



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS
CARRERA DE INGENIERÍA BIOQUÍMICA

**OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES COMESTIBLES
VEGETALES USADOS (ACVUs), COMO UNA ALTERNATIVA PARA
EL RECICLAJE DE MATERIAL DE DESECHO ALTAMENTE
CONTAMINANTE PARA EL MEDIOAMBIENTE.**

Trabajo de Investigación (Graduación), Modalidad: Trabajo Estructurado de Manera Independiente (TEMI) presentado como requisito previo a la obtención del título de Ingeniera Bioquímica otorgado por la Universidad Técnica de Ambato a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos.

Autora:

ANA CECILIA ARIAS TAMAYO

Tutor:

Dr. Roman Rodríguez M.; Ph.D

Ambato - Ecuador

2012

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del trabajo de investigación sobre el tema: **“OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES COMESTIBLES VEGETALES USADOS (ACVUS), COMO UNA ALTERNATIVA PARA EL RECICLAJE DE MATERIAL DE DESECHO ALTAMENTE CONTAMINANTE AL MEDIOAMBIENTE.”**, de la estudiante Ana Cecilia Arias Tamayo alumna de la Carrera de Ingeniería Bioquímica considero que dicho informe investigativo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación del jurado examinador designado.

Ambato, Marzo de 2012

EL TUTOR

.....
Dr. Roman Rodríguez Ph.D

AUTORÍA DEL TRABAJO DE GRADO

Los criterios emitidos en el trabajo de investigación: **“OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES COMESTIBLES VEGETALES USADOS (ACVUS), COMO UNA ALTERNATIVA PARA EL RECICLAJE DE MATERIAL DE DESECHO ALTAMENTE CONTAMINANTE AL MEDIOAMBIENTE”**, como también los contenidos, ideas, análisis, conclusiones y propuesta son de exclusiva responsabilidad de mi persona, como autora de este trabajo de grado.

Ambato, Marzo 2012

EL AUTOR

.....
Ana Cecilia Arias Tamayo

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS

Los miembros del Tribunal Examinador aprueban el Informe de Investigación, sobre el tema: **“OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES COMESTIBLES VEGETALES USADOS (ACVUS), COMO UNA ALTERNATIVA PARA EL RECICLAJE DE MATERIAL DE DESECHO ALTAMENTE CONTAMINANTE AL MEDIOAMBIENTE”**, de la estudiante: Ana Cecilia Arias

Ambato, Marzo 2012

Para constancia firman:

MIEMBRO TRIBUNAL

MIEMBRO TRIBUNAL

PRSEIDENTE TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

A mis padres por el apoyo incondicional para la culminación de un etapa más en mi vida y de quienes aprendí que con esfuerzo y dedicación se logran los objetivos mas difíciles.

A mi profesor y amigo Roman Rodríguez, quien me enseñó el valor de la honestidad y gracias a sus lecciones me incentiva a ser una mejor persona cada día, no solo en el ámbito académico sino también como ser humano.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
--------------------------	----------

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Tema de investigación.....	2
1.2 Planteamiento del problema	2
1.2.1 Contextualización	2
1.2.2 Análisis crítico	4
1.2.2.1 Relación Causa-Efecto.....	5
1.2.3 Prognosis	5
1.2.4 Formulación del problema	5
1.2.5 Preguntas directrices.....	5
1.2.6 Delimitación.....	6
1.3 Justificación.....	6
1.4 Objetivos	7
General	7
Específicos.....	7

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Investigativos.....	8
2.1.1 Biomasa	9
2.1.3 Aceites comestibles.....	10
2.1.4 Características químicas de los aceites.....	11
2.1.5 Propiedades fisicoquímicas de las grasas y aceites	11
2.1.6 Aceites Vegetales Usados.....	13
2.1.7 Biocombustibles	13

2.1.8 Pre-tratamiento del aceite.....	14
2.1.9 El Biodiesel.....	14
2.1.10 Post-tratamiento del biodiesel.....	19
2.1.11 Reacciones con microondas.....	19
2.1.11 Reacciones con calor por convección.....	20
2.2 Fundamentación filosófica.....	20
2.3 Fundamentación legal	20
2.4 Categorías Fundamentales	24
2.5 Hipótesis.....	25
Hipótesis nula (H_0):.....	25
Hipótesis alternativa (H_1):.....	25
2.6 Señalamiento de variables de la hipótesis.....	25
Variable dependiente:	25
Variable independiente:.....	25
Unidad de Observación:	25

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Enfoque	26
3.2 Modalidad básica de la investigación	26
3.3 Nivel o tipo de investigación.....	27
3.4 Población y muestra	27
3.5 Operacionalización de las variables.....	28
3.6 Plan de recolección de la información	29
3.6.1 Diseño Experimental	29
3.6.2 Datos preliminares.....	30
3.6.3 Pre-tratamiento del aceite vegetal usado.....	32
3.6.4 Determinación del proceso de transesterificación para la obtención del biodiesel.....	34

3.6.5 Post-tratamiento del biodiesel obtenido	37
3.6.6 Evaluación de las propiedades del biodiesel como combustible	38
3.7 Plan de procesamiento de la información.....	41

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Datos preliminares.....	42
4.2 Pre-tratamiento del aceite	43
4.3 Proceso de transesterificación para la obtención de biodiesel.....	44
4.3.1 Transesterificación con calor por convección-Metodología A	44
Optimización de respuesta para la metodología de calor por convección.....	44
4.3.3 Transesterificación con microondas - Metodología B.....	45
Optimización de respuesta para la metodología de microondas.....	45
4.3.5 Post-tratamiento del biodiesel obtenido	46
4.3.6 Comparación de rendimiento entre la metodología con calor por convección y microondas.....	47
4.4 Evaluación del biodiesel obtenido.....	47
4.4.1 Cuantificación de glicerina libre total y ligada en la fase glicérica	48
4.4.2 Prueba de combustión.....	49
4.5 Estimación de los costos de obtención de biodiesel purificado	49
4.5.1 Costos a escala de laboratorio	49
4.5.2 Costos a escala semi-industrial	51
4.6 Verificación de la hipótesis	52

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones	53
5.2 Recomendaciones	55

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.1 Datos Informativos	56
6.1.1 Título:	56
6.1.2 Institución Ejecutora:	56
6.1.3 Beneficiarios:.....	56
6.1.4 Ubicación:	56
6.1.5 Tiempo estimado de ejecución:	56
6.1.6 Equipo técnico responsable:.....	56
6.2 Antecedentes de la propuesta	57
6.3 Justificación	58
6.4 Objetivos	58
General	58
Específicos.....	59
6.5 Análisis de factibilidad	59
6.6 Fundamentación	60
6.7 Metodología Modelo Operativo	62
6.8 Administración	63
6.9 Previsión de la evaluación	65
BIBLIOGRAFÍA	66

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: NORMAS ASTM D6751 PARA BIODIESEL.....	9
TABLA 2.2: REQUISITOS DEL BIODIESEL SEGÚN NORMA INEN 2482:2009.....	15
TABLA 3.1 FACTORES Y NIVELES DE ESTUDIO PARA EL DESARROLLO DEL MÉTODO DE OBTENCIÓN DE BIODIESEL CON CALOR (METODOLOGÍA A).....	29
TABLA 3.2 FACTORES Y NIVELES DE ESTUDIO PARA EL DESARROLLO DEL MÉTODO DE OBTENCIÓN DE BIODIESEL CON MICROONDAS (METODOLOGÍA B)	29
TABLA 3.3: PARÁMETROS PARA EL PRETRATAMIENTO A PARTIR DE 100ML DEL ACEITE VEGETAL USADO CON CALOR POR CONVECCIÓN.....	32
TABLA 3.4: PARÁMETROS PARA EL PRE-TRATAMIENTO A PARTIR DE 100ML DEL ACEITE VEGETAL USADO CON LA MICROONDAS.....	33
TABLA 4.1: VALORES INICIALES DE DIVERSOS PARÁMETROS DEL ACEITE USADO, OBTENIDOS A PARTIR DE TRES RÉPLICAS (R1,R2,R3).....	42
TABLA 4.2: EVALUACIÓN DEL BIODIESEL PURIFICADO OBTENIDO CON LAS DOS METODOLOGÍAS.....	48
TABLA 4.3: ESTIMACIÓN DEL COSTO DE OBTENCIÓN DE UN LITRO DE BIODIESEL A CON REACTIVOS GRADO ANALÍTICO.....	50
TABLA 4.4: ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DE OBTENCIÓN DE BIODIESEL A ESCALA SEMI-INDUSTRIAL CON REACTIVOS GRADO COMERCIAL.	51
TABLA 6.2: MODELO OPERATIVO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR BATCH PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL.....	62
TABLA 6.3: ACTIVIDADES DE ADMINISTRACIÓN PARA UN PROYECTO.....	63
TABLA 6.4: PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: ÁRBOL DE PROBLEMAS	4
FIGURA 2.1: REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN.....	16
FIGURA 2.2: CATEGORIZACIÓN DE VARIABLES.....	24
FIGURA 3.1: DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRETRATAMIENTO DEL ACEITE VEGETAL USADO CALOR POR CONVECCIÓN	33
FIGURA 3.2: DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRE-TRATAMIENTO DEL ACEITE VEGETAL USANDO MICROONDAS.....	34
FIGURA 3.3: DIAGRAMA DE PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BODIESEL SIN PURIFICAR, USANDO CALOR POR CONVECCIÓN	35
FIGURA 3.4: DIAGRAMA DE PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BODIESEL SIN PURIFICAR USANDO MICROONDAS.....	36
FIGURA 3.5: DIAGRAMA DE PROCESO PARA EL POST-TRATAMIENTO DE BODIESEL SIN PURIFICAR	37
FIGURA 3.6: DIAGRAMA DE PROCESO PARA LA DETERMINACIÓN DE GLICERINA TOTAL	39
FIGURA 3.7: DIAGRAMA DE PROCESO PARA LA DETERMINACIÓN DE GLICERINA LIBRE.....	40
FIGURA 3.8: DIAGRAMA DE PROCESO PARA LA DETERMINACIÓN DE GLICERINA TOTAL Y LIBRE EN EL BLANCO.....	41
FIGURA 4.1: PORCENTAJE DE AGL DESPUÉS DEL PRE-TRATAMIENTO CON CADA METODOLOGÍA.....	43
FIGURA 4.2: PORCENTAJE DE RENDIMIENTO DE BODIESEL APLICANDO LOS TRATAMIENTOS DE LAS METODOLOGÍAS A Y B	46
FIGURA 4.3: PORCENTAJE PROMEDIO DE RENDIMIENTO MÁXIMO DE BODIESEL CON CALOR Y MICROONDAS.	47
FIGURA 4.4: PORCENTAJE PROMEDIO DE GLICERINA TOTAL LIBRE Y LIGADA EN LA FASE GLICÉRICA DEL BODIESEL OBTENIDO CON LA METODOLOGÍA A Y B.....	48
FIGURA 4.5: COSTOS DE PRODUCCIÓN DE BODIESEL A ESCALA DE LABORATORIO CON REACTIVOS GRADO ANALÍTICO	50
FIGURA 4.6: COSTOS DE PRODUCCIÓN DE BODIESEL A ESCALA SEMI-INDUSTRIAL CON REACTIVOS GRADO COMERCIAL.....	52
FIGURA 6.1: ESQUEMA DEL REACTOR PARA OBTENCIÓN DE BODIESEL	61

RESUMEN

El presente trabajo se basa en la obtención y análisis de biodiesel empleando aceites comestibles vegetales usados (ACVUs). La reacción de transesterificación es crucial para la obtención de biodiesel a partir de aceites y en ella se precisan temperaturas aproximadas de 60°C. De los diferentes procesos existentes (base-base, supercrítico, enzimático, equipo ultrasónico, etc.) en el presente trabajo se hace un estudio comparativo entre dos metodologías: metodología A que usa calor por convección y metodología B en la que se emplea microondas y se comparó el rendimiento con dos tipos de catalizadores, hidróxido de sodio y sodio metálico.

Las condiciones óptimas de transesterificación para cada metodología se establecieron de acuerdo a un diseño experimental multifactorial 2ⁿ y un análisis estadístico en StatGraphics Centurion XV.II, las variables que se estudiaron para la obtención de biodiesel con la metodología A fueron la relación molar metanol: aceite, tiempo de reacción, concentración de catalizador y el tipo de catalizador usado; en el caso de la metodología B se mantuvieron los mismos factores, excepto el tiempo de reacción, el cual fue reemplazado por la potencia de salida del microondas, las respuestas experimentales medidas fueron la densidad, viscosidad y rendimiento porcentual en base a la cantidad inicial de aceite; adicionalmente se realizó un análisis comparativo entre el rendimiento de biodiesel con cada una de las metodologías y un análisis de costos de producción a escala de laboratorio y a escala semi-industrial.

Para la metodología A, las condiciones de transesterificación con que se obtuvo un mayor rendimiento fueron una relación molar metanol: aceite 7.5:1, 0.5% de sodio metálico como catalizador y 60 minutos de reacción; para la metodología B las condiciones fueron: relación molar metanol:aceite 6:1, 0.5% de sodio metálico y una potencia de 200W de salida.

Una vez determinadas las condiciones óptimas de transesterificación, se procedió a elaborar un litro de biodiesel con cada metodología, el biodiesel obtenido fue sometido a pruebas de punto de ignición, índice de yodo, densidad, viscosidad y cuantificación de glicerina libre y total en la fase glicérica. Los resultados obtenidos se compararon con los parámetros planteados por la norma NTE INEN 2 482:2009 de requisitos para el biodiesel y todos mostraron valores dentro del rango establecido por dicha norma.

Tras la obtención del biodiesel con las condiciones establecidas anteriormente, se realizó una prueba de funcionamiento en un tractor de la Facultad de Agronomía de la Universidad Técnica de Ambato, la cual consistió en cargar el tractor con una mezcla de 50% de diesel de petróleo y 50% de biodiesel directamente en el tanque de combustible. El tractor realizó un recorrido de aproximadamente treinta minutos por el campus de la facultad con lo cual se demostró que el desempeño del motor fue satisfactorio y no se alteró su potencia ni ruido. Se observó que la combustión del biodiesel reduce notablemente la cantidad de humo que emana el tractor, generalmente éste todo el tiempo emite humo negro al ambiente.

SUMMARY

This work was based on obtaining and analysis of biodiesel obtained from waste vegetable oils (WVO). The transesterification reaction is crucial for the production of biodiesel from oils and it needs approximate temperatures of 60°C. Two different processes (base-base, supercritical enzymatic ultrasonic, etc.) were used: The methodology A that uses heat by convection and the methodology B that uses microwave. The performance was compared within them using two types of catalyst, sodium hydroxide and metallic sodium.

The optimal conditions for the transesterification reaction for each methodology were established according to a multifactorial experimental design and statistical analysis 2ⁿ in Centurion StatGraphics XV.II, variables that were studied for the production of biodiesel with the methodology A were the molar ratio methanol: oil, reaction time, catalyst concentration and type of catalyst used, in the case of methodology B the same factors were studied, except the reaction time, which was replaced by the output power of the microwave. The experimental responses were density, viscosity and yield percent, based on the initial amount of oil. Further analysis was performed comparing the performance of biodiesel in each of the methodologies and the cost production to a laboratory scale.

The transesterificación conditions for methodology A, which yield the highest amount of biodiesel were obtained with molar ratio of methanol:oil 7.5:1, 0.5% of sodium metal as catalyst and 60 minutes of reaction. For methodology B, the conditions were: molar ratio : methanol:oil 6:1, 0.5% of metallic sodium and a power output of the microwave 200W.

The biodiesel obtained was tested for flash point, density, viscosity and quantification of free and total glycerin. The results were compared with those raised by the standard parameters NTE INEN 2 482:2009, requirements for biodiesel All values within the range established by this rule.

Whit the biodiesel obtained as stated above, a function test, run on Universidad Técnica de Ambato was performed, using a mixture of 50% diesel oil (fossil) and 50% biodiesel. The tractor made a journey about thirty minutes around the campus, thus

showed that motor performance was satisfactory and did not alter its power and noise. It was observed that the combustion of biodiesel reduces significantly the amount of smoke emanating from the tractor.

INTRODUCCIÓN

El biodiesel es un biocombustible producido a partir de la reacción de transesterificación entre un aceite vegetal, ya sea este virgen o usado, un alcohol de cadena corta y un catalizador. El biodiesel puede ser utilizado en motores diesel de combustión interna sin modificación básica del motor. Es un combustible renovable, no tóxico, biodegradable y su uso reduce las emisiones de los gases de efecto invernadero.

El biodiesel obtenido a partir de aceites comestibles vegetales usados (ACVUs) puede reemplazar parcialmente al diesel derivado del petróleo. Al ser elaborado con aceites usados se da una alternativa al reciclaje de este material que por lo general es desechado a las alcantarillas o como basura común, generando un gran problema de contaminación al medioambiente.

El presente trabajo está orientado específicamente, dentro del uso de la biomasa como fuente de energía, al estudio de la producción de un biocombustible a partir de la transesterificación de aceite vegetal proveniente de fritura con un porcentaje de superior al 1 % de ácidos grasos libres máximo establecido para una generación óptima de este biocombustible. *(Castro, 2007)* En este caso, el aceite de fritura ha sido sometido a un proceso previo para eliminar el problema de su acidez elevada o su contenido de agua.

El presente trabajo de investigación propone obtener y caracterizar el biodiesel elaborado a partir de aceites comestibles vegetales usados, mediante la determinación de las características iniciales del aceite; el pre-tratamiento catalítico ácido del aceite; la elaboración catalítica básica del biodiesel utilizando calor y microondas para el proceso de transesterificación; la evaluación de los productos y subproductos obtenidos y la estimación del costo de obtención de biodiesel a escala de laboratorio y a escala semi-industrial.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Tema de investigación

Obtención de biodiesel a partir de aceites comestibles vegetales usados (ACVUs), como una alternativa para el reciclaje de material de desecho altamente contaminante para el medioambiente.

1.2 Planteamiento del problema

1.2.1 Contextualización

Con excepción de la energía hidroeléctrica y la nuclear, la mayoría de las necesidades energéticas del planeta se encuentran cubiertas por fuentes petroquímicas, carbón y gas natural. Todas estas fuentes de energía son finitas y a la velocidad de su uso actual se habrán terminado un día en un futuro muy cercano (Meher et al, 2006).

El problema de la contaminación atmosférica debido a la quema de combustibles fósiles afecta en gran medida a la calidad de vida en el planeta. La mayor parte de los automóviles usan la combustión de gasolina para su funcionamiento, proceso que va acompañado de la emisión de enormes cantidades de gases contaminantes como dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), y óxidos de nitrógeno (NO_x).

La disminución de las reservas mundiales de petróleo y el incremento de los problemas ambientales relacionados con el uso de combustibles fósiles han estimulado el interés en la búsqueda de fuentes alternativas de energía. Una alternativa a este problema es el uso de combustibles provenientes de materias primas renovables o a partir de desperdicios, los cuales permiten disminuir los problemas ambientales de contaminación. (Demirbas,2009).

El biodiesel, producto derivado de los aceites o grasas animales o vegetales, por medio de la transesterificación con alcohol (metanol o etanol), es recomendado como un sustituto del combustible fósil ya que el biodiesel es un combustible oxigenado, renovable, biodegradable, amigable con el medio ambiente, con propiedades similares de flujo y combustión, y un perfil bajo de emisión (Fukuda et al, 2001).

