

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
INGENIERÍA AMBIENTAL

*PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL CON EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA
AMBIENTAL*

**APROVECHAMIENTO DEL ACEITE DE COCINA USADO EN EL INSTITUTO
TECNOLÓGICO DE COSTA RICA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL**

REALIZADO POR:

ARTURO STEINVORTH ÁLVAREZ

CARTAGO AGOSTO, 2013


“Aprovechamiento del aceite de cocina usado en el comedor institucional del Instituto
Tecnológico de Costa Rica para la producción de biodiesel”

Informe presentado a la Escuela de Química
del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero ambiental con el grado en Licenciatura


Miembros del tribunal



MSc. Eric Romero Blanco
Director de tesis



Ph.D. Helder Teixeira Gomes
Lector 1



Ing. Carlos Roldán Villalobos
Lector 2

DEDICATORIA

A mi familia y amigos por creer en mí
y empujarme a terminar esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A todo el personal del comedor institucional del ITCR,
especialmente a Don Édgar, Willy, Carlos y Diego.

Al personal del CEQIATEC y a Marco
por la ayuda brindada en el laboratorio.

A mis profesores Eric Romero y Helder Teixeira Gomes por guiarme
y aclararme las dudas durante la elaboración de este trabajo.

Tabla de contenido

1. Resumen.....	7
2. Introducción.....	8
2.1. Definición del problema.....	8
2.2. Objetivos.....	9
2.3. Resumen metodológico.....	9
2.3.1. Cuantificación del biodiesel.....	9
2.3.2. Análisis de calidad del biodiesel.....	10
2.3.3. Validación de datos obtenidos.....	11
2.3.4. Costos y beneficios del proyecto.....	11
3. Marco de referencia.....	12
3.1. Energías renovables.....	12
3.2. Situación nacional de combustibles.....	13
3.2.1. Consumo.....	13
3.2.2. Precios.....	15
3.2.3. Programa para la producción de biocombustibles.....	16
3.3. Programa de Energías Limpias del Instituto Tecnológico de Costa Rica (PELTEC).	17
3.4. Biodiesel.....	18
3.4.1. Definición.....	19
3.4.2. Proceso de producción.....	19
4. Metodología.....	24
4.1. Definición del tipo de estudio.....	24
4.2. Objeto de estudio y recolección de la muestra.....	24

4.3. Rendimiento y cuantificación.....	25
4.3.1. Obtención y preparación del aceite de cocina usado.	25
4.3.2. Determinación de la cantidad extra de NaOH.	26
4.3.3. Preparación del metóxido de sodio.	26
4.3.4. Reacción de transesterificación.....	27
4.3.5. Separación del biodiesel y la glicerina.....	27
4.3.6. Lavado y secado del biodiesel.	28
4.4. Análisis de calidad.	29
4.4.1. Densidad.	29
4.4.2. Viscosidad cinemática a 40°C.	29
4.4.3. Número ácido.....	30
4.5. Validación de resultados.	31
4.6. Cotización de los componentes básicos.	31
5. Resultados y discusión.	32
5.1. Rendimiento y cuantificación.....	32
5.2. Análisis de calidad.	33
5.3. Costos y beneficios del sistema.....	35
6. Conclusiones y recomendaciones.	39
7. Fuentes de referencia.	41

Índice de figuras

Figura 1. Distribución del consumo en Costa Rica de productos derivados de petróleo en el año 2009.	14
Figura 2. Comportamiento de la factura petrolera de Costa Rica en los años 1995-2009. ..	14
Figura 3. Evolución del parque automotor de Costa Rica.	15
Figura 4. Precio en colones del diesel durante el período comprendido entre mayo de 2008 a mayo de 2013.	16
Figura 5. Reacción de transesterificación de aceite a biodiesel.	19
Figura 6. Reacción de transesterificación del aceite de cocina usado en el comedor del ITCR.	27
Figura 7. Separación de fases entre el biodiesel crudo y la glicerina cruda.	28
Figura 8. Lavado y secado del biodiesel.	28
Figura 9. Esquema de la planta piloto de producción de biodiesel propuesta para el Instituto Tecnológico de Costa Rica.	31

Índice de cuadros

Cuadro 1. Especificación de calidad para el biodiesel (B100).	22
Cuadro 2. Volumen producido y rendimiento del proceso.....	32
Cuadro 3. Densidad del biodiesel a 15 °C, viscosidad cinemática a 40°C y número ácido con sus respectivos parámetros establecidos en la normativa vigente.	34
Cuadro 4. Resumen comparativo entre los promedios obtenidos y los parámetros contenidos en el Reglamento Técnico Centroamericano.	34
Cuadro 5. Costos de la planta piloto para la producción de biodiesel con aceite de cocina usado.....	36

1. Resumen

El creciente aumento del consumo de combustibles fósiles y el aumento en su precio a nivel internacional han impulsado la búsqueda de nuevas alternativas para la sustitución de estos. El aceite de cocina usado surge como una opción para la producción de biodiesel. Este residuo en caso de ser mal manejado es sumamente dañino para el ambiente, en especial para las fuentes de agua.

El Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), como institución emblemática del país, debe dar el ejemplo y aprovechar los residuos generados dentro de sus instalaciones para disminuir su impacto ambiental. Además de esto, contribuir en la formación de sus estudiantes tanto en el área ambiental, como en el desarrollo de posibles nuevos negocios.

El propósito del trabajo es explorar la capacidad del ITCR de producir biodiesel a partir del aceite de cocina usado en el comedor institucional, que cumpla con las normas de calidad establecidas a nivel nacional y genere beneficios tanto educativos como económicos a la institución.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el biodiesel producido tuvo un alto rendimiento y los parámetros estudiados estuvieron en cumplimiento con lo dispuesto en la legislación nacional. Con base en esto, el proyecto demuestra potencial, sin embargo se debe lograr reducir los costos operativos y de infraestructura para garantizar que sea viable económicamente.

Palabras clave: Biodiesel; Aceite de cocina usado; Residuos; Energía renovable; Biomasa.

2. Introducción

2.1. Definición del problema

El alto costo de los combustibles fósiles y sus derivados y la contaminación que estos generan han impulsado la búsqueda de alternativas menos dañinas y más económicas. La producción de biocombustibles se ha ido abriendo camino en el mundo por estas razones. No obstante, algunas de las materias primas utilizadas entran en competencia directa con alimentos, lo que produce distorsiones en sus precios con sus consecuencias inmediatas en el ámbito social. Es por esto que también se ha venido trabajando en alternativas aprovechando residuos que se generen en distintos procesos. Uno de estos precisamente es el aceite de cocina usado.

El aceite usado presenta una gran opción para la generación de biodiesel. Este es desechado tanto en hoteles, restaurantes, negocios de comida rápida, comedores e inclusive en los hogares. Esta disponibilidad la hace atractiva para su aprovechamiento. Por otro lado su disposición incorrecta es un peligro para el ambiente, especialmente para las aguas. La práctica de descartar el aceite por el drenaje es común, ya que existe desinformación sobre los peligros que este puede representar al ambiente. Inclusive, la utilización del aceite de cocina usado para la alimentación de animales, tales como cerdos, es considerada riesgosa por algunos compuestos tóxicos que se forman y al ser ingeridos por los animales se van bioacumulando en la cadena alimenticia (Sudhir et al, 2007).

El Instituto Tecnológico de Costa Rica, en su comedor institucional, también genera este tipo de residuo que actualmente no se aprovecha. Esto crea una oportunidad de darle valor a algo que se descarta. La producción de biodiesel da como producto final el biocombustible, que presenta ventajas, con respecto al diesel proveniente del petróleo, como menor toxicidad, menor emisión de algunos contaminantes y ser biodegradable (sus productos finales son CO₂ y H₂O). Además se genera como subproducto de producción glicerina, que se puede destinar a la producción de jabón sin requerir mucha inversión.

Este proyecto tiene como eje central el manejo responsable de residuos, dirigido hacia la reutilización o valorización. Esto con miras a aprovechar los que se produzcan internamente para generar productos con valor agregado y evitar el tratamiento o mala disposición de los residuos, que puede llegar a ser más costoso y dañino para el ambiente.

2.2. Objetivos

El objetivo general del trabajo consiste en:

- *Valorizar los residuos de aceite de cocina usado en el comedor del Instituto Tecnológico de Costa Rica mediante la producción de biodiesel con el fin de contribuir al programa de energías limpias de la institución y al aprendizaje de los estudiantes sobre los biocombustibles.*

Los objetivos específicos planteados son los siguientes:

- *Cuantificar la producción de biodiesel a partir del residuo de aceite de cocina usado para obtener información relevante para el posterior diseño de un sistema.*
- *Analizar algunos parámetros de calidad del biodiesel producido y su cumplimiento con la legislación nacional para poder ser utilizado a nivel interno en el Instituto Tecnológico de Costa Rica.*
- *Determinar los costos y beneficios que podría brindar el proyecto a la institución.*

2.3. Resumen metodológico

La metodología se separó de acuerdo con los objetivos establecidos.

