferentes reactivos que se utilizan en las etapas de esterificación y transesterificación.

En el cuadro que se presenta a continuación, se indican las cantidades de reactivos a utilizar, en base a la masa de aceite.

Cuadro 3.2. Formulación para el proceso

Etapa	Reactivo	% masa aceite
Esterificación	Metanol 90% (mínimo)	$2.25 \times \text{masa AGL}^1$
	Ácido sulfúrico 98%	0.10 – 0.75
	Hidróxido de sodio 48%	0.06 – 0.64
Transesterificación	Metanol 100%	20 - 25
	Hidróxido de sodio sólido	0.40 – 1.0
	Ácido fosfórico 85%	0.03 - 0.20

Fuente: elaboración propia.

3.3 Balance de materia.

En el balance de materia se cumple el principio de que la masa que entra al proceso es igual a la masa que sale del proceso. Se realiza un balance de masa de los reactivos que entran al proceso y los productos a la salida del mismo.

En el caso de la producción de biodiesel se debe tomar en cuenta que es una reacción química la que se efectúa, por tanto es indispensable considerar la estequiometría de la reacción química de transesterificación.

A la entrada del proceso se tiene aceite, metanol e hidróxido de sodio. La masa de estos reactivos es conocida ya que son las cantidades iniciales usadas en el proceso.

A la salida del proceso se tiene biodiesel, glicerina, metanol que no reaccionó (el exceso) y jabón

La masa de biodiesel producido se determina in situ, a partir de este dato real y en base a la estequiometría de la reacción química, se calcula la cantidad de glicerina producida y el metanol que no reacciona.

En base al balance de masa se calcula la cantidad de jabón producido. Se aclara que este no es jabón solamente. Consiste en una mezcla de varios compuestos: jabón, hidróxido de sodio remanente, fosfato de sodio, sulfato de sodio, agua y residuos. En el anexo B se muestra un ejemplo de los cálculos estequiométricos mediante los cuales se obtiene los datos mostrados en el balance de masa de cada prueba realizada.

3.3.1 Resultados del balance de materia.

En el cuadro 3.3, se muestran los datos del balance de materia, en el cual, a la entrada del proceso se tienen las masas de aceite, metanol (Met.) e hidróxido de sodio (NaOH), y a la salida se muestran las masas del biodiesel (B100), glicerina pura (Glic.), metanol excedente o que no reaccionó (Met. exc.) y jabón.

Cuadro 3.3. Balance de materia

Lote	ENTRADA				SALIDA			
	Aceite (Kg)	Met. (Kg)	NaOH (kg)	Kg total	B100 (Kg)	Glic. (Kg)	Met. exc (Kg)	Jabón (Kg)
1	1.78E-01	6.32E-02	1.50E-03	2.43E-01	1.64E-01	1.69E-02	4.55E-02	1.67E-02
2	1.78E-01	5.53E-02	1.80E-03	2.35E-01	1.60E-01	1.66E-02	3.80E-02	2.04E-02
3	1.78E-01	3.16E-02	1.40E-03	2.11E-01	1.69E-01	1.75E-02	1.34E-02	1.14E-02
4	1.78E-01	3.16E-02	1.50E-03	2.11E-01	1.65E-01	1.71E-02	1.37E-02	1.49E-02
5	1.78E-01	3.16E-02	1.30E-03	2.11E-01	1.71E-01	1.77E-02	1.32E-02	9.55E-03
Prom	1.78E-01	4.27E-02	1.50E-03	2.22E-01	1.66E-01	1.72E-02	2.48E-02	1.46E-02

Fuente: elaboración propia

En el cuadro 3.4, se muestran los datos de proporción másica del biodiesel y glicerina en base a la masa de aceite. Los valores promedio obtenidos son: 93.06% para biodiesel (B100) y 9.64% para glicerina pura (Glic.). Es decir por cada 100 kilogramos de aceite se obtiene 93.06 kilogramos de biodiesel y 9.64 kilogramos de glicerina.

Los valores promedio respecto a la proporción másica obtenidos para el biodiesel y la glicerina, son similares a los datos de la literatura consultada, en donde se indica la siguiente relación másica ideal (Van Gerpen, *et al*, 2004).

100 lb de aceite + 10 lb de metanol → 100 lb de biodiesel + 10 lb de glicerina.

Cuadro 3.4. Proporción másica del biodiesel y glicerina en base a la masa de aceite.

Lote	Aceite (Kg)	B100 (Kg)	Glic. (Kg)	% B100	% Glic.
1	1.78E-01	1.64E-01	1.69E-02	91.89%	9.51%
2	1.78E-01	1.60E-01	1.66E-02	89.93%	9.31%
3	1.78E-01	1.69E-01	1.75E-02	94.82%	9.82%
4	1.78E-01	1.65E-01	1.71E-02	92.87%	9.62%
5	1.78E-01	1.71E-01	1.77E-02	95.80%	9.92%
Prom	1.78E-01	1.66E-01	1.72E-02	93.06%	9.64%

Fuente: elaboración propia

En el cuadro 3.5 se muestra el porcentaje másico a la salida en base a la masa total a la entrada. De esta forma, por ejemplo para el lote 1, al sumar los valores porcentuales: 67.39% para biodiesel (B100), 6.98% para glicerina (Glic.), 18.76% para metanol excedente (Met. Exc.) y 6.87% para jabón; el resultado es 100%. Lo cual significa que el 100% de la masa total a la entrada igual a 2.43×10^{-1} kg (ver cuadro 3.3) es la misma masa a la salida pero transformada en biodiesel, glicerina y jabón más el metanol excedente que no reaccionó. Esto comprueba que el balance de materia es correcto, es decir, la masa total a la entrada es igual a la masa total a la salida.