Las propiedades físico-químicas del biodiesel son prácticamente las mismas que las del gasóleo de origen fósil, tanto en densidad y número de cetano, aunque presenta un punto de inflamación superior. El biodiesel puede mezclarse con el gasóleo para su uso en motores, e incluso sustituirlo totalmente si se adaptan éstos convenientemente. Posee la propiedad de prolongar la vida útil de los motores ya que tiene mayor lubricidad que el diesel. En la actualidad, el biodiesel es utilizado en muchos países del mundo; por ejemplo en Alemania, Austria y otros países de Europa Central están utilizando biodiesel puro (100%). Los franceses usan mezclas de biodiesel en porcentajes bajos (5%); en los EE.UU. se venden mezclas de biodiesel; en Japón existe gran interés por producir y utilizar este producto; de igual manera ocurre en Latinoamérica, donde los principales productores de biodiesel son Brasil, Argentina y Ecuador. (Chica, 2009).

Actualmente, comparado con el diesel de origen fósil, el alto costo del biodiesel es la mayor barrera para su comercialización. Se ha reportado que aproximadamente entre el 75-80% del costo total de producción de biodiesel proviene del costo de la materia prima. Existen numerosos estudios acerca de la producción de biodiesel a partir de aceite vegetal crudo, sin embargo el reto es eliminar el uso de aceite vegetal crudo y utilizar las grandes cantidades de residuos de lípidos generados por restaurantes, industrias procesadoras de alimentos, locales de comida rápida y otros. La reutilización de dichos desperdicios oleosos no solamente reduce su emisión a la basura común, lo que provoca serios problemas ambientales, sino también, reduciría el costo de producción del biodiesel (Al-Widyan y Al-Shyoukh, 2002).

Se puede mencionar que en España existe una planta para la producción de biodiesel con una capacidad de 1000-1500 toneladas/año, la misma que utiliza aceites vegetales usados que se recogen de restaurantes y establecimientos similares para su reciclado. A partir de esta única materia prima se produce un biodiesel que se utiliza, mezclado con gasóleo, como combustible en los buses públicos de transporte de pasajeros (IDAE, 2007).

Nuestro país es el tercer productor de combustibles alternativos en Sudamérica, a través de la empresa productora de grasas y aceites LA FABRIL (Manta), que está entre los principales exportadores de este producto. La Fabril se encuentra produciendo biodiesel a partir de aceite refinado de palma africana y su principal comprador es la empresa Earth First Technologies, de la Florida en EE.UU. (Arévalo, 2008).

En nuestro medio existe gran cantidad de restaurantes y principalmente establecimientos de comida rápida, quienes reutilizan los aceites comestibles a tal grado que se hacen nocivos para la salud, ya que no existe control estatal que regule y controle, por otro lado, el desecho de los aceite vegetales usados en forma directa a la basura común o alcantarillado presenta también un fuerte problema medioambiental. Es entonces posible considerar estos establecimientos como fuente importante de materia prima, para lo cual, una estrategia reguladora por medio de una ordenanza municipal podría permitir recolectar periódicamente dichos aceites usados.

1.2.2 Análisis crítico



Figura 1.1: Árbol de problemas

1.2.2.1 Relación Causa-Efecto

Gran parte de la contaminación de agua, aire y suelo se debe a la quema de combustibles fósiles y la inadecuada disposición de residuos alimentarios, industriales, hospitalarios, etc. Los aceites comestibles usados, frecuentemente son vertidos por el desagüe o dispuestos en la basura común, lo que genera un grave problema ambiental, ya que son difícilmente biodegradables y cuando entran en contacto con el agua forman una película sobre la superficie la cual afecta la capacidad de intercambio de oxígeno.

1.2.3 Prognosis

La idea de usar aceites vegetales como combustible para los motores de combustión interna data de 1895 cuando el Dr. Rudolf Diesel desarrollaba su motor y empleó aceite de maní como combustible, o mejor dicho, como biocombustible.

El biodiesel es un combustible sustituto del gasóleo para motores diesel, el cual puede ser producido partiendo de materias primas agrícolas como aceites vegetales y/o grasas animales, posee las mismas propiedades del combustible diesel empleado en automóviles, camiones y buses; puede ser mezclado en cualquier proporción con el diesel obtenido de la refinación del petróleo.

1.2.4 Formulación del problema

Gran parte de los desechos alimenticios que generan establecimientos de comida rápida y los que se generan en el hogar son eliminados por las alcantarillas o dispuestos en la basura común lo que genera un agudo problema de contaminación de agua y suelo, alterando el ecosistema y los ciclos de vida.

1.2.5 Preguntas directrices

¿Cómo obtener biodiesel a partir de aceites comestibles usados?

¿Qué parámetros físicos y químicos son los más favorables para la reacción de transesterificación entre el aceite y el metanol?

¿Cómo comparar la eficiencia de la reacción de transesterificación entre el uso de microondas y calor?

¿Cómo evaluar las propiedades fisicoquímicas, rendimiento y costo del biodiesel obtenido?

1.2.6 Delimitación

Área:	Bioquímica
Sub-área:	Tratamiento de Residuos
Aspecto:	Producción de Combustibles Alternativos
Sub-aspecto:	Producción de Biodiesel a partir de Aceites Vegetales Usados
Temporal:	La investigación se realizó entre los meses de Marzo.- Diciembre 2011
Espacial:	La investigación fue realizada en los laboratorios de la Facultad Ciencia e Ingeniería Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato

1.3 Justificación

La necesidad de fuentes alternativas de energía es primordial debido a diversos aspectos como: al agotamiento irreversible de los suministros fósiles, el impacto negativo sobre el medio ambiente de las emisiones de dióxido de carbono y la contaminación directa del suelo y el agua en los procesos de extracción y transporte de crudo de petróleo. El biodiesel, preparado a partir de aceite usado de cocina tiene dos ventajas muy importantes, por una parte se evita la emisión de gases contaminantes como producto de la combustión porque no contiene azufre y la presencia de oxígeno en su composición química hace que la combustión sea mas completa, reduciendo la emisión de partículas de carbono elemental, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados y la otra ventaja es que se realiza un reciclaje de material de desecho altamente contaminante.

El presente trabajo de investigación está enfocado a desarrollar una metodología para la obtención de biodiesel a partir del principio de reciclaje de aceites vegetales usados. La implementación de esta metodología permite obtener dos ventajas muy importantes como son: la disminución de las emisiones de gases contaminantes producidos por el uso de combustibles fósiles y el reciclaje de aceites vegetales, los mismos que si son desechados a la basura común o a los sistemas de alcantarillado, son causantes de contaminación a gran escala de agua y suelo.

El desarrollo de un método de obtención de biodiesel y posteriormente, la posibilidad de implementación de una planta piloto traería consigo ventajas socioeconómicas como el desarrollo de proyectos de inversión encaminados a la producción de biocombustible, la creación de fuentes de trabajo, el establecimiento de un sistema de cooperación mutua entre investigadores, el Ilustre Municipio de Ambato y la colectividad, alianza que permitirá controlar el uso y las emisiones de aceite vegetal usado, evitar su desecho irresponsable y principalmente recolectarlo organizadamente, como materia prima para la obtención de biodiesel, para lo cual, primero se deben obtener datos técnicos que demuestren que se puede obtener biodiesel a partir de aceites vegetales usados.

1.4 Objetivos

General

- Realizar un estudio comparativo de dos metodologías para la obtención de biodiesel a partir de aceites comestibles usados, con el fin de seleccionar la mejor alternativa para el reciclaje de éste material altamente contaminante para el medio ambiente.

Específicos

- Establecer los parámetros físicos y químicos más favorables para la reacción de transesterificación utilizando calor por convección y microondas.
- Comparar la eficiencia de la reacción de transesterificación entre el uso de hidróxido de sodio y sodio metálico, como catalizador.
- Evaluar las propiedades fisicoquímicas, rendimiento y costo del biodiesel obtenido.
- Realizar pruebas de combustión del biodiesel obtenido en un motor a diesel.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Investigativos

El interés por el desarrollo de los biocombustibles, que comienza con su producción a escala industrial en los años 90, ha dado un giro a la matriz energética mundial y hoy en día representa el 1,7%, estimándose que es posible que los biocombustibles representen el 20% de los combustibles consumidos en el mundo en el año 2020. (UNCTAD, 2007).

Etimológicamente los biocombustibles se los define como combustibles de origen biológico que no han sido fosilizados y cuya obtención es de manera renovable a partir de restos orgánicos. Tanto los combustibles fósiles como los biocombustibles, tienen origen biológico, cabe indicar que toda sustancia susceptible de ser oxidada puede otorgar energía.

Durante la segunda guerra mundial, y ante la escasez de combustibles fósiles, se destacó la investigación realizada por Nikolaus August Otto con su motor de combustión interna de cuatro tiempos y Antonio Vivacqua en el Brasil, sobre diesel de origen vegetal, pero fue hasta el año de 1970, que el biodiesel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética y al elevado costo del petróleo.

En cuanto a su aplicación en los motores de combustión interna, el biodiesel puede ser mezclado con diesel tradicional o incluso sustituirlo totalmente. Hecho similar ocurre con el bioetanol para sustitución o mezclado con la gasolina convencional (APPA & Pricewaterhouse Coopers, 2005).

Para que los biocombustibles de origen agrícola sean una alternativa energética real, se necesita que estos productos, no sólo presenten características equivalentes a los de procedencia fósil, sino también que, en el conjunto de procesos de obtención, se consigan balances energéticos positivos y lleguen al mercado a un coste similar al de los productos derivados del petróleo a los que sustituyen (Barriga, 2007).

En los años noventa, Francia lanzó la producción local de biodiesel (conocido localmente como diéster) obtenido de la transesterificación del aceite de colza. Donde va mezclado en un 5% en el combustible diesel convencional, y en un 30 % en el caso de algunas flotas de transporte público. Renault, Peugeot y otros productores han certificado sus motores para la utilización parcial con biodiesel, mientras se trabaja para implantar un biodiesel del 50%. Francia empezó una producción local de biodiesel el cual se mezclaba en un 30% con diesel para transporte público. Renault y Peugeot certificaron motores de camiones con uso parcial de biodiesel (alrededor del 50%).

En 2008, la ASTM (American Society for Testing and Materials) publicó los estándares y especificaciones de mezcla de biodiesel.

Tabla 2.1: Normas ASTM D6751 para biodiesel

Propiedad	Límites	Unidad
Punto de inflamación	130,0 mín.	°C
Agua y sedimentos	0,050 máx.	% vol
Viscosidad cinemática a 40 °C	1,9 – 6,0	cSt.
Cenizas sulfatadas	0,020 máx.	% masa
Azufre (Grado S 15)	0,0015 máx.	ppm
Azufre (Grado S 500)	0,05 máx.	ppm
Corrosión en lámina de cobre	N° 3 máx.	-
Índice de cetano	47 mín.	-
Residuo carbonoso	0,050 máx.	% masa
Acidez	0,80 máx.	mg KOH/g
Glicerina libre	0,020 máx.	% masa
Glicerina total	0,240 máx.	% masa
Contenido de fósforo	0,001 máx.	% masa
Temperatura de destilación, 90% recuperado	360 máx.	°C

Fuente: ASTM. (2009). Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels

2.1.1 Biomasa

El término biomasa significa, en su definición más amplia, cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en algún proceso biológico. Este concepto comprende tanto a los productos de origen vegetal como a los de origen

animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. Quedan excluidos los combustibles fósiles, porque aunque derivan de materiales biológicos, a través del tiempo han sufrido transformaciones que han alterado profundamente su naturaleza. Actualmente se ha extendido el uso del término biomasa para denominar a un tipo de energía renovable basada en la materia orgánica anteriormente descrita.

La energía de la biomasa procede de la energía solar fijada por los vegetales mediante la fotosíntesis y acumulada en los enlaces químicos de las moléculas orgánicas que los conforman, es entonces una forma de energía química. Esta energía puede ser aprovechada de forma directa por combustión, la energía se libera al romperse los enlaces de los compuestos orgánicos durante la combustión, o de forma indirecta a través de compuestos derivados como alcoholes, ésteres. (Fernández, 2002).

Las fuentes de biomasa para la obtención de energía pueden clasificarse de diferentes maneras, por ejemplo, según su origen:

- La biomasa natural: producida espontáneamente en las tierras no cultivadas y que el hombre ha utilizado tradicionalmente para satisfacer sus necesidades calóricas, el mejor ejemplo es la leña.
- La biomasa residual: producida en las explotaciones agrícolas, forestales y ganaderas, así como los residuos orgánicos de origen industrial y urbano.
- Los cultivos energéticos, producidos con la finalidad de disponer de biomasa transformable en biocombustibles líquidos y sólidos.

2.1.3 Aceites comestibles

Los aceites comestibles provienen tanto de plantas como de animales, una manera de determinarlos químicamente es extraerlos y una vez purificados aplicar cromatografía para observar la proporción de ácidos grasos presentes en el aceite. En general los aceites vegetales aportan ácidos grasos insaturados y son ricos en vitamina E, su valor energético es de aproximadamente 900 Kcal por cada 100 gramos. El aceite más antiguo probablemente sea el de ajonjolí, que se sabe, lo usaban los egipcios. (Barriga 2007).

2.1.4 Características químicas de los aceites

Los aceites, así como las grasas, son triglicéridos de glicerol (también llamado glicerina, 1, 2, 3 propanotriol o sólo propanotriol). El glicerol es capaz de enlazar tres radicales de ácidos grasos llamados carboxilatos. Dichos radicales grasos por lo general son distintos entre sí; pueden ser saturados o insaturados. La molécula se llama triacilglicérido o triacilglicerol. Los radicales grasos pueden ser desde 12 carbonos de cadena hasta 22 y 24 carbonos de extensión de cadena. Existen en la naturaleza al menos 50 ácidos grasos. Algunos radicales grasos característicos provienen de alguno de los siguientes ácidos grasos:

Ácido linoleico	C18:2
Ácido linolénico	C18:3
Ácido oleico	C18:1
Ácido palmitoleico	C16:1

Estos ácidos son los llamados ácidos grasos insaturados o ácidos grasos esenciales, llamados así porque el organismo humano no es capaz de sintetizarlos por sí mismo, y es necesario por tanto ingerirlos en los alimentos.

Los ácidos grasos saturados son los siguientes:

Ácido esteárico	C18:0
Ácido palmítico	C16:0

2.1.5 Propiedades fisicoquímicas de las grasas y aceites

Los aceites y grasas pueden ser caracterizados según sus propiedades físicas (densidad, viscosidad, punto de fusión, índice de refracción) o químicas (índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxido, índice de saponificación, índice de éster).

Las propiedades que se estudiaron en el presente trabajo fueron:

- Densidad

La densidad del aceite es la relación entre su peso y su volumen, y en este caso está afectada por la temperatura. La densidad de los aceites vegetales varía dependiendo del tipo que sea y también varía dependiendo la temperatura a la que se encuentre, la

densidad estándar para los aceites vegetales va de un mínimo de 0.90 g/ml a un máximo de 0.93 g/ml a una temperatura media de 15°C (ambiente).

- Viscosidad

La viscosidad es una medida de la fricción interna entre moléculas, o de la resistencia a fluir de los líquidos. En general, la viscosidad de los aceites desciende con un incremento en la insaturación y con un decrecimiento del peso molecular de sus ácidos grasos

- Porcentaje de ácidos grasos libres (AGL)

Puede expresarse también como porcentaje de ácido oleico, palmítico o láurico, según el ácido graso que predomine en la grasa en cuestión. Los aceites y grasas refinados deben tener un nivel de ácidos grasos libres inferior al 0,2% como ácido oleico para ser aptos para su uso en alimentación Sin embargo, los aceites crudos y los usados previamente en frituras, comúnmente tienen un contenido de ácidos grasos libres significativamente superior a éste (2% o más). Este índice es particularmente importante para el proceso de producción de biodiesel (transesterificación), ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH ó KOH) formando jabones (saponificación), lo cual lleva a un menor rendimiento en la producción de biodiesel. La saponificación no sólo consume el catalizador necesario para la transesterificación, sino que además los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiesel.

- Índice de refracción

El índice de refracción de un aceite se define como la razón de la velocidad de la luz en el vacío con respecto a la velocidad de la luz en el aceite. El valor del índice de refracción está relacionado con grado de saturación y es un indicativo de la pureza del aceite

- Índice de peróxido

El índice de peróxido (IP) mide el grado de oxidación primaria que ha sufrido la grasa o aceite. Los peróxidos son los productos de descomposición primaria de la oxidación de las grasas, cualquiera sea su composición. Se forman en los puntos de insaturación de las cadenas de carbonos de los ácidos grasos La velocidad de oxidación crece con un incremento en la temperatura, con la exposición al oxígeno del aire, presencia de luz y contacto con materiales pro-oxidantes por ejemplo, el cobre metálico, latón, bronce u otras aleaciones que contengan cobre.(Cedeño 1999)

2.1.6 Aceites Vegetales Usados

Los aceites vegetales usados se producen en las cocinas de los hogares, restaurantes y en las industrias de alimentación, todos ellos deben gestionarse de forma correcta, para evitar el gran impacto ambiental que estos causan. Tradicionalmente el aceite vegetal usado se ha estado vertiendo en los fregaderos de nuestros hogares, a la basura común y en la mayoría de las ocasiones al alcantarillado esto no debe realizarse en ningún caso ya que produce un impacto sobre el medio ambiente, ensuciando nuestras aguas y dificultando el proceso de depuración de las mismas. Los aceites vegetales usados pueden emplearse como materia prima para la fabricación de jabones y biocombustibles.

Calentar un aceite cambia sus características. Algunos aceites que son saludables a temperatura ambiente pueden volverse perjudiciales cuando se calientan por encima de ciertas temperaturas. Al elegir un aceite para cocinar, es por tanto importante tener en cuenta su tolerancia al calor.

Un estudio del 2001 de sobre grasa alimenticio en el Reino Unido, los Estados Unidos y España halló que los aceites poli-insaturados como el de soja, colza, girasol y maíz se degradan fácilmente a compuestos tóxicos cuando se calientan. El aceite de palma contiene más grasas saturadas que los de colza, maíz, lino, soja y girasol. Por tanto, el aceite de palma puede soportar mejor las temperaturas altas del proceso de fritura y la oxidación respecto a los aceites muy insaturados. (Castro 2007)

2.1.7 Biocombustibles

El biocombustible es el término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa, es decir se obtiene a partir de plantas y sus derivados

Ventajas de los biocombustibles

- Alternativa a los combustibles derivados del petróleo
- Energía renovable
- Combustible no tóxico y biodegradable
- Reducción de emisiones contaminantes

- Utilización de residuos orgánicos

Desventajas de los biocombustibles

- A bajas temperaturas puede llegar a solidificarse y producir obstrucciones en los conductos.
- Es incompatible con algunos materiales ya que en estado puro puede llegar a dañar por ejemplo el caucho y algunas pinturas.
- Su utilización produce la pérdida de potencia del vehículo.
- Produce un mayor consumo en los vehículos debido a que tiene menos poder calorífico y tarda más tiempo en combustionar.

