



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DEL USO DE AGUA EN EL
PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE
ULTRASONIDO A NIVEL LABORATORIO**

Claudia Mercedes Zuñiga Lam

Asesorado por la MSc. Inga. Frances Annette Recari Fernández

Guatemala, agosto de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DEL USO DE AGUA EN EL
PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE
ULTRASONIDO A NIVEL LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CLAUDIA MERCEDES ZUÑIGA LAM

ASESORADO POR LA MSC. INGA. FRANCES ANNETTE RECARI FERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Monroy Benítez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DEL USO DE AGUA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDO A NIVEL LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado, con fecha 31 de julio de 2013.


Claudia Mercedes Zuñiga Lam



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142

000028

ADSE-MEAPP-0025-2013

Guatemala, 31 de julio de 2013.

Director:
Víctor Manuel Monzón Valdez
Escuela de Ingeniería Química
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación de la estudiante **Claudia Mercedes Zuñiga Lam** con carné número **1995-16099**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Energía y Ambiente**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y enseñad a todos"

MSc. Ing. Frances Annette Recari F.
Asesor (a)

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque.
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético

M. Sc. Ing. Frances Recari
Colegiado 743

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de Información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la estudiante, **CLAUDIA MERCEDES ZÚÑIGA LAM**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el **Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en ENERGÍA Y AMBIENTE** titulado **"DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DEL USO DE AGUA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDO A NIVEL LABORATORIO"**. Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, agosto 2013

Cc: Archivo
Copia: Colegio de Ingenieros Químicos de Guatemala
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 549 .2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DEL USO DE AGUA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDO A NIVEL LABORATORIO**, presentado por la estudiante universitaria: **Claudia Mercedes Zuñiga Lam**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 8 de agosto de 2013

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por guiarme en el camino y permitirme llegar a este momento tan importante de mi vida sin soltarme de la mano.
Mis padres	Manolo Alfredo Zuñiga León y Mercedes Lam Jurado de Zúñiga, por ser el pilar de lo que soy, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional.
Mi esposo	Andrés Marroquín Quan por su gran amor, comprensión, paciencia y apoyo.
Mis hijas	María Mercedes y María Inés, quienes fueron mi inspiración y me prestaron el tiempo que les pertenecía para terminar mis estudios.
Mi hermana	Ana Fabiola Zuñiga, por su cariño y apoyo.
Mi familia	Por ser una importante influencia en mi vida y acompañarme en mis penas y alegrías.
Mis amigos	Por su amistad y cariño demostrado en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por permitirme llegar hasta donde he llegado y por estar siempre a mi lado.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por haberme formado profesionalmente, en especial a las escuelas de Ingeniería Química y de Estudios de Postgrado, por todo lo enseñado.
Padres	Manolo Zuñiga y Mercedes Lam de Zúñiga, por su amor y apoyo incondicional.
Andrés Marroquín	Por su amor, sacrificio y apoyo para lograr culminar esta etapa.
Ing. Fidas Marroquín	Por sus enseñanzas a lo largo de mi carrera (q.e.p.d.).
Inga. Frances Recari	Por su asesoría en este trabajo y su ayuda desinteresada.
Raúl Velásquez	Por su asesoría y apoyo en este trabajo

Mis familiares y amigos

Por todo el apoyo y el cariño demostrado en las buenas y en las malas.

	7.2.1.4.	Productos de la reacción	41
	7.2.1.5.	Separación de los productos de la reacción.....	42
7.3.		Impacto ambiental en el agua por el proceso de biodiesel.....	42
	7.3.1.	Contaminación del agua por jabones	43
	7.3.2.	Aumento de la DBO del agua.....	44
	7.3.3.	Aumento del pH del agua	46
	7.3.4.	Acuerdo Gubernativo 236-2006	46
	7.3.5.	Matriz de Leopold (recurso hídrico)	49
8.		HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	53
9.		CONTENIDO PROPUESTO DEL INFORME FINAL.....	55
10.		MÉTODOS Y TÉCNICAS	57
11.		RESULTADOS ESPERADOS	67
12.		CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	69
13.		RECURSOS NECESARIOS	71
14.		BIBLIOGRAFÍA	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiesel convencional.....	62
2.	Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiesel con ultrasonido	63

TABLAS

I.	Tipo de variables e indicadores	59
II.	Datos a recolectar en cada proceso	65
III.	Recurso humano	71
IV.	Materiales e insumos.....	71

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H₂O	Agua, óxido de di hidrógeno
DBO	Demanda biológica de oxígeno
°C	Grados Celsius
GEI	Gases de efecto invernadero
KOH	Hidróxido de potasio
NaOH	Hidróxido de sodio
kHz	Kilo hertzios
kgCO₂/Mg	Kilogramo de dióxido de carbono por mega gramo
NO_x	Óxidos de nitrógeno
pH	Potencial de hidrógeno

GLOSARIO

Ácidos grasos	Ácidos mono carboxílicos de la fórmula general RCOOH, en donde R representa una cadena de hidrocarburo generalmente lineal, no ramificada, de 12 a 24 átomos de carbono y que componen a los triglicéridos.
Aceite vegetal	Compuesto orgánico obtenido a partir de semillas u otras partes de las plantas en cuyos tejidos se acumula como fuente de energía.
Alcoholes	Compuestos químicos orgánicos que contienen un grupo hidroxilo en sustitución de un átomo de hidrógeno enlazado de forma covalente a un átomo de carbono
Biocombustible	son combustibles de origen biológico obtenido de manera renovable a partir de restos orgánicos. Estos restos orgánicos proceden habitualmente del azúcar, trigo, maíz o semillas oleaginosas
Biodiesel	Mezcla de esteres cuyas propiedades son muy similares a las del aceite combustible diesel, formada a partir de los ácidos grasos de los triglicéridos que componen a los aceites y grasas.

Caracterización	Determinar los atributos peculiares de alguien o de algo.
Combustible	Sustancia carburante, cuya energía química, liberada en la reacción de combustión, busca aprovecharse.
Combustible fósil	Son tres: petróleo, carbón y gas natural, y se formaron hace millones de años, a partir de restos orgánicos de plantas y animales muertos.
Combustión	Reacción química entre compuestos carburantes y oxígeno que mediante una fuente de ignición genera dióxido de carbono y agua junto con la liberación de la energía química del combustible.
Emisión	Son todos los fluidos gaseosos, puros o con sustancias en suspensión.
Erosión	Degradación y el transporte de suelo o roca que producen distintos procesos en la superficie de la Tierra u otros planetas.
Esteres	Compuestos químicos derivados de los ácidos carboxílicos que se caracterizan por tener el grupo acilo unido a otra molécula mediante un átomo de oxígeno.

Gas	Estado de agregación de la materia en el cual, bajo ciertas condiciones de temperatura y presión, sus moléculas interactúan solo débilmente entre sí, sin formar enlaces moleculares.
Gas natural	Fuente de energía no renovable formada por una mezcla de gases ligeros que se encuentra en yacimientos de petróleo, disuelto o asociado con el petróleo o en depósitos de carbón.
Efecto invernadero	Fenómeno por el cual determinados gases, que son componentes de la atmósfera terrestre, retienen parte de la energía que la superficie planetaria emite por haber sido calentada por la radiación estelar.
Esterificación	Reacción mediante la cual los ácidos carboxílicos se convierten en ésteres con la adición de catalizadores ácidos.
Impacto ambiental	Efecto que produce una acción sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos.
Indicador	Elemento o dispositivo que muestra cierto cambio según el medio en el cual se encuentra.
MEM	Ministerio de Energía y Minas.

Proceso	Conjunto de actividades o eventos (coordinados u organizados) que se realizan o suceden (alternativa o simultáneamente) bajo ciertas circunstancias con un fin determinado.
Recursos naturales	Bien o servicio proporcionado por la naturaleza sin alteraciones por parte del ser humano.
Reducción	Se refiere a utilizar la cantidad mínima indispensable de recursos necesarios en acciones que van desde las cotidianas hasta las industriales.
Transesterificación	Reacción en la que los triglicéridos se convierten en esteres y glicerina con la utilización de catalizadores alcalinos.
Ultrasonido	Es una onda acústica o sonora cuya frecuencia está por encima del espectro auditivo del oído humano (20 000 Hz).

RESUMEN

Dado el impacto ambiental que el hombre está causando en el planeta y la disminución y contaminación de recursos, la humanidad se ve en la necesidad de buscar alternativas renovables al uso de hidrocarburos fósiles. Desde la década de los 70's se ha estudiado una forma alterna de producir un sustituto, lo cual llevó al desarrollo del biodiesel, el cual es un combustible que se sintetiza a partir de un aceite vegetal y que funciona como sustituto de los hidrocarburos de origen fósil con la ventaja de originarse de una fuente renovable y que produce menos emisiones tóxicas en comparación con los combustibles fósiles.

Al ser Guatemala un país agrícola, se tiene la capacidad de producir el aceite vegetal necesario para la elaboración de biodiesel, sin embargo la metodología que convencionalmente se usa es lenta y contamina el recurso hídrico al realizar lavados al biodiesel para retirar los subproductos y catalizador del mismo, en una relación de 10 unidades de agua por 1 de biodiesel.

Dado el alto uso de agua en el proceso, el presente diseño de investigación está proponiendo la incorporación del ultrasonido al proceso convencional, el cual por medio de la cavitación que provoca, aumenta el área de contacto y acelera las moléculas catalizando la reacción y, en teoría, disminuyendo el consumo de agua para la limpieza del biodiesel producido, con el fin de disminuir el impacto ambiental sobre el recurso hídrico y, que el resultado encontrado pueda servir para aplicarlo a la industria guatemalteca.

La importancia de este estudio es aportar a la industria una opción para optimizar el uso del recurso hídrico, ya que reduciendo la cantidad de agua de limpieza se reduce la cantidad de agua que se descarga a los cuerpos receptores. Consecuentemente se podría mejorar la calidad fisicoquímica del agua residual, la cual debería salir menos contaminada con subproductos del proceso de producción de biodiesel.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realiza dentro de las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, dentro de los lineamientos básicos de la Gestión Ambiental y específicamente en el Diseño y Aplicación de Proyectos de Biomasa y Biocombustibles en la rama de Procesos de Biodiesel.

Dado el impacto ambiental que el hombre está causando en el planeta y la disminución y contaminación de recursos, la humanidad se ve en la necesidad de buscar alternativas renovables al uso de hidrocarburos fósiles. Desde la década de los 70's se ha estudiado una forma alterna de producir un sustituto, lo cual llevó al desarrollo del biodiesel, que es un combustible que se sintetiza a partir de un aceite vegetal y que funciona como sustituto de los hidrocarburos de origen fósil con la ventaja de originarse de una fuente renovable y que produce menos emisiones tóxicas a comparación de los combustibles fósiles.

Al ser Guatemala un país agrícola, se tiene la capacidad de producir el aceite vegetal necesario para la elaboración de biodiesel, sin embargo la metodología que convencionalmente se usa es tardada y contamina el recurso hídrico al realizar lavados al biodiesel para retirar los subproductos y catalizador del mismo, en una relación de 10 unidades de agua por 1 de biodiesel.

Dado el alto uso de agua en el proceso, la presente investigación plantea producir biodiesel aplicando ultrasonido en el medio a nivel laboratorio para determinar si al eficientar la reacción se reduce el uso de agua para lavar el

biodiesel al final del proceso, con el fin de disminuir el impacto al recurso hídrico que el proceso convencional causa y, que el resultado encontrado pueda servir para aplicarlo a la industria guatemalteca.

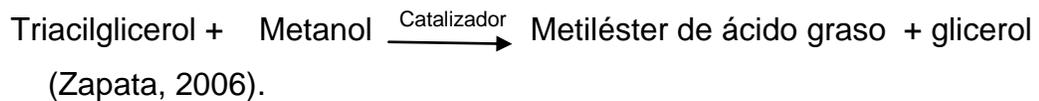
El marco teórico y conceptual se divide en tres secciones. En la primera sección se abordan los combustibles fósiles: el petróleo, el carbón y el gas natural o combustibles gaseosos, que son combustibles no renovables que se utilizan a nivel mundial y que causan un fuerte impacto en el medio ambiente, y que por ello surge la necesidad de buscar alternativas que causen menor impacto ambiental.

En la sección dos se analizará la alternativa de los biocombustibles, específicamente el biodiesel, se profundizará sobre su producción, las reacciones que están implicadas, las materias primas necesarias, el ultrasonido en el proceso de fabricación, los productos que resultan de la reacción y la separación de estos subproductos del biodiesel para utilizarlo como combustible.

En la sección tres describirá la contaminación del agua por descargas del proceso de biodiesel: la contaminación por los jabones producidos, el aumento del DBO del agua, el aumento del pH del agua, lo que está estipulado sobre ello en el acuerdo gubernativo 236-2006 y la Matriz de Leopold que aporta información sobre la forma de medir el impacto ambiental en el recurso hídrico.