**Cuadro 3.5. Porcentaje másico a la salida
en base a la masa total a la entrada.**

Lote	SALIDA			
	B100 (Kg)	Glic. (Kg)	Met. exc (Kg)	Jabón (Kg)
1	67.39%	6.98%	18.76%	6.87%
2	68.09%	7.05%	16.16%	8.70%
3	79.99%	8.28%	6.33%	5.39%
4	78.30%	8.11%	6.51%	7.08%
5	80.85%	8.37%	6.25%	4.53%
Prom	74.56%	7.72%	11.15%	6.57%

Fuente: elaboración propia

3.4 Balance de energía.

En cuanto concierne a combustibles, el balance energético básicamente es la diferencia entre la energía disponible por unidad de combustible producido y la energía necesaria para su producción (Donato, *et al*, 2008).

En el anexo C se muestra un ejemplo de cálculo del balance energético.

3.4.1. Consumo de energía.

La energía consumida se refiere a la energía que se utiliza para obtener el producto y subproducto. En este caso se utilizó energía eléctrica. En el siguiente cuadro se muestran los datos de consumo de energía eléctrica en mega-joules (MJ).

Cuadro 3.6 Energía eléctrica consumida

Lote	Mega-joules (MJ)
1	1.91E-01
2	1.86E-01
3	1.97E-01
4	1.93E-01
5	1.99E-01
Prom	1.93E-01

Fuente: elaboración propia

3.4.2. Energía contenida en el producto y subproducto.

La energía contenida en el producto y subproducto se calculó como la suma de las energías aportadas por el biodiesel y la glicerina. Para calcular tales energías se multiplicó el calor específico del producto o subproducto por la masa respectiva. En el cuadro siguiente se presentan los calores específicos de las sustancias mencionadas.

Cuadro 3.7 Calores específicos del biodiesel y glicerina.

Biodiesel	35	MJ/L
Glicerina	16.5	MJ/Kg

Fuente: Donato, et al, 2008.

En el siguiente cuadro se presenta la energía contenida en el producto y subproducto. Se observa que en promedio se tiene 6.95 mega-joules de energía. La columna correspondiente a E. prod. Se obtuvo sumando los valores de las columnas E. glicerina y E. biodiesel.

Cuadro 3.8 Energía contenida en el producto y subproducto.

Energía (MJ)			
Lote	E. glicerina	E. biodiesel	E. prod. ²
1	2.79E-01	6.58E+00	6.86E+00
2	2.73E-01	6.44E+00	6.71E+00
3	2.88E-01	6.79E+00	7.08E+00
4	2.82E-01	6.65E+00	6.93E+00
5	2.91E-01	6.86E+00	7.15E+00
Prom	2.83E-01	6.66E+00	6.95E+00

Fuente: elaboración propia

3.4.3 Energía neta y relación energética

La energía neta es la diferencia de la suma de energías contenidas en el producto y subproducto, menos la energía consumida en la producción de los mismos (Donato, et al, 2008). Expresado matemáticamente:

$$\text{Energía neta} = (\text{energía producto} + \text{energía subproducto}) - \text{energía consumida}$$

La relación energética es igual al cociente de la suma de energías contenidas en el producto y subproducto, entre la energía

consumida en la producción de los mismos (Donato, et al, 2008).
Expresado matemáticamente:

$$\text{Relación energética} = \frac{\text{energía producto} + \text{energía subproducto}}{\text{energía consumida}}$$

En el siguiente cuadro los resultados muestran que la energía contenida en el producto y subproducto es mayor que la energía que se consume en su producción.

Cuadro 3.9 Energía neta y relación energética

Lote	Energía (MJ)			E.cons.	E. neta	Rel. E.
	E. glicerina	E. biodiesel	E. prod.	MJ	MJ	E.prod./E.cons
1	2.79E-01	6.58E+00	6.86E+00	1.91E-01	6.67E+00	3.60E+01
2	2.73E-01	6.44E+00	6.71E+00	1.86E-01	6.53E+00	3.60E+01
3	2.88E-01	6.79E+00	7.08E+00	1.97E-01	6.88E+00	3.60E+01
4	2.82E-01	6.65E+00	6.93E+00	1.93E-01	6.74E+00	3.60E+01
5	2.91E-01	6.86E+00	7.15E+00	1.99E-01	6.95E+00	3.60E+01
Prom	2.83E-01	6.66E+00	6.95E+00	1.93E-01	6.75E+00	3.60E+01

Fuente: elaboración propia

3.4.4 Energía consumida por litro de biodiesel producido.

Para cada lote de biodiesel producido, la energía consumida en su producción, se dividió entre el volumen de biodiesel, para obtener el dato de cuanta energía se necesita para producir un litro de biodiesel (MJ/L). El resultado indica que se consumen en promedio 1.01 megajoules por litro de biodiesel producido.

Cuadro 3.10 Energía consumida por litro de biodiesel producido

	B100	E. cons.	E. cons./B100
Lote	L	MJ	MJ/L
1	1.88E-01	1.91E-01	1.01E+00
2	1.84E-01	1.86E-01	1.01E+00
3	1.94E-01	1.97E-01	1.01E+00
4	1.90E-01	1.93E-01	1.01E+00
5	1.96E-01	1.99E-01	1.01E+00
Prom	1.90E-01	1.93E-01	1.01E+00

Fuente: elaboración propia

3.5 Análisis de calidad del biodiesel.

Al biodiesel producido se le hizo prueba de calidad. Esta prueba de calidad consiste en una prueba de miscibilidad. El procedimiento consiste en mezclar 50 ml de biodiesel con 50 ml de agua potable y agitar vigorosamente. Se deja en reposo durante 5 minutos y si el biodiesel es de buena calidad se deben separar las capas de agua y biodiesel rápidamente. Quedando en la capa superior el biodiesel y en

la capa inferior el agua. En esta prueba se comprobó que el biodiesel producido es de buena calidad pues la separación de capas fue rápida, se tardó sólo 2 minutos.

3.6 Rendimiento en la producción de biodiesel.

El rendimiento en la producción de biodiesel se calcula a partir de la cantidad de biodiesel teórico y el biodiesel realmente producido en la planta.