2.1.8 Pre-tratamiento del aceite

La mayor parte del biodiesel se produce a partir de aceites comestibles semirrefinados con buenas características de acidez y humedad. Sin embargo, existe gran cantidad de aceites y grasas de menor calidad y menor costo que también podrían ser convertidos en biodiesel (por ejemplo, aceites vegetales crudos, grasas animales y aceites usados o residuales). El problema para procesar estas materias primas baratas es que suelen tener grandes cantidades de ácidos grasos libres, gomas, humedad y otras impurezas que afectan el proceso de transesterificación alcalina.

El aceite para producir biodiesel debe ser refinado, con el objetivo de:

- Eliminar ácidos grasos libres (AGL)
- Eliminar ceras, para mejorar el desempeño en frío del biodiesel.
- Eliminar otros contaminantes, y obtener una mejor calidad de la glicerina.
- Eliminar sólidos que interrumpan el proceso de transesterificación.

2.1.9 El Biodiesel

El biodiesel es un combustible renovable derivado de aceites o grasas de origen vegetal o animal. El prefijo bio hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diesel tradicional derivado del petróleo; mientras que diesel se refiere a su uso en motores de este tipo. Como combustible, el biodiesel puede ser usado en forma pura o mezclado con diesel de petróleo.

El National Biodiesel Board (la asociación de productores norteamericanos de biodiesel) lo define como un combustible compuesto de ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites o grasas, vegetales o animales. Este biocombustible se obtiene mediante un proceso químico llamado transesterificación, en el cual los aceites orgánicos son combinados con un alcohol y alterados químicamente para formar un éster etílico o metílico, el cual recibe finalmente el nombre de biodiesel.

El biodiesel puede mezclarse con gasóleo procedente del refinado del petróleo en diferentes cantidades. Se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla: B100 en caso de utilizar sólo biodiesel, u otras notaciones como B5, B15, B30 o B50, donde la numeración indica el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla. (Chica 2009).

2.1.9.1 Características técnicas del diesel y el biodiesel

El diesel se define como combustible derivado del petróleo compuesto por parafínicos naftalénicos y aromáticos. El número de carbonos es fijo está comprendido entre C₁₀ y C₂₂. Mientras que en el biodiesel, los compuestos básicos de los aceites y las grasas producen triglicéridos, por lo cual su origen y calidad de obtención determinan las características del biodiesel. A continuación se detallan las principales normas técnicas del diesel de petróleo y el biodiesel.

Tabla 2.2: Requisitos del Biodiesel según Norma INEN 2482:2009

Parámetro	Norma	Unidades	Biodiesel
Densidad (15°C)	ASTM D 1298	Kg/m ³	860-900
Viscosidad Cinemática (40°C)	ASTM D 445	cSt	3.5 - 5.0
Punto de inflamación	ASTM D 93	°C	120 min
Azufre	ASTM D 1552	ppm	10 max.
Agua	ASTM D 95	ppm	500 max.
Corrosión al cobre	ASTM D 130	-	Clase 1
Numero de cetano	ASTM D 613	-	49 min.
Temperatura de destilación 90%	ASTM D 1160	°C	360 max.
Índice de yodo	EN 14111	g yodo/100g	120 max.

Fuente: Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 2482:2009)

2.1.9.2 Reacción de síntesis

En la reacción de transesterificación la molécula de triglicérido se divide en tres moléculas de metiléster y una de glicerina. El hidróxido, actuando como un catalizador, rompe los enlaces que unen a los ácidos grasos con la glicerina, la glicerina se separa y las cadenas de ácidos grasos se unen al metanol.

En esta reacción hay tres partes, primero una cadena de ácido graso se separa del triglicérido y se une al metanol formando una molécula de metiléster, quedando un diglicérido. Después se separa de la glicerina otra cadena de ácido graso, que se une al metanol formando la segunda molécula de metiléster, dejando un monoglicérido. Finalmente el monoglicérido se convierte en metiléster sustituyendo la glicerina por metanol. Cuando termina esta última etapa se completa la reacción. (Díaz, 2007)

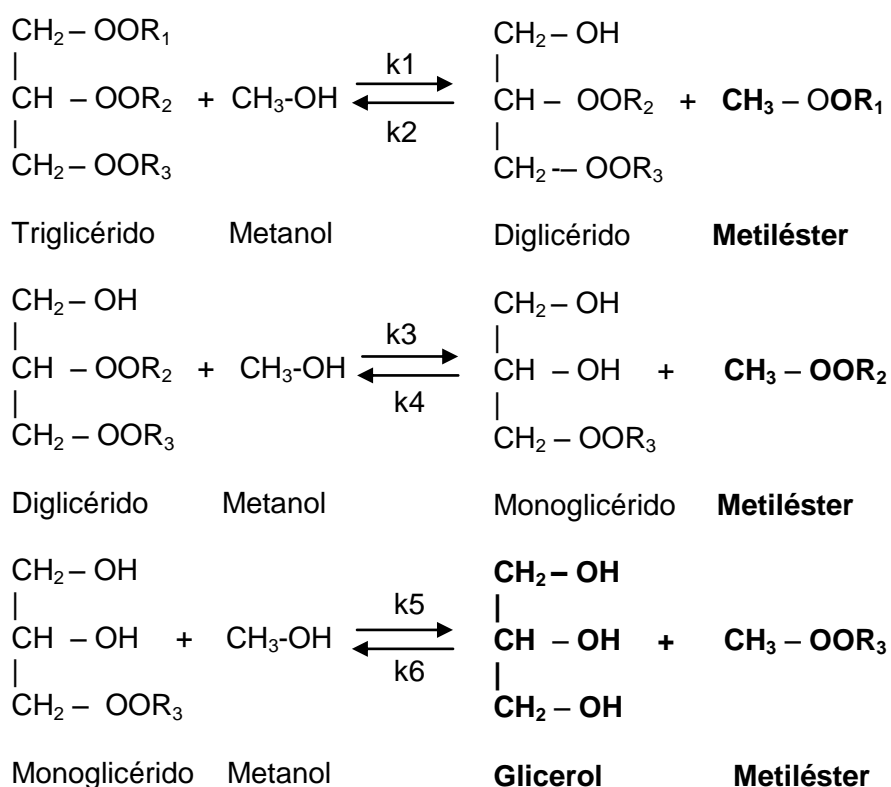


Figura 2.1: Reacción de transesterificación.

2.1.9.3 El alcohol

El alcohol es el principal insumo para la producción de biodiesel. En volumen, representa alrededor del 10-15% de los insumos consumidos. Los alcoholes que más comúnmente se utilizan para producir biodiesel son metanol y etanol. Se puede utilizar otros alcoholes – propanol, isopropanol, butanol y pentanol pero estos son mucho más sensibles a la contaminación con agua (es decir, la presencia de agua en mínimas cantidades inhibe la reacción. El metanol es tóxico cuando se ingiere, se inhala o al contacto con la piel, y además altamente inflamable, sus gases se encienden a una temperatura de 12°C. Además, el metanol arde con una llama incolora, de manera que no es fácil apreciar si se enciende.

Una de las variables más importantes que afectan el rendimiento de la transesterificación es la razón molar entre el alcohol y los triglicéridos. Por razón molar se entiende la cantidad de moléculas de alcohol necesarias para reaccionar con una molécula de triglicérido o aceite. Como vimos en la Figura 2.1, se requieren 3 moléculas de alcohol y una de triglicérido para producir 3 moléculas de biodiesel y una de glicerol. Sin embargo, la transesterificación es una reacción de equilibrio reversible, es decir, se necesita un gran exceso de alcohol para forzar la reacción hacia la derecha (es decir, hacia los productos buscados, biodiesel y glicerol). Por esto, en la práctica, cuando se trabaja con metanol se recomienda una razón molar de 6:1 para asegurar una conversión máxima de los triglicéridos a ésteres (Espinoza 2009).

2.1.9.4 El catalizador

La transesterificación de los triglicéridos puede ser realizada mediante diferentes procesos catalíticos. Los catalizadores utilizados pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Catalizadores alcalinos – hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, sodio metálico.
- Catalizadores ácidos – ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico.
- Catalizadores enzimáticos – lipasas

La relación molar se asocia con el tipo de catalizador utilizado. Por ejemplo, una reacción catalizada con ácido necesita una relación 30:1 de butanol a aceite de soya, mientras una reacción con catalizador alcalino requiere solo una relación de 6:1 para

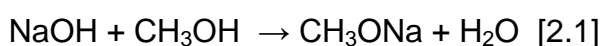
alcanzar el mismo rendimiento del éster para un tiempo de reacción dado. (Loaiza, 2003)

El proceso más conocido, utilizado y hasta el momento más efectivo es el que emplea catalizadores alcalinos. Sin embargo, si el aceite tiene un alto contenido de ácidos grasos libres, la catálisis alcalina no es apropiada debido a que los hidróxidos reaccionan con los ácidos grasos libres formando jabones, lo cual reduce el rendimiento de producción de biodiesel. En este caso, se requiere otro tipo de transesterificación, o un pretratamiento con catalizadores ácidos. (Han, 2009).

2.1.9.5 Catalizadores alcalinos

En el caso de la catálisis alcalina, es muy importante que los catalizadores se mantengan en un estado anhidro. Debe evitarse su contacto prolongado con el aire, pues éste disminuye su efectividad debido a la interacción con la humedad y con el dióxido de carbono (Meher, 2006).

El catalizador generalmente se combina con la cantidad necesaria de metanol para la reacción ya sea que se utilice NaOH o Na metálico, se obtendrá metóxido de sodio también llamado metilato de sodio con la diferencia que la primera reacción se obtiene agua como subproducto en la segunda hidrógeno.



2.1.9.6 Catalizadores ácidos

Los catalizadores ácidos pueden ser utilizados tanto para la esterificación de ácidos grasos libres con el fin de convertirlos directamente en ésteres o para la transesterificación de los triglicéridos. Cuando la materia prima es un aceite con alto contenido de ácidos grasos libres (AGL), la esterificación ácida está recomendada como un primer proceso para tratar estos AGL, pero debe ser seguida por la transesterificación alcalina (con NaOH o KOH como catalizadores) para convertir los triglicéridos subsistentes. Los catalizadores ácidos también pueden ser utilizados directamente para la transesterificación, pero esta reacción es extremadamente lenta y requiere de un exceso aún mayor de alcohol, lo cual la torna poco económica. (Bradshaw, 1992).

2.1.10 Post-tratamiento del biodiesel

Luego de la transesterificación y la separación de las dos fases, biodiesel y glicerol se requiere de un post-tratamiento para asegurar que el biodiesel cumpla con los estándares de calidad exigidos, pues éste aún contiene impurezas derivadas del proceso parte de metanol en exceso, posiblemente jabones, y trazas de catalizador. Los metilésteres se someten a temperatura y vacío para evaporar el metanol y recuperarlo, y luego son llevados a un proceso de lavado para separar todas las impurezas. El lavado se realiza con agua acidulada (con ácido fosfórico o ácido cítrico) que se mezcla con el biodiesel. El ácido neutraliza el catalizador residual presente y separa los jabones que se puedan haber formado en la reacción. Los jabones se convierten en ácidos grasos libres (que se quedan en el biodiesel) y en sales solubles en agua. Así, los restos de catalizador, jabón, sales, glicerina y metanol se quedan en el agua de lavado. Este lavado se realiza al menos dos veces con agua nueva cada vez, hasta que se halla eliminado todo el residual de catalizador alcalino y el efluente tenga un color claro. (Van Gerpen, 2005).

2.1.11 Reacciones con microondas

La aplicación de las microondas a los sistemas químicos representa un nuevo método para acelerar las reacciones químicas, con el consiguiente ahorro de tiempo. Concretamente, las microondas interactúan con las moléculas de agua, desde la frecuencia de 2450 MHz (12,2 m), incrementando la velocidad de calentamiento.

En presencia de las microondas, las reacciones químicas experimentan una fuerte aceleración, bien por la interacción directa de los reactivos o bien indirectamente por medio del disolvente. Desde este punto de vista, resulta de gran importancia seleccionar de forma adecuada tanto los materiales como los disolventes de reacción. Asimismo, hay que tener precaución en la utilización de las microondas, ya que puede existir peligro de explosión por incremento de la presión o sobrecalentamiento.

Su efectividad reside en que las microondas dan un calor intenso y localizado que puede ser superior a la temperatura registrada por el recipiente de reacción. Este método permite la obtención de una elevada tasa de eficiencia y se ha demostrado que sólo consumen una cuarta parte de la energía necesaria en el proceso por convección. A pesar de que todavía está a escala de laboratorio, en la etapa de desarrollo, el método de microondas tiene un gran potencial para ser uno de los

métodos más eficaces, además de tener un costo lo suficientemente competitivo para la producción de biodiesel a escala comercial.

2.1.11 Reacciones con calor por convección.

La convección es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire y agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Estos al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, su densidad disminuye y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido.

En todas las reacciones químicas ocurren cambios de energía, es decir; se puede absorber o liberar energía en forma de calor, luz, energía eléctrica, etc. Si en una reacción se libera energía en forma de calor; decimos que la reacción es exotérmica; si la energía es absorbida, entonces la reacción es endotérmica. La reacción de transesterificación es una reacción que requiere calor para poder desarrollarse, el mismo que puede ser suministrado por convección hasta alcanzar una temperatura de 60°C.

2.2 Fundamentación filosófica

Se fundamenta el presente trabajo de investigación es el positivista, también denominado paradigma cuantitativo, empírico, analítico, racionalista, ya que trata de predecir que algo va a suceder y luego verificarlo o comprobarlo. El positivismo acepta como único conocimiento válido al conocimiento verificable y medible, visible. Lo que importa para el positivista es la cuantificación y medir una serie de repeticiones que llegan a constituirse en tendencias, el análisis de los datos obtenidos en dichas repeticiones se realiza a través del uso de estadística, tablas y una discusión acerca de cómo estos datos se relacionan con la hipótesis, se construyen teorías, todo fundamentado en el conocimiento cuantitativo.

2.3 Fundamentación legal

El Congreso ecuatoriano aprobó en un primer debate un proyecto de ley de fomento de biocombustibles que apunta a crear el marco legal que regule la producción y consumo del combustible renovable y avanzar en la investigación y desarrollo. El

gobierno quiere que los biocombustibles ayuden a reducir las importaciones de hidrocarburos del país, que ascienden a 2.300 millones de dólares.

Decreto Ejecutivo No. 2332

R.O. No. 482 (15 de diciembre de 2004)

Artículo 1.- Declara de interés nacional la producción, comercialización y uso de los biocombustibles como componente en la formulación de los combustibles que se consumen en el país.

Decreto Ejecutivo No. 146

R.O. No. 39 (12 de marzo de 2007)

Artículo 1.- Crea el Consejo Nacional de Biocombustibles con la misión de definir políticas y aprobar planes, programas y proyectos relacionados a la producción, manejo, industrialización y comercialización de biocombustibles.

La Constitución Política del Estado Ecuatoriano

Artículo 3.- Es deber primordial del Estado proteger el Medio Ambiente.

Artículo 86.- Declara de interés público la Preservación del Medio Ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país; así como la prevención de la contaminación ambiental, la recuperación de los espacios naturales degradados; el manejo sustentable de los recursos naturales.

Ley de Gestión Ambiental

Artículo 20.- El inicio de toda actividad que suponga riesgo ambiental debe contar con licencia respectiva, otorgada por el Ministerio del ramo, quien podrá otorgar o negar la emisión de la misma.

Plan Nacional del Buen Vivir

Capítulo 6: Estrategias para el período 2009-2013

6.7: Cambio de la Matriz energética.

La matriz energética del Ecuador no hace sino reafirmar la característica de nuestro país como exportador de bienes primarios de bajo valor agregado e importador de bienes industrializados. En efecto, la contabilidad energética muestra que la producción nacional, que constituye el 90% de la oferta energética total⁵⁴, está

concentrada en un 96% en petróleo crudo y gas natural, quedando las energías renovables (hidroelectricidad y biomasa) relegadas a un 4% de la producción nacional.

En contrapartida, el segundo componente de la oferta energética, las importaciones – que son el 10% restante de la oferta–, corresponden en más del 90% a derivados de petróleo (GLP, diesel, nafta de alto octano y otros), además, dependiendo de las circunstancias se importa electricidad y otros productos no energéticos.

En la demanda energética, las exportaciones son el principal componente (64% del total), en tanto que la demanda doméstica apenas alcanza el 28% del total, y el 8% restante corresponde a pérdidas por transformación. Ahora bien, el 90% de las exportaciones son de petróleo crudo, el 9% restante de derivados de bajo valor agregado (fuel oil principalmente) y el resto (1%) corresponden a aceites de origen vegetal. La demanda doméstica se compone principalmente de derivados de petróleo (79%), electricidad (13%), biomasa (leña, bagazo y otros) (5%), y el resto (2%) productos no energéticos como carburantes y otros. Desde una perspectiva sectorial la demanda doméstica se concentra en los sectores transporte (52%), industria (21%) y residencial (19%), el resto (8%) corresponde a los sectores: comercial y servicios (4%), y otros sectores de la economía (4%).

El cambio de la matriz energética tiene varios componentes:

- La participación de las energías renovables debe incrementarse en la producción nacional. Para el cumplimiento de este objetivo, los proyectos hidroeléctricos del Plan Maestro de Electrificación deben ejecutarse sin dilación; y, adicionalmente, debe impulsarse los proyectos de utilización de otras energías renovables: geotermia, biomasa, eólica y solar.

Concretamente, debemos continuar con el programa de sustitución de focos incandescentes por focos ahorradores; con la importación de electrodomésticos eficientes energéticamente penalizando fuertemente a aquellos que sean de consumo ineficiente; con el desarrollo de proyectos de biocombustibles (de segunda y tercera generación) que no aumenten la frontera agrícola, es decir, en zonas degradadas o semidesérticas, cuidando sobre todo de no poner en riesgo la soberanía alimentaria; la producción de biocombustibles a partir de biomasa de desecho podría ser una alternativa importante. En las ciudades, será importante auspiciar proyectos de tratamiento integral de desechos, orientados al reciclaje y a la generación de abonos

orgánicos y energía. La exploración del gas en la costa ecuatoriana debe continuar así como los proyectos de aprovechamiento del gas natural del Golfo de Guayaquil. Finalmente, la soberanía integral contempla también la soberanía energética, por lo que es importante desarrollar las capacidades productivas que nos permitan el autoabastecimiento energético, en particular, de electricidad. Una vez alcanzado este objetivo, la interconexión con nuestros vecinos puede servir para impulsar procesos de reducción del precio de generación, mediante la optimización del despacho de energía eléctrica

Objetivos Nacionales para el buen vivir

Objetivo 4: Garantizar los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable

Política 4.3. Diversificar la matriz energética nacional, promoviendo la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles.

- a. Aplicar programas, e implementar tecnología e infraestructura orientadas al ahorro y a la eficiencia de las fuentes actuales y a la soberanía energética.
- b. Aplicar esquemas tarifarios que fomenten la eficiencia energética en los diversos sectores de la economía.
- c. Impulsar la generación de energía de fuentes renovables o alternativas con enfoque de sostenibilidad social y ambiental.
- d. Promover investigaciones para el uso de energías alternativas renovables, incluyendo la mareomotriz y la geotermia, bajo parámetros de sustentabilidad en su aprovechamiento.
- e. Reducir gradualmente el uso de combustibles fósiles en vehículos, embarcaciones y generación termoeléctrica, y sustituir gradualmente vehículos convencionales por eléctricos en el Archipiélago de Galápagos.
- f. Diversificar y usar tecnologías ambientalmente limpias y energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto en la producción agropecuaria e industrial y de servicios.