2. ANTECEDENTES

- El proceso más utilizado para la producción de biodiesel es la transesterificación, la cual se refiere a la reacción entre un aceite o grasa y un alcohol en un medio catalizado, para producir ésteres alquílicos de ácidos grasos como el biodiesel y glicerol o glicerina.



- Los alcoholes empleados deben ser de bajo peso molecular; entre éstos, el más utilizado es el metanol debido a su bajo costo, seguido por el etanol. (Zapata, 2006).
- Ospina Jiménez (2008) explora y analiza la situación actual del biodiesel en Colombia, desde el punto de vista económico: el comportamiento de los precios tanto del biodiesel como del aceite crudo de palma, el establecimiento del marco legal colombiano y los aspectos medio ambientales (contaminación atmosférica y su contribución al efecto de invernadero).
- La catálisis heterogénea ha sido reconocida como una de las alternativas más promisorias para la solución integral a muchos de los problemas operacionales y ambientales que presenta la producción de biodiesel convencional. (Becerra, 2008).

- (P. Mazo, 2007) estudiaron los métodos alternativos para la obtención de biodiesel, microondas y ultrasonido, puesto que el uso de ultrasonido de baja frecuencia (28 y 40 kHz) reduce el tiempo de reacción, la cantidad de catalizador requerido es 2 o 3 veces menor y la relación aceite:alcohol es baja (1:6) y la aplicación de las microondas en la química ha permitido acelerar reacciones.
- (Abreu, 2006) estudiaron la obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales usados confirmando que el mejor catalizador es de tipo básico (NaOH y KOH) con tiempos de reacción de dos horas.
- En la curva de equilibrio de inmiscibilidad en el sistema ternario metanol-biodiesel-agua, se demuestra que es factible utilizar una relación 10:1 de biodiesel:agua para el lavado de biodiesel, ya que los coeficientes de partición obtenidos (mayores a la unidad) indican que el agua es un excelente disolvente extractor de metanol en el biodiesel, por lo que los costos del proceso son minimizados y se reduce el impacto ambiental en materia de uso de agua para llevar a cabo esta operación indispensable. (Díaz Fulgan, 2010).

3. OBJETIVOS

General

Determinar si la aplicación de ultrasonido a la producción de biodiesel reduce significativamente el consumo de agua dentro del proceso.

Específicos

1. Comparar la eficiencia del proceso con ultrasonido con la eficiencia del proceso convencional de transesterificación.
2. Caracterizar el agua residual del lavado tanto para el proceso convencional como con el que utiliza ultrasonido.
3. Cuantificar el consumo de agua en el proceso de lavado de biodiesel con aplicación de ultrasonido.

4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo se realiza dentro de las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, dentro de los lineamientos básicos de la Gestión Ambiental y específicamente en el diseño y aplicación de proyectos de biomasa y biocombustibles en la rama de procesos de biodiesel.

En Guatemala se produce biodiesel de la forma convencional, la cual implica un tiempo de reacción de aproximadamente 4 horas, uso de reactivos en exceso para obtener la mayor cantidad de biodiesel y emplear una gran cantidad de agua para lavar el biodiesel para retirar de él los subproductos, de hasta 10 unidades de agua por 1 unidad de biodiesel obtenido.

Esta investigación está proponiendo la incorporación al proceso de ultrasonido, el cual por medio de la cavitación que provoca, aumenta el área de contacto y acelera las moléculas catalizando la reacción y, en teoría, disminuyendo el uso de agua para la limpieza del biodiesel producido.

En Guatemala en general cada vez los cuerpos de agua están más contaminados y hay en menos cantidad. Las industrias que están ubicadas en la costa sur, pueden potencialmente contaminar más pues los mantos fríaticos de esa zona están a poca profundidad y verter agua contaminada en el suelo causa directamente contaminación por absorción en el manto fríatico y en las aguas subterráneas. La importancia de este estudio es aportar a la industria una opción para optimizar el recurso hídrico, reducir la cantidad de agua de limpieza

se reduce la cantidad de agua que se descarga a los cuerpos receptores, ya sea que se le dé un tratamiento al salir del proceso o que vaya directamente al alcantarillado y/o río más cercano a la industria, que es lo que generalmente sucede en Guatemala, posiblemente se optimice tanto en la calidad de agua que se va a descargar como en la cantidad de agua que se va a descargar con subproductos.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con la escasez de combustibles de fuentes no renovables como el petróleo, el alza de precios y la contaminación producida por ellos la humanidad se ve en la necesidad de buscar fuentes de energía alternativas y entre ellas se desarrolla el biodiesel en 1977.

El proceso convencional de fabricación de biodiesel, llamado “reacción de transesterificación”, utiliza en cantidades excesivas algunas materias primas para poder obtener el mayor rendimiento de biodiesel. Al terminar dicha reacción, quedan disueltos en el biodiesel varios subproductos, los cuales tienen que ser eliminados a través de una serie de lavados con agua.

El mayor inconveniente ambiental que tiene este proceso es el exceso de agua que se utiliza para realizar los lavados anteriormente mencionados. En Guatemala, la pequeña industria que se dedica a la fabricación de biodiesel, vierte esta agua al final del proceso directamente al alcantarillado público, sin ningún tratamiento previo, contaminando de esta manera, otros cuerpos de agua.

El agua residual proveniente de esta industria en particular, se caracteriza por su contenido de alcohol, catalizador y tensoactivos (jabón), los cuales junto al pH alcalino resultante aumentan la DBO del agua.

Considerando que las fuentes de energía no renovables se están agotando, y que en Guatemala el proceso convencional de producción de biodiesel contamina el agua residual y otros cuerpos de agua, surgen las siguientes interrogantes:

¿Reducirá significativamente el consumo de agua en el proceso de producción de biodiesel la aplicación de ultrasonido?

¿Será mayor la eficiencia del proceso con ultrasonido comparado con el proceso convencional de transesterificación?

¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua residual del proceso de producción de biodiesel convencional y con ultrasonido?

¿Qué cantidad de agua se usará para el lavado del biodiesel en el proceso con ultrasonido?

6. ALCANCES DEL TEMA

La presente investigación en la producción de biodiesel es de tipo experimental, ya que en este caso es el ultrasonido para observar un cambio en el consumo de agua entre los dos procesos: el convencional y aplicando ultrasonido.

El proceso convencional consume una alta cantidad de agua (en una relación de 10 partes de agua a 1 de biodiesel) y lo que se quiere lograr es minimizar este consumo de agua optimizando el proceso.

Los alcances de esta investigación son a nivel nacional pues se enfocará en la normativa guatemalteca.

Se realizará a nivel laboratorio por el costo del equipo, pudiendo utilizarse los datos obtenidos para aplicarlos industrialmente en caso se compruebe la hipótesis planteada.

El presente estudio beneficia a:

- Investigaciones de las Escuelas de Ingeniería Química, Química, Bioquímica, Tecnología de Alimentos y Maestría en Energía y Ambiente.
- Industria de biodiesel

7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

7.1. Combustibles fósiles

Comprenden todos los materiales que se emplean para producir energía en forma de calor mediante reacciones nucleares (Real Academia Española, 2013) y proceden de restos vegetales y otros organismos vivos que fueron sepultados por efecto de grandes cataclismos o fenómenos naturales y por la acción de microorganismos, bajo ciertas condiciones de presión y temperatura.

Con la evolución del planeta los restos de seres que lo poblaron en sus distintas etapas se fueron depositando en el fondo de mares, lagos y otros cuerpos de agua. Allí fueron cubiertos por capas de sedimento, luego fueron necesarios millones de años para que las reacciones químicas de descomposición y la presión ejercida por el peso de esas capas transformasen a esos restos orgánicos en gases, petróleo y carbón, que son los combustibles fósiles más conocidos (Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala, 2012).

Petróleo

Es un combustible natural líquido constituido por una mezcla de hidrocarburos. Su poder calorífico oscila entre las 9000 y 11000 kcal/kg y procede de la transformación, por acción de determinadas bacterias, de enormes masas de plancton sepultadas por sedimentos y, en determinadas condiciones de presión y temperatura. Es un combustible fósil más ligero que el agua. Estos depósitos se almacenan en lugares con roca porosa y hay rocas

impermeables (arcilla) a su alrededor que evita que se salga (Hervastecnología, 2013).

El petróleo se encuentra en profundidades que varían entre los 600 y los 5000 metros. Este recurso ha sido usado por el ser humano desde la antigüedad, por ejemplo los egipcios usaban petróleo en la conservación de las momias y los romanos como de combustible para el alumbrado (Mindomo, 2013).

El petróleo y sus derivados tienen múltiples y variadas aplicaciones, además de ser un combustible de primer orden, también constituye una materia prima fundamental en la industria, pues a partir del petróleo se pueden elaborar fibras, caucho artificial, plásticos, jabones, asfalto, tintas de imprenta, caucho para la fabricación de neumáticos y un sin número de productos que abarcan casi todos los productos del campo (Recurso Renovable, 2013).

El petróleo en su estado crudo carece de utilidad, sus componentes deben separarse en un proceso denominado refinamiento. Esta técnica se hace en instalaciones denominadas refinerías. Los componentes se separan calentando el petróleo y en la zona más alta de la torre se recogen los hidrocarburos más volátiles y ligeros y en la más baja los más pesados (Villalba Hervás, 2010).

Del refinamiento del petróleo se extraen los siguientes productos, comenzando por los más pesados, obtenidos a altas temperaturas:

- Residuos sólidos como el asfalto: para recubrir carreteras
- Aceites pesados: para lubricar máquinas
- Gasóleos: para calefacción y motores diesel
- Queroseno: para motores de aviación

- Gasolinas: para el transporte de vehículos
- Gases: butano y propano, usados como combustibles domésticos

El petróleo produce energía de forma regular con buen rendimiento, sin embargo al no ser un combustible renovable sus reservas disminuyen y su precio se eleva, es contaminante y contribuye al efecto invernadero y lluvia ácida. Su manipulación es peligrosa.

Carbón

Es un mineral que se formó a partir de los restos vegetales prehistóricos, principalmente de los helechos arborescentes, esos restos sepultados por el fango y bajo los efectos del calor, la presión y la falta de oxígeno, tomaron la estructura mineral que hoy presentan. El primer combustible fósil que ha utilizado el hombre es el carbón y representa cerca del 70% de las reservas energéticas mundiales de combustibles fósiles conocidas actualmente, es la opción más utilizada en la producción de electricidad a nivel mundial (IDAE, 2013).

La importancia del carbón radica en su poder energético como combustible, las primeras máquinas de vapor, como barcos, trenes y maquinaria industrial se movieron gracias a la energía que suministraba a este material. Posteriormente fue desplazado por el petróleo.

A medida que pasaba el tiempo, el carbón aumentaba su contenido en carbono, lo cual incrementa la calidad y poder calorífico del mismo. Según este criterio, el carbón se puede clasificar en:

- Turba: es el carbón más reciente. Tiene un porcentaje alto de humedad (hasta 90%), bajo poder calorífico (menos de 2000 kcal/kg) y poco carbono (menos de un 50%). Se debe secar antes de su uso y se encuentra en zonas pantanosas, es comúnmente utilizado en sistemas de calefacción.
- Lignito: poder calorífico menor de 7000 kcal/kg, con más de un 50% de carbono y mucha humedad (30%). Se encuentra en minas a cielo abierto y es una característica que hace su uso más rentable. Se emplea comúnmente en centrales eléctricas.
- Hulla: tiene alto poder calorífico, más de 7000 kcal/kg y elevado porcentaje de carbono (85%). Se emplea en centrales eléctricas y fundiciones de metales.
- Antracita: es el carbón más antiguo, tiene más de un 90% de carbono. Arde con facilidad y tiene un alto poder calorífico (más de 8000 kcal/kg).

Existen también carbones artificiales, los más importantes son el coque y el carbón vegetal (UNED, 2013).

- Coque: se obtiene a partir del carbón natural, en un proceso de calentamiento o calcinación de otros carbones minerales en ausencia de aire dentro de hornos especiales. El resultado es un carbón con un mayor poder calorífico.
- Carbón vegetal: se obtiene a partir de la madera.

Del carbón se obtiene una gran cantidad de energía en forma sencilla y cómoda, regularmente el carbón se consume cerca de donde se explota, por lo que se ahorran costos de transporte. Sin embargo hay que destacar que su proceso de extracción es peligroso y su combustión genera problemas ambientales por el elevado índice de azufre, contribuyendo al efecto invernadero y lluvia ácida (Biblioteca Virtual de la Unión de Juventudes Comunistas de España, 2013).