El rendimiento se define como la masa real de biodiesel entre la masa teórica de biodiesel. De acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{masa real de biodiesel}}{\text{masa teórica de biodiesel}} \times 100$$

El porcentaje en masa de glicerina producida se calculó mediante la fórmula:

$$\% \text{ de glicerina} = \frac{\text{masa de glicerina}}{\text{masa de aceite}} \times 100$$

3.6.1. Resultados de rendimiento.

El rendimiento promedio en la producción de biodiesel fue 92.64%, valor que está dentro de lo aceptable de acuerdo a la literatura consultada (Van Gerpen, *et al*, 2004).

En relación a la glicerina se obtuvo un rendimiento promedio igual a 9.64%, dato que es coherente con la bibliografía consultada (Van Gerpen, *et al*, 2004).

En el siguiente cuadro se muestran los resultados de rendimiento para cada prueba realizada y el promedio.

Cuadro 3.11 Rendimiento en la producción de biodiesel.

	ACEITE	BIODIESEL		GLIC.	RENDIMIENTO	GLIC.
Lote	(Kg)	Real (Kg)	Teórico (Kg)	(Kg)	B100 (%m)	(%m)
1	1.78E-01	1.64E-01	1.79E-01	1.69E-02	91.47%	9.51%
2	1.78E-01	1.60E-01	1.79E-01	1.66E-02	89.52%	9.31%
3	1.78E-01	1.69E-01	1.79E-01	1.75E-02	94.39%	9.82%
4	1.78E-01	1.65E-01	1.79E-01	1.71E-02	92.44%	9.62%
5	1.78E-01	1.71E-01	1.79E-01	1.77E-02	95.36%	9.92%
Prom	1.78E-01	1.66E-01	1.79E-01	1.72E-02	92.64%	9.64%

Fuente: elaboración propia

3.7 Consumo de materia prima e insumos.

En el siguiente cuadro se presenta el consumo promedio de materia prima e insumos utilizados en la producción de biodiesel.

Cuadro 3.12 Consumo de materia prima e insumos.

Lote	Aceite (L)	Metanol (L)	NaOH (Kg)
1	2.00E-01	8.00E-02	1.50E-03
2	2.00E-01	7.00E-02	1.80E-03
3	2.00E-01	4.00E-02	1.40E-03
4	2.00E-01	4.00E-02	1.50E-03
5	2.00E-01	4.00E-02	1.30E-03
Prom	2.00E-01	5.40E-02	1.50E-03

Fuente: elaboración propia.

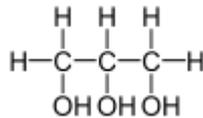
3.8 Caracterización y aplicaciones de los subproductos del proceso de producción de biodiesel.

3.8.1 Glicerol o glicerina.

- **Fórmula química.**

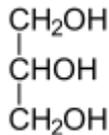
El 1,2,3 propanotriol, glicerol o glicerina ($C_3H_8O_3$) (del griego *Glykos*, dulce) es un alcohol con tres grupos hidroxilos ($-OH$), por lo que podemos representar la molécula como:

Figura 3.1. Molécula de la glicerina.



O, en su forma semi-desarrollada como:

Figura 3.2. Fórmula semi-desarrollada de la glicerina:



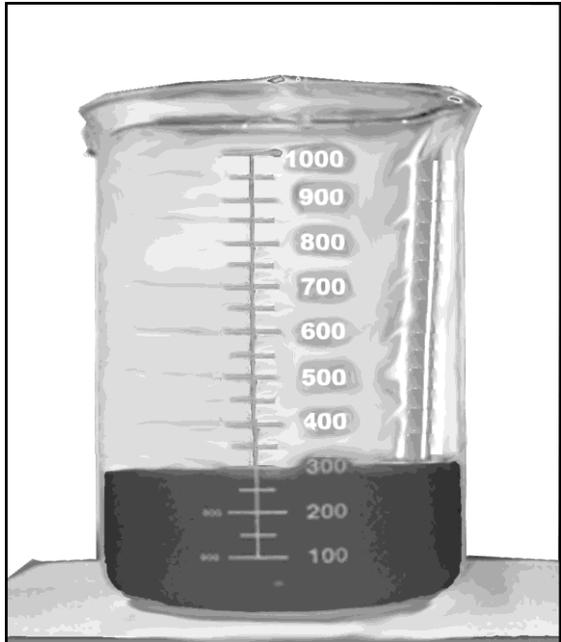
El propanotriol es uno de los principales productos de la degradación digestiva de los lípidos, paso previo para el ciclo de Krebs y también aparece como un producto intermedio de la fermentación alcohólica.

Además junto con los ácidos grasos, es uno de los componentes de lípidos como los triglicéridos y los fosfolípidos. Se presenta en forma de líquido a una temperatura ambiental de $25^\circ C$ y es higroscópico e inodoro. Posee un coeficiente de viscosidad alto y tiene un sabor dulce como otros polialcoholes.

- **Historia**

Alrededor del año 600 a. C., los fenicios divulgaron el conocimiento alquimista de cómo hacer jabón, unos siglos más tarde, tuvo su difusión a través de Marsella, en los galos y en los pueblos germánicos. Anteriormente este compuesto orgánico no se llamaba "glicerina" o "glicerol," porque estos nombres se crearon en el siglo XX. En el siglo XIV durante el reinado de Carlos I, la corona inglesa monopolizaba el comercio y la fabricación de jabón.

En el siglo siguiente, este conocimiento se tomó de la alquimia para la química, un ejemplo histórico estaría en el del químico inglés Claude Joseph Geoffroy (1741), que intensificó sus estudios sobre la naturaleza de las grasas, lo que le llevó al descubrimiento de la glicerina. Menos de 40 años después, el químico sueco Carl



Glicerina.