Política 4.4. Prevenir, controlar y mitigar la contaminación ambiental como aporte para el mejoramiento de la calidad de vida.

- a. Aplicar normas y estándares de manejo, disposición y tratamiento de residuos sólidos domiciliarios, industriales y hospitalarios, y sustancias químicas para prevenir y reducir las posibilidades de afectación de la calidad ambiental.
- b. Desarrollar y aplicar programas de recuperación de ciclos vitales y remediación de pasivos ambientales, tanto a nivel terrestre como marino, a través de la aplicación de tecnologías amigables y buenas prácticas ambientales y sociales, especialmente en las zonas de concesiones petroleras y mineras otorgadas por el Estado ecuatoriano.
- c. Implementar acciones de descontaminación atmosférica y restauración de niveles aceptables de calidad de aire con el objetivo de proteger la salud de las personas y su bienestar.
- d. Reducir progresivamente los riesgos para la salud y el ambiente asociados a los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs).
- e. Regular criterios de preservación, conservación, ahorro y usos sustentables del agua e implementar normas para controlar y enfrentar la contaminación de los cuerpos de agua mediante la aplicación de condiciones explícitas para el otorgamiento de las autorizaciones de uso y aprovechamiento.

2.4 Categorías Fundamentales

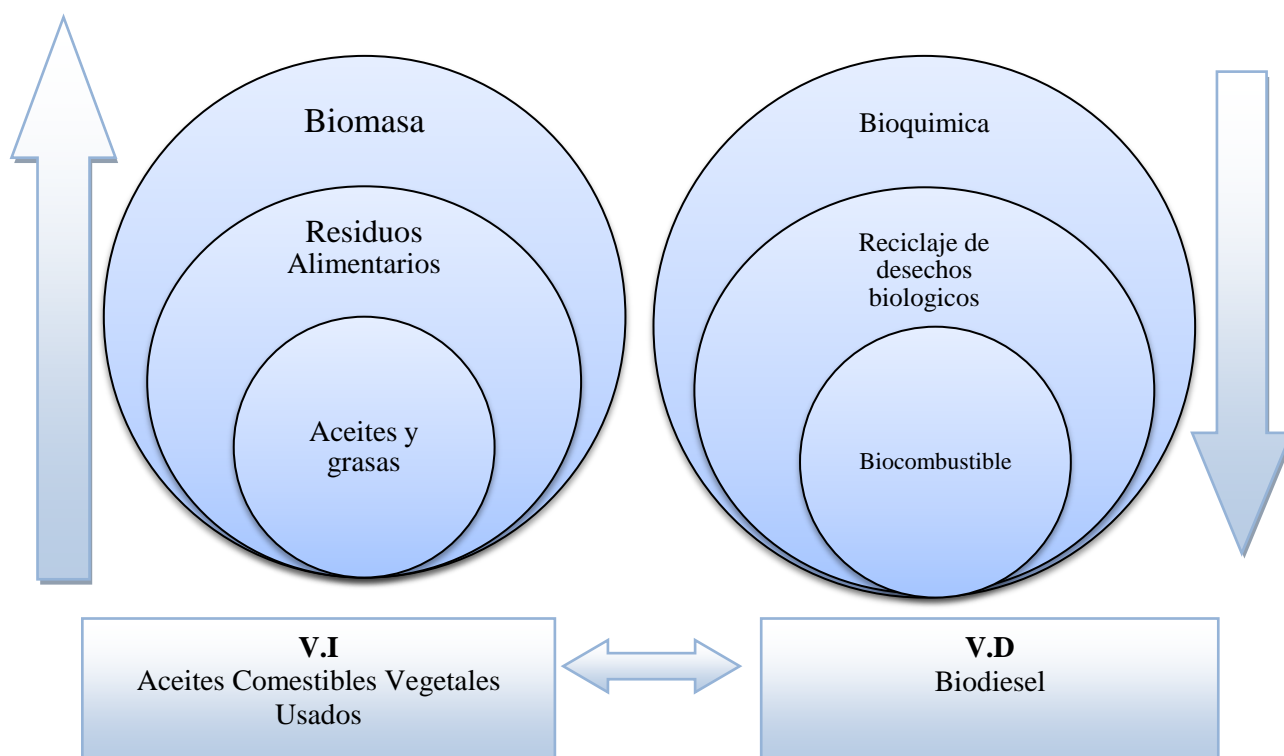


Figura 2.2: Categorización de variables

2.5 Hipótesis

Hipótesis nula (H_0): A partir de aceites comestibles vegetales usados (ACVUs) no se puede obtener biodiesel, para ser usado como sustituto parcial del combustible de origen fósil en motores de diesel.

Hipótesis alternativa (H_1): A partir de aceites comestibles vegetales usados (ACVUs) se puede obtener biodiesel, para ser usado como sustituto parcial del combustible de origen fósil en motores de diesel.

2.6 Señalamiento de variables de la hipótesis

Variable dependiente: Biodiesel

Variable independiente: Aceites comestibles vegetales usados.

Unidad de Observación: Muestras obtenidas con cada tratamiento.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Enfoque

Cuantitativo ya que recolecta y analiza datos para probar hipótesis que han sido formuladas previamente, enfatiza el análisis de partes o componentes del fenómeno en observación, confía en mediciones, uso de la estadística para hacer inferencias, requiere de precisión y exactitud. Para este enfoque la forma confiable de conocer la realidad es a través de la medición numérica y el análisis de datos, se basa en un proceso hipotético deductivo y busca generalizar los resultados obtenidos hacia poblaciones más amplias.

Cualitativo, ya que obtiene información que permitirá conocer el fenómeno en su totalidad antes de adelantarse a formular hipótesis, se basa en métodos de recolección de datos sin medición numérica, tales como descripciones y observaciones.

3.2 Modalidad básica de la investigación

Dentro del trabajo propuesto se va a utilizar las siguientes modalidades de investigación:

Investigación Documental.

Como una variante de la investigación científica, cuyo objetivo fundamental es el análisis de diferentes, utiliza técnicas muy precisas, de la documentación existente, que directa o indirectamente, aporte la información documental como parte esencial de un proceso de investigación científica, constituyéndose en una estrategia donde se observa y reflexiona sistemáticamente sobre realidades (teóricas o no) usando para ello diferentes tipos de documentos. Indaga, interpreta, presenta datos e informaciones sobre un tema determinado de cualquier ciencia, utilizando para ello, una metódica de análisis; teniendo como finalidad obtener resultados que pudiesen ser base para el desarrollo de la creación científica.

Investigación Experimental.

Es la investigación en la que se obtiene la información por medio de la observación de los hechos, y que se encuentra dirigida a modificar la realidad con el propósito de estudiarla en circunstancias en las que normalmente no se encuentran, con el fin de describir y analizar lo que ocurriría en determinadas condiciones.

Investigación Descriptiva

Mediante este tipo de investigación, que utiliza el método de análisis, se logra caracterizar un objeto de estudio o una situación concreta, señalar sus características y propiedades. Combinada con ciertos criterios de clasificación sirve para ordenar, agrupar o sistematizar los objetos involucrados en el trabajo indagatorio.

3.3 Nivel o tipo de investigación

Para la realización del trabajo investigativo en mención acude el siguiente tipo de investigación:

Investigación Explicativa

Se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido, los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas, como de los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos.

3.4 Población y muestra

En la presente investigación no se tomó en cuenta la población N, puesto que las muestras de aceite se las recolectará de forma directa en diferentes establecimientos de comida rápida de la ciudad de Ambato de forma aleatoria.

3.5 Operacionalización de las variables

LO OPERATIVO				
HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	ÍNDICES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
A partir de aceites comestibles vegetales usados (ACVUs) se puede obtener biodiesel, para ser usado como sustituto parcial del combustible de origen fósil en motores de diesel.	<p>Variable independiente:</p> <p>Aceites comestibles vegetales usados.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad • Viscosidad • Índice de peróxidos • Porcentaje de ácidos grasos libres 	<ul style="list-style-type: none"> • 0.9-0.92 g/ml • 30-53 cSt • Máximo 10 meqO₂/Kg • Menos de 1% para elaborar biodiesel 	<ul style="list-style-type: none"> • Picnómetro • Viscosímetro • Yodometría • Titulación ácido-base
	<p>Variable Dependiente:</p> <p>Biodiesel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad • Viscosidad • Punto de ignición • Rendimiento • Glicerina ligada 	<ul style="list-style-type: none"> • 0.9-0.92 g/ml • 30-53 cSt • Mínimo 130 °C • 75-90% • Menor de 10% 	<ul style="list-style-type: none"> • Picnómetro • Viscosímetro • ASTM D 93 • Medición volumétrica • A.O.C.S Ca 14-56

Elaborado por: Ana Cecilia Arias.

3.6 Plan de recolección de la información

3.6.1 Diseño Experimental

Se aplicó un diseño factorial 2^n con cuatro factores, para cada una de las metodologías; Metodología A: Reacción con calor y Metodología B: reacción con microondas.

El diseño aplicado evalúa tres respuestas experimentales: densidad a 20°C (gr/ml), viscosidad a 40°C (cSt) y rendimiento de biodiesel en función de la cantidad de aceite usado.

Tabla 3.1 Factores y niveles de estudio para el desarrollo del método de obtención de biodiesel con calor (Metodología A)

Factores	Niveles
A. Relación molar <i>metanol:aceite</i>	A1: 6:1 A2:7.5:1
B. Concentración de catalizador	B1: 1.0 % B2: 0.5 %
C. Tiempo de reacción	C1: 30 minutos C2: 60 minutos
D: Tipo de catalizador	D1: Hidróxido de sodio D2: Sodio metálico

Tabla 3.2 Factores y niveles de estudio para el desarrollo del método de obtención de biodiesel con microondas (Metodología B)

Factores	Niveles
A. Relación molar <i>metanol:aceite</i>	A1: 6:1 A2:7.5:1
B. Concentración de catalizador	B1: 0.5% B2: 1.0%
C. Potencia del Microondas	C1: 20% (200W) C2: 50% (500W)
D: Tipo de catalizador	D1: Hidróxido de sodio D2: Sodio metálico

3.6.2 Datos preliminares

3.6.2.1 Evaluación de la calidad del aceite vegetal usado

3.6.2.1.1 Determinación de la densidad

Se determinó la densidad del aceite con una balanza analítica y un picnómetro de 25ml. La densidad se determinó a temperatura ambiente con la ecuación siguiente:

$$Densidad (\rho) = \frac{\text{masa de aceite}}{25\text{ml}}$$

3.6.2.1.2 Determinación de la viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática del aceite se realizó a una temperatura de 40°C en un baño termostático y un viscosímetro de Cannon, se cronometró el tiempo de flujo de aceite y se calculó mediante la ecuación:

$$Viscosidad\ cinemática\ (\mu) = k \cdot t$$

Donde:

μ = Viscosidad cinemática (centistokes)

k = Constante del viscosímetro (centistokes/s)

t = tiempo de flujo del aceite (s)

3.6.2.1.3 Determinación del índice de refracción

La determinación de índice de refracción se realizó a temperatura ambiente, se colocó una gota de aceite en el porta muestras del refractómetro y se dio lectura al índice de refracción

3.6.2.1.4 Determinación del porcentaje de ácidos grasos libres

- a) Se preparó una solución de etanólica de hidróxido de sodio 0.1N, la misma que se estandarizó con ftalato ácido de potasio.
- b) Se pesó 10 gramos de aceite, se añadió 50 ml de etanol, se colocó la mezcla en un agitador magnético y se tituló los ácidos grasos libres con fenolftaleína como indicador con la solución anteriormente preparada, hasta alcanzar el punto de viraje de la fenolftaleína. El porcentaje de AGL se calculó con la ecuación:

$$\%AGL = \frac{V * M * N}{10 * m_{(aceite)}}$$

Donde:

V= volumen de NaOH usado para la titulación (ml)

M= peso molecular ácido oléico (g/mol)

n= Normalidad de la solución de NaOH

m= peso de la muestra de aceite (gr)

3.6.2.1.5 Determinación de índice de peróxidos

- a) Se pesó una cantidad adecuada de aceite en un matraz limpio y seco.
- b) Se añadió 10 ml de cloroformo y se disolvió rápidamente el aceite por agitación; se añadió 15 ml de ácido acético glacial y 1 ml de disolución saturada de yoduro de potasio.
- c) Se tapó el matraz y se agitó suavemente por 1 minuto; se dejó reposar 5 minutos en un lugar oscuro.
- d) Se añadió 75 ml de agua destilada, y se valoró el yodo liberado con solución de tiosulfato de sodio 0.01N, utilizando disolución de almidón como indicador.
- e) Paralelamente, se efectuó un ensayo en blanco.

El índice de peróxidos (IP) se expresa en miliequivalentes de oxígeno activo por kilogramo de muestra:

$$IP = \frac{(V - V_B) * N * 1000}{m_{(aceite)}}$$

Donde:

V = volumen de tiosulfato de sodio consumido en la muestra.

V_B = volumen de tiosulfato de sodio consumido en el blanco.

N = normalidad de la disolución de tiosulfato de sodio.

m = peso de la muestra.

3.6.3 Pre-tratamiento del aceite vegetal usado

3.6.3.1 Secado del aceite

El secado del aceite consiste en eliminar el agua que se encuentre presente en el aceite, para esto, el aceite fue calentado a una temperatura de 120°C por un tiempo de 20 minutos.

3.6.3.2 Metilación de ácidos grasos libres

El aceite fue sometido a un pre-tratamiento el cual consistió en una reacción de metilación de los ácidos grasos libres usando metanol en exceso y como catalizador ácido sulfúrico. Para el pretratamiento se usaron dos fuentes de energía: calor por convección y microondas.

Tabla 3.3: Parámetros para el pretratamiento a partir de 100ml del aceite vegetal usado con calor por convección

Parámetro	Valor
Temperatura de reacción (°C)	60
Tiempo de reacción (h)	1
Concentración de catalizador H ₂ SO ₄ (%)	1
Relación molar metanol aceite	10:1

Los parámetros de la Tabla 3.3 fueron establecidos según referencias bibliográficas (Mazo et al. 2008), en donde se menciona que para un aceite con alto porcentaje de AGL, deber ser pre-tratado con una relación molar metanol:aceite superior a 8:1 por un tiempo de 2 horas y con 1% de H₂SO₄, esto para una aceite con un contenido de 13% de AGL, sin

embargo para este caso una hora de reacción fue suficiente para disminuir los AGL, ya que al dejar la reacción por un tiempo de 2 horas la disminución de la acidez no fue significativa.

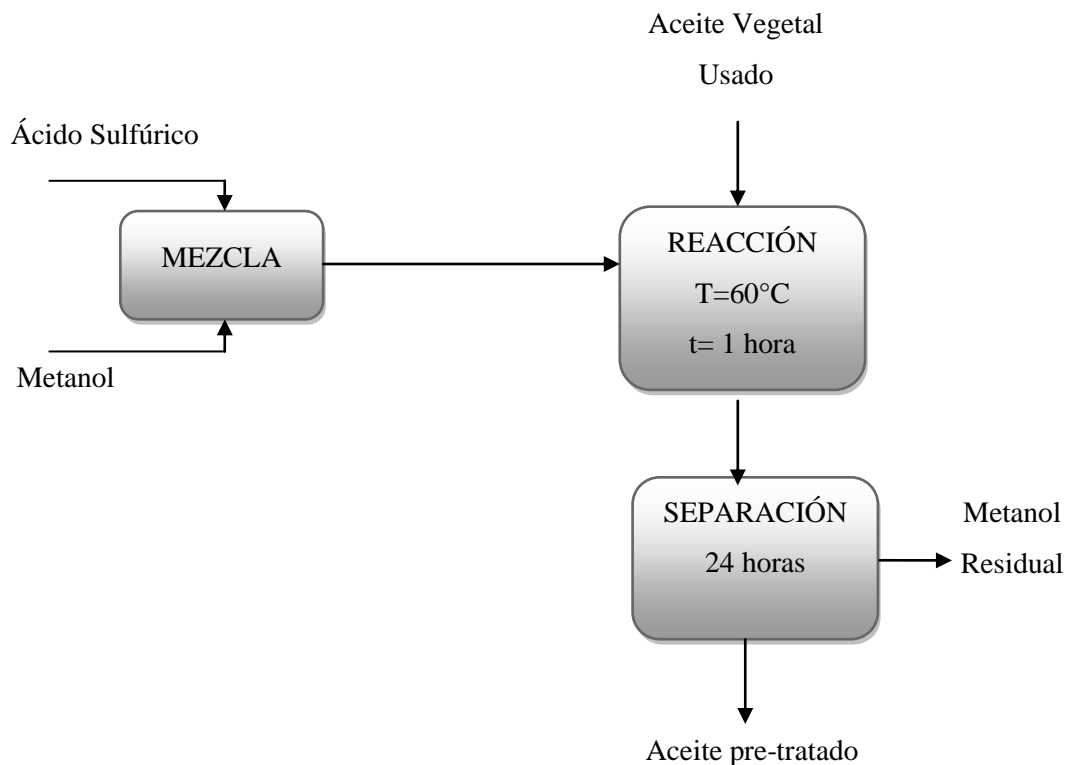


Figura 3.1: Diagrama del proceso de pre-tratamiento del aceite vegetal usado calor por convección

Tabla 3.4: Parámetros para el pre-tratamiento a partir de 100ml del aceite vegetal usado con la microondas

Parámetro	Valor
Potencia microondas (W)	200
Tiempo de reacción (min)	30
Concentración de catalizador H_2SO_4 (%)	1
Relación molar metanol aceite	10:1

Según *Mazo et al. 2008*, sobre la esterificación asistida con microondas muestran que el tiempo de reacción cuando se usan alcoholes de cadena corta el tiempo adecuado es de 30 minutos y que para los alcoholes ramificados, debe aumentarse el tiempo de reacción por encima de 60 minutos para disminuir la acidez a un valor por debajo de 1%, los demás parámetros son iguales a los tomados para la esterificación por convección. El microondas usado para la reacción tanto de pre-tratamiento como de transesterificación no posee agitador por lo que se hizo necesaria una agitación manual de 30 segundos cada 5 minutos hasta completar los 30 minutos de reacción con el objeto homogenizar la mezcla de aceite y metanol.