Gas natural o combustibles gaseosos

Se obtiene de yacimientos y consiste en una mezcla de gases que se encuentra almacenada en el interior de la tierra, algunas veces en forma aislada como gas seco o acompañado de petróleo como gas húmedo. Su origen es semejante al del petróleo, aunque su extracción es más sencilla.

Está compuesto principalmente por metano (cerca del 70%), un compuesto químico hecho de átomos de carbono e hidrógeno y el resto es mayoritariamente etano, propano y butano, su poder calorífico ronda las 11000 kcal/m³ (Ingeniería Básica de Yacimientos, 2013).

Se extrae mediante tuberías y se almacena directamente en grandes contenedores de aluminio. Luego se distribuye a los usuarios a través de gasoductos. Como es inodoro e incoloro, al extraerlo se mezcla con una sustancia que le da un fuerte y desagradable olor. De este modo, las personas pueden darse cuenta de que existe una filtración o escape de gas.

Los gases licuados del petróleo o gases GLP son el butano y propano, se obtienen en las refinerías y poseen un poder calorífico que ronda las 25000 kcal/m³.

El impacto ambiental del uso de combustibles fósiles es enorme, tanto la extracción como la combustión de los mismos emite a la atmósfera residuos de óxido de azufre, óxido de nitrógeno y dióxido de carbono, que se consideran los principales causantes del efecto invernadero con un aumento progresivo de la temperatura media y la lluvia ácida con el deterioro de bosques y pérdida de fertilidad en la tierra, contaminación de aguas y otras estructuras (ataca las piedras).

Se suman a estos efectos nocivos las posibilidades de derrames de petróleo y la influencia sobre la atmósfera (Tecnología Industrial, 2013).

El uso de los combustibles fósiles aún es muy practicado por su facilidad de extracción, disponibilidad y precio bajo para proveer energía.

7.2. Biocombustibles

Se denomina así a los combustibles obtenidos mediante el tratamiento físico o químico de materia vegetal o de residuos orgánicos (Real Academia Española, 2013). Los biocombustibles contienen componentes derivados de biomasa u organismos recientemente vivos y/o sus desechos metabólicos. Los biocomponentes actuales proceden habitualmente del azúcar, trigo, maíz o semillas oleaginosas. Todos ellos reducen el volumen total de CO₂ que se emite en la atmósfera, ya que lo absorben a medida que crecen y emiten prácticamente la misma cantidad que los combustibles convencionales cuando se queman (Liliana Haim, 2013).

Debido a la actual aplicación simultánea de tecnologías de componentes en los motores de los vehículos que se fabrican en la mayoría de los países, los biocomponentes son a menudo mezclados con los carburantes en pequeñas

proporciones, 5 o 10%, proporcionando una reducción útil pero limitada de gases de efecto invernadero. En Europa y Estados Unidos, se ha implantado una legislación que exige a los proveedores mezclar biocombustibles hasta ciertos niveles determinados (BP España, 2013).

Los biocombustibles existen desde la invención de los automóviles. A principios del siglo XX, Henry Ford consideró usarlos para mover sus famosos Modelos T con etanol e incluso los primeros motores diesel llegaron a funcionar con aceite de cacahuete. Pero el descubrimiento de inmensos depósitos de petróleo mantuvo la gasolina y el diesel muy baratos durante décadas, lo que relegó a los biocombustibles al olvido. Sin embargo, con la reciente subida de los precios del petróleo, junto a la creciente preocupación sobre el calentamiento global causado por las emisiones de dióxido de carbono, los biocombustibles han vuelto a subir a la palestra (National Geographic, 2013).

Dicho así, parecería que los biocombustibles son la gran solución. Los automóviles son grandes emisores de dióxido de carbono, el peor gas de efecto invernadero causante del calentamiento global. Pero como las plantas absorben dióxido de carbono mientras crecen, los cultivos destinados a la fabricación de biocombustible absorben tanto dióxido de carbono como el que emiten los escapes de los vehículos que los queman. Y a diferencia de las reservas petrolíferas subterráneas, los biocombustibles son un recurso renovable ya que siempre podemos cultivar más para producir biocombustible.

Los procesos de cultivo, fabricación de fertilizantes y pesticidas además de la conversión de las plantas en biocombustible, consumen mucha energía (Bartolome Burgos, 2013).

De hecho, es tanta energía la que consumen que hay un debate abierto sobre el etanol de maíz para dilucidar si proporciona la misma energía que necesita para su cultivo y procesamiento (EROEI). Además, puesto que gran parte de la energía usada en la producción procede del carbón y el gas natural, los biocombustibles no sustituyen el petróleo que consumen (National Geographic, 2013).

En el futuro, muchos expertos consideran que será mejor hacer biocombustibles a partir de gramíneas y árboles pequeños ya que contienen más celulosa. La celulosa es un material resistente que conforma las paredes de las células vegetales y es la mayor parte del peso de las plantas. Si se pudiese transformar la celulosa en biocombustible, sería mucho más eficiente que los biocombustibles actuales y se emitiría menos dióxido de carbono a la atmósfera.

A nivel mundial y particularmente en América Latina el uso de combustibles fósiles es cada vez menos accesible por varias razones; entre ellas, por la tendencia a su agotamiento y a las limitaciones crecientes debido al aumento progresivo en su costo. Los biocombustibles, surgen como una alternativa sustentable en el tiempo como respuesta a la acción humana del efecto que produce la quema de éstos, a veces injustificada o irracional para el beneficio del hombre. Otra razón adicional es el aspecto ambiental, este en los últimos años ha tenido una gran relevancia debido a los efectos en los cambios climáticos, los cuales se han comenzado a sentir en cualquier parte del mundo, la contaminación ambiental generada debido a la combustión de los productos fósiles está incrementando a unos niveles sin precedentes en la atmosfera (Araque, 2013).

Gran cantidad de investigación y desarrollo relacionado con el tema comienza a florecer a nivel internacional y ya se están viendo frutos. Millones de campesinos en América Latina han abandonado sus campos y hoy viven formando parte del cordón de miseria en las grandes ciudades capitales, podrían verse favorecidos con el desarrollo de los biocombustibles.

Los biocombustibles en las américas tienen una ventaja frente al mundo, ya que se dispone de grandes extensiones de territorios no cultivados que se podrían habilitar para el desarrollo de unidades de producción que pudieran generar por un lado comida para la población y a su vez de extensiones que podrían utilizarse para la producción de energías alternativas y poder solventar en parte la necesidad de combustibles en los países, así como, generar divisas muy necesitadas en muchos.

La Unión Europea, consciente de la creciente necesidad de nuevas y mejores tecnologías de producción, y sobre todo de mayores volúmenes de biomasa —requeridos para la producción de biocombustibles proyectada— se ha interesado en promover la sostenibilidad de este tipo de energía en América Latina y el Caribe y el mundo (CEPAL, 2013).

Para facilitar la comprensión del contexto en que se insertan los biocombustibles en la región es necesario entender las dinámicas de dos realidades diferentes. Una de ellas es la amplia experiencia que tiene Brasil en la industria bioenergética; y otra, es la del resto de América Latina, caracterizada por el todavía inmaduro desarrollo del sector.

En la mayoría de los países de la región la investigación y desarrollo es reducida, debido principalmente a las altas inversiones exigidas. Brasil es el único país de la región que invierte en investigación y desarrollo más del 1% del

PIB, y esta inversión proviene mayoritariamente desde el sector público, a diferencia de los países desarrollados donde el esfuerzo privado es considerable.

La industria de los biocombustibles, a diferencia de otros tipos de producción, enfrenta estrictas exigencias de sostenibilidad para su desarrollo (CEPAL, 2013).

En este sentido ha habido interés en definir indicadores de sostenibilidad (criterios de sostenibilidad de GBEP) que permitan marcar el rumbo del desarrollo del sector bioenergía, considerando los impactos ambientales, sociales y económicos y de seguridad energética.

El mercado de los biocombustibles se ha desarrollado durante la última década, teniendo un crecimiento explosivo de 10% anual. Los dos biocombustibles principales son el bioetanol, que alcanza más del 80% de la producción, y el biodiesel (18%). El mayor productor de bioetanol es Estados Unidos (54%), en base a maíz, y el segundo es Brasil (33%), en base a caña de azúcar. Colombia también presenta importancia en la región, con el 0,4% de la producción global, también en base a caña de azúcar. En cuanto al biodiesel, el mayor productor es la Unión Europea (alrededor del 60%), en base a raps y aceite de soya, seguido de Estados Unidos (14%), a partir de soya; en ALC destacan como productores Brasil (9%) y Argentina (13%) en base a soya, y Colombia en base a aceite de palma. Los porcentajes han cambiado recientemente, debido a la irrupción de Argentina como productor de biodiesel de soya (Políticas sobre desarrollo Institucional en innovación en biocombustibles en América Latina y el Caribe, 2011).

Las razones del desarrollo explosivo de este mercado a nivel global se basan principalmente en tres aspectos: a) seguridad energética, a través de la sustitución de combustibles fósiles; b) mejorar la balanza de pagos al sustituir importaciones de hidrocarburos; y c) la promoción del desarrollo rural. En el último tiempo una nueva motivación para la producción de biocombustibles tiene relación con la mitigación del cambio climático. Los aspectos mencionados se han traducido en ambiciosas políticas de promoción de los biocombustibles por parte de los gobiernos, cuestión que ha permitido el desarrollo de este mercado; sin embargo, el limitado rol de las fuerzas de mercado propiamente ha llevado a cuestionar su competitividad (CEPAL, 2013).

La mayoría de los países, especialmente los desarrollados, poseen políticas o instrumentos cualitativos y cuantitativos para promover su desarrollo a lo largo de toda la cadena de producción y comercialización.

Los biocombustibles elaborados en base a cultivos agrícolas, llamados de primera generación, han sido dinamizados, inicialmente, para fortalecer la seguridad energética, promover el desarrollo y diversificar las exportaciones, entre otros. Estos biocombustibles enfrentarán una competencia por suelos y agua, puesto que a pesar de que la productividad de los cultivos crece más rápido que la tasa de natalidad, la demanda por proteínas crece más rápido que la productividad de los cultivos. Esta competencia también ocurrirá, de manera indirecta, en los biocombustibles de siguientes generaciones, que provienen de biomasa residual, requieren alta tecnología para su creación, y por lo tanto amplios fondos públicos para investigación y desarrollo (CEPAL, 2013).

En Guatemala 90 por ciento de los biocombustibles se exporta y el 10 restante queda para consumo local (Mundo & Motor, 2013).

Según estudios de organismos internacionales Guatemala cuenta con la infraestructura necesaria para abastecerse con cuatro mil galones por día de este insumo y con ello disminuir la dependencia del petróleo. Por sus características industriales, Guatemala es considerado el país centroamericano con mayor capacidad instalada para producir biocombustibles, gracias a la producción de azúcar que aporta como subproducto al etanol. Esto lo convierte en el tercer exportador de combustibles verdes a nivel mundial. También llamados combustibles renovables, sirven para el funcionamiento de motores de combustión interna de forma pura o mezclados con otro tipo de carburante. Entre los que cuentan ya con manejo y producción formal están etanol, biodiesel y biogás.

En la actualidad, países como Alemania, Brasil, China, Estados Unidos, Francia e Italia producen y utilizan biocombustibles, lo que ha significado una reducción en el tonelaje de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Este podría ser el caso de Guatemala, pero en la actualidad el 90 por ciento de la producción va para Europa, Estados Unidos y México, mientras el país sigue dependiendo del petróleo y de las fluctuaciones de su mercado (Mundo & Motor, 2013).

La idea de mezclar etanol con gasolina súper o regular no es un tema nuevo, pues con la emisión del Decreto Ley 17-85, Ley de Alcohol Carburante, se busca que el parque vehicular nacional utilice una mezcla de gasolina con el cinco por ciento de etanol (E5), actualmente no hay datos que garanticen el cumplimiento de esta normativa.

En 2008 la Organización de Estados Americanos (OEA) recomendó que para 2012 Guatemala tendría que iniciar un uso paulatino de etanol y biodiesel en su flota vehicular, para llegar a un E10 y un cinco por ciento en biodiesel. La

propuesta no hizo eco, aun cuando representaba la oportunidad de llevar al consumidor combustibles al precio más bajo (Mundo & Motor, 2013).

A sabiendas de que con la producción actual de etanol (65 millones de galones al año) se podría utilizar una mezcla de hasta 10 por ciento de este alcohol por cada galón, lo que parece no ceder es la voluntad política para crear programas de producción y uso de alcohol carburante en el país.

Gracias a que Guatemala es uno de los mayores productores de azúcar del mundo, hoy cinco grandes ingenios compiten para destilar la mayor cantidad de etanol, actividad que se multiplica a otras pequeñas empresas que ven en la producción del biodiesel una oportunidad de ganancia (Mundo & Motor, 2013).