Wilhelm Scheele fue el primero en aislar este compuesto en 1779, calentando una mezcla de litargirio (PbO) con aceite de oliva. Fue él quien formalizó el descubrimiento de que las grasas y aceites naturales contienen glicerina.

- **Presencia**

El glicerol está presente en todos los aceites y grasas animales y vegetales de la forma combinada, es decir, vinculadas a los ácidos grasos como el ácido esteárico, oleico, palmítico y ácido láurico para formar una molécula de triglicéridos. Los aceites de coco y de palma contienen una cantidad elevada (70 - 80%) de ácidos grasos de cadena de carbono 6 a 14 átomos de carbono.

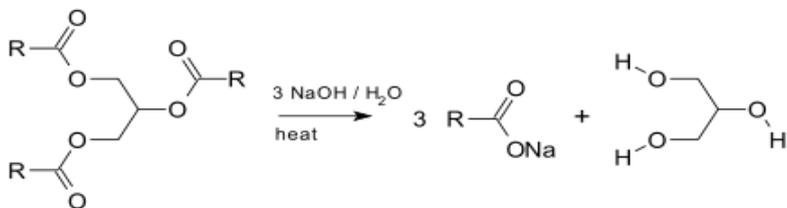
Estos producen más moléculas de glicerol en los aceites que contienen ácidos grasos de 16 a 18 átomos de carbono, como las grasas, el aceite de semilla de algodón, el aceite de soja, el aceite de oliva y el aceite de palma. El glicerol combinado también está presente en todas las células animales y vegetales como parte de su membrana celular en forma de fosfolípidos.

- **Producción de glicerol**

Todo el glicerol producido en el mundo hasta 1949, provenía de la industria del jabón. Actualmente, el 70% de la producción de glicerol le pertenece a los Estados Unidos, y proviene de los glicéridos (grasas y aceites naturales), y el resto de la producción de glicerina sintética (subproducto del propileno), la producción de ácidos grasos y ésteres de ácido ácidos (biodiesel).

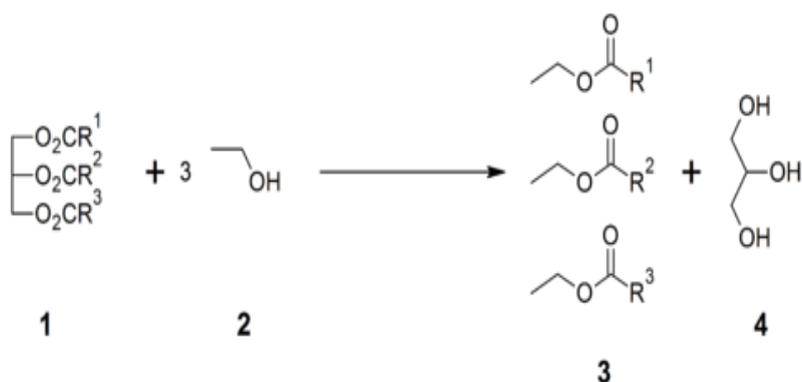
Se producía mediante saponificación de las grasas, como un subproducto de la fabricación del jabón.

Figura 3.3. Obtención de glicerol a partir de la producción de jabón.



También puede obtenerse como un subproducto durante la producción del biodiesel mediante transesterificación. Los triglicéridos (1) reaccionan con un alcohol como el etanol (2) con un catalizador para proporcionar ésteres etílicos de ácidos grasos (3) y glicerol (4):

Figura 3.4. Obtención de glicerol a partir de la producción de biodiesel



El glicerol puede producirse también por diferentes caminos desde el propileno.

- **Salud y factores de riesgo.**

El glicerol es reconocido como seguro para el consumo humano desde 1959. Puede ser utilizado en diversos productos alimenticios para diferentes propósitos. Los niveles de la DL50 en ratas son 470 mg / kg, en conejillos de Indias de 7750 mg / kg. Varios estudios han demostrado que una gran cantidad de glicerol (sintético o natural) se puede administrar sin la aparición de efectos adversos para la salud.

- **Caracterización del glicerol.**

Cuadro 3.13. Características del glicerol.

Glicerina		
Temperatura	°C	30
Densidad	kg/m ³	1255,0
Viscosidad	Pa.s	0,620
Presión de Vapor	kPa	0,0000398

Fuente: elaboración propia

- **Aplicaciones del glicerol.**

El glicerol se genera en grandes cantidades como co-producto del proceso de fabricación de biodiesel. Actualmente, una de las preocupaciones más importantes es como dar salida a este subproducto que está causando un gran impacto a nivel económico y medioambiental en la biorefinería industrial.

Se trata de un compuesto que no es tóxico ni irritante, es biodegradable y reciclable y presenta una serie de propiedades físicas y químicas que pueden convertirlo en un disolvente alternativo a los disolventes orgánicos convencionales. Se caracteriza por su alto punto de ebullición, escasa presión de vapor, elevada capacidad para disolver compuestos orgánicos e inorgánicos y estabilidad en condiciones normales de presión y temperatura.

Es poco miscible en agua y algunos éteres e hidrocarburos. Además, el glicerol puede ser convertido fácilmente en metanol, etanol, 1-propanol y propanodiol por medio de reacciones de hidrogenólisis, siendo entonces, una buena materia prima para la preparación de otros disolventes.

Por todas estas cualidades puede utilizarse como humectante, plastificante, emoliente, espesante, medio dispersor, lubricante, endulzante y anticongelante. También se puede utilizar como ingrediente en cosmética, artículos de aseo, medicamentos y productos alimenticios.

Por otra parte, el glicerol es utilizado como producto bruto en síntesis química de dendrímeros, poliéteres hiperramificados y poliésteres con gran área específica y numerosas ramificaciones funcionales. Siguiendo en esta línea, el glicerol puede utilizarse como disolvente verde en reacciones orgánicas catalíticas y no catalíticas y en metodologías sintéticas ofreciendo buenos rendimientos de conversión y selectividad.