2.3.1. Rendimiento y cuantificación del biodiesel

Para la cuantificación del biodiesel se trabajó en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Ambiental.

- *Obtención del aceite de cocina usado en el comedor institucional del ITCR:* Se coordinó con el personal para obtener un galón de aceite cada vez que fuera desechado luego de su uso.
- *Pre-tratamiento del aceite:* Filtración para eliminar partículas gruesas en el aceite.
- *Determinación de la cantidad de hidróxido de sodio (NaOH) extra para neutralizar ácidos grasos libres:* Se realizó una titulación del aceite para determinar la masa extra a adicionar al metanol en la preparación del metóxido de sodio.
- *Preparación del metóxido de sodio:* mezcla del metanol con hidróxido de sodio.
- *Reacción de transesterificación:* reacción que ocurre entre el aceite de cocina usado y el metóxido de sodio preparado.
- *Separación del biodiesel y glicerina:* Por medio de un embudo de separación para obtener el producto deseado y el subproducto aprovechable.
- *Lavado y secado del biodiesel:* Último paso antes de obtener el biodiesel listo para ser utilizado directamente o mezclado con diesel.

El producto esperado es el rendimiento de la reacción de transesterificación (se trabajó con una base de 1 L).

2.3.2. Análisis de calidad del biodiesel.

Los parámetros a evaluar para la calidad del biodiesel en el país se encuentran estipulados en el Reglamento Técnico Centroamericano, contenido en el decreto ejecutivo N°34128 COMEX-MEIC-MINAET. Los parámetros estudiados fueron: densidad del biodiesel, número ácido y viscosidad. Se escogieron estos parámetros ya que se contaba con el equipo para realizar las mediciones.

- *Densidad:* con base en el método ASTM D-1298, con un densímetro.
- *Número ácido:* con base en el método ASTM D-664, por colorimetría.

- *Viscosidad:* con base en el método ASTM D-445, utilizando un viscosímetro de Ostwald calibrado con agua destilada.

Los productos esperados son las mediciones para compararlas a lo establecido en la legislación vigente.

2.3.3. Validación de datos obtenidos.

Los datos obtenidos de los análisis de calidad son respaldados por medio de los métodos de la American Society for Testing and Materials (ASTM). La estandarización de dichos procedimientos valida los resultados que se obtienen de los experimentos.

2.3.4. Costos y beneficios del proyecto.

Para determinar los costos se cotizaron los componentes del sistema propuesto, los químicos necesarios y la mano de obra requerida. Se realizó una lista con una breve explicación de los beneficios que puede traer el proyecto a la institución.

3. Marco de referencia

El mal manejo del aceite de cocina usado puede verse tanto desde la óptica de ser un problema ambiental y de salud tanto como la de ser una oportunidad de negocio y de contribuir al desarrollo de las energías renovables, específicamente los combustibles alternativos.

La problemática que puede generar la mala disposición de los aceites en general es grave. El descarte del aceite por el drenaje puede causar que este se taquee, por lo tanto incrementa los costos de mantenimiento de los sistemas de drenaje. Además de formar una capa en la superficie del agua que impide la transferencia de oxígeno del aire al agua, su alta carga orgánica puede provocar problemas en las plantas de tratamiento de aguas y ecosistemas acuáticos (Guerrero et al, 2011). Inclusive la alimentación de animales utilizando los aceites de cocina usados puede representar un riesgo. Si estos han sido sobreutilizados, se pueden formar compuestos como hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), bifenilos policlorados (PCB), dioxinas y otras sustancias relacionadas con dioxinas, epóxidos, hidroperóxidos y sustancias poliméricas que han demostrado ser adversas para la salud. Entre los efectos nocivos están: retraso en el crecimiento, incremento en el tamaño de riñones e hígado y otros órganos. También algunos de estos compuestos son bioacumulables a través de los años, por lo que los efectos son cada vez más graves conforme se sube en la pirámide alimenticia (Sudhir et al, 2007).

3.1. Energías renovables.

Uno de los grandes desafíos a solucionar durante este siglo a nivel mundial será el abastecimiento y producción de energía. Con los fluctuantes precios del crudo, inestabilidad en las zonas productoras y las reservas disminuyendo, los países deben buscar alternativas. Las energías renovables representan un nicho muy importante en el cual, tanto la empresa privada como los gobiernos, deben invertir en estas áreas.

El Programa Ambiental de las Naciones Unidas del 2011 (UNEP por sus siglas en inglés) define las energías renovables como: *“aquellas que son obtenidas por procesos naturales que son repuestos constantemente. En sus varias expresiones se deriva directa o indirectamente del sol o el calor emanado desde la tierra. Incluye también la generada por recursos solares, eólicos, biomásicos, geotérmicos, hídricos y marítimos, además de biocombustibles e hidrógeno derivados de recursos renovables”* (UNEP 2011).

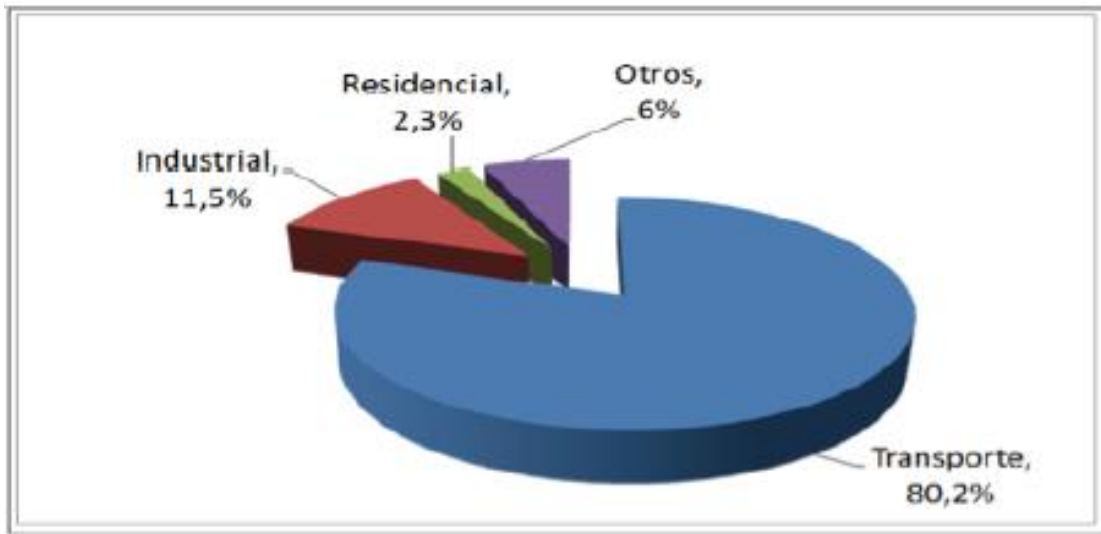
Las energías renovables traerán muchos más beneficios que simplemente energéticos. El propio desarrollo de estos traerá nuevos empleos, logrará llevar energía a lugares remotos, ayudará a reducir el impacto ambiental, disminuir la dependencia de fuentes fósiles, etc. La iniciativa a nivel mundial es incursionar más en este tipo de tecnologías y lograr hacerlas competitivas a nivel de mercado. De acuerdo con el UNEP las regiones en las cuales hay mayor potencial de explotar este tipo de fuentes es en los países en vías de desarrollo.

3.2. Situación nacional de combustibles.

Costa Rica tiene un potencial para generar 635 MW a partir de biomasa, de los cuales 95 MW son viables desarrollar (MINAET 2010). No obstante solamente se han instalado 24 MW del total. El país tiene un increíble potencial para investigar en productos agrícolas y otros residuos que puedan ayudar a reducir la dependencia de combustibles fósiles y ayudar a mitigar los efectos negativos que estos tienen sobre la economía y la salud. Costa Rica tiene la oportunidad de aprovechar sus residuos biomásicos para tal fin.