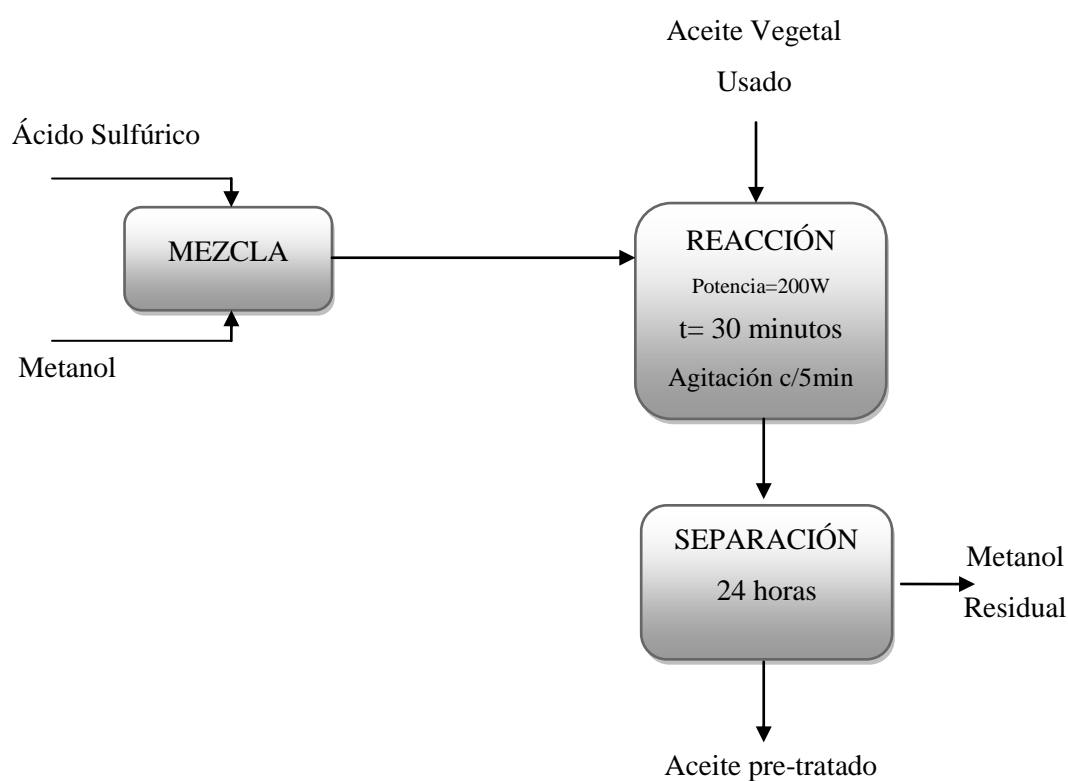


Figura 3.2: Diagrama del proceso de pre-tratamiento del aceite vegetal usando microondas

3.6.4 Determinación del proceso de transesterificación para la obtención del biodiesel

Para la obtención de Biodiesel se definieron los parámetros y las variables de la reacción de transesterificación, los principales factores que influyen en la metodología son:

- Alcohol y la relación molar alcohol:aceite

- Catalizador y su concentración
- Temperatura y tiempo de reacción
- Tipo de catalizador
- Potencia de salida del microondas

3.6.4.1 Transesterificación con calor (Metodología A)

Para la transesterificación se utilizó aceite vegetal comestible usado y metanol anhidro como reactivos y como catalizadores hidróxido de sodio y sodio metálico. Se realizó ensayos con un volumen de 100ml de aceite, en donde se varió la relación molar metanol:aceite, la concentración de catalizador, el tiempo de reacción y tipo de catalizador. La reacción se llevó a cabo a una temperatura de 60°C usando como fuente de calor una hornilla, con agitación de una batidora.

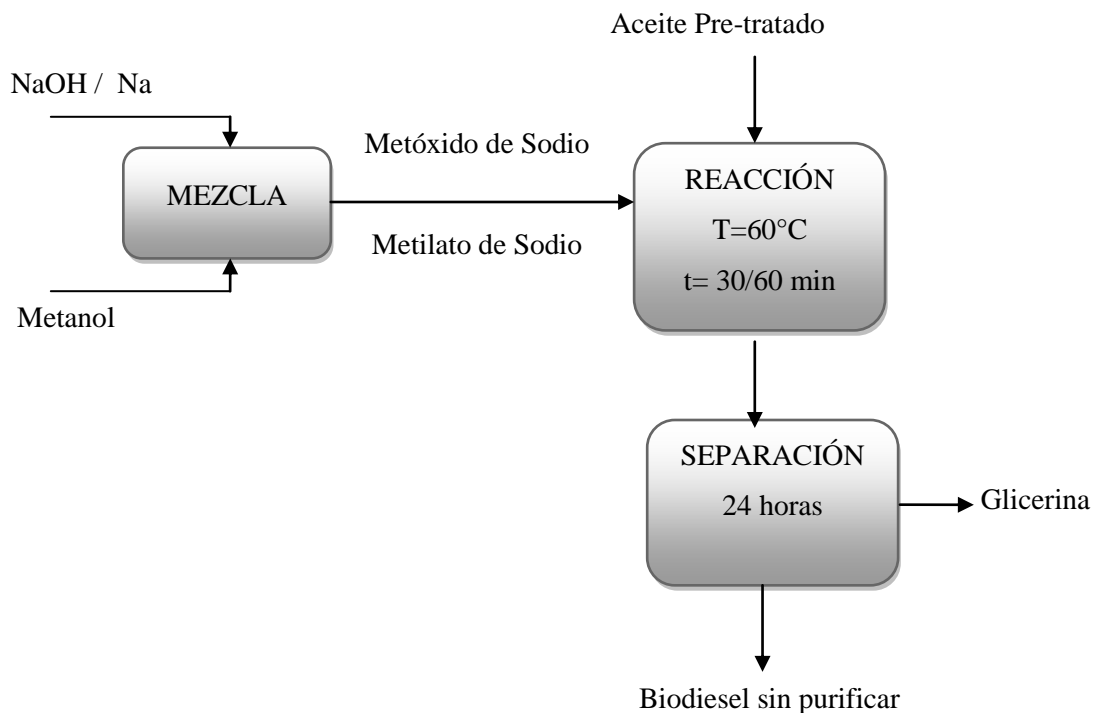


Figura 3.3: Diagrama de proceso para la obtención de biodiesel sin purificar, usando calor por convección

3.6.4.2 Transesterificación con microondas (Metodología B)

Para la transesterificación se utilizó aceite vegetal comestible usado y metanol anhidro como reactivos, como catalizadores hidróxido de sodio y metilato de sodio. Se realizó ensayos en los que se variará la relación molar metanol:aceite, concentración de catalizador y potencia de salida del microondas. La reacción se llevó a cabo en botellas de vidrio las cuales fueron sometidas a microondas por un tiempo de 30 minutos, con intervalos de 5 minutos para agitación manual de igual forma que en el pre-tratamiento. El diagrama de proceso para la elaboración de biodiesel, de acuerdo con la Metodología B se indica en el Gráfico 3.5.

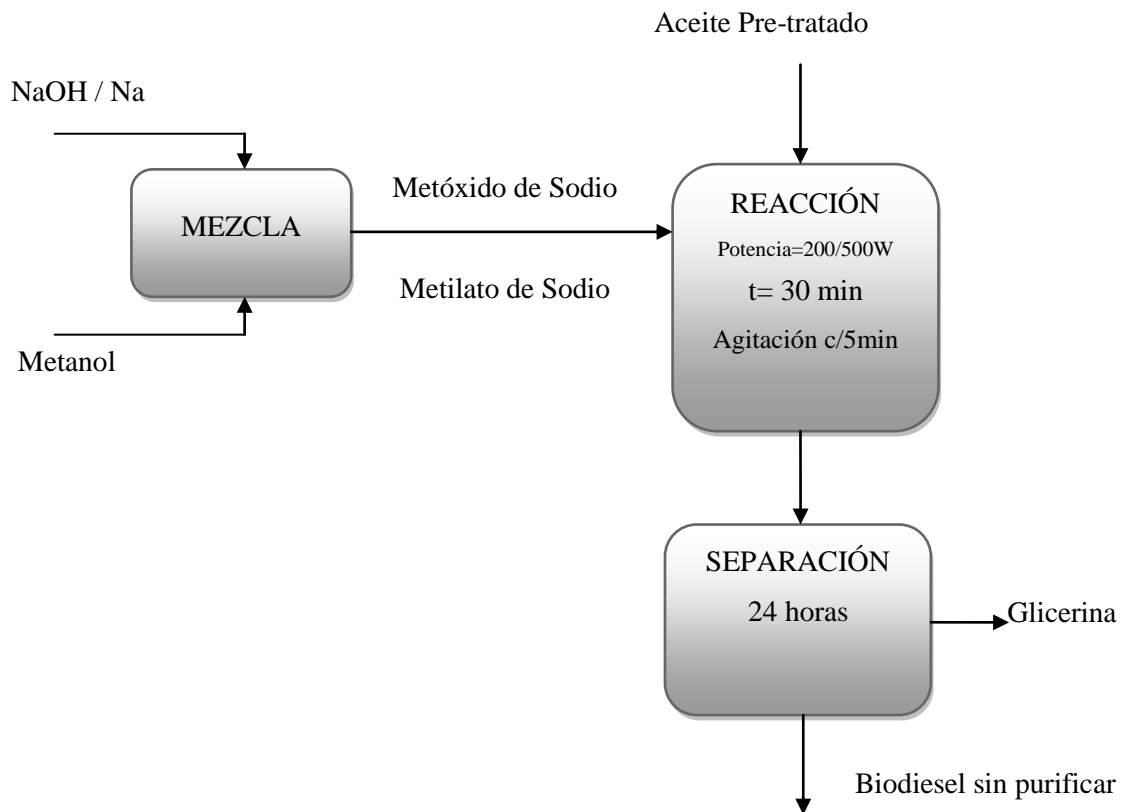


Figura 3.4: Diagrama de proceso para la obtención de biodiesel sin purificar usando microondas

3.6.5 Post-tratamiento del biodiesel obtenido

Tras la obtención del biodiesel éste se sometió a un lavado con agua tibia acidulada para eliminar los restos de jabón que se hayan formado durante el proceso y a la vez el ácido neutralizó los restos de catalizador presentes, el lavado se realizó hasta que el agua de lavado tuvo un pH neutro.

Finalmente se realizó el secado del biodiesel a una temperatura de 100°C para eliminar cualquier residuo de agua que quedara tras el lavado.

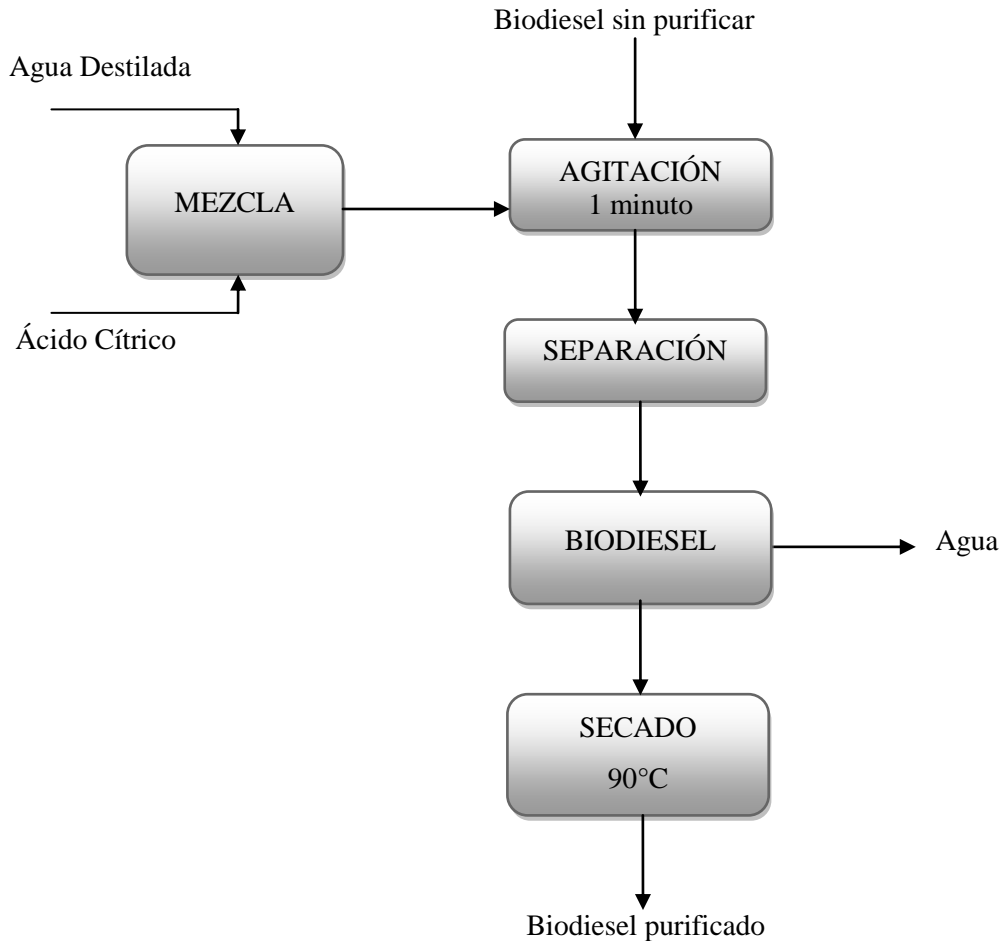


Figura 3.5: Diagrama de proceso para el post-tratamiento de biodiesel sin purificar

3.6.6 Evaluación de las propiedades del biodiesel como combustible

Una vez que se establecieron las condiciones de transesterificación para cada metodología se elaboró biodiesel a partir de 1000ml (900 g) de aceite, se midió pH, densidad, viscosidad, punto de ignición y se cuantificó la glicerina total, libre y ligada presente en la fase glicérica según la norma A.O.C.S Ca 14-56 como se muestra en las figuras 3.6, 3.7 y 3.8.