De acuerdo con datos proporcionados por el Ministerio de Energía y Minas (MEM), las cinco destilerías en funcionamiento tienen una capacidad instalada de producción de más de 250 mil millones de litros de etanol por año. En el caso del biodiesel, seis plantas de pequeña escala la tienen para generar unos cuatro mil galones por día. Aunque en este último punto, Erick Estrada, catedrático universitario e investigador de biocombustibles, señala que el biodiesel no es una solución alternativa para el diesel derivado del petróleo, debido a que su producción es muy baja.

Por otro lado, un estudio de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL califica a Guatemala como país idóneo para seguir expandiendo la producción de biocombustibles, por la extensa disponibilidad de tierras, amplia experiencia en el procesamiento del azúcar y otras materias primas, así como por su tecnología de punta en el área industrial.

En ese punto la OEA coincide al afirmar que en el país hay cerca de un millón de hectáreas que podrían utilizarse para el cultivo de especies para la producción de biocombustibles como piñón (*Jatropha curcas*), palma de aceite, soya o higuierillo.

Según cifras no oficiales de la CEPAL, actualmente el país produce unos 90 millones de litros anuales de etanol, a partir de la caña de azúcar. Sin embargo, Guatemala podría generar hasta un millón de litros diarios, con mejoras tecnológicas y expansión de sus cultivos, estima el estudio.

Como indica Kevin de Cuba, del Programa de apoyo de la Organización de Estados Americanos para el desarrollo de los biocombustibles en Centroamérica, el tema de la producción de biocombustibles es algo que no puede generalizarse, pues cada país tiene un perfil diferente para el uso de combustibles y un potencial para su producción (Mundo & Motor, 2013).

Un proceso consultivo con todos los actores es necesario para alcanzar consenso y un análisis holístico de todos los impactos permitirá comparar con el uso actual de combustibles que en este caso son el diesel y la gasolina.

Como explica Aída Lorenzo, gerente de la Asociación Promotora de Combustibles Renovables de Guatemala (ACR), no existe un riesgo entre la producción de este tipo de combustibles y la seguridad alimentaria nacional, pues este es un subproducto de la caña de azúcar, en su mayoría. Esta posición es secundada por Pedro Ordóñez, catedrático de química de la Universidad de San Carlos e investigador del biodiesel, quien señala que producir los biocombustibles de manera responsable no representa mayores peligros para el país.

Se ha estimado que por cada litro de etanol producido dentro de los ingenios se consume cerca de 12 litros de agua. Por lo que, la producción de agroenergía representa un riesgo de mayor escasez de recursos naturales (Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas, 2013).

Según los ambientalistas, al producir melaza se obtiene vinaza, un desecho industrial que causa desoxigenación del agua. Por cada litro de etanol producido se obtienen de 10 a 14 litros de vinaza, la cual puede causar graves problemas si no hay un manejo adecuado y responsable (BIO Energéticos, 2013).

En tanto, los expertos de la Comisión Nacional de Biocombustibles, del Ministerio de Energía y Minas en Guatemala, son más cautos al explicar que el peligro de una competencia entre etanol, biodiesel y alimentos siempre existe, pero no supone un alto riesgo toda vez esté respaldado con estudios de impacto ambiental.

Aunque la producción de biocombustibles representaría un ahorro de millones de dólares en comparación con los combustibles, así como un alivio para la bolsa de los automovilistas, el hecho es que siempre habrá opiniones a favor y en contra y no se sabe qué tan bueno puede ser hasta que no esté disponible para el consumo popular.

Se considerar que en el proceso de producción de biocombustibles se hace uno de combustión que obviamente genera emisiones, también es cierto que genera otros subproductos como la vinaza, que deben ser manejados con cuidado.

7.2.1. Biodiesel

El biodiesel es un biocombustible sintético elaborado con recursos renovables, que se fabrica a partir de cualquier grasa animal o aceites vegetales, que pueden ser ya usados o sin usar. Se utiliza girasol, canola, soja, los cuáles, en algunos casos, son cultivados exclusivamente para producirlo. Se puede usar puro o mezclado con gasoil en cualquier proporción en motores diesel. El principal productor de biodiesel en el mundo es Alemania, que concentra el 63% de la producción. Le sigue Francia con el 17%, Estados Unidos con el 10%, Italia con el 7% y Austria con el 3% (Carlos Alvarez, 2013).

El sistema más habitual es la transformación de estos aceites a través de un proceso de transesterificación. De este modo, a partir de alcohol metílico, hidróxido sódico (soda cáustica) y aceite vegetal se obtiene un éster que se puede utilizar directamente en un motor diesel sin modificar, obteniéndose glicerina como subproducto. La glicerina puede utilizarse para otras aplicaciones.

Las propiedades del biodiesel son prácticamente las mismas que las del gasóleo de automoción en cuanto a densidad y número de cetano. Además, presenta un punto de inflamación superior.

Por todo ello, el biodiesel puede mezclarse con el gasóleo para su uso en motores e incluso sustituirlo totalmente si se adaptan éstos convenientemente (Consejo Nacional de Energía - El Salvador, 2013).

La ASTM (American Society for Testing and Material Standard) describe al biodiesel como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de

animales, y que se emplean en motores de ignición de compresión. Sin embargo, los ésteres más utilizados, son los de metanol y etanol (obtenidos a partir de la transesterificación de cualquier tipo de aceites vegetales o grasas animales o de la esterificación de los ácidos grasos) debido a su bajo coste y sus ventajas químicas y físicas (Miliarium).

Algunas de las ventajas del biodiesel comparado con el diesel convencional son las siguientes:

- El biodiesel tiene mayor lubricidad que el diesel de origen fósil, por lo que extiende la vida útil de los motores.
- Es más seguro de transportar y almacenar, ya que tiene un punto de inflamación 100°C mayor que el diesel fósil. El biodiesel podría explotar a una temperatura de 150°C.
- Se degrada de 4 a 5 veces más rápido que el diesel fósil y puede ser usado como solvente para limpiar derrames de diesel fósil.
- Permite al productor agrícola autoabastecerse de combustible; además, su producción promueve la inclusión social de los habitantes menos favorecidos del sector rural, debido a que no requiere altos niveles de inversión (Gabriel Rodríguez, 2013).
- Prácticamente no contiene azufre, por lo que no genera SO₂ (dióxido de azufre), un gas que contribuye en forma significativa a la contaminación ambiental. El Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés) está considerando al azufre como el “plomo” del próximo siglo. Actualmente en todas partes las legislaciones están exigiendo

disminuir el contenido de azufre del diesel, de manera que este sea Low sulphur diesel o LSD (diesel de bajo contenido de azufre). El LSD tiene un menor grado de lubricidad que el diesel, por lo que es más necesario adicionarle biodiesel.

- El biodiesel no contamina fuentes de agua superficial ni acuíferos subterráneos.

Algunas de las desventajas del biodiesel comparado con el diesel convencional son las siguientes:

- El biodiesel presenta problemas de fluidez y congelamiento a bajas temperaturas ($<0^{\circ}\text{C}$), especialmente el que se produce de palma africana.
- El contenido energético del biodiesel es algo menor que el del diesel (12% menor en peso u 8% en volumen), por lo que su consumo es ligeramente mayor.
- El biodiesel de baja calidad (con un bajo número de cetano) puede incrementar las emisiones de NOx (óxidos de nitrógeno), pero si el número de cetano es mayor que 68, las emisiones de NOx serían iguales o menores que las provenientes del diesel fósil.
- Descompone el caucho natural de algunos componentes de motores antiguos (Gabriel Rodríguez, 2013).
- Necesita muchos aditivos para disminuir la temperatura de gelificación (formación de cristales).

- El biodiesel puede contener pequeñas cantidades de agua, pero son problemáticas. Aunque el biodiesel no es miscible con el agua, es higroscópico como el etanol, es decir, absorbe el agua de la humedad atmosférica. Una de las razones para que el biodiesel sea higroscópico es la persistencia de los mono y diglicéridos sobrantes de una reacción incompleta. Estas moléculas pueden actuar como un emulsionante, permitiendo que el agua se mezcle con el biodiesel. También puede existir agua residual debido al tratamiento o como resultado de la condensación del tanque de almacenamiento.

7.2.1.1. Producción de biodiesel – reacciones

La producción de biodiesel es sencilla y no responde a economías de escala. Parte de un aceite vegetal, o grasa animal, a los que se somete a un proceso de transesterificación. Como resultante de este proceso se obtiene biodiesel y un subproducto conocido como glicerina. Esta última se utiliza para la elaboración de cosméticos, medicina, lubricación de maquinaria, fabricación jabón, entre otros y se logra mezclando el aceite vegetal, o la grasa animal, con un alcohol liviano y un catalizador. Al cabo de un tiempo de reposo, se separan por decantación el biodiesel, y la glicerina (Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala, 2012).

Si fue correctamente elaborado, el biodiesel que se obtiene sólo requiere filtrado antes de ser usado. Se lo puede almacenar igual que el gasoil.

La química detrás del biodiesel muestra que un buen entendimiento de las varias reacciones químicas es necesario para el conocimiento de los productos secundarios (benignos y nocivos). El biodiesel está compuesto de ésteres, de

metilésteres o etilésteres. Existen combinaciones de una sola molécula de ácido graso combinada con una molécula de alcohol, como el metanol (formando esteres metílicos) o etanol (produciendo esteres etílicos), el alcohol y el ácido graso están conectados vía una unión de esteres.

La reacción del biodiesel ocurre cuando el alcohol pequeño, metanol o etanol, reemplaza a uno de los grupos de alcoholes en la unión de esteres en la glicerina, convirtiendo un triglicérido en un diglicérido y una molécula de biodiesel. Este tipo de reacción, donde un alcohol reemplaza a otro en un ester se llama transesterificación. La reacción continua a reemplazar cada uno de los grupos alcoholes convirtiendo cada molécula de grasa en tres de biodiesel y una de glicerina. Por ejemplo, si un aceite está compuesto de completamente de ácido esteárico (C18:0, peso molecular 284,5 g/mol), y triglicéridos, 1kg de aceite reaccionara completamente con 122,7 g de metanol para formar 1005,2 g de biodiesel. En realidad, la reacción nunca es perfecta, la mayoría de la gente usa metanol extra para incrementar el producto de la reacción (Whitman Direct Action, 2010).

Bajo condiciones normales, esta reacción ocurre muy despacio. Para dar paso a una reacción más rápida, se ocupa calor y un catalizador. La reacción puede ser catalizada por un ácido o una base, pero uno puede alcanzar una reacción mucho más rápida usando una base. El método más común usa el hidróxido de sodio (NaOH peso molecular 40,0 g/mol) o el hidróxido de potasio (KOH, peso molecular 56,11 g/mol).

Cantidades equivalentes de base pueden ser encontradas al multiplicar las proporciones de pesos moleculares (Rezende, S.M.; Soares, B. G; Coutinho, F.M.B.; Reis, S. C.M. dos; Reid, M. G.; Lachter, E.R.; Nascimento, R.S.V., 2005).

La reacción de transesterificación puede ser catalizada por bases, ácidos o enzimas. Los triglicéridos son ésteres de cadenas largas, ácidos carboxílicos combinados con glicerol. Los ácidos carboxílicos $\{R-C(=O)-O-H\}$ pueden ser convertidos dentro de los metil ésteres $\{R-C(=O)-O-CH_3\}$ por la acción de un agente de transesterificación.

Las bases pueden catalizar la reacción quitando un protón del alcohol, haciéndolo más reactivo, mientras que los ácidos pueden catalizar la reacción, por donación de un protón para el grupo carbonilo, haciéndolo más reactivo.

Transesterificación con catalizador ácido

El proceso de transesterificación es catalizado por ácidos Brønsted, preferentemente por ácido sulfónico o sulfúrico. Estos catalizadores dan una muy alta producción de ésteres alquílicos, pero las reacciones son lentas en comparación con catalizadores alcalinos. La transesterificación catalizada por un ácido es más conveniente para ácidos o grasas que tienen altas cantidades de ácidos grasos libres y humedad. Aksoy reportó que es necesario llevar a cabo la transesterificación bajo una condición ácida cuando el componente del aceite fuese de un material de menor grado como el aceite de oliva.

Transesterificación con catalizador alcalino

En el método de transesterificación con metanol vía alcalina, el catalizador (KOH o NaOH) es disuelto en el alcohol en un pequeño reactor. El aceite es transferido al reactor de biodiesel y después la mezcla catalizador/alcohol.

La mezcla se agitada a 60 °C de temperatura y una presión ambiente. Una reacción de transesterificación exitosa produce dos fases líquidas: éster y glicerina cruda.

La glicerina cruda se recolecta en un contenedor después de algunas horas de sedimento. La separación de la fase puede ser observada en 10 minutos y completarse en 2 horas aunque la sedimentación puede tomar hasta 20 horas. Después de que la sedimentación finaliza, se agrega agua para lavar el éster.