3.2.1. Consumo.

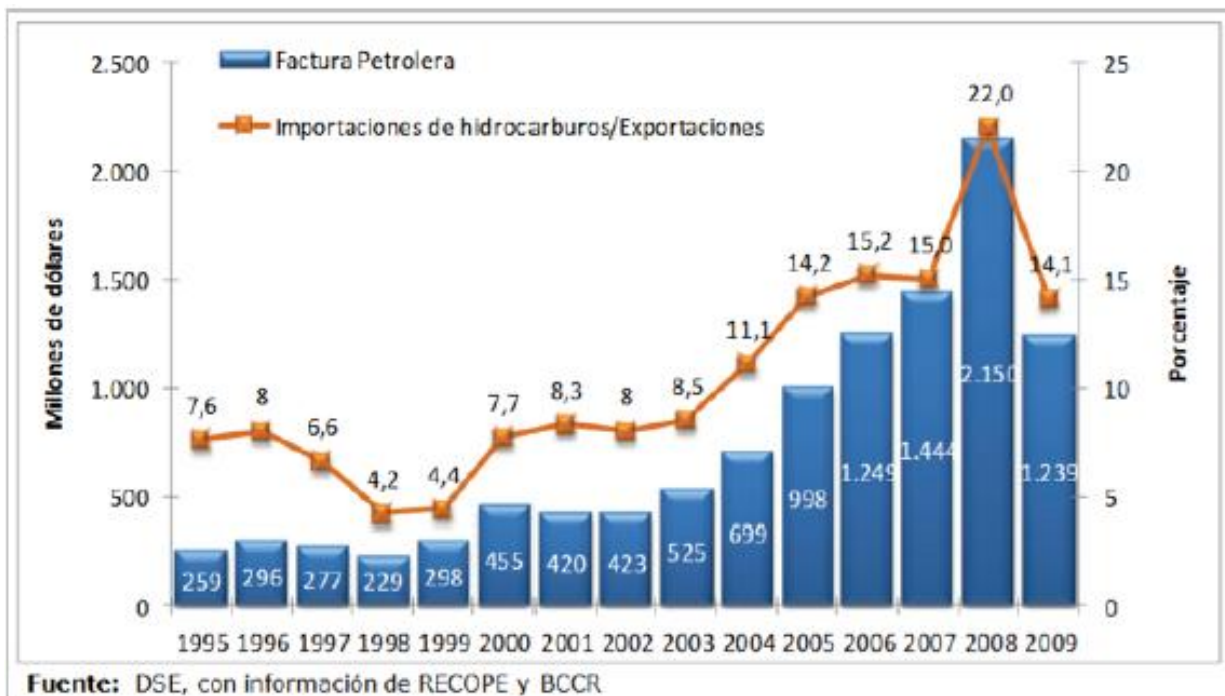
El país tiene una alta dependencia de los combustibles fósiles para varios de los sectores que componen su economía. De acuerdo con un estudio del Ministerio de Energía, Ambiente y Telecomunicaciones (MINAET) del año 2010, la mayoría del consumo de estos productos es para el sector de transportes (Figura 1.).



Fuente: Dirección Sectorial de Energía, Balance Nacional de Energía 2009

Figura 1. Distribución del consumo en Costa Rica de productos derivados de petróleo en el año 2009.

La factura petrolera ha venido creciendo a un ritmo elevado durante los últimos años y se prevé que siga incrementando, de acuerdo con el Plan Estratégico Energético del 2010 (Figura 2).



Fuente: DSE, con información de RECOPE y BCCR

Figura 2. Comportamiento de la factura petrolera de Costa Rica en los años 1995-2009.

Aunado a esto, el parque automotor del país también muestra signos de crecimiento, según este mismo documento (Figura 3). De acuerdo con datos de la Refinería Costarricense de Petróleo aproximadamente un 38% de la venta de derivados del petróleo corresponde al diesel (RECOPE, 2012).

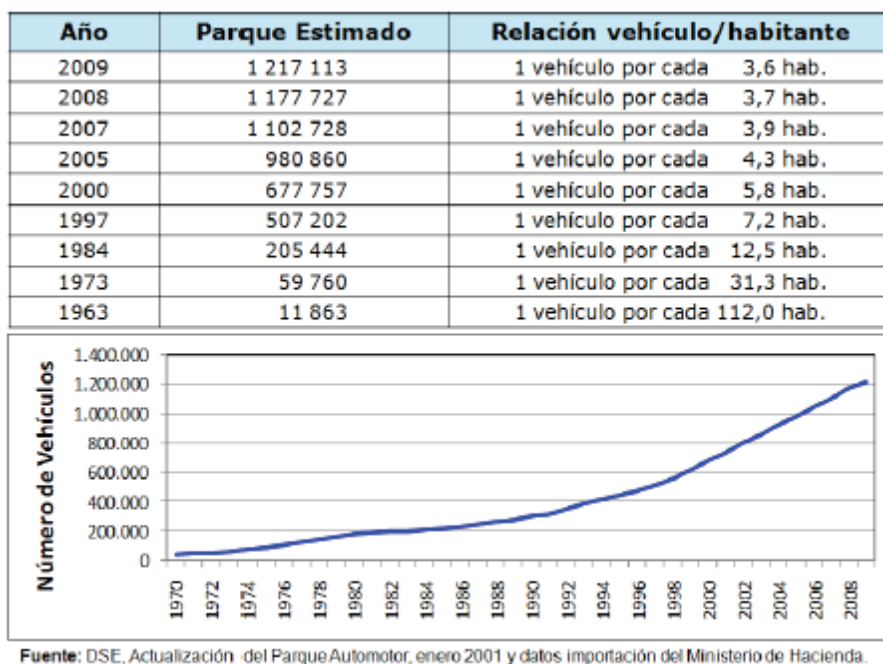


Figura 3. Evolución del parque automotor de Costa Rica.

3.2.2. Precios.

La volatilidad de los precios internacionales del petróleo y sus derivados traen gran incertidumbre al país. Al ser una nación meramente importadora de crudo y productos terminados, se está de manos atadas a la hora de depender totalmente de los mercados. El comportamiento durante los últimos cinco años, de 2008-2013, muestra altibajos, sin embargo, se nota que la tendencia es al alza (Figura 4). Esto porque conforme merman las reservas de hidrocarburos a nivel mundial, la demanda dispara los precios y encarece cada vez más los productos derivados de estos.

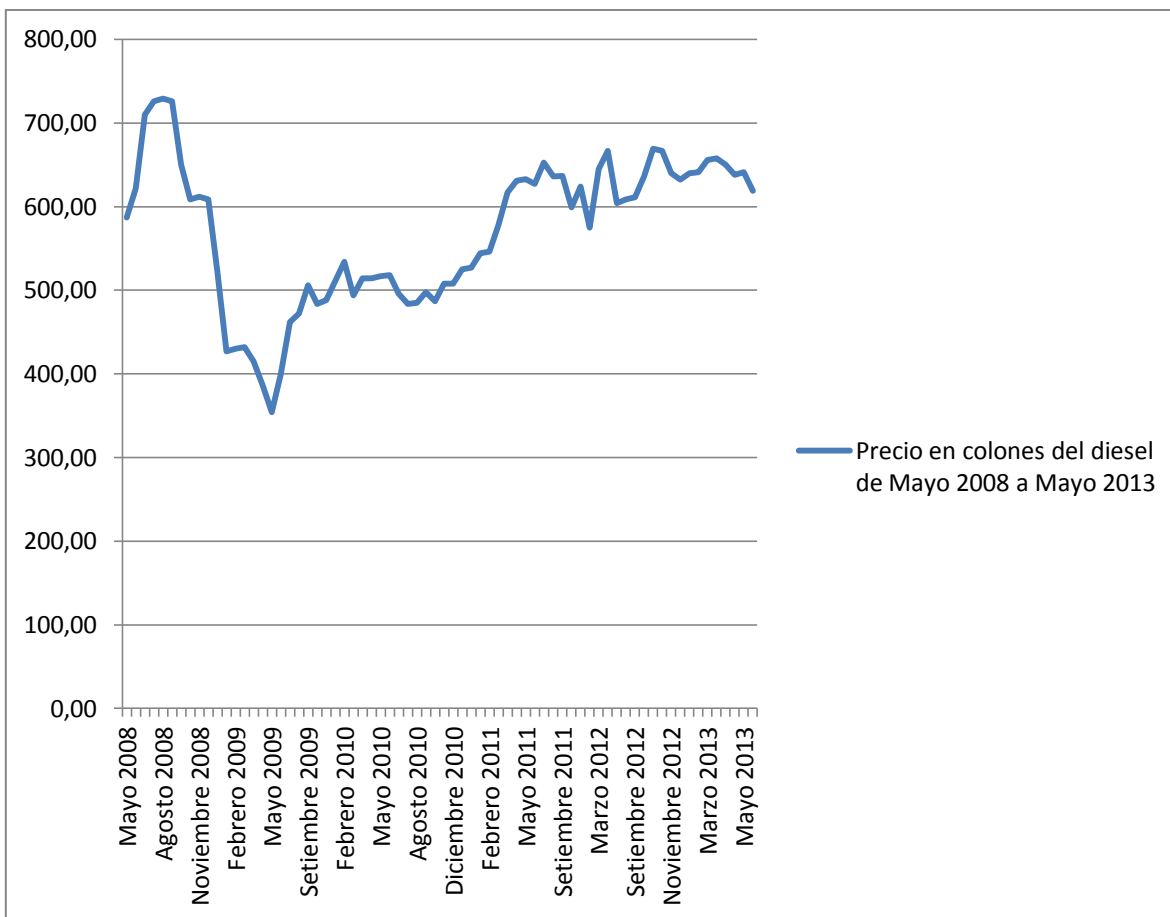


Figura 4. Precio en colones del diesel durante el período comprendido entre mayo de 2008 a mayo de 2013.