Se trata de un disolvente que respeta el medio ambiente, que puede actuar como medio de reacción, que posibilita la solubilidad de reactivos y catalizadores, que permite llevar a cabo reacciones en microondas, que ofrece una separación sencilla del producto y del reciclado de complejos de metales de transición.

Se ha trabajado en reacciones de sustitución nucleofílica; reducciones estequiométricas con NaBH_4 y catalíticas con H_2/Pd ; acoplamientos tipo Suzuki y tipo Heck y transesterificaciones enzimáticas. Se han obtenido altas conversiones y selectividades de los productos y aunque no puede afirmarse que se trata del mejor disolvente de todos los posibles, estas conclusiones apoyan la continuidad de las investigaciones sobre el glicerol como disolvente verde.

Por otra parte, la reducción catalítica de β -cetoésteres proquirales y cetonas en presencia de glicerol proporciona excelentes rendimientos y selectividades. Estos resultados son comparables con los obtenidos al utilizar agua como disolvente y superiores a los resultados obtenidos para líquidos iónicos y medios fluorados.

Se está planteando también el uso de glicerol en la industria microbiológica para la obtención de productos de alto valor añadido, ya que promete ser una nueva fuente de carbón para las fermentaciones con microorganismos. Recientemente se está estudiando la posibilidad de convertir el bio-glicerol en carbonato de glicerol a través de una ruta alternativa: glicerólisis de urea, que podría ser útil a nivel industrial en un futuro no muy remoto. Este proceso presenta una conversión del 80% y una selectividad próxima al 100%.

Principales usos del glicerol.

- La elaboración de cosméticos como por ejemplo, jabones de tocador. La glicerina aumenta su detergencia, da blancura a la piel y la suaviza. Se puede encontrar entre un 8-15% de glicerina en la composición de estos jabones.
- En el área de la medicina se utiliza en la elaboración de medicamentos en forma de jarabes (como excipiente; como antiséptico para prevenir infecciones en heridas; como inhibidor de cambios enzimáticos durante la fermentación de ungüentos, pastas o cremas; como disolvente de iodo, bromo, fenol, timol, taninos, alcaloides y cloruro de mercurio.
- Como baño calefactor para temperaturas superiores a los 250 °C;
- Lubricación de maquinarias específicas. Por ejemplo, de producción de alimentos y medicamentos (por no ser tóxica), de petróleo, etc.;
- En disciplinas militares para la fabricación de explosivos, como la nitroglicerina así como para enfriar los cañones de las armas de fuego.

- Anticongelante (bajo el punto de fusión del agua, por el descenso crioscópico).
- Elaboración de productos de consumo. Principalmente, se utiliza para preparar extractos de té, café, jengibre y otros vegetales; fabricación de refrescos; aditivo (tipo tensioactivo comestible) para mejorar la calidad del producto.
- Elaboración de resinas alquídicas, que se utilizan como aislantes.
- Fluido separador en tubos capilares de instrumentos.
- Industria de lacas y pinturas. Componente clave de los barnices que se utilizan para acabados. En algunos casos, se utiliza glicerina al 98% para preparar barnices electroaislantes.
- Industria tabaquera. Debido a la elevada capacidad higroscópica de la glicerina, es posible regular la humedad con el fin de eliminar el sabor desagradable e irritante del humo de tabaco.
- Industria textil proporcionando elasticidad y suavidad a las telas.
- Industria del cuero. Se añade a disoluciones acuosas de cloruro de bario con el fin de preservar las pieles. También se añade a emulsiones de cera para curtirlas.

4. ASPECTOS ECONÓMICOS Y FINANCIEROS.

4.1. Costo de producción de semilla de tempate.

En El Salvador FIAGRO en el año 2006, realizó un estudio de sensibilidad de un proyecto de inversión para 5,000 hectáreas de Jatropha Curcas, en término de los riesgos asociados a los supuestos sobre las variables claves del mismo.

Los resultados fueron los siguientes:

**Cuadro 4.1. Estimado de costos de producción a 5 años para 2000
Arbustos por Hectárea y una Producción
de 27,500 Kilogramos de Fruto fresco.**

	Unidad	Costo \$ Unidad	Costo \$ Total
Arbustos	c/u	\$0.10	\$200.00
Fertilizante	Kg.	0.40	113.40
Urea 1ª aplicación	Kg.	0.41	209.22
Urea 2ª aplicación	Kg.	0.41	325.45
Fertilizante foliar	Lt	6.75	6.75
Fertilizante foliar 2ª	Lt	6.75	6.75
Herbicida	Lt	5.50	31.49
Insecticida foliar	Lt	5.50	1.65
Insecticida Nematicida	Kg.	3.70	71.46
Siembra	dh	4.00	200.00
Limpias	dh	4.00	100.00
Fertilizaciones	dh	4.00	24.00
Aplicación Herbicidas	dh	4.00	16.00
Aplicación foliares	dh	4.00	40.00
Aplicación Insecticida foliar	dh	4.00	20.00
Podas	dh	4.00	40.00
Corta de fruto fresco	Kg.	0.01	275.00
Transporte interno	TM	5.00	25.00
Descascarillado	TM	10.00	50.00
Secado	TM	5.00	25.00
Transporte interno	TM	11.00	55.00
Total			US\$1,836.17

Fuente: elaboración propia

4.2. Análisis de precio del aceite de tempate.

4.2.1. Mercado Interno

En el mercado interno no existen datos del precio del aceite de tempate, pero con fines de producción de biodiesel, se tomará como precio de referencia el de aceite de Palma Africana, ya que sirven para los mismos fines, aunque sus características son un poco diferentes.

Con el objeto del presente análisis tomaremos el dato de US\$450 dólares por tonelada métrica de aceite, al cual si le quitamos los costos de extracción de US\$ 60.00 por TM (dato presentado en el 5° Foro mundial de Energía sostenible, celebrado en Viena del 11 al 13 Mayo de 2005), nos quedan US\$ 390 dólares para el pago de la semilla. Si necesitamos de tres toneladas de semilla seca para la producción de una tonelada de aceite, su precio a pagar sería de US\$ 130.00 por tonelada de semilla.