Transesterificación enzimática

En la transesterificación química usando un catalizador alcalino o ácido el proceso da un alto nivel de conversión de triglicéridos a sus correspondientes metil ésteres en cortos tiempos de reacción, pero la reacción tiene varias desventajas: utiliza gran cantidad de energía, la recuperación de glicerol es difícil, el catalizador ácido o alcalino tiene que separarse del producto, el residuo de agua alcalina requiere de tratamiento, los ácidos grasos libres y el agua interfieren con la reacción.

Otra alternativa de catálisis es el empleo de enzimas denominadas lipasas. Algunas de las lipasas más utilizadas en numerosos estudios de producción de biodiesel son la *Candida*, *Penicillium* y las *Pseudomonas*.

La transesterificación enzimática de aceites refinados o de desecho, es insensible al contenido de agua y ácidos grasos libres, requiere menos etapas, consume menos energía y genera menos agua de desecho en este debe ser notado que el subproducto glicerol, que puede ser fácilmente removido sin ningún proceso complejo y que también los ácidos grasos libres contenidos en

el residuo del aceite y las grasas pueden completamente convertirse a metil ésteres.

El costo de producción de un catalizador enzimático es regularmente mayor que el de uno alcalino.

Los parámetros que afectan la reacción de transesterificación se pueden dividir en dos:

- Las condiciones de reacción, y
- Las características del aceite

La transesterificación de aceites vegetales depende de las condiciones de reacción utilizadas en el proceso, tales como: temperatura y tiempo de reacción, concentración molar alcohol: aceite vegetal, tipo de alcohol, tipo y concentración de catalizador, tiempo de reacción y contenido de ácidos grasos libres y humedad (Morayma Uribe Gómez, 2010).

7.2.1.2. Materias primas

Aceites vegetales convencionales

Las materias primas utilizadas convencionalmente en la producción de biodiesel han sido los aceites de semillas oleaginosas como el girasol y la colza (Europa), la soja (Estados Unidos) y el coco (Filipinas); y los aceites de frutos oleaginosos como la palma (Malasia e Indonesia). Por razones climatológicas, la colza (*Brassicanapusse* produce principalmente en el norte de Europa y el girasol (*Helianthusannuus*) en los países mediterráneos del sur, como España o Italia. La utilización de estos aceites para producir biodiesel en Europa ha

estado asociada a las regulaciones de retirada obligatoria de tierras de la Política Agraria Común (PAC), que permite el cultivo de semillas oleaginosas a precios razonables. Sin embargo, la dedicación de sólo las tierras de retirada para la producción de materias primas energéticas supone un riesgo por cuanto estas superficies varían en el tiempo, ya que el régimen de retirada de tierras depende de la oferta y la demanda de cereales alimentarios, lo que implica que este índice está sujeto a alteraciones(López Blanco, 2013).

- Palma africana o de aceite (*Elaeisguineensisjacq*), a palma africana es una planta del trópico húmedo, que es la mejor opción para las tierras bajas de las regiones tropicales y ayuda a prevenir la erosión. Este es un cultivo que requiere de grandes cantidades de agua.
- Piñón (*Jatropha Curcas L.*), Se le localiza en climas tropicales y semitropicales, es un arbusto-árbol que llega a medir de 1 a 8 metros. Crece en suelos pobres y arenosos, es resistente a la sequía y la semilla posee un importante contenido de proteína y de grasa. Se cultiva en India, África y Centroamérica para obtener biodiesel.
- Frijol de soya (*Glycine Max L., Merril.* Familia Leguminosas), es una planta anual de origen oriental, que prefiere para su buen desarrollo, veranos cálidos y húmedos, se emplea como aceite para cocinar y la pasta, co-producto del proceso de extracción, como fuente de proteína en los alimentos balanceados para el ganado.
- Colza (*BrassicaNapus L.*), La semilla de colza contiene entre 380 y 400 kilogramos de aceite y entre 180 y 200 kilogramos de proteína por tonelada y al procesarla por el método de solventes, se obtienen 369 kilogramos de aceite crudo y aproximadamente 500 kilogramos de torta o

pasta con 200 kilogramos de proteína, Los 369 kilogramos de aceite al esterificarse con bioetanol, producirán 387 kilogramos de biodiesel, es decir aproximadamente 460 litros. Así, los productos principales de la transformación de una tonelada de semilla, son: 460 litros de biodiesel y 500 kilogramos de torta o pasta con 40% de proteína.

- **Cártamo (*Carthamustinctorius L.*)**, La semilla contiene por kilogramo, 280 gramos de aceite y 126 gramos de proteína (además 500 gramos de carbohidratos totales, 43 gramos de cenizas y 48 gramos de agua). Así, de una tonelada de semilla de cártamo se producen aproximadamente 272 kilogramos de aceite y 728 kilogramos de pasta que contienen 126 kilogramos de proteína, es decir el 17,3%. Los 272 kilogramos de aceite al esterificarse con bioetanol producen aproximadamente 285 kilogramos de biodiesel, es decir 339 litros.
- **Girasol (*Helianthusannuus L.*)**, La semilla de girasol, en base seca, en peso, se compone de 42% de aceite; 16% de proteína y 40% de fibra. Así, de una tonelada de semilla se obtienen, extrayendo por presión: 387 kilogramos de aceite y 613 kilogramos de pasta, ésta con 160 kilogramos de proteína, es decir, el 26%. Los 387 kilogramos de aceite al esterificarse con bioetanol, producirán aproximadamente 405 kilogramos de biodiesel; es decir, 482 litros.

Aceites vegetales alternativos

Además de los aceites vegetales convencionales, existen otras especies más adaptadas a las condiciones del país donde se desarrollan y mejor posicionadas en el ámbito de los cultivos energéticos. En este sentido, destacan la utilización, como materias primas de la producción de biodiesel, de los

aceites de *Camelina sativa*, *Crambeabyssinica* y *Jatropha curcas*. Existen otros cultivos que se adaptan mejor a las condiciones de cada país y que presentan rendimientos de producción mayores. Se trata de los cultivos de *Brassicacarinata* y *Cynaracardunculus*. La *Brassicacarinata* es una alternativa real al secano y regadío extensivo. La *Cynaracardunculus* es un cultivo plurianual y permanente, de unos diez años de ocupación del terreno, y orientado fundamentalmente a la producción de biomasa, aunque también pueden aprovecharse sus semillas para la obtención de aceite. Se obtienen de 2 000 a 3 000 kilogramos de semillas, cuyo aceite sirve de materia prima para la fabricación de biodiesel (Stavarache, 2005).

Aceites vegetales modificados genéticamente

Los aceites y las grasas se diferencian principalmente en su contenido en ácidos grasos. Los aceites con proporciones altas de ácidos grasos insaturados, como el aceite de girasol o de camelina sativa, mejoran la operatividad del biodiesel a bajas temperaturas, pero disminuyen su estabilidad a la oxidación, que se traduce en un índice de yodo elevado. Por este motivo, se pueden tener en consideración, como materias primas para producir biodiesel, los aceites con elevado contenido en insaturaciones, que han sido modificados genéticamente para reducir esta proporción, como el aceite de girasol de alto oleico (Stavarache, 2005).

Aceites de fritura usados

El aceite de fritura usado es una de las alternativas con mejores perspectivas en la producción de biodiesel, ya que es la materia prima más barata y con su utilización se evitan los costes de tratamiento como residuo. Hoy día muchos países que son grandes consumidores de aceites vegetales,

centrándose el consumo en aceite de oliva y girasol. Por su parte, los aceites usados presentan un bajo nivel de reutilización, por lo que no sufren grandes alteraciones y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustible.

Grasas animales

Además de los aceites vegetales y los aceites de fritura usados, las grasas animales, y más concretamente el sebo de vaca, pueden utilizarse como materia prima de la transesterificación para obtener biodiesel. El sebo tiene diferentes grados de calidad respecto a su utilización en la alimentación, empleándose los de peor calidad en la formulación de los alimentos de animales. La aplicación de grasas animales surgió a raíz de la prohibición de su utilización en la producción de piensos o alimento seco para ganado, como salida para los mismos como subproducto. Sin embargo, actualmente no existe un nivel de aplicación industrial.

Aceites de otras fuentes

Por otra parte, es interesante señalar la producción de lípidos de composiciones similares a los aceites vegetales, mediante procesos microbianos, a partir de algas, bacterias y hongos, así como a partir de microalgas.

7.2.1.3. Ultrasonido en el proceso de fabricación

Se define como ultrasonido al sonido cuya frecuencia de vibraciones es superior al límite perceptible por el oído humano (Real Academia Española, 2013). Se define como el sonido en una frecuencia superior de la que el oído

humano puede percibir. El rango normal de audición es de entre 16 Hz y cerca de 18 kHz y el ultrasonido se considera generalmente que se encuentra entre los 20 kHz hasta valores por encima de 100 MHz, como cualquier onda de sonido, el ultrasonido alternativamente comprime y expande la separación molecular del medio que atraviesa, causando una serie de ciclos de compresión y de rarefacción.

Si se aplica un gran gradiente de presión negativa al líquido, de modo que la distancia entre las moléculas supera la distancia crítica molecular necesaria para mantener el líquido intacto, el líquido se descompondría y se crearían cavidades, es decir, se formarían burbujas de vapor del líquido. A altas intensidades de ultrasonidos, una pequeña cavidad puede crecer rápidamente debido a efectos inerciales. Como resultado, algunas burbujas se expansionarían repentinamente a un tamaño inestable y se colapsarían violentamente, generando energía de efecto químico y mecánico. El colapso de las burbujas de cavitación destruiría el límite de la fase y causaría emulsión, por chorros de ultrasonido que afectarían un líquido a otro (Morayma Uribe Gómez, 2010).

Una baja frecuencia de irradiación de ultrasonidos puede ser útil para la transesterificación de triglicéridos con el alcohol. Los ultrasonidos proporcionan la energía mecánica para la mezcla y la energía de activación necesaria para iniciar la reacción de transesterificación.

La ultrasonificación aumenta la velocidad de reacción química y el rendimiento de la transesterificación de aceites vegetales y grasas animales en biodiesel.

La mezcla de ultrasonidos mejora la transferencia de masa y la cinética de reacción que conduce a la aceleración de transesterificación y mayor rendimiento. Ahorra exceso de metanol y catalizador.

El ultrasonido ha demostrado ser una herramienta muy útil para mejorar la velocidad de reacción en una variedad de sistemas reactivos. Se han llevado a cabo unos estudios cinéticos de la transesterificación usando una sonda de ultrasonido, considerando el proceso global como una única reacción irreversible. Los resultados obtenidos no permiten la selección de la mejor expresión cinética (Ana Cristina Dinis Vicente Parda, 2012).

La química verde, hace referencia al uso de procesos industriales menos contaminantes y disminuir el gasto energético, de agua y minimizar la producción de compuestos contaminantes, todo esto de forma compatible con la rentabilidad.

7.2.1.4. Productos de la reacción

En las reacciones secundarias del biodiesel se encuentran:

- Producción de jabones: en conjunto con la deseada reacción del biodiesel, hay muchas más reacciones que pueden ocurrir con varios contaminantes en el aceite. Los contaminantes en el aceite ya sea el agua o los FFA pueden producir efectos no deseados, siendo uno de estos el jabón. NaOH y KOH reaccionan con el agua y los triglicéridos para producir jabón. NaOH y KOH pueden reaccionar con Fofas directamente, deprotonando los ácidos grasos libres y formando agua y jabón. Dado que demasiado jabón en el biodiesel puede producir una emulsión, un paso importante en la producción del biodiesel es

asegurarse de que la cantidad de agua es lo suficientemente baja como para evitar la producción de jabones.

- Esterificación acida: una reacción secundaria más beneficiosa ocurre cuando los FFA reaccionan con el metanol directamente para producir biodiesel. Esto se llama esterificación. La esterificación puede ser catalizada con ácido (preferiblemente con poco contenido de agua). Esta es una manera común de tratar aceites que tienen demasiados ácidos grasos libres para producir biodiesel. El ácido sulfúrico concentrado es típicamente usado como catalizador (Whitman Direct Action, 2010).

7.2.1.5. Separación de los productos de la reacción

Una vez terminada la reacción química se realiza la separación de productos en una serie de columnas de destilación, la primera columna de platos recupera el metanol usado en exceso, posteriormente se utiliza un extractor para separar el biodiesel del glicerol y en la etapa final se usan torres de rectificación para la respectiva purificación del biodiesel y glicerol.