Fuente: Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE).

Este tipo de fluctuaciones es lo que ha llevado a Costa Rica, y al mundo en general, a buscar alternativas a su dependencia de los combustibles fósiles. Al ser casi la totalidad de los combustibles destinados al sector de transportes, es este en el cual hay que enfocarse. El país puso en marcha en el 2008 el Programa Nacional de Biocombustibles con miras a reducir su dependencia de los mercados internacionales y producirlos nacionalmente.

3.2.3. Programa para la producción de biocombustibles.

En el año 2008, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el MINAET se lanzó el Programa Nacional de Biocombustibles (PNB). El objetivo de este fue: “desarrollar una

industria de biocombustibles que contribuya a la seguridad y eficiencia energética, la mitigación del cambio climático, la reactivación del sector agrícola y el desarrollo socioeconómico nacional”.

En dicha iniciativa se busca impulsar acciones tanto en el campo de la elaboración del biodiesel como del etanol. Se citan varios productores a nivel nacional y su capacidad de producción. También retos que tienen los biocombustibles para lograr penetrar en el mercado nacional. La falta de información acerca de ellos es uno de los mayores retos con los que se cuenta a nivel comercial. Una de las metas es crear condiciones aptas en las cuales se desarrolle un mercado de compra y venta de biocombustibles de calidad, en cumplimiento a la normativa nacional.

3.3. Programa de Energías Limpias del Instituto Tecnológico de Costa Rica (PELTEC).

El Instituto Tecnológico de Costa Rica, en el año 2009, comenzó con su Programa de Energías Limpias (PELTEC) en el cual se busca: “desarrollar actividades que permitan impulsar el desarrollo de proyectos relacionados con fuentes no convencionales de energía que busquen reducir tanto los efectos ambientales provocados por el uso de energía fósil, como la dependencia energética de Costa Rica” (PELTEC 2009). En este se fomenta el uso de fuentes limpias de energía para Costa Rica, incluidos los biocombustibles. No obstante, al describir las posibles fuentes para la producción de estos, se deja por fuera el uso del aceite de cocina usado como materia prima.

Al ser considerado este como un residuo, y muchas veces un problema para los distintos actores que lo disponen, es fácil de conseguir y de tratar para la producción de biocombustibles, específicamente biodiesel. Actualmente, según el Programa Nacional de Biocombustibles (MINAE-MAG 2008) el uso de este residuo para producir biodiesel se ha limitado a varias empresas privadas que han demostrado interés en aprovecharlo. El propósito del trabajo es explorar la capacidad del ITCR de producir biodiesel a partir del aceite de cocina usado en el comedor institucional, que cumpla con las normas de calidad

establecidas a nivel nacional y genere beneficios tanto educativos como económicos a la institución.

Actualmente en el Instituto Tecnológico de Costa Rica existen dos comedores que descartan aceite de cocina usado. Entre ambos se generan alrededor de 50 litros semanales (Roldán et al, 2012). Sin embargo, para este estudio solamente se consideró el comedor institucional ya que el otro envía su aceite de cocina usado a tratar fuera de la institución.

3.4. Biodiesel.

El biodiesel es un combustible, considerado entre las fuentes de energías alternativas, que tiene la posibilidad de sustituir el uso del diesel. Tiene propiedades similares, algunas con mayores ventajas y algunas desventajas también. Entre sus ventajas se pueden citar: menores emisiones de CO, SO₂ (nulas porque no contiene azufre), material particulado, compuestos orgánicos aromáticos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y sus nitroderivados (nPAH). El biodiesel es biodegradable, por lo tanto, su toxicidad en el ambiente en caso de derrames es baja (Larosa, 2001). En cuanto a las emisiones de CO₂, se produce una mejor combustión ya que el biodiesel contiene mayor cantidad de oxígeno en porcentaje de masa que el diesel (Bowman et al, 2006). El dióxido de carbono emitido es luego fijado por la planta de la cual se obtendrá el aceite, por lo tanto se crea un ciclo en el cual el mismo CO₂ emitido es utilizado en el proceso de fotosíntesis del cultivo.

El manejo, almacenamiento y distribución del biodiesel es similar al del diesel, con la ventaja de que el biodiesel tiene un punto de inflamación mayor que el del diesel. Puede ser almacenado por espacios de 3 a 6 meses sin necesidad de agregar aditivos para su estabilización. El clima de Costa Rica hace que los problemas de bajas temperaturas no afecten significativamente el biodiesel (Larosa, 2001).

A continuación se presentan algunas definiciones sobre qué es el biodiesel.

3.4.1. Definición.

De acuerdo con la American Society for Testing and Materials (ASTM) el biodiesel está compuesto por “*ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales*” (Guerrero et al., 2011). En el Reglamento de Biocombustibles, se parte de la misma definición de la ASTM a la cual se le agrega: “*por ende de recursos renovables, identificado como B100, que cumple con las especificaciones de calidad establecidas en el Decreto Ejecutivo N°34128 COMEX-MEIC-MINAET*”.

3.4.2. Proceso de producción.

El proceso de producción de biodiesel más utilizado es el de transesterificación. En este se hace reaccionar el aceite con un alcohol (metanol o etanol) para formar los ésteres metílicos o etílicos, respectivamente (Figura 5).

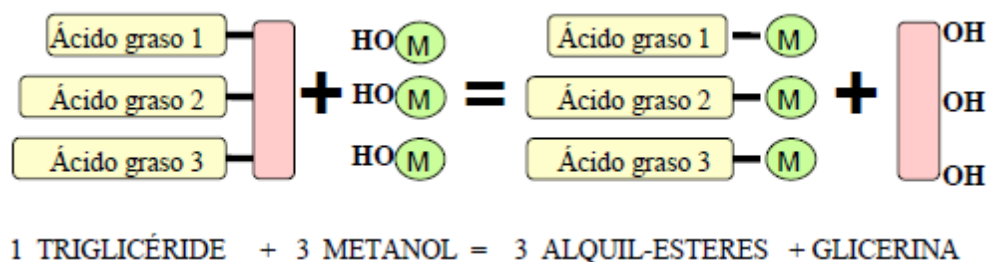


Figura 5. Reacción de transesterificación de aceite a biodiesel.

La reacción de transesterificación es reversible, por lo que para lograr obtener más alquil-ésteres (biodiesel) se debe agregar alcohol en exceso (ONU-CEPAL, 2007). Esta reacción es conducida bajo presencia de un catalizador alcalino, como el hidróxido de sodio o hidróxido de potasio.

La reacción se ve afectada por varios factores como la temperatura de reacción, relación molar alcohol/aceite vegetal, tipo de alcohol, tipo de catalizador, concentración del

catalizador, tiempo de reacción, intensidad del mezclado y el contenido de ácidos grasos libres y agua (Rojas et al, 2009).

Los catalizadores básicos aceleran más la velocidad de reacción en comparación con los catalizadores ácidos (Guerrero et al., 2011). No obstante, pueden llevar a la formación de productos no deseados como jabones, al reaccionar con los ácidos grasos libres. Por lo tanto, es importante darle un pre-tratamiento al aceite para neutralizarlos.

Durante el proceso de producción, el pre-tratamiento es uno de los pasos determinantes para una efectiva conversión del aceite a biodiesel. La remoción tanto de agua, como partículas de tamaño considerable, es esencial ya que estos interfieren en la reacción. Parte del pre-tratamiento también es la neutralización de los ácidos grasos libres, además de determinar la cantidad extra de hidróxido de sodio que se debe agregar a la reacción. Una vez pre-tratado el aceite, se mezcla con el catalizador y el alcohol para llevar a cabo la transesterificación.

Posterior a la reacción, se obtienen dos fases: la del biodiesel crudo en la parte superior y la de la glicerina cruda en el fondo. Las últimas etapas antes de obtener el biodiesel listo para utilizar son el lavado y secado. En ellas, se remueven el metanol, hidróxido de sodio y agua, los cuales son impurezas para el biodiesel.