El rendimiento de semilla es del 16%, por lo que se necesitaría comprar 18,750 Kg de fruto, lo que significa que el kilo de fruto fresco tendría un precio de \$0.0208.

Comprobación:

Costo de fruto fresco 18,750 X 0.0208	\$390.00
Costo de extracción de aceite	\$ 60.00
Costo tonelada de aceite	\$450.00

Para poder pagar el kilo de fruto fresco a US\$0.03, el precio del aceite de palma tendría que ser de US\$622.50 la TM.

4.2.2. Comercio Externo

Debido a que el aceite de tempate soporta temperaturas más frías que el aceite de Palma Africana, es viable su exportación para la comunidad Europea y otras regiones más frías; por lo cual su precio de exportación debería ser sujeto de investigación, con lo que se mejoraría la viabilidad del proyecto. Es factible que no existan precios internacionales porque no hay volúmenes exportables más que en la India.

Hay que tener en cuenta que la comunidad Europea paga el diesel por lo menos tres veces el valor de lo que nosotros pagamos, esto es como 6 dólares por galón de biodiesel, lo que permitiría tener excelentes precios de exportación

La producción de Europa solo cubre como máximo el 10% de su demanda total de biodiesel, esto ocasionará que para los próximos cinco años el aceite de tempate tenga una gran demanda del producto.

La Unión Europea, pretende regular la mezcla de diesel fósil con biodiesel en un cinco por ciento.

Por lo anteriormente dicho, la exportación del aceite de tempate hace que el proyecto tenga una gran perspectiva de exportación.



Procesador de biodiesel

4.3. Costo de producción de biodiesel.

Tomando como base el documento anteriormente citado, y con un precio de US\$ 450.00 la tonelada métrica de aceite, el costo de producción de biodiesel sería:

Cuadro 4.2. Costo de producción de biodiesel.

Costo del Aceite	US\$ 450.00
Costo de transesterificación	US\$ 100.00
Costo de depreciación de Capital	US\$ 21.08
Cargos Administrativos	US\$ 10.54
Intereses de capital de trabajo	US\$ 26.36
Total de costode 900 Kg.	US\$ 607.98
Total de costo por tonelada	US\$ 675.54
Menos 100 Kg. de glicerina	US\$ 52.71
Costo neto de 1000 Kg. Biodiesel	US\$ 622.83
Costo Biodiesel por kilo	US\$ 0.62
Costo por litro	US\$ 0.56
Costo por galón	US\$ 2.13

Fuente: elaboración propia

Con un precio de US\$ 2.13 por galón de biodiesel en planta el costo de venta al distribuidor sería:

Costo de producción/galón	US\$2.13
Margen de ganancia (10%)	US\$0.21
TOTAL	US\$2.34

El precio de venta al público sería:

Precio al distribuidor	US\$ 2.34
FOVIAL	US\$ 0.20
Flete Local	US\$ 0.032
Margen de ganancia Gasolineras	US\$ 0.051
Margen– distribuidoras	US\$ 0.038
Precio al público	US\$ 2.66

Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

1. El rendimiento promedio en la producción de biodiesel fue 92.64%, valor que es aceptable de acuerdo a la literatura consultada.
2. Los valores promedio porcentuales máxicos para el biodiesel y la glicerina, calculados en base a la masa de aceite procesado, son similares a los datos de la literatura consultada. Los valores promedio obtenidos son: 93.06% para biodiesel y 9.64% para glicerina pura.
3. En la producción de biodiesel los resultados muestran que la energía contenida en los productos y subproductos es mayor que la energía que se consume en su producción.
4. El precio del galón de biodiesel al público es de US\$2.66, el cual es competitivo cuando el galón de diesel fósil supera este valor, como es el caso del precio del diesel en este período.
5. La glicerina es el subproducto del proceso de producción de biodiesel y tiene muchas aplicaciones por lo que tiene un valor comercial que puede aprovecharse para financiar el mismo proceso.

NOTAS

¹-La masa de ácidos grasos libres (AGL) se multiplica por 2.25 para obtener la masa de metanol que debe utilizarse para la esterificación. Para la determinación del contenido de ácidos grasos libres véase el anexo A.

² E. prod.= energía del biodiesel + energía de la glicerina.

³ Van Gerpen, J.; Shanks, B.; Pruszko, R. Biodiesel Production Technology. National Renewable Energy Laboratory. U.S.A. 2004. Pág. 3.

BIBLIOGRAFÍA

Donato, L.; Huerga, I.; Hilbert, J. (2008). **Balance energético de la producción de biodiesel a partir de soja en la república Argentina**. Argentina: INTA.

Glicerol. Recuperado el 14 de diciembre de 2010, de <http://es.wikipedia.org/wiki/Glicerol>.

Machuca, L. (2007). **Desarrollo de Biodiesel en El Salvador**. El Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.

Propiedades del biodiesel según las normas Europea y de Estados Unidos de América. (2000). Recuperado el 15 de marzo de 2010, de <http://www.abcbiodiesel.com.ve>.

Van Gerpen, J.; Shanks, B.; Pruszko, R. (2004). **Biodiesel Production Technology**. U.S.A.: National Renewable Energy Laboratory.

ANEXOS

ANEXO A

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE ÁCIDOS GRASOS LIBRES E ÍNDICE DE ACIDEZ EN MUESTRAS DE ACEITE Y BIODIESEL.

Para esta determinación se utilizó el método oficial de análisis de la sociedad de químicos de los Estados Unidos. A continuación se describe el procedimiento de análisis.

Pesar 7.05 gramos de muestra y colocarla en un frasco de 250 ml conteniendo 50 ml de alcohol, previamente neutralizado con solución 0.1 N (normal) de NaOH y 2 ml de fenolftaleína. Titular esta muestra con solución 0.25 N de NaOH con agitación continua hasta que aparezca un color rosado permanente.