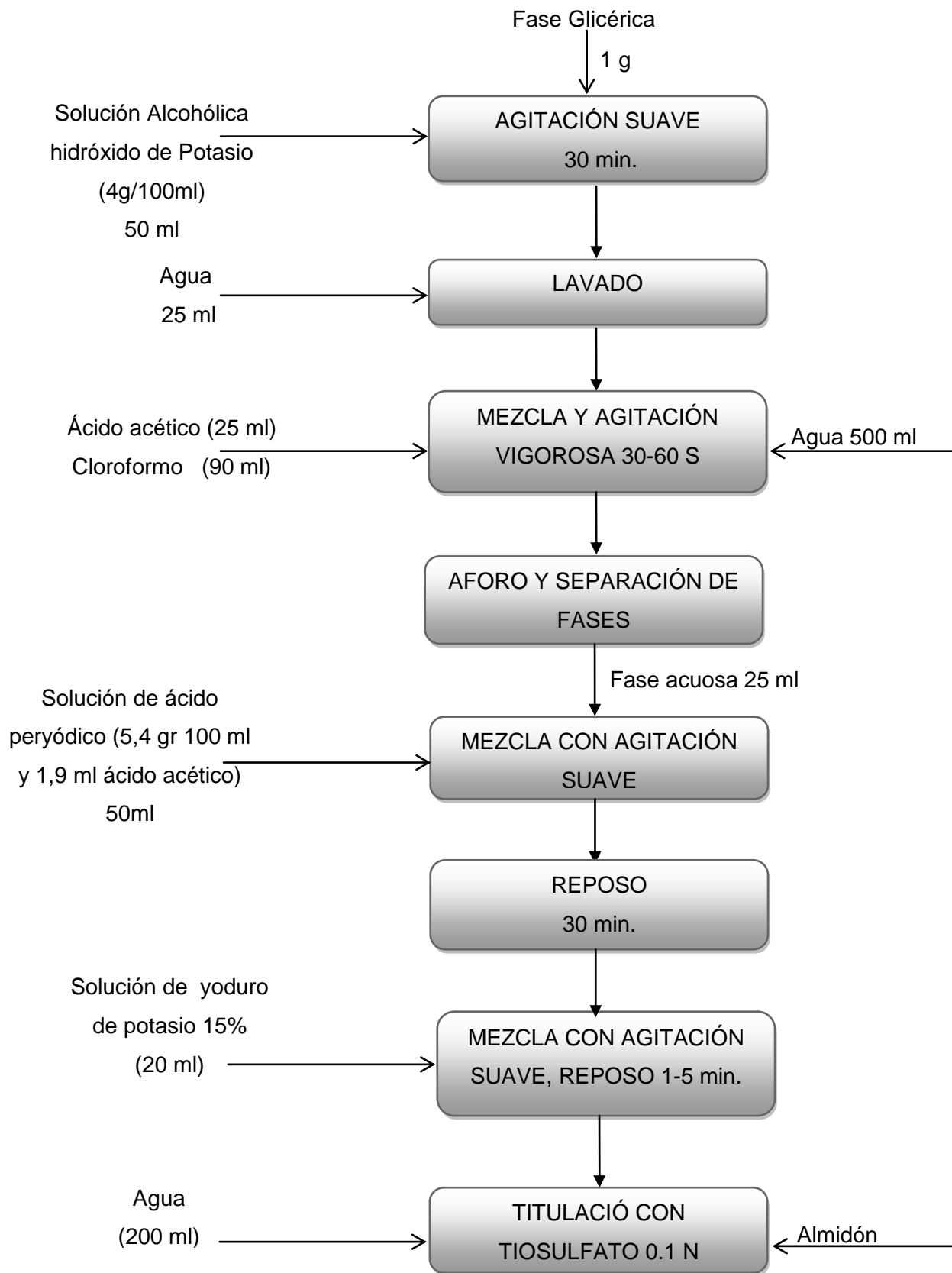


Figura 3.6: Diagrama de proceso para la determinación de glicerina total

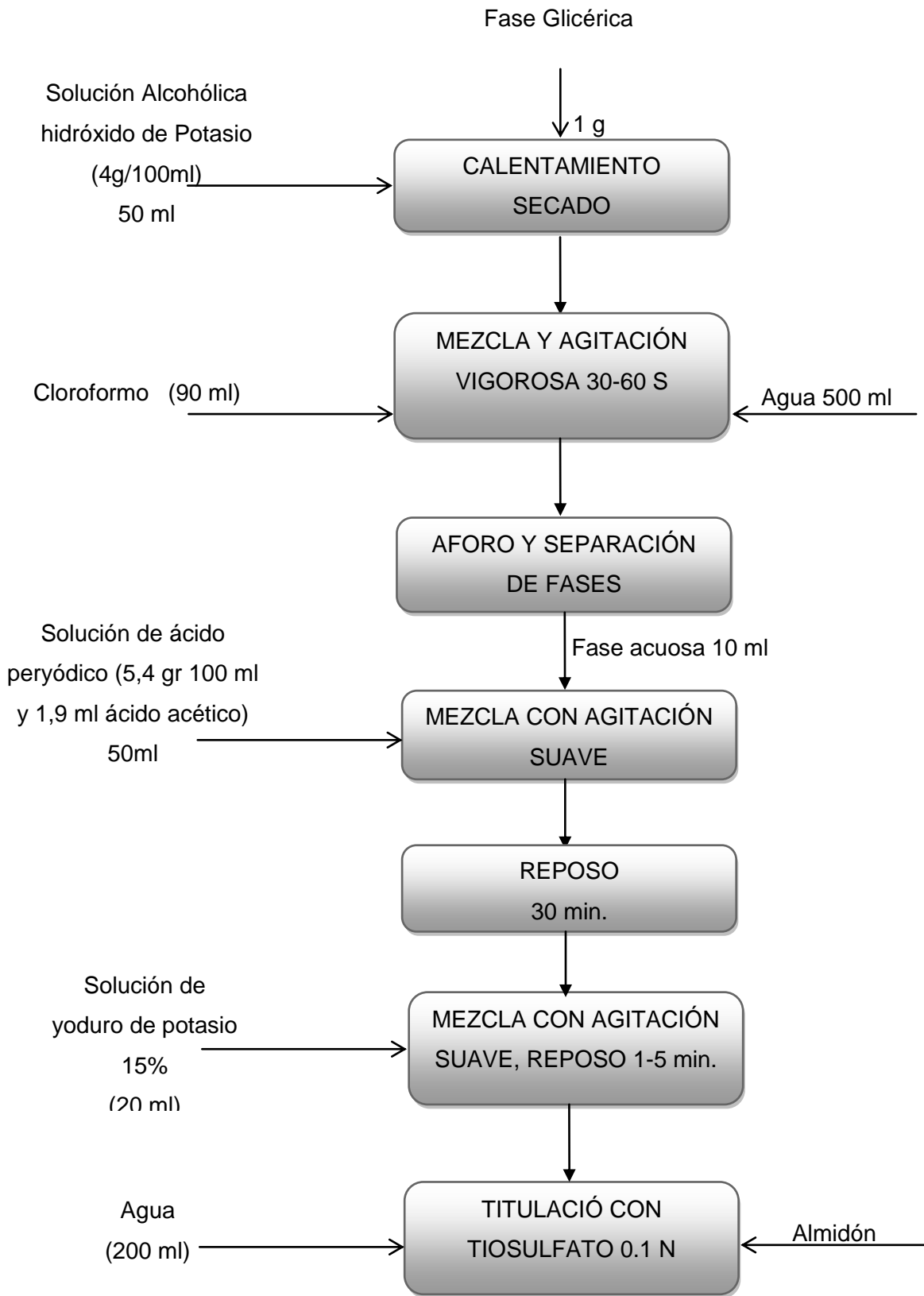


Figura 3.7: Diagrama de proceso para la determinación de glicerina libre

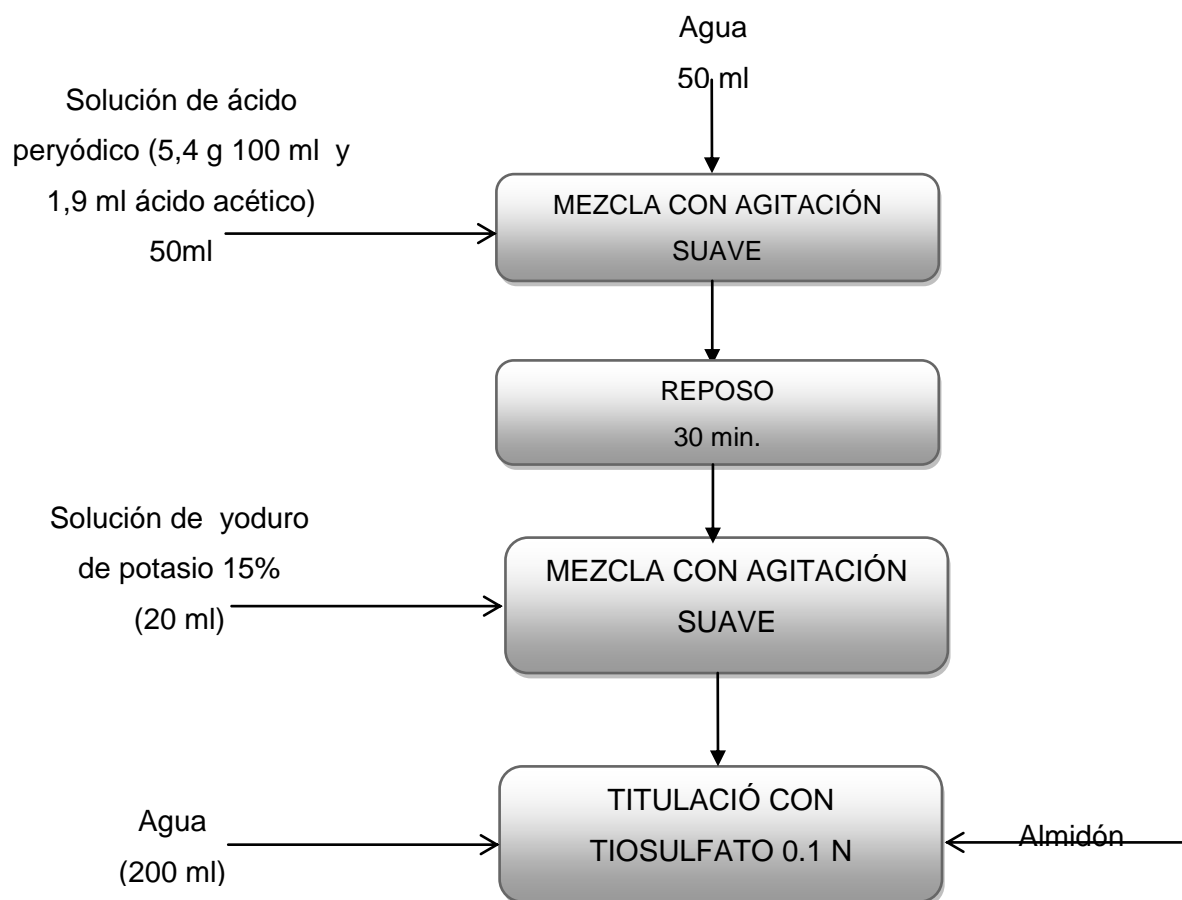


Figura 3.8: Diagrama de proceso para la determinación de glicerina total y libre en el blanco

3.7 Plan de procesamiento de la información

Las respuestas experimentales para el diseño planteado fueron: densidad, viscosidad y porcentaje de rendimiento, estos datos fueron analizados con el paquete estadístico StatGraphics Centurion XV.II, con el cual se determinó si hay diferencia significativa entre los tratamientos y se obtuvo las condiciones óptimas de obtención de biodiesel para cada una de las metodologías. La prueba *t de student* se aplicó para determinar si existe diferencia significativa entre el promedio máximo de rendimiento entre las dos metodologías, la cantidad de ácidos grasos libre después de aplicar el pre-tratamiento con calor por convección y con microondas y para la cantidad de glicerina ligada en la fase glicérica después del proceso de transesterificación, el análisis se realizó en el programa Excel 2007, considerando un nivel de significancia del 95%.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Datos preliminares

Para establecer las propiedades iniciales del aceite vegetal, se procedió a la evaluación de los índices de calidad con los procedimientos indicados en el acápite 3.6.1.1. En la Tabla 4.1 se indica los resultados promedio y desviación estándar de la evaluación de las propiedades del aceite usado

Tabla 4.1 Valores iniciales de diversos parámetros del aceite usado, obtenidos a partir de tres réplicas (R1,R2,R3)

Parámetro	R1	R2	R3	Promedio
Densidad a 20°C (gr/ml)	0.90	0.91	0.90	0.90±0.01
Viscosidad a 40°C (cSt)	32.3	31.8	32.5	32.20±0.36
Índice de refracción a 20°C	1.436	1.435	1.435	1.435±0.001
%AGL	9.23	9.18	9.20	9.20±0.02
Índice de peróxido (meqO ₂ /Kg aceite)	38.67	39.04	39.17	38.96±0.21

El aceite usado contiene un elevado índice de peróxidos y un alto porcentaje de ácidos grasos libres, indicativo de que el aceite está bastante deteriorado debido a las altas temperaturas a las que es expuesto y a su excesiva reutilización, el índice de peróxidos es una propiedad que no influye en la obtención de biodiesel, ya que solo afecta a las condiciones organolépticas del aceite y no a la estructura de los triglicéridos o de los ácidos grasos que intervienen en la reacción de transesterificación, pero es una información que se da para hacer evidente que el aceite esta reutilizado en exceso y

representa un peligro potencial para la salud, bajo este argumento se puede implementar una ordenanza municipal de recolección de aceite en establecimientos de comida y obtener continuamente la materia prima.

4.2 Pre-tratamiento del aceite

Debido al alto porcentaje de ácidos grasos libres (AGL) en el aceite, fue necesario realizar un pre-tratamiento catalítico ácido, como se describe en el acápite 3.6.2, con el fin de reducir la cantidad de ácidos grasos libres presentes y así evitar la formación de jabones y la disminución del rendimiento de biodiesel

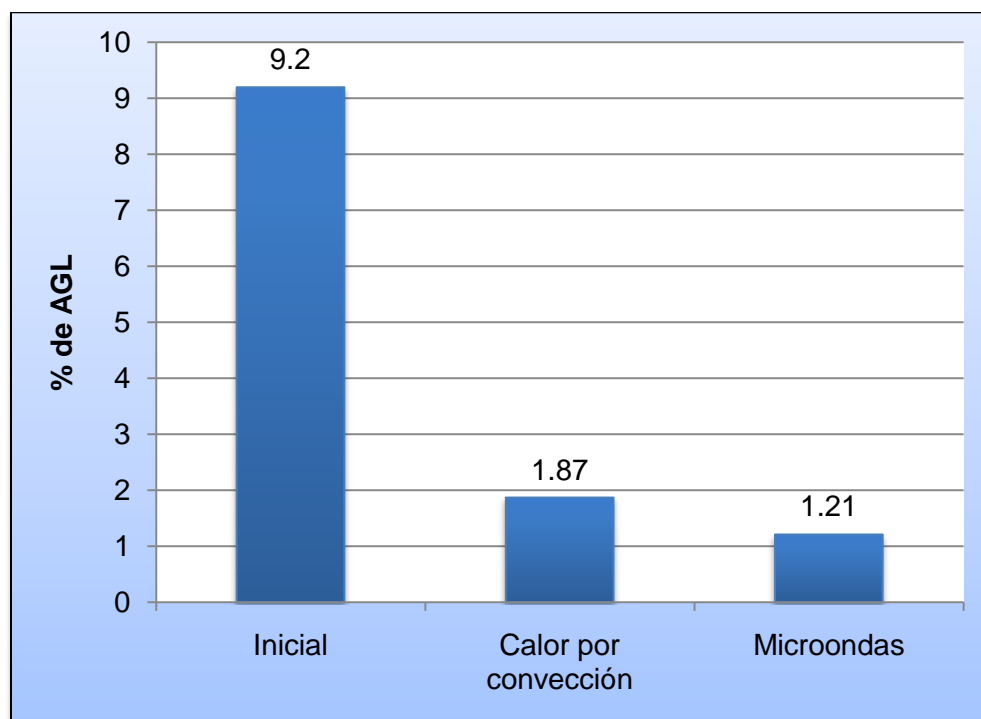


Figura 4.1: Porcentaje de AGL después del pre-tratamiento con cada metodología

El análisis *t de student* (ANEXO B) para los valores medios tras el pre-tratamiento indica que existe diferencia significativa en la disminución de ácidos grasos libres en el aceite. Se obtiene un menor número de ácidos grasos libres utilizando microondas (gráfico 4.1); para el análisis se consideró un nivel de confianza del 95% y un $\alpha=0.05$

4.3 Proceso de transesterificación para la obtención de biodiesel

4.3.1 Transesterificación con calor por convección-Metodología A

Para establecer las condiciones de transesterificación catalítica básica con calor por convección se utilizaron los valores de las variables independientes para cada uno de los tratamientos como se indica en la Tabla 3.1. Se consideró que la relación molar metanol:aceite mayor a la estequiométrica, con el propósito de desplazar el equilibrio químico hacia la reacción directa de formación de ésteres metílicos y glicerina. Los valores de los porcentajes de rendimiento en relación a la cantidad inicial de aceite, la densidad y viscosidad del biodiesel obtenido con la metodología A se detallan en el Anexo C. El análisis estadístico de los valores medios de rendimiento (Anexo E), indicó que existe diferencia significativa entre los diferentes siendo el tratamiento 14 (0.5% de sodio metálico como catalizador, relación molar metanol:aceite de 7.5:1 y tiempo de reacción de 60 minutos) el que presentó el mayor rendimiento. La densidad y viscosidad del biodiesel obtenido con todos los tratamientos de la metodología A, no se ve afectada significativamente.

La figura A y B del ANEXO M muestra como al usar el hidróxido de sodio como catalizador se favorece a una reacción de saponificación y se observa una capa de jabón en el fondo de la botella, al contrario de lo que sucede al usar sodio metálico, en donde ve únicamente la capa de glicerina y la capa biodiesel, no existe formación de jabón ya que este catalizador al reaccionar con el metanol no forma agua por lo tanto se obtiene mejores resultados y mayor rendimiento.

Optimización de respuesta para la metodología de calor por convección

El estudio estadístico muestra las condiciones para la optimización del proceso según la metodología de calor por convección. (Anexo E2). Se determinó que el porcentaje de catalizador es un factor que no influye en el rendimiento, ya que si se aumenta el porcentaje de éste de 0.5% a 1.0%, el rendimiento no se ve afectado. Los factores que más incidieron son el tipo de catalizador, tiempo de reacción y la relación molar metanol:aceite. El uso del sodio metálico como catalizador da un mayor rendimiento ya que este al reaccionar con el metanol no forma agua, por consiguiente no hubo formación de jabón y el rendimiento aumentó

4.3.3 Transesterificación con microondas - Metodología B

Para el establecimiento de las condiciones de transesterificación catalítica básica con microondas se utilizaron los valores de las variables independientes para cada uno de los tratamientos como se indica en la Tabla 3.4.

Los valores de los porcentajes de rendimiento en relación a la cantidad inicial de aceite, la densidad y viscosidad del biodiesel obtenido con la metodología B se detallan en el Anexo D. El análisis estadístico de los valores medios de rendimiento (Anexo H), mostró que, al aplicar los tratamientos de acuerdo con la Metodología B, éstos presentan una diferencia significativa entre ellos, el mayor rendimiento se obtuvo al aplicar el tratamiento 11 (1.0% de sodio metálico como catalizador, una relación molar metanol:aceite de 6.0:1 y una potencia de salida del microondas de 200W). Los valores de densidad y viscosidad del biodiesel obtenido con los tratamientos de la metodología B, no se ven afectados de manera significativa.

Las figuras C y D del ANEXO N muestran como la potencia de salida del microondas con es un factor que influye de manera importante en el rendimiento y los productos obtenidos, una potencia de 500W favorece la saponificación, la reacción se da bruscamente formando jabón y disminuyendo el rendimiento, una potencia de 200W es suficiente para que la reacción se dé favorablemente.

Optimización de respuesta para la metodología de microondas

El análisis estadístico para la optimización del proceso de transesterificación con microondas (Anexo F2) mostró que los factores que más influyen en la obtención del biodiesel son la potencia de salida del microondas y el tipo de catalizador. El mayor rendimiento se logró con sodio metálico y una potencia de 200W. En esta metodología, la relación molar metanol:aceite y el porcentaje de catalizador no influyen en el proceso, si se disminuye la relación molar de metanol de 7.5 a 6 y el catalizador de 1% a 0.5%, no se existe diferencia significativa en el rendimiento de biodiesel. Entonces las condiciones óptimas de rendimiento son: 0.5% de sodio metálico como catalizador, una relación molar metanol:aceite de 6.0:1 y una potencia de salida del microondas de 200W.

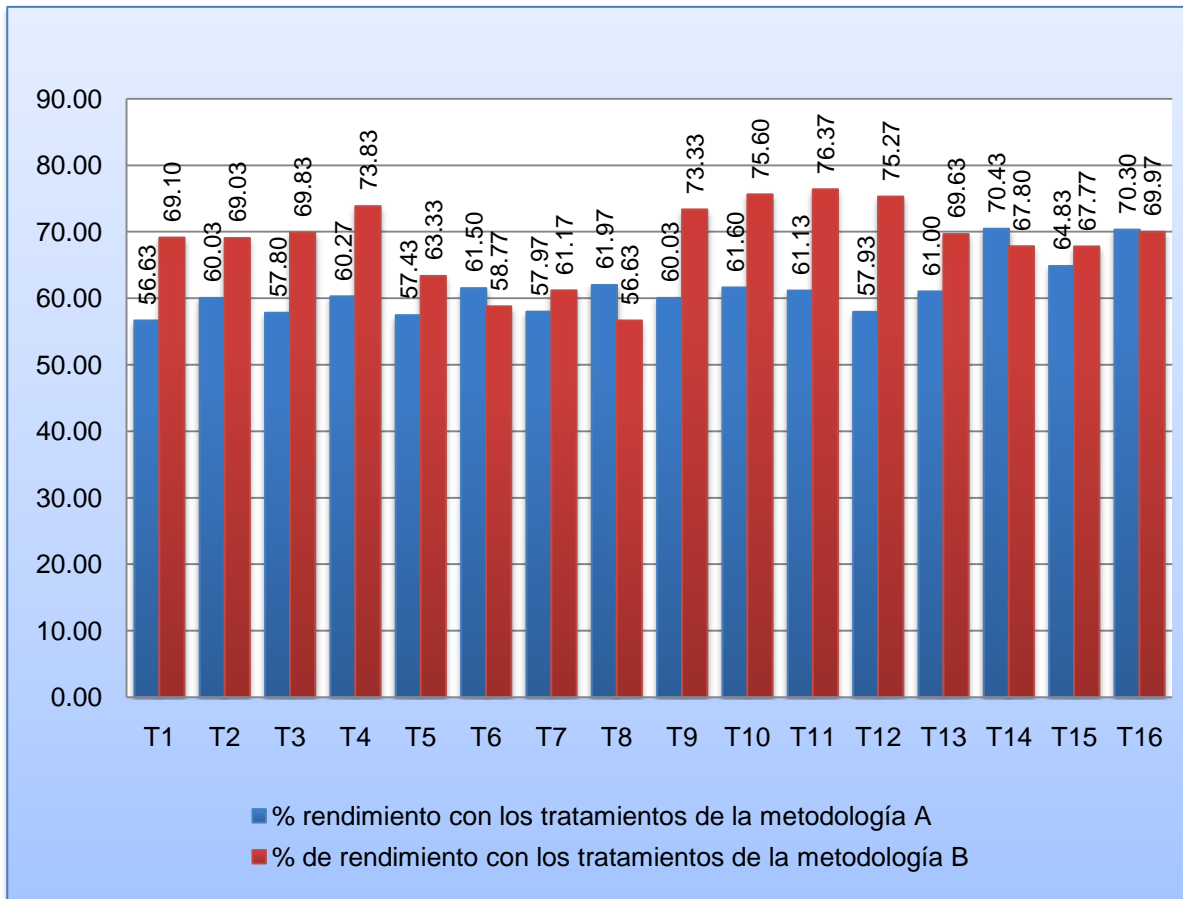


Figura 4.2: Porcentaje de rendimiento de biodiesel aplicando los tratamientos de las metodologías A y B

4.3.5 Post-tratamiento del biodiesel obtenido

El lavado con agua acidulada y el secado del biodiesel obtenido asegura que cumpla con los estándares de calidad exigidos pues este aún contiene impurezas derivadas del proceso, parte del metanol en exceso, jabones y trazas de catalizador proceso que permite neutralizar el catalizador alcalino residual y separar el jabón que se puede haber formado en la reacción de transesterificación. Los jabones se convierten en ácidos grasos libres (que quedan en el biodiesel) y en sales solubles en agua, así los restos de catalizador, jabón, sales, glicerina y metanol se quedan en el agua de lavado. El biodiesel está purificado cuando el agua de lavado tenga un pH neutro. El biodiesel se secó por evaporación a una temperatura de 90°C para separar toda el agua restante. El producto final de este proceso es el biodiesel purificado.