3.4.3. Análisis de calidad.

Como todo producto el biodiesel cuenta con ciertas pruebas estandarizadas para controlar su calidad. Esto tiene como fin garantizarle al usuario que lo que se inyecte al motor, no vaya a causarle daños. En Costa Rica, la normativa a seguir es dada por el Reglamento de Técnico Centroamericano de Biocombustibles: Biodiesel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diesel, especificaciones. Este reglamento está contenido en el decreto ejecutivo N° 34128 COMEX-MINAE-MEIC. En este se citan los parámetros que deben ser cumplidos para poder comercializar el biodiesel como carburante en los Estados Parte de la Unión Aduanera Centroamericana (Cuadro 1).

Los parámetros escogidos para este trabajo fueron: densidad, viscosidad cinemática a 40°C y número ácido. Esto porque se contaba con las instalaciones y equipos apropiados para la realización de dichos procedimientos.

Cuadro 1. Especificación de calidad para el biodiesel (B100).

Parámetro	Unidades	Método	Valores
Aditivos	-----	-----	Reportar
Contenido de ésteres	Fracción de masa (% masa)	EN 14103	0,965 (96,5 mínimo)
Gravedad API a 15,56 °C o Densidad a 15°C	°API kg/m ³	ASTM D-287 ASTM D-1298	Reportar
Estabilidad a la oxidación, 110°C	H	EN 14112	6,0 mínimo
Punto de inflamación ("Flash point")	°C	ASTM D-93	130,0 mínimo
Agua y sedimentos	Fracción de volumen (% volumen)	ASTM D-2709	0,00050 (0,050) máximo
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	ASTM D-445	1,9-6,5
Ceniza sulfatada	Fracción de masa (% masa)	ASTM D-874	0,00020 (0,020) máximo
Contenido de azufre total	mg/kg	ASTM D-5453	15 máximo
Corrosión tira de cobre, 3h, 50°C	-----	ASTM D-130	Nº3 máximo
Número de cetano	-----	ASTM D-613	47 mínimo
Punto de enturbiamiento	°C	ASTM D-2500	Reportar
Residuo de carbón	Fracción de masa (% masa)	ASTM D-4530	0,00050 (0,050) máximo
Número ácido	mg KOH/g	ASTM D-664	0,50 máximo
Glicerina libre	Fracción de masa (% masa)	ASTM D-6584	0,00020 (0,020) máximo
Glicerina total	Fracción de masa (% masa)	ASTM D-6584	0,00240 (0,240) máximo
Contenido de fósforo	Fracción de masa (% masa)	ASTM D-4951	0,00001 (0,001) máximo
Temperatura de destilación a temperatura equivalente atmosférica, 90% recuperado	°C	ASTM D-1160	360 máximo
Sodio (Na) y potasio (K) combinados	mg/kg	EN 14538	5 máximo
Calcio (Ca) y magnesio (Mg) combinados	mg/kg	EN 14538	5 máximo

3.4.3.1. Densidad.

La densidad se define como la razón masa/volumen a cierta temperatura definida. Es uno de los parámetros de calidad más simples de medir e indica a grandes rasgos la composición global del biodiesel (Knothe et al., 2005). El método estándar para realizar la medición es el ASTM D-1298.

3.4.3.2. Viscosidad cinemática a 40°C.

La viscosidad es importante para efectos de la inyección del combustible a las cámaras de combustión del motor (Ribeiro Gallo, 2008). Además puede llegar a formar depósitos en el motor, lo cual es perjudicial para este. El método ASTM correspondiente es el D-445.

3.4.3.3. Número ácido.

La prueba de número ácido mide la cantidad de hidróxido de potasio (KOH) necesario para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en 1 gramo de muestra (unidades mg KOH/g). Además indica la oxidación e hidrólisis presente en el biodiesel. Esto es importante ya que se pueden formar ácidos orgánicos débiles o ácidos inorgánicos fuertes que pueden corroer el sistema en el cual se utiliza el biocombustible. Se realizó siguiendo el método ASTM D-664.

4. Metodología.

4.1. Definición del tipo de estudio.

El proyecto tiene como fin explorar la posibilidad de aprovechar el aceite de cocina usado del comedor institucional del Instituto Tecnológico de Costa Rica para la producción de biodiesel que podrá ser consumido internamente. Con el propósito de instalar una planta piloto a mediano plazo de acuerdo con la cantidad de residuo que se genere en el establecimiento. A largo plazo sería importante coordinar con las municipalidades aledañas un programa de manejo responsable de aceites de cocina usados, tanto residencial como comercial.

De acuerdo con lo establecido en los objetivos del trabajo, se definieron dos etapas, cada una con su respectiva metodología.

4.2. Objeto de estudio y recolección de la muestra.

El trabajo, como se citó anteriormente, tiene como objeto de estudio, el aceite de cocina usado en el comedor. Se recolectó lo descartado por el comedor durante el mes de marzo y la primera semana de abril de 2013.

Cada día en el cual la cocina desechó aceite se recolectó cerca un galón (aproximadamente 3.8 litros). Para obtener el biodiesel, por cada galón se trabajaron 3 muestras de 1 litro cada una. Se recolectaron galones los días: 1, 14 y 20 de marzo y el 5 de abril del 2013. Esto resultó en 12 muestras, las cuales fueron tratadas en tres etapas diferentes. Se decidió trabajar de este modo por razones de tiempo, ya que el aceite solamente era descartado al día siguiente en el que se freían alimentos, lo cual no era todos los días.

Las etapas son las siguientes:

- *Rendimiento y cuantificación*: el rendimiento evalúa tanto la conversión de aceite de cocina usado a biodiesel como las pérdidas en las cuales se incurre en el proceso.
- *Análisis de calidad*: para la valoración preliminar se escogieron los parámetros de: número ácido, densidad y viscosidad cinemática a 40°C para ser comparados con lo exigido por la normativa nacional. Esto ya que se contó con la disponibilidad y facilidad para realizar dichas pruebas.
- *Análisis de costos*: se consultó en el mercado nacional acerca del precio de los componentes principales para lograr estimar el costo del sistema propuesto.

4.3. Rendimiento y cuantificación.

El rendimiento y cuantificación del biodiesel lo que busca es la síntesis del biodiesel y conocer cuánto porcentaje del aceite de cocina usado inicial se convierte en biodiesel luego de sufrir la reacción de transesterificación, tomando en cuenta las pérdidas en el proceso de separación y purificación. El volumen base trabajado fue de 1 litro de aceite de cocina usado. Los pasos seguidos se presentan detallados en las siguientes secciones.

4.3.1. Obtención y preparación del aceite de cocina usado.

Para la obtención del aceite de cocina usado se contactó al comedor institucional del ITCR para que lo facilitaran una vez que fuera descartado. Después de ser utilizado para la fritura de alimentos, al ser dispuesto se hizo pasar, a una temperatura alrededor de los 35°C, por un cedazo fino para eliminar las partículas más gruesas. Una vez filtrado se recolectó en un recipiente de una capacidad de un galón para continuar con su tratamiento.

4.3.2. Determinación de la cantidad extra de NaOH.

La cantidad extra de NaOH es importante para neutralizar los ácidos grasos libres que se encuentran en el aceite de cocina usado. Estos pueden interferir en la reacción y promover la formación de jabones, los cuales no son los productos deseados.

Para su determinación se preparó la disolución con la cual se valorará el aceite. La disolución de NaOH con la cual se trabajó es de una concentración de 1 g/l.

Se tomaron 2 ml de aceite y se diluyeron en 20 ml de 2-propanol en un erlenmeyer. A esto se le agregaron 3 gotas del indicador fenolftaleína. Se procedió a valorar con la disolución de NaOH. Se registró el volumen consumido de esta para luego determinar la masa extra de NaOH necesaria para la preparación del metóxido de sodio.

4.3.3. Preparación del metóxido de sodio.

El metóxido de sodio es una disolución de hidróxido de sodio (NaOH) en metanol. El volumen de metanol necesario fue un 20-25% del aceite de cocina usado que se desea convertir a biodiesel (en este caso 1 litro, por lo tanto entre 200-250 ml de metanol).

La cantidad de hidróxido de sodio por agregar se determinó de la siguiente manera:

$$g NaOH = (5 + x)g NaOH$$

Donde x equivale a la masa calculada mediante la titulación de los ácidos grasos libres.

La disolución se realizó en una capilla de gases ya que sus vapores son dañinos para la salud. Es posible acelerar la disolución calentando a una temperatura de no más de 50°C, para evitar la liberación de vapores dañinos y la evaporación del metanol.