El volumen de NaOH gastado corresponde al contenido de ácidos grasos libres (%AGL) que posee la muestra.

El índice de acidez es igual al doble de ácidos grasos libres.

$$\mathbf{IA = 2 \% AGL}$$

ANEXO B

BALANCE DE MATERIA EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Cálculo de la cantidad (teórica) de biodiesel producido.

Para calcular la cantidad teórica de biodiesel se parte de la masa de aceite. Se calcula los moles respectivos de aceite dividiendo la masa entre el peso molecular. De acuerdo a la estequiometría de la reacción, un mol de aceite reacciona para producir tres moles de biodiesel. Utilizando esta relación y los moles de aceite se obtiene los moles de biodiesel teóricos. Para obtener la masa de biodiesel teórico se multiplica los moles por el peso molecular.

A continuación se presenta un ejemplo de los cálculos realizados.

Cuadro B.1 Balance de masa

ENTRADA			SALIDA			
Aceite (kg)	Metanol (kg)	NaOH (kg)	B100 (kg)	Glicerina (kg)	Metanol nrx (kg)	Jabón (kg)
1.78E-01	6.32E-02	1.50E-03	1.64E-01	1.69E-02	4.55E-02	1.67E-02

- Aceite:

Masa= 1.78E-01kg

Peso molecular = 885.46 kg/kgmol (triolina)³

Moles = Masa/Peso molecular

Moles = 1.78E-01 Kg/885.46 kg/kgmol = 2.01E-04 kgmol

- Biodiesel teórico:

$$\text{Peso molecular} = 296.5 \text{ kg/kgmol}$$

$$\text{Moles} = (\text{kgmol de aceite})(3 \text{ kgmol biodiesel}/1 \text{ kgmol de aceite})$$

$$\text{Moles} = (2.01\text{E-}04 \text{ kgmol})(3 \text{ kgmol biodiesel}/1 \text{ kgmol de aceite}) = 6.03\text{E-}04 \text{ kgmol}$$

$$\text{Masa} = (\text{Moles})(\text{Peso molecular})$$

$$\text{Masa} = (6.03\text{E-}04 \text{ kgmol})(296.5 \text{ kg/kgmol}) = 1.79\text{E-}01 \text{ kg}$$

Cálculo de glicerina producida

La cantidad de glicerina producida se calcula a partir de la cantidad real de biodiesel producido. Tomar en cuenta que en la reacción química se producen tres moles de biodiesel por cada mol de glicerina. Esta relación estequiométrica se debe considerar en el cálculo. Se calcula los moles de biodiesel dividiendo la masa entre el peso molecular. Con los moles de biodiesel y la relación estequiométrica entre el biodiesel y la glicerina, se calcula los moles de glicerina. La masa de glicerina se obtiene multiplicando los moles por el peso molecular correspondiente.

$$\text{Peso molecular de biodiesel} = 296.5 \text{ kg/kgmol}$$

$$\text{Masa de biodiesel} = 1.64\text{E-}01 \text{ kg}$$

$$\text{Moles de biodiesel} = \text{masa de biodiesel}/\text{peso molecular biodiesel}$$

$$\text{Moles de biodiesel} = 1.64\text{E-}01 \text{ kg}/296.5 \text{ kg/kgmol} = 5.53\text{E-}04 \text{ kgmol}$$

$$\text{Peso molecular glicerina} = 92.1 \text{ kg/kgmol}$$

$$\text{Moles de glicerina} = (\text{kgmol biodiesel})(1 \text{ kgmol glicerina}/3 \text{ kgmol biodiesel})$$

$$\text{Moles de glicerina} = (5.53\text{E-}04 \text{ kgmol})(1 \text{ kgmol glicerina}/3 \text{ kgmol biodiesel}) = 1.84\text{E-}04 \text{ kgmol}$$

$$\text{Masa de glicerina} = (\text{kgmol glicerina})(\text{peso molecular glicerina})$$

$$\text{Masa de glicerina} = (1.84\text{E-}04 \text{ kgmol})(92.1 \text{ kg/kgmol}) = 1.69\text{E-}02 \text{ kg}$$

Cálculo de metanol que no reaccionó

Para calcular la cantidad de metanol que no reaccionó, a la cantidad de metanol inicial se le resta el metanol que reaccionó. El metanol inicial es el que se agrega durante una prueba. El metanol que reacciona se calcula a partir del biodiesel producido. Se utiliza la relación estequiométrica la cual indica que para producir tres moles de biodiesel tienen que reaccionar tres moles de metanol. Con los moles de biodiesel producido y la relación estequiométrica entre el biodiesel y el metanol, se calcula los moles de metanol que reaccionaron. La masa de metanol se calcula multiplicando los moles por el peso molecular.

- **Biodiesel producido (real):**

$$\text{Masa} = 1.64\text{E-}01 \text{ kg}$$

$$\text{Moles} = \text{masa/peso molecular} = 1.64\text{E-}01 \text{ kg}/296.5 \text{ kg/kgmol} = 5.53\text{E-}04 \text{ kgmol}$$

- **Metanol inicial:**

$$\text{Masa} = 6.32\text{E-}02 \text{ kg}$$

$$\text{Peso molecular} = 32.04 \text{ kg/kgmol}$$

$$\text{Moles} = \text{Masa/Peso molecular}$$

$$\text{Moles} = 6.32\text{E-}02 \text{ kg}/32.04 \text{ kg/kgmol} = 1.97\text{E-}03 \text{ kgmol}$$