4.3.6 Comparación de rendimiento entre la metodología con calor por convección y microondas

La prueba estadística t entre los máximos rendimientos promedio obtenidos con las dos metodologías (Anexo K), indica que existe diferencia significativa entre los valores obtenidos para el análisis se consideró un nivel de confianza del 95% y un $\alpha=0.05$, un mayor rendimiento se obtiene usando microondas en el proceso de transesterificación, ya que este tipo de radiación electromagnética tiene la propiedad de disminuir tiempos de reacción, obtener altos rendimientos, evitar la obtención de productos colaterales y reducir procesos de purificación

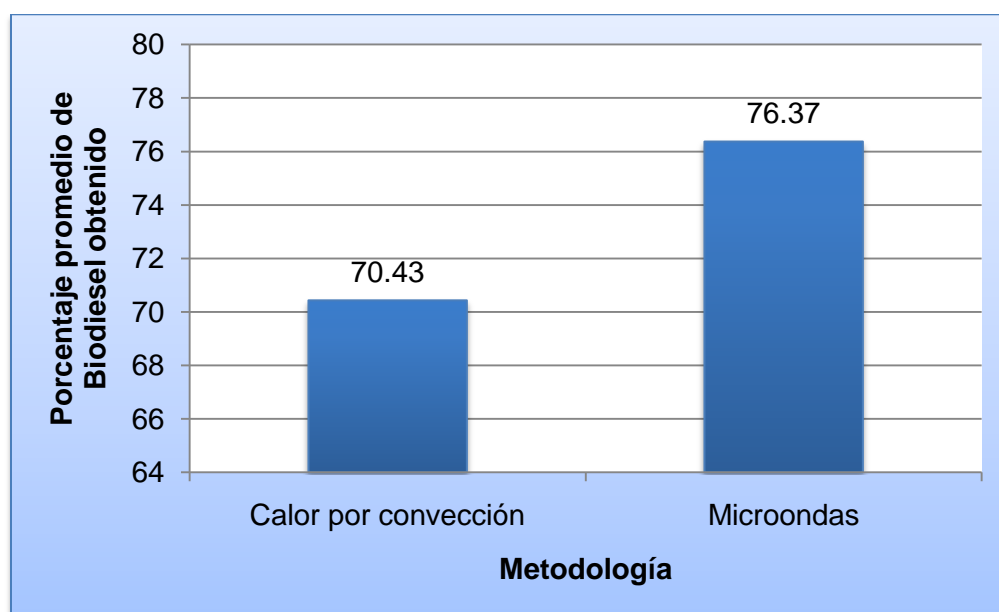


Figura 4.3: Porcentaje promedio de rendimiento máximo de biodiesel con calor y microondas.

4.4 Evaluación del biodiesel obtenido

Los mejores tratamientos fueron aplicados en la obtención de un litro de biodiesel, el cual fue sometido a evaluación de sus propiedades como combustible en los laboratorios de Petrocomercial.

Tabla 4.2: Evaluación del biodiesel purificado obtenido con las dos metodologías

ENSAYO	BIODIESEL CON CALOR	BIODIESEL CON MICROONDAS	DIESEL FÓSIL
Densidad a 15°C (gr/ml)	0.90	0.91	0.86 – 0.90
Viscosidad a 40°C (cSt)	4.67	4.81	3.50 – 5.00
Punto de ignición (°C)	87.65	88.93	52 - 96

Fuente: Laboratorio de Análisis de Control de calidad Petrocomercial Terminal Ambato

4.4.1 Cuantificación de glicerina libre total y ligada en la fase glicérica

En la cuantificación de glicerina libre y ligada en la fase glicérica formada como subproducto de la transesterificación, el análisis estadístico *t student* (Anexo L) indicó que existe diferencia significativa en el contenido de glicerina ligada para cada metodología, la Figura 4.4 se muestra los resultados obtenidos. El porcentaje de glicerina ligada es un parámetro que permite establecer la conversión a la que se llegó al final de la reacción de transesterificación, indica el porcentaje de monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos que no reaccionaron durante el proceso y que permanecen disueltos en la fase glicérica

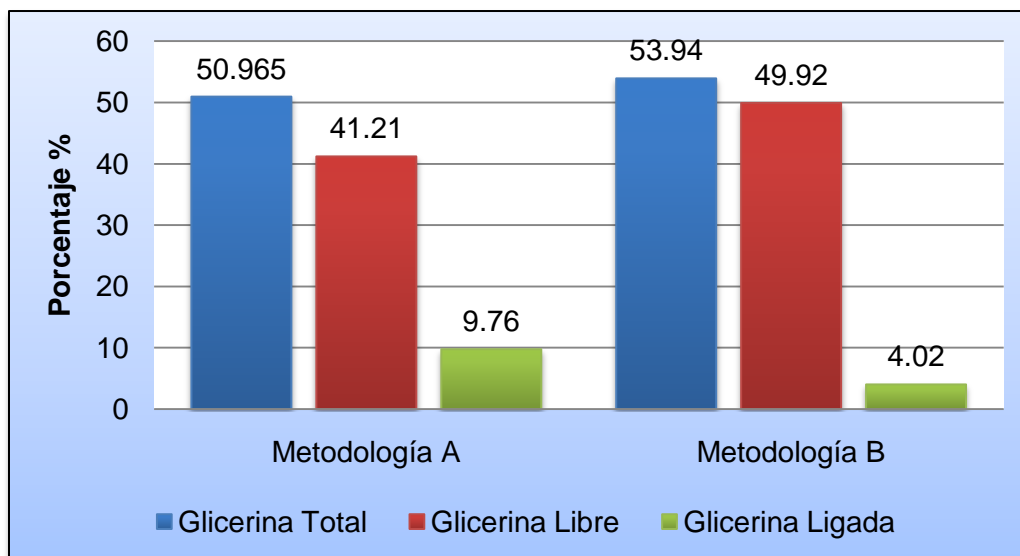


Figura 4.4: Porcentaje promedio de glicerina total libre y ligada en la fase glicérica del biodiesel obtenido con la metodología A y B

4.4.2 Prueba de combustión

La prueba de combustión se realizó en un tractor de la Facultad de Agronomía de la Universidad Técnica de Ambato, la prueba consistió en realizar una mezcla de 50% de diesel fósil y 50% de biodiesel, la mezcla se la hizo directamente en el tanque de combustible previamente evacuado, primero se vertieron cuatro litros del diesel fósil y posteriormente cuatro litros de biodiesel el orden en que se realiza la mezcla es importante ya que el biodiesel al tener una densidad ligeramente más alta tiende a irse al fondo del tanque y de esta manera obtener una mezcla más homogénea con el diesel fósil. La prueba comenzó con el encendido del motor y calentamiento del mismo, en ese momento se pudo observar que el tubo de escape desprendió humo gris, que como lo supo manifestar el operario del tractor, es común que emita ese tipo de humo. Tras un tiempo de calentamiento de aproximadamente cinco minutos se realizó un recorrido de treinta minutos por el campus de la Facultad de Agronomía, el recorrido incluyó tramos planos y tramos con pendientes para verificar que la potencia del tractor no se ve afectada por el uso de biodiesel. La primera observación importante que se hizo fue que la cantidad y color del humo que emanaba disminuyeron notablemente, los pocos gases que se desprendían no tenían color y el olor fue similar al aceite. Por otra parte el operario manifestó que el motor no sufrió ningún cambio en cuanto a su potencia, en las pendientes trabajó de manera satisfactoria y el ruido permaneció igual. Posterior a la prueba realizada se hizo una entrevista a dos operarios de tractores para conocer su opinión y apreciación del uso de biodiesel como sustituto parcial del diesel fósil, en esta entrevista los operarios manifestaron que les parece una excelente alternativa, principalmente porque los gases que se producen por la combustión afecta a su salud y la sustitución del combustible fósil por un biocombustible mejoraría sus condiciones de trabajo.

4.5 Estimación de los costos de obtención de biodiesel purificado

4.5.1 Costos a escala de laboratorio

El costo de producción de biodiesel a escala de laboratorio se realizó tomando en cuenta que los reactivos utilizados fueron de grado analítico, se comparó los costos entre el uso de hidróxido de sodio y sodio metálico como catalizador para el proceso de transesterificación, para el cálculo se tomaron en cuenta los rendimientos promedio bajo

las condiciones óptimas que se muestran en los ANEXOS E2 y H2 para cada metodología.

Tabla 4.3: Estimación del costo de obtención de un litro de biodiesel a con reactivos grado analítico

	Metodología A		Metodología B	
	NaOH ^a	Na ^b	NaOH ^c	%Na ^d
Ř (%)^e	61.5	70.43	69.1	73.33
Aceite (\$/L aceite)	0.32	0.28	0.29	0.27
\$Metanol/L aceite	3.00	2.63	2.13	2.01
\$Ácido Sulfúrico/L aceite	0.22	0.66	0.20	0.64
\$Catalizador/L aceite	0.16	0.13	0.14	0.13
\$Energía Eléctrica (kW-h) /L aceite	0.05	0.05	0.09	0.09
TOTAL (USD/ L)	3.75	3.75	2.86	3.14

^a:calor por convección, 1 litro de aceite, 0.5% NaOH, 7.5:1 metanol:aceite,60 minutos

^b:calor por convección, 1 litro de aceite, 0.5% Na metálico, 7.5:1 metanol:aceite,60minutos (óptimo)

^c:microondas, 1 litro de aceite, 0.5% NaOH, 6:1 metanol:aceite,200W

^d:microondas, 1 litro de aceite, 0.5% Na metálico, 6:1 metanol:aceite,200W (óptimo)

^e:Rendimiento promedio con las condiciones especificadas

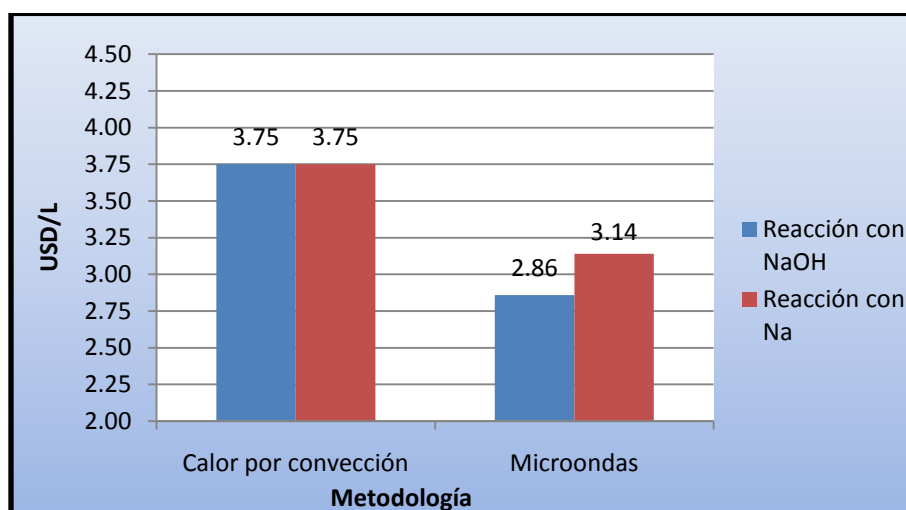


Figura 4.5: Costos de producción de biodiesel a escala de laboratorio con reactivos grado analítico

4.5.2 Costos a escala semi-industrial

Para la obtención del costo de producción de biodiesel a escala semi-industrial se tomó como base da cálculo 1litro de aceite, El costo de producción de biodiesel a escala semi-industrial se realizó tomando en cuenta que los reactivos utilizados fueron de grado comercial, se comparó los costos entre el uso de hidróxido de sodio y sodio metálico

Tabla 4.4: Estimación de los costos de obtención de biodiesel a escala semi-industrial con reactivos grado comercial.

	Metodología A		Metodología B	
	NaOH ^a	Na ^b	NaOH ^c	%Na ^d
Ř (%)^e	61.5	70.43	69.1	73.33
Aceite (\$/L aceite)	0.32	0.28	0.29	0.27
\$Metanol/L aceite	1.97	1.72	1.33	1.34
\$Ácido Sulfúrico/L aceite	0.16	0.57	0.13	0.55
\$Catalizador/L aceite	0.19	0.16	0.16	0.16
\$Energía Eléctrica (kW-h) /L aceite	0.05	0.05	0.09	0.09
TOTAL (USD/ L)	2.69	2.78	2.00	2.41

a: calor por convección, 1 litro de aceite, 0.5% NaOH, 7.5:1 metanol:aceite, 60 minutos

b: calor por convección, 1 litro de aceite, 0.5% Na metálico, 7.5:1 metanol:aceite, 60 minutos (óptimo)

c: microondas, 1 litro de aceite, 0.5% NaOH, 6:1 metanol:aceite, 200W

d: microondas, 1 litro de aceite, 0.5% Na metálico, 6:1 metanol:aceite, 200W (óptimo)

e: Rendimiento promedio con las condiciones especificadas

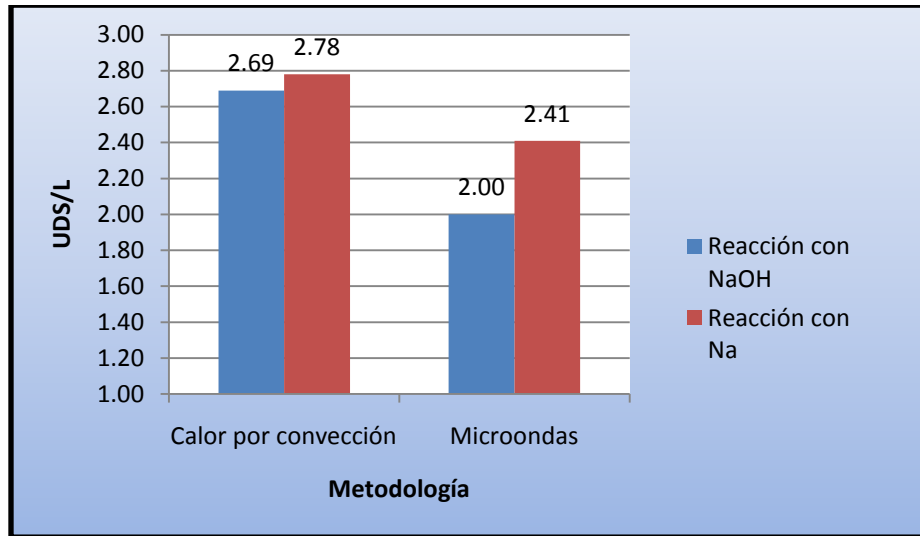


Figura 4.6: Costos de producción de biodiesel a escala semi-industrial con reactivos grado comercial

4.6 Verificación de la hipótesis

Tras haber realizado el procesamiento, análisis e interpretación de los resultados obtenidos con la aplicación de las dos metodologías descritas, se acepta la hipótesis de alternativa (H_1), afirmando que se puede obtener biodiesel a partir de aceites comestibles vegetales usados (ACVUs) y que éste puede ser usado como sustituto parcial del diesel de origen fósil.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El aceite vegetal usado como materia prima para la obtención del biodiesel contiene un promedio de 9.2% de ácidos grasos libres y 38.96 meqO₂/Kg aceite (índice de peróxidos), indicativo de que el aceite fue sometido a altas temperaturas, reutilizado varias veces y que no es apto para el consumo humano, ya que como se indica en el Codex Alimentarius el máximo de peróxido permitido es de 10 meqO₂/Kg. El aceite con alto contenido de ácidos grasos libres debe someterse a un pre-tratamiento en medio ácido y exceso de metanol con el fin de lograr que los ácidos grasos libres se metilen y así evitar la formación de jabón en el momento de la transesterificación catalítica básica de obtención de biodiesel. El pre-tratamiento del aceite logró disminuir la cantidad de ácidos grasos libres a 1.87% con la metodología de calor por convección y a 1.20% con la metodología de microondas. Existe diferencia significativa en la disminución del porcentaje de ácidos grasos libres con cada metodología, siendo la metodología con microondas la que logró una mayor disminución de ácidos grasos libres.

El factor que más influye en el rendimiento de obtención de biodiesel con la metodología de calor por convección es el tipo de catalizador, un mayor rendimiento se obtiene aplicando sodio metálico en el proceso. La concentración del catalizador es un factor que no influye en el rendimiento, si se aumenta la concentración de 0.5% a 1.0% el rendimiento no se ve afectado, al realizar el pre-tratamiento no es necesario un exceso de hidróxido de sodio para neutralizar los ácidos grasos libres. Las condiciones para la optimización del proceso de transesterificación utilizando calor por convección fueron: relación molar metanol: aceite 7.5:1, 0.5% de sodio metálico como catalizador y un tiempo de reacción de 60 minutos.

En la obtención de biodiesel con microondas, la potencia de salida es factor que más influye en el rendimiento, una potencia de 500W favorece la formación de jabones y disminuye el rendimiento de biodiesel, una potencia de 200W es suficiente para que la

reacción de transesterificación se lleve a cabo satisfactoriamente. Para esta metodología la concentración de catalizador es un factor que no influye en el rendimiento, el pre-tratamiento reduce la cantidad de catalizador necesario para la transesterificación, al variar la relación molar metanol:aceite de 6:1 a 7.5:1 el rendimiento no presenta diferencia significativa, ya que las microondas tienen la capacidad de reducir tiempos de reacción y elevar los rendimientos de las reacciones. Las condiciones en la que el rendimiento alcanza su máximo valor son: relación molar 6:1, 0.5% de sodio metálico como catalizador y una potencia de salida de 200W

El máximo rendimiento obtenido con calor por convección es de 70.43%. Con microondas el mayor rendimiento es 76.37%, Un mayor rendimiento se consigue al aplicar microondas en el proceso de obtención de biodiesel. La conversión del aceite en esteres metílicos también aumenta utilizando microondas como fuente energía, los valores promedio de glicerina ligada en la fase glicérica fueron de 9.76% usando calor por convección y 4.02% usando microondas, mientras menor sea el porcentaje de glicerina ligada el proceso es más eficiente porque este parámetro indica el porcentaje de monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos que no reaccionaron durante el proceso y que permanecen disueltos en la fase glicérica.

El costo de producción de biodiesel a escala industrial, con reactivos de grado comercial disminuye aproximadamente un 27% en comparación con el costo de producción a escala de laboratorio. El proceso de producción más rentable para la obtención de biodiesel es usando microondas como fuente de energía para la reacción e hidróxido de sodio como catalizador, el costo de producción por litro de biodiesel es de \$2.00. El uso de microonda implica un requerimiento de energía mayor, pero la ventaja es que el tiempo de producción se reduce a la mitad.

El reciclaje de aceites comestibles usados en la obtención de biodiesel es una alternativa viable desde el punto de vista técnico, ecológico y social. Si bien el costo del biodiesel es mayor que el de origen fósil, la producción de biodiesel a escala comercial será viable únicamente cuando se reconozca que una verdadera calidad de vida es aquella que respeta y está de la mejor forma posible en armonía con la naturaleza.

5.2 Recomendaciones

Estudiar con mayor profundidad el mecanismo de la reacción de transesterificación catalítica con microondas, variando los tiempos de reacción, cantidad de catalizador y potencia de salida, con el fin de optimizar los requerimientos de energía, reactivos y catalizadores en el proceso de obtención de biodiesel.

Realizar la cuantificación de los ésteres del biodiesel obtenido con las dos metodologías, con métodos instrumentales como cromatografía de gases o HPLC, de esta manera se obtendrá información de la pureza del biodiesel obtenido.