7.3. Impacto ambiental en el agua por el proceso de biodiesel

El aumento en la producción de biocombustibles requerirá incrementar considerablemente la cantidad de biomasa producida, a través de la intensificación del uso de la tierra y la expansión de las áreas cultivadas, estos cambios en el uso de la tierra pueden tener un impacto significativo en los recursos hídricos. En efecto, para mejorar la eficiencia del uso de la tierra probablemente se recurra a sistemas de alto rendimiento que requieren un mayor uso de fertilizantes, pesticidas y agua para riego, Esta situación generaría un crecimiento de la demanda de agua, a la vez que probablemente

ocasiona un incremento en la contaminación hídrica con fertilizantes y pesticidas (D'Ippolito, 2007).

Por otra parte, el aumento de las superficies plantadas podría causar una mayor evapotranspiración, lo que aumentaría el uso consuntivo y reduciría el flujo de retorno y la recarga de los acuíferos.

Los impactos dependerán considerablemente del contexto, el tipo de uso de la tierra que será reemplazado para aumentar la producción, la especie elegida, y la vulnerabilidad del ecosistema que se verá afectado, Como regla general, las especies que requieren menor riego, menos fertilizantes y pesticidas, y proveen una mejor protección contra la erosión tendrán un impacto menor en los recursos hídricos.

A estos impactos hay que sumarles los provenientes del proceso de producción de biocombustibles, que también puede afectar la cantidad y calidad del agua. En efecto, las plantas productoras de biodiesel y bioetanol utilizan agua en distintas etapas del proceso de producción, por lo que su instalación puede significar un incremento de la demanda de agua. Asimismo, como consecuencia del proceso de producción, se generan efluentes que, si no son tratados adecuadamente, pueden ocasionar un incremento en la contaminación de los cuerpos receptores (Florencia Saulino , 2011).

7.3.1. Contaminación del agua por jabones

En el proceso de producción de biodiesel se produce una mezcla de jabones, metanol, agua y catalizadores. El proceso de purificación con agua se hace necesario para eliminar la contaminación producida por el lavado.

Cualquiera que sea el método de purificación que utiliza en la producción de biodiesel, la peor contaminación es el metanol. Que representa el principal solvente sosteniendo todas las cosas nocivas para el ambiente.

Cuando estos ácidos grasos libres entran en contacto con el catalizador, reaccionan con él para hacer jabón en el proceso que se conoce como saponificación.

7.3.2. Aumento de la DBO del agua

En el proceso de producción de biodiesel se produce un aumento de la demanda biológica de oxígeno o DBO, que es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida disuelta o en suspensión.

La muestra debe tomarse transcurridos cinco días de la reacción y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro. Es un método aplicable en aguas continentales (ríos, lagos o acuíferos), aguas negras, aguas pluviales o agua de cualquier otra procedencia que pueda contener una cantidad apreciable de materia orgánica. No es aplicable, sin embargo, a las aguas potables, ya que al tener un contenido tan bajo de materia oxidable la precisión del método no sería adecuada (Rezende, S.M.; Soares, B. G; Coutinho, F.M.B.; Reis, S. C.M. dos; Reid, M. G.; Lachter, E.R.; Nascimento, R.S.V., 2005).

El método comúnmente usado es el de la oxidabilidad con permanganato potásico, pretende medir, en principio, exclusivamente la concentración de contaminantes orgánicos. Sin embargo, la oxidación de la materia orgánica no es la única causa del fenómeno, sino que también intervienen la oxidación de nitritos y de las sales amoniacaes, susceptibles de ser también oxidadas por

las bacterias en disolución. Para evitar este hecho se añade N-alitiourea como inhibidor. Además, influyen las necesidades de oxígeno originadas por los fenómenos de asimilación y de formación de nuevas células.

También se producen variaciones significativas según las especies de gérmenes, concentración de estos y su edad, presencia de bacterias nitrificantes y de protozoos consumidores propios de oxígeno que se nutren de las bacterias, entre otras causas. Es por todo esto que el DBO ha sido constantemente objeto de discusión: sus dificultades de aplicación, interpretación de los resultados y reproductibilidad se debe al carácter biológico del método.

En la expresión de los resultados $DBO = F(T_0 - T_5) - (F-1)(D_0 - D_5)$ donde:

D_0 = contenido de oxígeno (mg/l) del agua de dilución al principio del ensayo.

D_5 = contenido medio de oxígeno (mg/l) del agua de dilución al cabo de 5 días de incubación.

T_0 = contenido de oxígeno (mg/l) de una de las diluciones de la muestra al principio del ensayo.

T_5 = contenido de oxígeno (mg/l) de una de las diluciones de la muestra al cabo de 5 días de incubación.

F = factor de dilución.

Valores por encima de 30 mgO₂/litro pueden ser indicativos de contaminación en aguas continentales, aunque las aguas residuales pueden alcanzar una DBO de miles de mgO₂/litro.

7.3.3. Aumento del pH del agua

Muchas de las propiedades anómalas del agua se deben a enlaces de hidrógeno muy fuertes. En una amplia gama de temperaturas de sobrecalentamiento, los enlaces de hidrógeno se rompen, cambiando sus propiedades más de lo que normalmente se esperaría mediante un aumento de temperatura por sí solo. El agua se convierte de hecho en menos polar y se comporta más como un disolvente orgánico, como el metanol o el etanol.

En ella aumenta notablemente la solubilidad de los materiales orgánicos y gases, y puede actuar como un disolvente, reactivo o catalizador en aplicaciones industriales y de análisis, incluida la destilación, reacciones químicas y la limpieza.

En el proceso de producción de biodiesel el producto final presenta el inconveniente de que a pesar de que se ha dejado decantar en el metilésteres aún hay restos de metanol y de soda cáustica por lo que el pH es muy alcalino, y como complicación en el uso del biodiesel se presenta el daño a los motores.

En el proceso del lavado de biodiesel pueden aplicarse dos métodos y son: mediante agitación y mediante aireación denominado “método de burbuja de la Universidad de Idaho”.

7.3.4. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006

En el proceso de fabricación del biodiesel en Guatemala han de considerarse las directrices y reglamentación emitidas en el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006.

Este acuerdo fue emitido por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala el 5 de mayo de 2006 y consiste en un “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”.

Las consideraciones de este reglamento se enfocan en propiciar el desarrollo social, económico y tecnológico que prevenga el impacto adverso del ambiente y mantenga el equilibrio ecológico y va de acuerdo a la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente.

Los parámetros de medición para determinar las características de las aguas residuales consideradas en este acuerdo son los siguientes:

- a. Temperatura
- b. Potencial de hidrógeno
- c. Grasas y aceites
- d. Materia flotante
- e. Sólidos suspendidos totales
- f. Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a veinte grados Celsius
- g. Demanda química de oxígeno
- h. Nitrógeno total
- i. Fósforo total
- j. Arsénico
- k. Cadmio
- l. Cianuro total
- m. Cobre
- n. Cromo hexavalente
- o. Mercurio
- p. Níquel
- q. Plomo

- r. Zinc
- s. Color y
- t. Coliformes fecales

En lo que afecta directamente a la producción de biodiesel hay un modelo propuesto para la reducción progresiva de cargas de demanda bioquímica de oxígeno de las aguas residuales que se descarguen a un cuerpo receptor.

La etapa uno se considera con una duración de cinco años y van en reducción porcentual del 10 al 50% con una carga de kilogramos por día/año de $3000 \leq EG < 6000$ en el año uno y llegando a $50000 \leq EG < 250000$.

La etapa dos tiene una duración de cuatro años con una reducción porcentual que va del 10 al 50% terminando la carga de kilogramos por día en $50000 \leq EG < 125000$.

La etapa tres tiene nuevamente una duración de cinco años pero la reducción porcentual de carga de kilogramos por día va del 50 hasta el 90% quedando los valores en $30000 \leq EG < 85000$.

La última etapa es la cuarta y tiene una duración de cuatro años con fecha máxima de cumplimiento el dos de mayo del año dos mil veinticuatro, con una reducción porcentual que va del 40 al 60% con el valor final en carga de kilogramos por día en $4000 \leq EG < 7000$.

El valor inicial de descarga estará determinado por los resultados del estudio técnico necesario para proyectar los datos. Para los porcentajes a considerarse en la reducción de la etapa uno se utilizará el valor inicial de

descarga del estudio y en las etapas siguientes la carga inicial será el resultado obtenido en la reducción porcentual de la etapa anterior.

Según el reglamento la determinación de la demanda química de oxígeno para las descargas de aguas residuales se obtendrá mediante la siguiente fórmula: demanda química de oxígeno dividido entre la demanda bioquímica de oxígeno.

Se estiman los parámetros de aguas para reuso, autorizando los siguientes:

- a. Riego agrícola en general,
- b. Cultivos comestibles,
- c. Acuicultura,
- d. Pastos y otros cultivos y
- e. Recreativo

Existe la prohibición de disponer las aguas residuales a flor de tierra, en canales abiertos y en alcantarillado pluvial. La descarga directa al manto freático, la dilución y reusos en áreas protegidas, en humedales y en cualquier otra área donde se ponga en riesgo la biodiversidad y la salud y seguridad humana.

7.3.5. Matriz de Leopold (recurso hídrico)

La Matriz de Leopold es un método cuantitativo de evaluación de impacto ambiental creado en 1971 y se utiliza para identificar el impacto inicial de un proyecto en un entorno natural. El sistema consiste en una matriz con columnas representando varias actividades que ejerce un proyecto y en las filas se

representan varios factores ambientales que son considerados. Las intersecciones entre ambas se numeran con dos valores, uno indica la magnitud (de -10 a +10) y el segundo la importancia (de 1 a 10) del impacto de la actividad respecto a cada factor ambiental (Raco, 2013).

Las medidas de magnitud e importancia tienden a estar relacionadas, pero no necesariamente están directamente correlacionadas. La magnitud puede ser medida en términos de cantidad: área afectada de suelo, volumen de agua contaminada, etc. Por ejemplo, el caso de una corriente de agua que erosiona una gran cantidad de suelo. En este caso, el impacto tiene una magnitud significativa, pero la importancia que tenga respecto al medio ambiente puede ser baja, ya que es una pequeña parte de suelo. En total resultan 8800 interacciones totales (100 acciones posibles x 88 efectos ambientales). Dada la extensión de la matriz se recomienda operar con una matriz reducida, excluyendo las filas y las columnas que no tienen relación con el proyecto.

Méritos y desventajas del Método de Leopold

Obliga a considerar los posibles impactos de proyectos sobre diferentes factores ambientales, incorpora la consideración de magnitud e importancia de un impacto ambiental, permite la comparación de alternativas, desarrollando una matriz para cada opción y sirve como resumen de la información contenida en el informe de impacto ambiental.

El proceso de evaluación es subjetivo. No contempla metodología alguna para determinar la magnitud ni la importancia de un impacto, no considera la interacción entre diferentes factores ambientales, no distingue entre efectos a corto y largo plazo, aunque pueden realizarse dos matrices según dos escalas de tiempo y los efectos no son exclusivos o finales, existe la posibilidad de

considerar un efecto dos o más veces (Río Negro, Universidad Nacional - Argentina, 2013).

8. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Al realizar el proceso de producción de biodiesel con ultrasonido se reducirá la cantidad de agua con la que se lava el biodiesel, para removerle los subproductos de la reacción disueltos e implícitamente ofrecer una opción para disminuir el agua residual del proceso que se vierte a los cuerpos de agua.

9. CONTENIDO PROPUESTO DEL INFORME FINAL

El índice preliminar propuesto para el informe final se detalla a continuación:

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

HIPÓTESIS

OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Combustibles fósiles

2.2. Biocombustibles

2.2.1. Biodiesel

2.2.1.1. Producción de biodiesel - reacciones

2.2.1.2. Materias primas

2.2.1.3. Ultrasonido en el proceso de fabricación

2.2.1.4. Productos de la reacción

2.2.1.5. Separación de los productos de la reacción

2.3. Impacto ambiental en el agua por el proceso de biodiesel

2.3.1. Contaminación del agua por jabones

- 2.3.2. Aumento de la DBO del agua
- 2.3.3. Aumento del pH del agua
- 2.3.4. Acuerdo gubernativo 236-2006
- 2.3.5. Matriz de Leopold (recurso hídrico)

- 3. METODOLOGÍA
- 4. RESULTADOS
- 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ANEXOS

10. MÉTODOS Y TÉCNICAS

Tipo de investigación

La investigación “reducción en el uso de agua en el proceso de producción de biodiesel mediante la aplicación de ultrasonido a nivel laboratorio” a realizar se clasifica por su objetivo como una investigación experimental, pues se comparará el consumo de agua en el proceso de producción de biodiesel sin utilizar el ultrasonido y con el ultrasonido, agua que en el proceso normal se utiliza para “lavar” el biodiesel para removerle los subproductos (entre ellos el glicerol).

Tipo de hipótesis

La hipótesis de esta investigación corresponde a una hipótesis de investigación de diferencia de grupos, pues se analizarán dos grupos: biodiesel producido con ultrasonido y biodiesel producido sin ultrasonido y se comparará la cantidad de agua que se utilizó en cada proceso.