4.3.4. Reacción de transesterificación.

La reacción de transesterificación es la reacción por la cual el aceite se convierte en biodiesel. En esta se hacen reaccionar el litro de aceite de cocina usado con el metóxido de sodio (Figura 6). Se calentó el aceite a una temperatura de 50-55°C y una vez estabilizado se agregó el metóxido de sodio. El tiempo de reacción es de 30 minutos, bajo agitación. Al transcurrir ese tiempo se reposó la mezcla durante 5 minutos para lograr su estabilización.



Figura 6. Reacción de transesterificación del aceite de cocina usado en el comedor del ITCR.

4.3.5. Separación del biodiesel y la glicerina.

Una vez estabilizada la reacción se obtienen el producto deseado, biodiesel crudo, y glicerina, un subproducto que puede tener valor en otras instancias. Para lograr su separación se vertió la mezcla en un embudo de separación y se esperó a que ocurriera una separación de las dos fases que toma alrededor de dos horas. El biodiesel se observó en la parte superior y la glicerina en la parte inferior, lo cual facilitó el drenaje de esta (Figura 7).



Figura 7. Separación de fases entre el biodiesel crudo y la glicerina cruda.

4.3.6. Lavado y secado del biodiesel.

Por último al biodiesel crudo se le removieron impurezas, como metóxido de sodio sin reaccionar mediante un lavado con agua (50% del volumen de aceite de cocina usado inicial, en este caso 500 ml). El agua del primer lavado no puede ser reutilizada. Luego se procedió a realizar varios lavados hasta observar una fase de biodiesel poco variable.

La etapa de secado consistió en evaporar el agua contenida en la mezcla de biodiesel y agua producto de los lavados. Esta se calentó a 110°C bajo agitación hasta que se observó un claro cambio en color y se detuvo el burbujeo (Figura 8).



Figura 8. Lavado y secado del biodiesel.

Una vez obtenido el biodiesel, posterior al secado, se dejó enfriar y se cuantificó el volumen producido en una probeta, para posteriormente determinar el rendimiento:

$$\% V/V \text{ de rendimiento} = \left(\frac{V_{biodiesel}}{V_{aceite}} \right) * 100$$

4.4. Análisis de calidad.

El biodiesel debe cumplir con una serie de requisitos para poder declararse apto para uso. Estos están contenidos en el decreto N°34128 COMEX-MINAE-MEIC. De la tabla de parámetros se seleccionaron: número ácido, densidad y viscosidad cinemática a 40°C por la importancia y facilidad y disponibilidad del equipo necesario para poder llevar a cabo las pruebas.

4.4.1. Densidad.

Para su determinación se utilizó un densímetro marca Ertco Light Template 60/60°F apto para líquidos livianos, como aceites. El procedimiento seguido fue el estipulado en la norma ASTM D-1298.

4.4.2. Viscosidad cinemática a 40°C.

El procedimiento establecido para este parámetro es la norma ASTM D-445. Se usó un viscosímetro de Ostwald marca Cannon, modelo 100 U378 para la medición de la viscosidad dinámica. Para calibrar el instrumento se utilizó agua destilada. Se cronometró el tiempo que duró el líquido en fluir entre las marcas del viscosímetro. Se trabajaron 3 mediciones y se obtuvo un promedio. Para obtener la viscosidad dinámica utilizó la siguiente fórmula:

$$\eta_x = \frac{(\eta_r * t_x * \rho_x)}{(t_r * \rho_r)}$$

Donde:

r es el líquido de referencia usado para la calibración del viscosímetro.

x es el biodiesel.

η es la viscosidad dinámica a 40°C expresada en Pa*s.

ρ es la densidad del líquido a 40°C en kg/m³.

t es el tiempo promedio que duró el líquido en fluir expresado en segundos.

El cálculo de la viscosidad cinemática se realizó dividiendo la viscosidad dinámica entre la densidad del líquido. ($\nu = \eta/\rho$). El resultado se expresó en mm²/s.

4.4.3. Número ácido.

El procedimiento está descrito en la norma ASTM D-974. Se realizó por medio de una titulación, utilizando colorimetría para determinar el punto final de la valoración. Cada muestra se trabajó por duplicado y se tomó el valor promedio para los resultados. La fórmula para obtener el número ácido es:

$$NA (mg KOH/g) = \frac{[(V_x - V_b) * M * 56,1]}{W}$$

Donde:

V_x es el volumen consumido de la disolución valorante por la muestra (ml).

V_b es el volumen consumido de la disolución valorante por el blanco (ml).

M es la concentración de la disolución valorante (mol/l).

W es la cantidad de muestra pesada (g).

4.5. Validación de resultados.

Los datos obtenidos de los análisis de calidad son respaldados por medio de los métodos de la American Society for Testing and Materials (ASTM). La estandarización de dichos procedimientos valida los resultados que se obtienen de los experimentos.

4.6. Cotización de los componentes básicos.

Se consultó en el mercado nacional acerca de los componentes principales del sistema para estimar los costos en los que se debe incurrir para adquirir las partes del sistema.

La planta piloto propuesta es relativamente simple y pequeña (Figura 9).

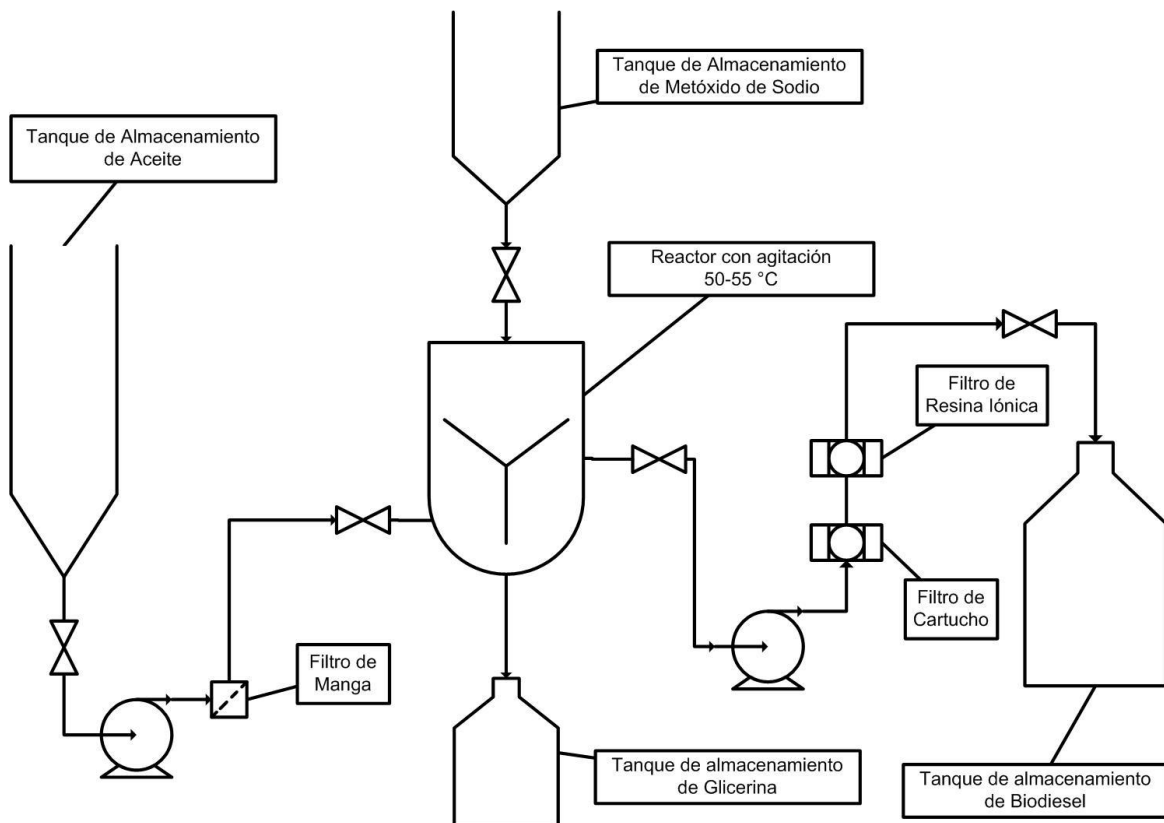


Figura 9. Esquema de la planta piloto de producción de biodiesel propuesta para el Instituto Tecnológico de Costa Rica.

5. Resultados y discusión.

5.1. Rendimiento y cuantificación.

Los resultados del rendimiento de aceite de cocina usado a biodiesel se presentan a continuación (Cuadro 2). El volumen inicial de aceite fue de 1 litro.

Cuadro 2. Volumen producido y rendimiento del proceso.