- **Metanol que reaccionó:**

$$\text{Peso molecular} = 32.04 \text{ kg/kgmol}$$

$$\text{Moles} = (\text{kgmol biodiesel})(3 \text{ kgmol metanol}/3 \text{ kgmol biodiesel})$$

$$\text{Moles} = (1.64\text{E-}01 \text{ kgmol})(3 \text{ kgmol metanol}/3 \text{ kgmol biodiesel}) = 1.64\text{E-}01 \text{ kgmol}$$

$$\text{Masa} = (\text{moles})(\text{peso molecular}) = (1.64\text{E-}01 \text{ kgmol})(32.04 \text{ kg/kgmol}) = 5.12\text{E-}03 \text{ kg}$$

- **Metanol que no reaccionó:**

$$\text{Metanol que no reaccionó} = \text{metanol inicial} - \text{metanol que reaccionó}$$

$$\text{Metanol que no reaccionó} = 6.32\text{E-}02 \text{ kg} - 5.12\text{E-}03 \text{ kg} = 4.55\text{E-}02 \text{ kg}$$

Cálculo de jabón producido

Por jabón entiéndase una mezcla de varios compuestos: jabón, hidróxido de sodio remanente, fosfato de sodio, sulfato de sodio, agua y residuos. Se calcula la masa de jabón producido mediante el balance de masa mostrado a continuación.

Masa jabón = masa aceite + masa metanol inicial + masa NaOH – masa biodiesel – masa glicerina – masa metanol que no reaccionó.

Masa jabón = $1.78E-01$ kg + $6.32E-02$ kg + $1.50E-03$ kg – $1.64E-01$ kg - $1.69E-02$ kg - $4.55E-02$ kg = $1.67E-02$ kg

Cálculo de metanol para la transesterificación

Para asegurar el máximo rendimiento en la producción de biodiesel, es indispensable utilizar un exceso de metanol. Lo recomendado es usar el doble de metanol que el necesario. En la estequiometría de la reacción se tiene que 1 mol de aceite requiere 3 moles de metanol, al duplicar esta relación se debe usar 6 moles de metanol por cada mol de aceite. A continuación se presenta un ejemplo.

- **Cálculo de los moles de aceite**

Masa aceite = $1.78E-01$ kg

Peso molecular = 885.46 kg/kgmol

Moles = Masa/Peso molecular

Moles = $1.78E-01$ kg /885.46 kg/kgmol = $2.01E-04$ kgmol

- **Masa de metanol**

Peso molecular metanol = 32.04 kg/kgmol

Relación molar metanol/aceite = 6

Masa metanol = moles aceite x (relación molar metanol/aceite) x peso molecular metanol.

Masa metanol = $2.01E-04$ kgmol x 6 x 32.04 kg/kgmol = $3.86E-02$ kg

La masa de metanol representa el 22% de la masa de aceite. Por tanto, en la transesterificación debe utilizarse una masa de metanol igual o superior al 22% de la masa de aceite.

Rendimiento en la producción de biodiesel

Cuadro B.2 Rendimiento

Lote	ACEITE	BIODIESEL		GLIC.	RENDIMIENTO	
	(Kg)	Real (Kg)	Teórico (Kg)	(Kg)	B100 (%m)	Glic. (%m)
1	1.78E-01	1.64E-01	1.79E-01	1.69E-02	91.47%	9.51%

$\% \text{ Rendimiento} = (\text{masa real de biodiesel} / \text{masa teórica de biodiesel})100$

$\% \text{ Rendimiento} = (1.64\text{E-}01 \text{ kg} / 1.79\text{E-}01 \text{ kg})100 = 91.47\%$

El porcentaje en masa de glicerina producida se calculó mediante la fórmula:

$\%m = (\text{masa de glicerina} / \text{masa de aceite})100$

$\%m = (1.69\text{E-}02 \text{ kg} / 1.78\text{E-}01 \text{ kg})100 = 9.51\%$

ANEXO C

BALANCE DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Para los cálculos del balance energético se utilizan los calores específicos de los productos biodiesel y glicerina, que se muestran a continuación.

Cuadro C.1 Calor específico

Biodiesel	35	MJ/L
Glicerina	16.5	MJ/Kg

Para los cálculos se tomó los datos obtenidos en la prueba 1.

Cuadro C.2 Balance de masa

ENTRADA			SALIDA			
Aceite (Kg)	Metanol (Kg)	NaOH (kg)	B100 (Kg)	Glicerina (Kg)	Metanol nrx (Kg)	Jabón (Kg)
1.78E-01	6.32E-02	1.50E-03	1.64E-01	1.69E-02	4.55E-02	1.67E-02

Cuadro C.3 Balance de energía

Lote	Energía producto y subp. (MJ)			E.cons.	E. neta	Rel. E.
	E. glicerina	E. biodiesel	E. Prod.	MJ	MJ	E.total/E.cons
1	2.79E-01	6.58E+00	6.86E+00	1.91E-01	6.67E+00	3.60E+01

El volumen de biodiesel producido es:

Volumen = masa/densidad = $1.64E-01 \text{ Kg}/(0.87 \text{ Kg/L}) = 0.19 \text{ litros}$.

La masa de glicerina producida es $1.69E-02 \text{ Kg}$

Energía glicerina = masa x capacidad calorífica

Energía glicerina = $1.69E-02 \text{ Kg} \times 16.5 \text{ MJ/Kg} = 2.79E-01 \text{ MJ}$

Energía biodiesel= volumen x capacidad calorífica

Energía biodiesel= $0.19 \text{ litros} \times 35 \text{ MJ/L} = 6.58E+00 \text{ MJ}$

Energía producto = Energía glicerina + Energía biodiesel

Energía producto = $2.79E-01 \text{ MJ} + 6.58E+00 \text{ MJ} = 6.86E+00 \text{ MJ}$

Energía consumida = $1.91E-01 \text{ MJ}$

Energía neta = Energía producto - Energía consumida

Energía neta = $6.86E+00 \text{ MJ} - 1.91E-01 \text{ MJ} = 6.67E+00 \text{ MJ}$

Impresión y diseño:



Tel.: 2100-5156

Este libro se terminó de imprimir en
Agosto de 2011, en Impresos PRYSA

Tiraje: 1000 ejemplares