Fase 1: Investigación preliminar

- Se recopilará mayor información de las materias primas y su asequibilidad en el mercado guatemalteco, así como su toxicidad y los subproductos que producen para escoger la que mejor cumpla con los objetivos de la Maestría de Energía y Ambiente.

- Se determinará la mejor forma de realizar las reacciones con los recursos disponibles.
- Se recopilará información de los equipos a utilizar y se cotizará el equipo que al menor costo cumpla con el proceso, como es el caso del ultrasonido.

Fase 2: Diseño de investigación, métodos e instrumentación

Diseño de investigación

El diseño de investigación de este trabajo es un diseño experimental en el que se comparan dos grupos de datos, siendo el primero el grupo control (producción de biodiesel convencional sin ultrasonido) y el grupo experimental (producción de biodiesel con ultrasonido)

Variables

Tabla I. **Tipo de variables e indicadores**

Variable	Tipo de Variable	Indicador	Dimensionales
Aceite vegetal de fritura usado	Independiente	Materia prima	Mililitros
Metanol	Dependiente	Materia prima	Mililitros
Hidróxido de sodio	Dependiente	Materia prima	Gramos
Agua de lavado	Dependiente	Materia prima	Mililitros
Biodiesel	Dependiente	Producto	Mililitros
Norma ASTM D 6751-02	Dependiente	Calidad de combustible	Positivo/negativo

Fuente: elaboración propia.

- **Manipulación de variables**

Un experimento se lleva a cabo para analizar si una o más variables independientes afectan a una o más variables dependientes y por qué las afectan. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio).

La variable independiente se manipulará cinco veces para cada tipo de proceso (convencional y con ultrasonido) y cada una de ellas se repetirá 3 veces para evaluar el efecto del uso de ultrasonido en el proceso en las variables dependientes. En el método convencional debe añadirse (según la estequiometría) un exceso de las materias primas para producir la mayor cantidad de biodiesel posible y teóricamente se

podría reducir este “exceso” de materias primas con el proceso con ultrasonido, reduciendo así los subproductos obtenidos.

- Validez

Todo experimento debe cumplir con el control o validez interna de la situación experimental, es decir, si se observa que la manipulación de las variables independientes provoca una variación en las variables dependientes, la variación de estas últimas se debe a la manipulación de las independientes y no a otros factores. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio).

Validez interna: para validar el experimento se realizarán 5 corridas por proceso y 3 repeticiones por corrida, donde se harán variaciones de la concentración de las materias primas y con base a ello se determinará cuánta agua es necesaria para realizar el lavado del biodiesel.

Validez externa: para validar externamente el experimento, se analizarán en el laboratorio las características fisicoquímicas de:

- Materias primas
- Aceite de fritura vegetal
- Se realizarán pruebas durante el proceso para determinar si la reacción se completó.
- Al biodiesel antes de lavarlo y después de lavarlo hasta que sus características fisicoquímicas estén dentro de los rangos aceptables de la Norma ASTM D 6751-02.
- Caracterización fisicoquímica del agua residual del lavado.

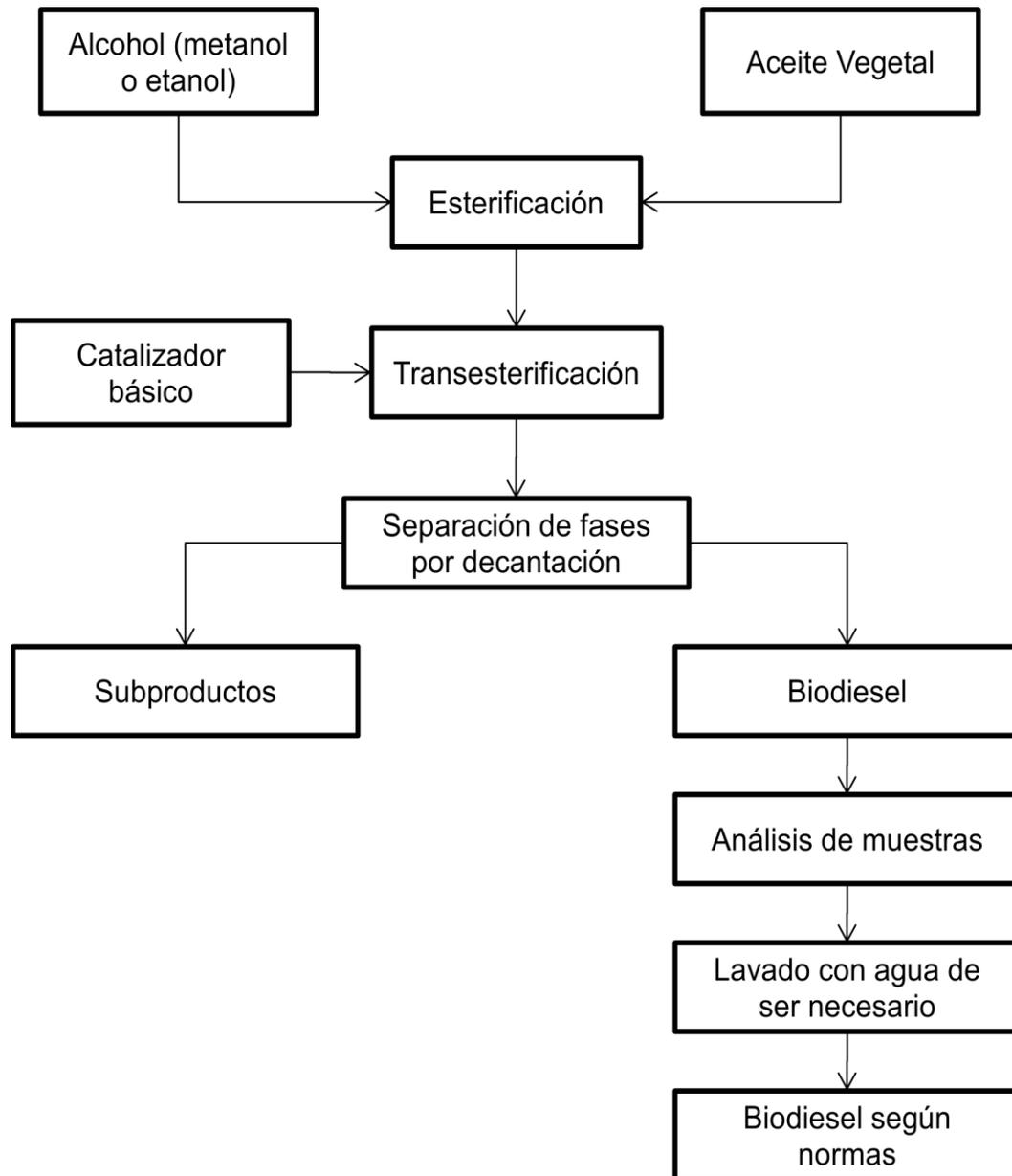
Métodos

El primer método será el convencional, en el que se realiza una esterificación, mezclando ácido sulfúrico con el aceite que se transformará, para convertir los ácidos grasos libres a ésteres y así obtener un mejor rendimiento del biodiesel. A continuación se realiza la transesterificación aplicando una base a la mezcla junto con un catalizador (alcohol). Al completar la reacción se deja en reposo para que se separen bien las fases y se separa cada fase por decantación. Se analiza el biodiesel si cumple con las especificaciones para poder usarse en motores, sino realizar el lavado para retirar el exceso de subproductos en disolución y el catalizador. Se monitoreará el biodiesel hasta que esté libre de los subproductos.

El segundo método será en el que se aplicará el ultrasonido mientras transcurre la reacción de transesterificación. Al terminar las reacciones se tomará una muestra del biodiesel obtenido para determinar su pureza y así aplicar el agua necesaria para lavarla y separar los subproductos no deseables disueltos. Se modificarán las concentraciones de las materias primas para determinar si se eficientiza la reacción y después de ello se determinará la cantidad de agua que se necesita para lavar el biodiesel.

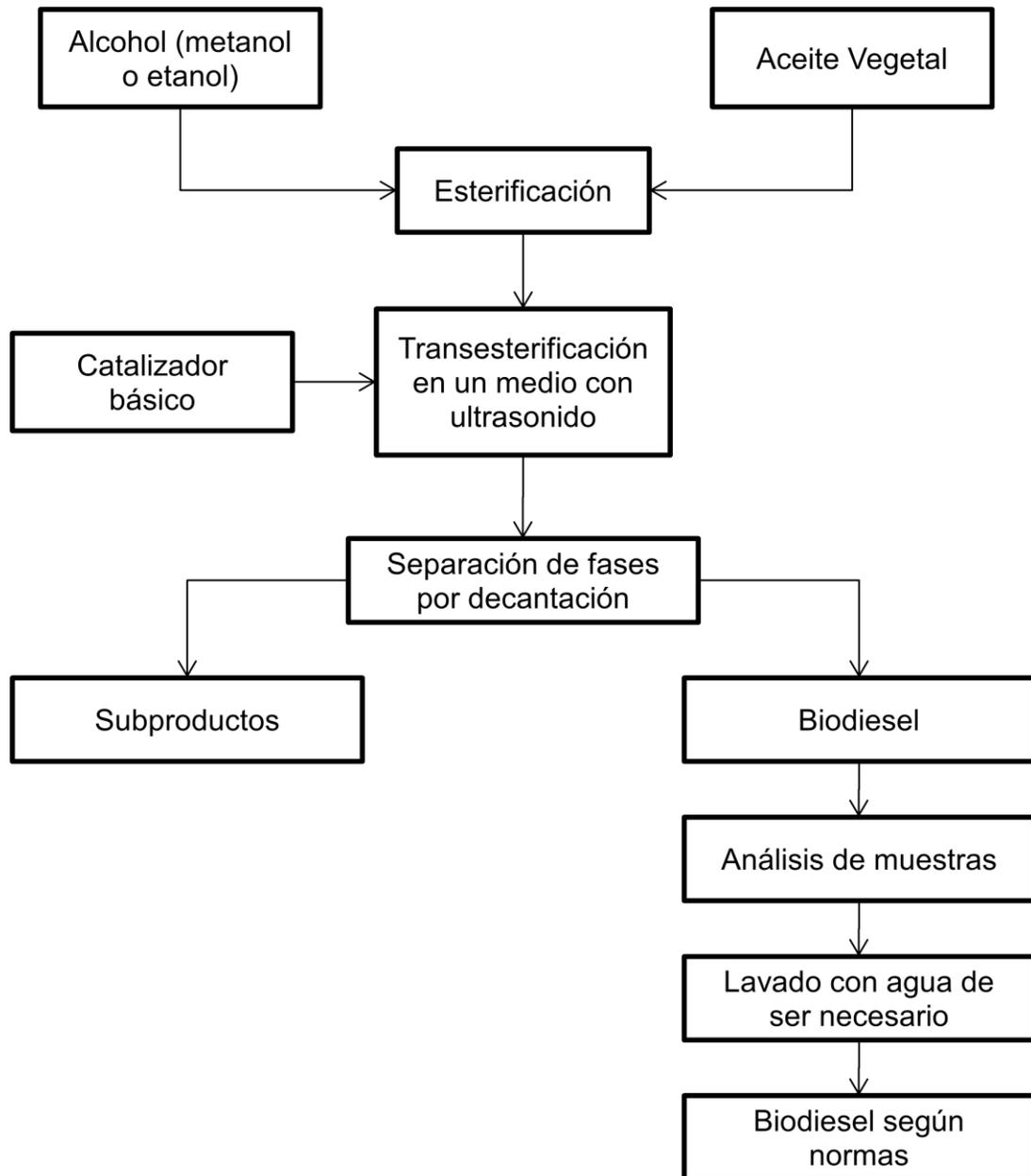
Se analizará cada biodiesel fisicoquímicamente para determinar si cumple las especificaciones para usarse en motores y al final se comparará en cada proceso cuánto se utilizó de agua.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiesel convencional



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiesel con ultrasonido



Fuente: elaboración propia.

Instrumentación

Método convencional: se realizará en un reactor con capacidad de aproximadamente 1 litro. Para cada paso se realizarán pruebas para determinar el progreso de la transesterificación y así determinar el tiempo en que termina la reacción.

Método con ultrasonido: para el método con ultrasonido se utilizarán transductores de entre 20-40 kHz a temperatura y velocidad de agitación constantes. Se analizará la mezcla para determinar el tiempo en el que se termina la transesterificación y se le dará el lavado al biodiesel obtenido para determinar la cantidad de agua requerida.

En ambos métodos se utilizarán reactivos y los instrumentos para manejarlos; se realizarán análisis a las muestras para determinar sus características fisicoquímicas y ácidos grasos presentes.