Muestra	Fecha	Volumen producido (± 10) ml	Rendimiento (% V/V)
1	1/3/2013	970	97
2	1/3/2013	980	98
3	1/3/2013	950	95
4	14/3/2013	1000	100
5	14/3/2013	930	93
6	14/3/2013	970	97
7	20/3/2013	980	98
8	20/3/2013	920	92
9	20/3/2013	960	96
10	5/4/2013	960	96
11	5/4/2013	950	95
12	5/4/2013	990	99
Promedio			96

La literatura reporta rendimientos entre 80-99% dependiendo de las condiciones de temperatura, presión y proporciones de aceite-metanol-catalizador que se utilicen (Knothe

et al., 2005; Larosa, 2001; Guerrero et al., 2011; Ribeiro Gallo, 2008). Las condiciones empleadas para la producción del biodiesel resultaron en un rendimiento bastante elevado y en concordancia con lo reportado en la literatura. Esto determina que el procedimiento seguido brinda excelentes resultados a nivel de laboratorio. El **alto rendimiento** potencia los beneficios provenientes del aprovechamiento del aceite de cocina usado para la generación de biodiesel. Esto consecuentemente se transforma en ahorros económicos por la sustitución del diesel por biodiesel producido localmente.

5.2. Análisis de calidad.

Los resultados de las pruebas de calidad escogidas se presentan en el cuadro 3. El resumen de los resultados y la comparación con sus parámetros se presenta en el cuadro 4.

De los resultados se puede observar que todas las muestras trabajadas están en cumplimiento con la reglamentación. Inclusive tanto el valor promedio, como los mínimos y máximos de cada muestra, cuentan con un buen margen de cumplimiento con respecto a los límites. De esto se puede concluir que el procedimiento seguido ha permitido obtener un producto que logra estar en regla con las exigencias determinadas en la legislación nacional para los parámetros estudiados.

La calidad del biodiesel se puede ver afectada por varios parámetros. Entre estos se pueden citar: la calidad de la materia prima, la composición de ácidos grasos libres del aceite vegetal o animal, el proceso de producción, materiales de los equipos y procesos de post-producción (Knothe et al, 2005).

La densidad indica la composición global del biodiesel. Esta propiedad tiene importancia tanto en la elaboración de mezclas con diesel, como en la inyección del biodiesel al motor. Esto porque los motores de diesel funcionan con un sistema de medición de volumen (Demirbas, 2008).

Cuadro 3. Densidad del biodiesel a 15 °C, viscosidad cinemática a 40°C y número ácido con sus respectivos parámetros establecidos en la normativa vigente.

Muestra	Fecha	Densidad a 15°C (kg/m ³)	Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	Número ácido (mg KOH/g)
1	1/3/2013	885	4,89	0,022
2	1/3/2013	885	5,54	0,022
3	1/3/2013	885	5,82	0,039
4	14/3/2013	885	4,96	0,017
5	14/3/2013	880	5,31	0,017
6	14/3/2013	880	4,88	0,017
7	20/3/2013	880	5,07	0,011
8	20/3/2013	880	5,20	0,006
9	20/3/2013	880	5,17	0,017
10	5/4/2013	880	4,96	0,011
11	5/4/2013	880	5,02	0,011
12	5/4/2013	880	5,06	0,006
Parámetro		860-900	1,9-6,5	0,5 máximo

Cuadro 4. Resumen comparativo entre los promedios obtenidos y los parámetros contenidos en el Reglamento Técnico Centroamericano.

Prueba	Valor promedio	Parámetro establecido
Densidad a 15°C (kg/m ³)	881,7 ± 5,0	860-900
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	5,2 ± 0,6	1,9-6,5
Número ácido (mg KOH/g)	0,02 ± 0,02	0,5 máximo

Incertidumbre: calculada a partir de los datos del cuadro 3. I = 2*s.

La viscosidad por su parte es la resistencia de un fluido (en este caso biodiesel) a fluir. Esta es de suma importancia ya que afecta la atomización del combustible a la hora de ser inyectado al motor. A mayor viscosidad mayor la tendencia de causar problemas (Knothe et al, 2005). El biodiesel tiene una viscosidad mayor que la del diesel, aunque sus valores andan muy cercanos (para el diesel 1,9-4,1 mm²/s; para el biodiesel 1,9-6,0 mm²/s). El alcohol utilizado en la reacción de transesterificación tiene efectos en la viscosidad del biodiesel. Los ésteres metílicos tienen menor viscosidad que los ésteres etílicos (ídem).

El número ácido es un indicador relativo de las impurezas (cantidad de ácidos grasos libres y minerales ácidos presentes en el biodiesel), degradación u oxidación que sufre el biodiesel (Steinbach, 2007). El número ácido puede aumentar tanto por procesos oxidativos como por malos manejos en el proceso de producción (ADMC, 2012). Esto se asocia con los potenciales daños como corrosión y depósitos formados en el sistema de inyección de diesel. Para disminuir el número ácido es de suma importancia neutralizar los ácidos grasos libres antes de llevar a cabo la reacción de transesterificación.

5.3. Costos y beneficios del sistema.

La instalación de la planta piloto de producción de biodiesel conlleva una inversión en componentes, reactivos y personal para su adecuado funcionamiento. De todos estos costos, los mayores son en la inversión inicial que se debe hacer en el equipo, ya que tanto el personal como los químicos no requieren tanto esfuerzo al ser un proceso bastante simple. Inclusive un estudiante bajo supervisión podría ser el encargado de operar la planta durante cada lote de producción.

De acuerdo con el personal del comedor institucional y con un trabajo elaborado por estudiantes del ITCR, la estimación de aceite de cocina usado que se desecha por mes es de 100 litros. Fue a partir de este volumen que se estimaron los costos totales del sistema (Cuadro 5).

Cuadro 5. Costos de la planta piloto para la producción de biodiesel con aceite de cocina usado.

Componente	Precio (₡)
Inversión en equipo	
Tanques de almacenamiento de aceite de cocina usado, metanol y reactor	900 000.00
Tanqueta de almacenamiento de biodiesel	50 000.00
Bombas	597 181.09
Carcasa para filtro de manga	1 765 435.00
Carcasa para filtro de cartucho	538 776.00
Total	3 851 392.09
Costos operativos	
Metanol (5 L)	13 600.00
Hidróxido de sodio (25 kg)	12 376.35
Silicato de magnesio (kg)	184 614.06
Filtro de manga	17 099.50
Filtro de cartucho	23 730.00
Análisis de calidad	504 253.63
Personal (estudiante asistente 15 horas, ₡/semestre)	60 000.00
Total	815 673.54

Tipo de cambio al 10/6/2013: \$1 = ₡504.41

Como se puede observar a partir de los costos del sistema, la inversión que se debe realizar para llevar a cabo el proyecto es poco menos de cuatro millones de colones. Los costos iniciales del equipo tienen su punto crítico en las carcasas para los filtros. No obstante, se

podría reducir la inversión si se fabricara la carcasa dentro de los talleres de la institución, se comprara de segunda mano o se realizara una investigación de mercado más profunda.

En cuanto a los costos operativos, el más importante es en la etapa de análisis. Para estos se recomienda realizar mínimo un análisis anual. Se debería coordinar con el Centro de Electroquímica y Energía Química (CELEQ) de la Universidad de Costa Rica para obtener algún trato preferencial o desarrollar los análisis en el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El silicato de magnesio tiene un alto costo también, no obstante, se estima que puede filtrar 800 litros de biodiesel por kilogramo, por lo que se necesitaría 1,5 kg de este por año de acuerdo a la producción estimada de aceite (1200 litros anuales).

Los beneficios obtenidos de implementar una planta piloto de producción de biodiesel son de varias índoles. Algunos de estos son ambientales, otros económicos, otros educativos, por lo que un proyecto de este tipo genera réditos que son difíciles de cuantificar.

Entre los beneficios se pueden citar:

- *Manejo responsable del residuo*: se conoce el destino final del residuo, por lo que se puede verificar que no está siendo dispuesto incorrectamente.
- *Opción de extender la iniciativa*: esto funciona de dos maneras. La primera es servir como ejemplo a nivel nacional tanto en instituciones como para la empresa privada de cómo hacerse responsable de los propios residuos y lograr sacar provecho de estos. La segunda es poder coordinar con los gobiernos locales cercanos para desarrollar programas de recolección de este residuo para evitar que se disponga en condiciones perjudiciales para el ambiente.
- *Reutilización de un residuo*: el aceite de cocina usado es un residuo generado constantemente en la universidad, con tendencia a crecer conforme crece la cantidad de estudiantes, dado que habrá que producir cada vez más comida. Por lo tanto la producción está garantizada y cada vez se generará un ahorro mayor en la sustitución de diesel. Los subproductos generados a su vez son una oportunidad para crear nuevos productos para ser utilizados a nivel interno.