Matriz de experimentación

Por cuestiones de costos se realizarán 5 corridas por proceso, y 3 pruebas por corrida, utilizando la siguiente matriz para recolectar los datos.

Tabla II. **Datos a recolectar en cada proceso**

Proceso	Corrida	Prueba	Aceite Vegetal Cantidad	Reactivo Metanol Cantidad	Catalizador NaOH Cantidad	Agua Cantidad
Convencional	1	1				
		2				
		3				
	2	1				
		2				
		3				
	3	1				
		2				
		3				
	4	1				
		2				
		3				
	5	1				
		2				
		3				
Ultrasonido	1	1				
		2				
		3				
	2	1				
		2				
		3				
	3	1				
		2				
		3				
	4	1				
		2				
		3				
	5	1				
		2				
		3				

Fuente: elaboración propia.

Fase 3: Análisis de datos e interpretación de resultados

Según Samperio (2003) para muestras correlacionadas el análisis de los datos se hará utilizando una prueba de T.

Con esta prueba se compararán los dos grupos de datos (proceso con ultrasonido y sin ultrasonido) y se comparará el uso del agua en cada uno para determinar si se cumple la hipótesis.

11. RESULTADOS ESPERADOS

- De acuerdo a la revisión bibliográfica se espera determinar la calidad de biodiesel sin lavar después de los dos procesos, mediante las características fisicoquímicas para determinar si el biodiesel necesita lavarse.
- De requerir el lavado, determinar la cantidad de agua necesaria para que el biodiesel cumpla con el rango permitido para usarse en motores diesel.
- Con los resultados de uso de agua en cada proceso, comparar los mismos y comprobar la hipótesis de investigación.

12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

MES	AGOSTO 2013				SEPTIEMBRE 2013					OCTUBRE 2013				NOVIEMBRE 2013				DICIEMBRE 2013				ENERO 2014				FEBRERO 2014							
SEMANA	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Fase 1: Investigación preliminar																																	
Fase 2: Adquisición de equipos																																	
Fase 2: Adquisición de materias primas																																	
Fase 2: Montaje y realización de las pruebas																																	
Fase 3: Análisis de los resultados obtenidos																																	
Realización del informe final																																	

13. RECURSOS NECESARIOS

Tabla III. Recurso humano

RECURSOS HUMANOS	COSTO MENSUAL	TOTAL POR 9 MESES
Asesor	Q 280,00	Q 2 520,00
Estudiante	Q 2 000,00	Q 18 000,00
Imprevistos	5% de RRHH	Q 1 026,00
	TOTAL	Q 21 546,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. Materiales e insumos

MATERIALES E INSUMOS	
1	Reactor
1	Resistencia sumergible para mantener la temperatura adecuada
1	Termómetro
	Alcohol (metanol o etanol)
	Base (hidróxido de sodio o hidróxido de potasio)
	Cubetas plásticas naturales
	Medidor de pH
1	Agitador
1	Sistema de ultrasonido
	Decantador de 20 litros

Fuente: elaboración propia.

14. BIBLIOGRAFÍA

1. Abreu, L. A. (2006). Obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales usados. *Revista ION*, 19 (1), 39-42.
2. Amaya, B. B. (2008). Evaluación del análisis del ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera empleando la metodología "de la cuna a la cuna". *Revista ION*, 21 (1), 17-26.
3. Ana Cristina Dinis Vicente Pardal. (2012). *Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales*. Obtenido de http://dehesa.unex.es:8080/xmlui/bitstream/handle/10662/326/TDUEX_2012_Pardal.pdf?sequence=1
4. Araque, E. (18 de Enero de 2013). *Latinoamerica Renovable*. Obtenido de <http://latinoamericarenovable.com/?p=3580>
5. Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala. (2012). *ACR Guatemala*. Obtenido de <http://www.acrguatemala.com/biodiesel.shtml#ppbiodiesel>
6. *Asociación de combustibles renovables, Guatemala*. (s.f.). Recuperado el 01 de Marzo de 2013, de <http://www.acrguatemala.com>

7. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas. (2013). Recuperado el 2013, de <http://www.corpoica.org.co/SitioWeb/Documento/JatrophaContrataciones/ATLAS-BIOCOMBUSTIBLES.pdf>
8. Bartolome Burgos. (2013). *Africa Fundación*. Recuperado el 2013, de http://www.africafundacion.org/IMG/pdf/bartolome_Burgos_agrocombustibles.pdf
9. Becerra, M. L. (2008). Producción de biodiesel y glicerina limpia empleando catálisis básica heterogénea. *Ion*, 21 (1).
10. Biblioteca Virtual de la Unión de Juventudes Comunistas de España. (2013). *La Caja de Herramientas*. Recuperado el 2013, de <http://archivo.juventudes.org/uni%C3%B3n-de-juventudes-comunistas-de-esp%C3%B1a/documentos-de-ecologismo-conferencia-de-medio-rural-y>
11. BIO Energéticos. (2013). Obtenido de <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol/prouccion-a-partir-de-cana-de-azucar.html>
12. BP España. (2013). *BP España*. Obtenido de <http://www.bp.com/marketingsection.do?categoryId=951&contentId=7038461>
13. Carlos Alvarez. (2013). *Economía UNAM*. Recuperado el 2013, de <http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04c-arlosalvarez.pdf>

14. CEPAL. (2013). Recuperado el 2013, de <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/1/46151/SyCNo69.pdf>
15. Colucci, J. A. (2005). Biodiesel from an alkaline transesterification reaction of soybean oil using ultrasonic mixing. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 82 (7), 525-530.
16. Commission Staff Working Document. (2012). *Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 98/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources*. European Commission. Brussels: European Commission.
17. Consejo Nacional de Energía - El Salvador. (2013). Obtenido de http://www.cne.gov.sv/index.php?view=items&cid=4%3Afaq-biocombustibles&id=4%3Aicuales-son-las-ventajas-y-las-desventajas-de-usar-biodiesel-en-lugar-de-diesel&option=com_quickfaq&Itemid=181
18. D'Ippolito, S. A. (2007). Analysis of a two-step, Noncatalytic, Supercritical Biodiesel Production Process with heat recovery. *Energy & Fuels* (21), 339-346.
19. Florencia Saulino . (2011). *Implicaciones del desarrollo de los biocombustibles para la gestión y aprovechamiento del agua*. Obtenido de <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/4/45304/lcw0445e.pdf>
20. Gabriel Rodríguez. (2013). Recuperado el 2013, de http://www.inti.gov.ar/upt/pdf/Biodiesel_vs_Diesel.pdf

21. Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. *Metodología de la Investigación*. Monterrey: McGraw Hill.
22. Hervastecnología. (2013). *iesvillalbahervastecnologia*. Recuperado el 2013, de <http://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2008/09/combustibles-fosiles.pdf>
23. IDAE. (2013). *IDAE*. Recuperado el 2013, de http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_Nuevos_Combustibles_6_2d83b8b8.pdf
24. Ingeniería Básica de Yacimientos. (2013). *Ingeniería Básica de Yacimientos*. Recuperado el 2013, de <http://blog.espol.edu.ec/alberto/files/2012/01/Rodr%C3%ADguez-J.-R.-Ingenier%C3%ADa-B%C3%A1sica-de-Yacimientos.pdf>
25. Jank, Marcos. Kutas, Géraldine. Amaral, Luiz Fernando. Nassar, André. (2007). *EU and U.S. Policies on Biofuels: Potential Impacts on Developing Countries*. The German Marshall Fund of the United States. Washington, Unites States.: The German Marshall Fund of the United States.
26. Ji, J. W. (2006). Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics*, 44, e411-e414.
27. Lee, L. S. (2007). Desarrollo de BioCombustibles en Guatemala. *I Feria Energética* (pág. 14). Guatemala: Gobierno de Guatemala.

28. Lilitana Haim. (2013). *Las cáscaras como fuentes de biocombustibles*. Recuperado el 2013, de http://www.porquebiotecnologia.com.ar/adc/uploads/pdf/37_cascaras_fuentes_de_biocombustibles.pdf
29. López Blanco, E. (2013). *Estudio y desarrollo de una planta piloto para la obtención de biodiesel*. Universitat Politècnica de Catalunya. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.
30. Luiz Augusto Horta Nogueira. (2004). *PERSPECTIVAS DE UN PROGRAMA DE BIOCOMBUSTIBLES*. Comisión Económica para América Latina y El Caribe CEPAL. México: Naciones Unidas.
31. Miliarium. (s.f.). *Ingeniería Civil y Medio Ambiente*. Recuperado el Junio de 2013, de <http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Biocombustibles/Biodiesel.asp>
32. Mindomo. (2013). *Mindomo*. Recuperado el 2013, de <http://www.mindomo.com/mindmap/recursos-naturales-bea9a5e952d3409286afcae5a6b1767c>
33. Morayma Uribe Gómez. (2010). *SIMULACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE*. Obtenido de <http://www.riieeme.mx/docs/tesismoraymabiodiesel2.pdf>
34. Mundo & Motor. (2013). Biocombustibles ¿ahorro o amenaza?

35. National Geographic. (2013). *National Geographic*. Recuperado el 2013, de <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/biofuel-profile>
36. P. Mazo, L. R. (2007). Métodos Alternativos para la Obtención de Biodiesel, Microondas y Ultrasonido. *Ion*, 20 (1), 51-57.
37. Pardo, A. C. (2012). *Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis*. Badajoz, España: Universidad de Extremadura.
38. *Políticas sobre desarrollo Institucional en innovación en biocombustibles en América Latina y el Caribe*. CEPAL. (2011). Santiago: Naciones Unidas.
39. Raco. (2013). Recuperado el 2013, de www.raco.cat/index.php/ECT
40. Razo, C. A.-M. (2007). *Biocombustibles y su impacto potencial en la estructura agraria, precios y empleo en América Latina*. Santiago de Chile, Chile: CEPAL .
41. Real Academia Española. (2013). *Real Academia Española*. Obtenido de <http://lema.rae.es/drae/?val=combustible>
42. Recurso Renovable. (2013). *Recurso Renovable*. Recuperado el 2013, de <http://recursoenovable.blogspot.com/2013/06/tipos-de-recursoenovable.html>

43. Rezende, S.M.; Soares, B. G; Coutinho, F.M.B.; Reis, S. C.M. dos; Reid, M. G.; Lachter, E.R.; Nascimento, R.S.V. (2005). Aplicação de resinas sulfônicas como catalisadores em reações de transesterificação de óleos vegetais. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. En *Aplicação de resinas sulfônicas como catalisadores em reações de transesterificação de óleos vegetais. Polímeros: Ciência e Tecnologia*.
44. Río Negro, Universidad Nacional - Argentina. (2013). *Río Negro, Universidad Nacional - Argentina*. Recuperado el 2013, de <http://unrn.edu.ar/blogs/matematica1/files/2013/04/5%C2%B0-Matriz-de-Leopold-con-plantilla.pdf>
45. Santos, F. R. (2009). Optimization of the production of biodiesel from soybean oil by ultrasound assisted methanolysis. *Fuel Processing Technology, 90* (2), 312-316.
46. Siatis, N. K. (2006). Improvement of biodiesel production based on the application of ultrasound: Monitoring of the procedure by FTIR spectroscopy. *Journal of the American Oil Chemists' Society, 83* (1), 53-57.
47. Stavarache, C. V. (2005). Fatty acids methyl esters from vegetable oil by means of ultrasonic energy. *Ultrasonics Sonochemistry, 12* (5), 367-372.
48. Tecnología Industrial. (2013). Recuperado el 2013, de <http://colegasdefrikisdealcoy.blogspot.com/p/energias.html>

49. Thanh, L. T. (2010). Ultrasound-assisted production of biodiesel fuel from vegetable oils in a small scale circulation process. *Bioresource Technology*, 101 (2), 639-645.
50. UNED. (2013). Recuperado el 2013, de <http://www.uned.es/biblioteca/energiarenovable3/sistemas.htm>
51. Villalba Hervás. (2010). *Combustibles Fósiles*. Obtenido de <http://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2008/09/combustibles-fosiles.pdf>
52. Villares Asiain, J. (2010). *Métodos de monitorización de la reacción de transesterificación de aceite de girasol para la obtención de biodiésel*. Universidad Pública de Navarra, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.
53. Whitman Direct Action. (2010). *Whitman Direct Action*. Obtenido de [http://www.whitmandirectaction.org/downloads/documents/biodieselguide\(espanol\).pdf](http://www.whitmandirectaction.org/downloads/documents/biodieselguide(espanol).pdf)
54. Yori, C. D. (2007). Deglycerolization of biodiesel streams by adsorption over silica beds. *Energy & Fuels* (21), 347-353.
55. Zapata, C. D. (2006). Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: 1. Diseño y simulación de dos procesos continuos. *Dyna*, 74 (151), 71-82.