- *Ahorro económico*: esto por cuanto no habría que comprar la cantidad de diesel que puede ser sustituida por biodiesel (en un principio alrededor de 100 litros por mes). La volatilidad del precio del combustible fósil genera cierta inseguridad y gastos elevados para la universidad. Tomando en cuenta los 100 litros de aceite de cocina usado por mes y utilizando el rendimiento promedio de 96% se producirían 96 litros de biodiesel. Económicamente esto significa un ahorro bruto anual de ₡713 088,00 (precio del diesel al 31 de mayo de 2013: ₡619,00). A este ahorro habría que descontarle los costos operativos, además se consideró que la cantidad de aceite de cocina usado desechado mensualmente no varía durante el año.
- *Imagen y prestigio*: el realizar iniciativas dentro del marco ambiental, manejo responsable de residuos e innovación dentro del país le dará un mayor prestigio tanto dentro como fuera de Costa Rica. Aunque no es algo totalmente nuevo, es algo que proyecta responsabilidad y liderazgo en un tema necesario como lo es el desarrollo de propuestas en energías renovables.
- *Formación académica*: esto traerá grandes beneficios educativos para la población estudiantil del Tecnológico. Permitirá realizar investigaciones para la mejora del sistema, tanto en materiales, como materias primas (aceites). Le brindará a los estudiantes conocimientos que podrán permitirles incorporarse al mercado laboral con nuevas ideas.

6. Conclusiones y recomendaciones.

La transición de combustibles fósiles a alternativas menos dañinas es uno de los cambios a los cuales se apuesta para lograr la meta de ser un país carbono neutral para el 2021. El Programa Nacional de Biocombustibles es una de las iniciativas que promueve la producción de estos para lograr una menor dependencia de los combustibles fósiles y su consecuente impacto, tanto ambiental como económico que esto significa.

El Instituto Tecnológico de Costa Rica, como institución de educación superior Benemérita de la Patria, es una de las encargadas de fomentar la investigación y propagación de nuevos proyectos que permitan alcanzar el objetivo mencionado anteriormente. Las universidades e instituciones públicas deben dar el ejemplo y promover políticas e ideas fáciles de reproducir para que el resto de país siga sus pasos.

El protocolo de producción suministrado por el profesor Helder Teixeira Gomes ha demostrado producir biodiesel de buena calidad. Las propiedades analizadas han cumplido con los parámetros establecidos en el Decreto Ejecutivo N° 34128 COMEX-MEIC-MINAET, lo cual arroja resultados alentadores. No obstante, para una mejor evaluación del protocolo, se recomienda realizar el análisis de calidad completo para garantizar un producto de calidad. Además del cumplimiento con los criterios de calidad, el rendimiento es alto.

La inversión a realizar para construir una planta piloto es poco menos de cuatro millones de colones. Esta se justifica debido a que los beneficios que provee un proyecto de este tipo son muchos. Dar un ejemplo a seguir y la consecuente mejora en la imagen de la institución, la educación de sus estudiantes en temas relevantes al ambiente y con oportunidades a futuro, reutilización de residuos propios que generen productos con valor agregado como lo son el biodiesel y la glicerina, además de los beneficios económicos por la no compra de diesel son solamente algunos de los que se pueden obtener. No obstante, es importante reducir los costos más elevados, como los análisis en cuanto a la parte operativa y algunos en equipo, para garantizar que el proyecto sea viable económicamente.

Entre las recomendaciones pertinentes se citan los análisis de calidad completos como forma de garantizar un combustible apto para el uso, asesorías de personas con experiencia en el campo de los biocombustibles para la instalación del sistema y la capacitación adecuada del personal que quedase a cargo de este. El establecimiento de responsabilidades y procedimientos será sumamente importante para el correcto funcionamiento de la planta. A nivel institucional se debe crear un programa de manejo de residuos de aceite de cocina usado e incluso se insta a coordinar con los quioscos y restaurantes que se instalan en el campus y las municipalidades aledañas al ITCR que también generen un programa de este tipo para que se realice una disposición correcta de un residuo que de ser mal manejado puede traer graves consecuencias ambientales.

7. Fuentes de referencia.

- Archer Daniels Midland Company. 2012. *Biodiesel technical information*. Consultado el 31 de mayo de 2013 en: <http://www.biodiesel.org/docs/ffs-basics/adm-fact-sheet-biodiesel-technical-information.pdf?sfvrsn=4>.
- Baig, A., Ng, F.T.T. 2011. *Determination of acid number of biodiesel and biodiesel blends*. Journal of American Oil Chemists' Society. Volumen 88, Número 2, Pp. 243-253. Estados Unidos de América.
- Bowman, M., Hilligoss, D., Rasmussen, S., Thomas, R. 2006. *Biodiesel: a renewable and biodegradable fuel*. Hydrocarbon Processing. Febrero 2006. Pp. 103-106.
- De la Torre, T. 2010. *Hacia un nuevo modelo energético para nuestro país*. Ministerio de Energía, Ambiente y Telecomunicaciones. 7 de julio de 2010. Consultado el 20 de abril de 2012 en: <http://www.dse.go.cr/es/foro/EstrategiaEnergetica.pdf>.
- Demirbas, A. 2008. *Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines*. Springer-Verlag London Limited.
- Guerrero, C.A., Guerrero-Romero, A., Sierra, F.E. 2011. *Biodiesel production from waste cooking oil*. Biodiesel - Feedstocks and Processing Technologies. InTech. Consultado el 30 de mayo de 2013 en: <http://www.intechopen.com/books/biodiesel-feedstocks-and-processing-technologies/biodiesel-production-from-waste-cooking-oil>.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2009. *Programa de Energías Limpias del Instituto Tecnológico de Costa Rica (PELTEC)*. Consultado el 13 de abril de 2013 en: <http://www.renenergyobservatory.org/alfresco/d/a/workspace/SpacesStore/1d9ae9e2-8d07-4cd2-ae1a-e95179702c62/peltec.pdf?guest=true>.
- Knothe, G., Van Gerpen, J., Krahl, J. 2005. *The Biodiesel Handbook*. American Oil Chemists' Society Press. Estados Unidos de América.
- Larosa, R. 2001. *Proceso para la producción de biodiesel (metiléster o ésteres metílicos de ácidos grasos)*. Consultado el 22 de mayo de 2013 en: http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/bodie_lar/bodie_lar.htm.

- Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. 2009. *Decreto N°35091 MAG-MINAET: Reglamento de Biocombustibles*. Diario La Gaceta 53, 17 de marzo de 2009.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Economía, Industria y Comercio. 2007. *Decreto N°34128 COMEX-MINAE-MEIC: Reglamento Técnico Centroamericano. Biocombustibles. Biodiesel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diesel. Especificaciones*. Consultado el 15 de marzo de 2013 en: http://www.pgr.go.cr/scij/scripts/TextoCompleto.dll?Texto&nNorma=61964&nVersion=70513&nTamanoLetra=10&strWebNormativa=http://www.pgr.go.cr/scij/&strODBC=DSN=SCIJ_NRM;UID=sa;PWD=scij;DATABASE=SCIJ_NRM;&strServidor=\\pgr04&strUnidad=D:&strJavaScript=NO.
- Ministerio de Comercio Exterior, Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. 2009. *Decreto N°35091 MAG-MINAET: Reglamento de Biocombustibles*. Diario La Gaceta 53, 17 de marzo de 2009.
- Programa Ambiental de la Organización de las Naciones Unidas. 2011. *Hacia una economía verde Capítulo 6: Energías renovables*. Consultado el 11 de mayo de 2012 en: <http://www.unep.org/greeneconomy/Portals/88/GETReport/pdf/Chapitre%206%20Renewable%20Energy.pdf>.
- Refinería Costarricense de Petróleo. 2012. *Estadístico de ventas: período enero 2012*. Consultado el 11 de mayo de 2013 en: www.recope.go.cr/info_clientes/CIU-Enero.xlsx.
- Ribeiro Gallo, W.L. 2008. *Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, Guatemala, El Salvador y Honduras*. Convenio CEPAL/ República Federal Alemana. México.
- Rojas, A.F., Girón, E., Torres, H.G. 2009. *Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión- catálisis química*. Revista Ingeniería e Investigación. Vol. 29, N° 3, Pp 17-22. Diciembre 2009.
- Roldán, C., Salazar, T., Muñoz, A.C. 2012. *Determinación del potencial de producción de energía limpia del Instituto Tecnológico de Costa Rica*.

Steinbach, A. 2007. *A comprehensive analysis of biodiesel*. Consultado el 31 de mayo de 2013 en: <http://www.biodieselmagazine.com/articles/1917/a-comprehensive-analysis-of-biodiesel/>.

Sudhir, C.V., Sharma, N.Y., Mohanan, P. 2007. *Potential of waste cooking oil as biodiesel feedstock*. Emirates Journal for Engineering Research. Volumen 12, N° 3, Pp 69-75.