Evaluar las características de la glicerina, subproducto del proceso de transesterificación, la cual tras su purificación puede ser utilizada en múltiples procesos, en la industria farmacéutica en la elaboración de medicamentos en forma de jarabes o como excipiente y en cosmética en la elaboración de jabones de tocador.

Impulsar el desarrollo de un reactor para la producción de biodiesel a escala semi-industrial en las condiciones que se establecieron dentro de este trabajo de investigación.

El presente estudio puede servir como base para realizar futuras investigaciones en el campo de la utilización de microondas para procesos químicos ya que esta fuente de energía permite disminuir tiempos de reacción, obtener altos rendimientos, evitar la obtención de productos colaterales y reducir procesos de purificación. Así mismo con los datos obtenidos de las condiciones óptimas para la transesterificación y los procedimientos de pre-tratamiento, transesterificación, y post-tratamiento, se podrá diseñar un reactor para la elaboración de biodiesel a escala industrial, lo cual generará fuentes de empleo y un mejor aprovechamiento de los materiales de desecho.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.1 Datos Informativos

6.1.1 Título:

Diseño y construcción de un reactor batch para la obtención de biodiesel a partir de aceites comestibles vegetales usados

6.1.2 Institución Ejecutora:

Universidad Técnica de Amato - Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Bioquímica.

6.1.3 Beneficiarios:

Transporte Público Universidad Técnica de Ambato

6.1.4 Ubicación:

Universidad Técnica de Ambato

6.1.5 Tiempo estimado de ejecución:

6 meses

6.1.6 Equipo técnico responsable:

Dr. Roman Rodríguez- Ana Cecilia Arias

6.2 Antecedentes de la propuesta

A partir de la revolución en 1970, surge la implementación y desarrollo energético acompañado de la constante lucha por el equilibrio entre la alta productividad, la modernización y el ambiente. De aquí que las principales naciones, en especial las más preocupadas por dicho desarrollo tecnológico, promueven charlas y convenciones en las cuales llegan a acuerdos y compromisos por un ambiente sano.

Uno de los primeros resultados tangibles de las investigaciones realizadas por la UNALM (Universidad Nacional Agraria La Molina) e ITDG (Intermediate Technology Development Group) ha sido la implementación de un sistema piloto de producción y uso de biodiesel en la universidad, reaprovechando los aceites usados que desecha el comedor universitario para abastecer uno de los buses de transporte de alumnos con una mezcla de 20% de biodiesel y 80% de diesel convencional (mezcla denominada B20). Previamente, la calidad del combustible obtenido fue evaluada mediante análisis fisicoquímicos y pruebas de funcionamiento en un motor diesel estacionario. El sistema implementado incluye la recolección del aceite, purificación y transformación en biodiesel y la alimentación de un bus de la flota universitaria, mediante un surtidor especial instalado en el área de Servicios Generales de la UNALM. El proceso de transesterificación se realiza en un reactor piloto diseñado y construido por el equipo técnico del proyecto.

La Escuela Politécnica de Chimborazo a través de la Escuela de Ingeniería Química realizó un estudio sobre el diseño y construcción de un reactor batch para la obtención de Biodiesel a partir de aceites vegetales, el trabajo consistió en el dimensionamiento del equipo en base a pruebas de laboratorio en las cuales se establecieron las condiciones óptimas de obtención de biodiesel, de acuerdo a esto el reactor construido tiene una capacidad de 40 litros en estructura de acero inoxidable. El equipo permite la obtención de biocombustible en un rendimiento del 75% en volumen y características favorables para la utilización en un motor de combustión interna.

De acuerdo a M. González, la demanda proyectada de diesel en el año 2008 para uso automotor en Ecuador fue aproximadamente 12 M-barriles. En el supuesto que se

requiriera reemplazar (blending) un 5% de este volumen, se necesitaría aproximadamente 600 000 barriles de biodiesel al año, que a su vez corresponden a unos 25.2 M-galones por año, (equivalentes a unas 83.500 t)

6.3 Justificación

La construcción de un reactor para la producción de biodiesel se basa en la demanda actual las previsiones de demanda futura de combustibles respetuosos con el medio ambiente, denominados en general biocombustibles. La producción y el uso de los biocombustibles presentan diversas ventajas medioambientales, energéticas y socioeconómicas respecto a los combustibles convencionales derivados del petróleo.

En cuanto a sus ventajas desde el punto de vista energético los biocombustibles constituyen una fuente de energía renovable y limpia, el incremento del uso de los biocombustibles, contribuye a la reducción de la dependencia energética de los combustibles fósiles, y por tanto tiene efectos positivos para la seguridad de abastecimiento energético.

La construcción de reactores de mediana escala, su análisis y estudio para posterior implementación en plantas de obtención de biodiesel a escala industrial, y su puesta en producción, contribuyen a la creación de nuevos puestos de trabajo estables en el ámbito local y regional, y al desarrollo socioeconómico del área mediante la recolección de aceites vegetales comestibles usados, con fines energéticos, todo ello sin comprometer el medio ambiente ni los recursos limitados ya que la producción de biodiesel se presenta como una alternativa para la disposición adecuada de aceites usados evitando así la contaminación de efluentes de agua.

6.4 Objetivos

General

- Elaborar el diseño y construcción de un reactor batch para la obtención de biodiesel a partir de Aceites Comestibles vegetales Usados

Específicos

- Recolectar el aceite usado generado por locales de comida rápida de la ciudad de Ambato.
- Desarrollar el dimensionamiento y montaje del el equipo en base a las pruebas de laboratorio desarrolladas en el presente trabajo.
- Efectuar pruebas de obtención de biodiesel de acuerdo a los parámetros establecidos en el estudio.
- Realizar pruebas fisicoquímicas y evaluación como combustible del biodiesel obtenido.
- Evaluar el funcionamiento de motores a diesel utilizando mezclas en diferentes proporciones de biodiesel elaborado.

6.5 Análisis de factibilidad

Las ventajas más relevantes de esta tecnología es que la cinética de reacción es más rápida que en las otras tecnologías (a excepción de la supercrítica), lo que asegura un volumen menor de los reactores y que la separación de los productos se realiza a condiciones moderadas de temperatura y presión.

En la ciudad los locales de comida rápida son una vasta fuente de materia prima, a un costo muy bajo, sin embargo con la ayuda de las autoridades seccionales, mediante una ordenanza municipal de disposición final y recolección de aceites usados, se podría obtener una mayor cantidad de materia prima para el proceso requerido.

La desventaja de este mecanismo de producción es que requiere de la ausencia total de agua, puesto que ésta induce una hidrólisis en el reactor con la consecuente formación de jabones a partir del catalizador y de ácidos grasos libres o aceite, además de pérdidas de éster por solubilización en las aguas de lavado utilizadas en la purificación del biodiesel.

Una revisión de las plantas para la producción de biodiesel, muestra que este proceso cuenta con experiencia desarrollada, y es posible técnica y económicamente a escala industrial. Esta tecnología es utilizada ampliamente en Europa y los Estados Unidos para la obtención a escala industrial de biodiesel a partir de aceite de colza y girasol, entre otros.

La capacidad de producción mundial de Biodiesel era prácticamente inexistente a principios de la década de los noventa. Los 14 millones de toneladas producidas en 2007 exhiben un ritmo que puede arrojar magnitudes muy significativas en pocos años más.

El incremento de producción de biodiesel se explica por varios hechos:

1. La escalada de precios del petróleo
2. La decisión de la Unión Europea de incrementar la participación de los combustibles renovables en su matriz energética
3. Entre 2005 y 2007 se generalizan las leyes en distintos países del mundo que establecen incentivos fiscales y corte de mezcla obligatorios.

6.6 Fundamentación

El proceso batch es el método más simple para la producción de biodiesel. Se trata de reactores con agitación, donde el reactor puede estar sellado o equipado con un condensador de reflujo. Las condiciones de operación más habituales son temperatura de 65°C, aunque rangos de temperatura de 25°C a 85°C también han sido publicadas. Es necesaria una agitación rápida para una correcta mezcla en el reactor del aceite, el alcohol y el catalizador. Al finalizar la reacción la agitación debe ser menor para permitir la separación del glicerol de la fase de ésteres.

El gráfico 6.1 muestra un esquema del birreactor para la obtención de biodiesel, básicamente consta de dos etapas: en la primera se realizará el pretratamiento catalítico ácido con el fin de esterificar los AGL presentes y en la segunda se realizará la transesterificación catalítica básica. El decantador ayudará a la separación de la fase glicérica y los ésteres (biodiesel), además se contará con un filtro que evitara que residuos de jabón formado y otras impurezas pasen al producto final.

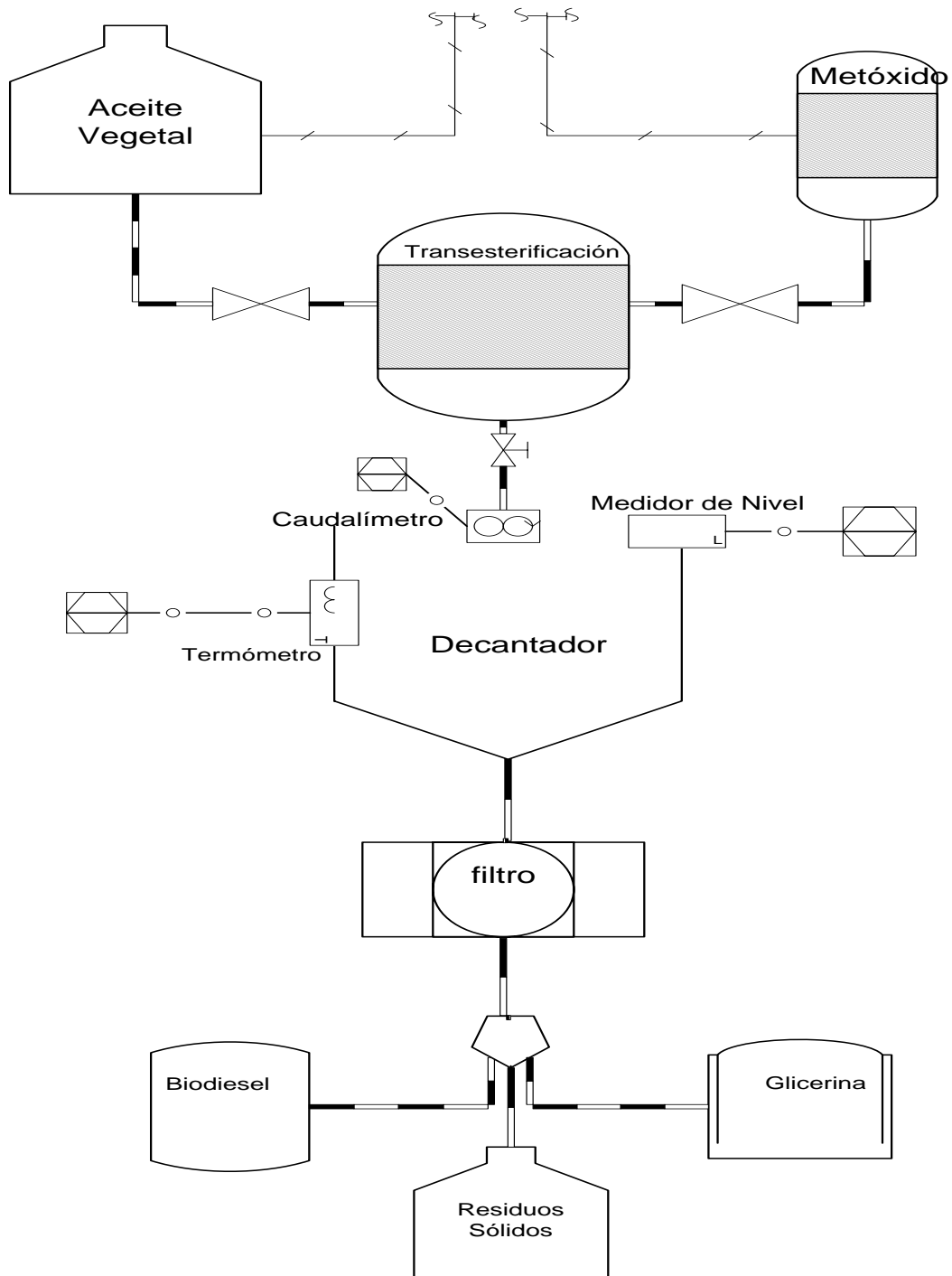


Figura 6.1: Esquema del reactor para obtención de biodiesel

Elaborado por: Ana Cecilia Arias

6.7 Metodología Modelo Operativo

Tabla 6.2: Modelo operativo para la implementación de un reactor batch para la obtención de biodiesel

Etapas	Actividades	Tiempo estimado
Planificación	<ul style="list-style-type: none">▪ Definición de metas▪ Desarrollo de planes▪ Coordinar Actividades	2 semanas
Organización	<ul style="list-style-type: none">▪ Definir Ubicación▪ Delegar Funciones▪ Estimar presupuesto▪ Cotizaciones	3 semanas
Dirección	<ul style="list-style-type: none">▪ Orientar al personal hacia los objetivos▪ Entrenar al personal en sus actividades	1 mes
Ejecución	<ul style="list-style-type: none">▪ Adquisición de recursos materiales y tecnológicos.▪ Montaje de reactor.▪ Prueba funcionamiento	2 meses
Control	<ul style="list-style-type: none">▪ Pruebas fisicoquímicas del producto▪ Evaluación del rendimiento.▪ Pruebas en motores.	2 semanas

Elaborado por: Ana Cecilia Arias

6.8 Administración

Tabla 6.3: Actividades de Administración para un proyecto

Actividad	Descripción
Definición del proyecto	Antes de iniciar el proyecto, es indispensable que el trabajo está entendido y que los responsables, tanto de la ejecución del proyecto como quienes recibirán los resultados del mismo, tienen una visión clara de los resultados esperados
Planeación del Trabajo	Se determina cómo se va realizar el trabajo. Esto implica entonces elaborar un plan para el trabajo.
Administración de Contratos	El contrato es el documento que rige las condiciones bajo las cuales se adquiere un bien y/o servicio.
Administración de Proveedores	En el transcurso del proyecto, la relación con los proveedores es muy variante, variación estrechamente ligada al avance del mismo.
Administración del Plan de trabajo	Describe lo que hay que hacer, el orden del trabajo, el esfuerzo requerido y quien está asignado a qué tarea, pero solo representa el mejor estimado de cómo completar el trabajo que queda por hacer en un momento dado de un proyecto.
Administración del Alcance	El alcance de un proyecto describe los límites del mismo y lo que el proyecto va a entregar, qué información se necesita y qué partes de la organización se verán afectadas.

Administración de Riesgos	El riesgo es una condición futura que existe fuera del control del grupo del proyecto, y que puede tener un impacto negativo sobre el resultado del proyecto si se llega a dar la condición.
Administración de la comunicación	Comunicar el estado del mismo.
Administración de la documentación	Para proyectos pequeños no hay necesidad de establecer todo un sistema administrativo, pero en la medida que el alcance del proyecto aumenta, se hace necesario tenerlo
Administración de la calidad	La calidad de un proyecto se mide por qué tan cerca están de cumplirse las expectativas, por lo tanto el objetivo central del equipo del proyecto es tratar de cumplir y exceder los objetivos iniciales
Administración de la medición	Se deben incluir métricas que determinen que tan bien se satisfacen los requerimientos del cliente y como se cumple con las expectativas. Dependiendo de los resultados, se toman los correctivos pertinentes.

Elaborado por: Ana Cecilia Arias

6.9 Previsión de la evaluación

Tabla 6.4: Previsión de la Evaluación

Preguntas Básicas	Explicación
¿Quiénes solicitan evaluar?	INNEN Ecuador
¿Por qué evaluar?	Provee información técnica de importancia para la optimización el proceso de transesterificación
¿Para qué evaluar?	Mejorar la calidad del biodiesel obtenido a partir de ACVUs
¿Qué evaluar?	Características fisicoquímicas y propiedades como combustible del biodiesel obtenido.
¿Quién evalúa?	Laboratorio de Fisicoquímica y Análisis Instrumental, UTA-FCIAL

Elaborado por: Ana Cecilia Arias

BIBLIOGRAFÍA

Altin R. and Selim C. (2001). The potential of using vegetable oil fuels as diesel engines. *Energy Conversion and Management*. 42, 529–538.

Al-Widyan M. and Al-Shyouk A. (2002). Experimental evaluation of the transesterificación of waste palm oil into Biodiesel, *Bioresour. Technol.* 85, 253–256.

APPA & Pricewaterhousecoopers. Una Estrategia de Biocarburantes para España (2005-2010).2005. *Adaptación a los objetivos de la Directiva 192 p.*

Arancibia Yulene y Calero Tatiana. (2011). Obtención de biodiesel a partir de aceite de semillas de oleaginosas de la provincia de Chimborazo, Riobamba, Tesis de grado previo la obtención de Ingeniera en Biotecnología Ambiental, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Escuela de Ciencias Químicas.

Arévalo Pablo et al. (2008). Obtención de biodiesel a partir de grasa bovina. *La Granja*. 8, 9-16.

ASTM. 2009. Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels. Accedido el 15.06.2011 desde:
<http://www.astm.org/Standards/D6751.htm>

Barnard Michael et al. (2007). Continuous-Flow Preparation of Biodiesel Using Microwave Heating, *Energy & Fuels* 21, 1777-1781

Barriga A. (2007). Producción y uso de aceites vegetales y Biodiesel en Ecuador, *Perspectiva Tecnológicas*. Accedido el 18.06.2011 desde:
<http://www.cdts.espol.edu.ec/documentos/biodiesel.pdf>.

Brito A. et al. (2009). Biodiesel Production from Waste Oil Using Mg-Al Layered Double Hydroxide Catalysts, *Energy & Fuels*. 23, 2952–2958

Castro Paula et al. Opciones para la producción y uso de biodiesel en el Perú, *Primera edición: 2007 ©Soluciones Prácticas – ITDG*.

Cedeño O. et al (1999). Estudio de la densidad y de la viscosidad de algunos ácidos grasos puros, *Grasas y Aceites* Vol. 50. Fase. 5, 359-368.

Cetinkaya Merve and Filiz Karaosmanoglu (2005), A New Application Area for Used Cooking Oil Originated Biodiesel: Generators, *Energy and Fuels*, 19, 645-652

Chica F. et al. (2009). Estudio y aplicación del biodiesel, *Ingenius*. 2, 3-9.

Chin L. et al. (2009). Process Optimization for Biodiesel Production from Waste Cooking Palm Oil (*Elaeis guineensis*) Using Response Surface Methodology. *Energy & Fuels* 23, 1040–1044

Demirbas Ayhan. (2009). Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification. *Energy Conversion and Management*. 50, 923-927.

Di Serio Martino et al. (2008), Heterogeneous Catalysts for Biodiesel Production, *Energy and Fuels*. 22, 207–217

Encinar José M. (2005). Biodiesel from Used Frying Oil. Variables Affecting the Yields and Characteristics of the Biodiesel. *Ind. Eng. Chem*. 44, 5491-5499.

Espinoza Alex y Palma Paúl (2009), Diseño y construcción de un reactor batch para obtención por transesterificación de biodiesel a partir de aceite de cocina

reciclado, Riobamba, Tesis de grado previo la obtención de Ingeniero Químico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Escuela de Ingeniería Química.

Fu Baosong et al. (2009), Biodiesel from Waste Cooking Oil via Heterogeneous Superacid Catalyst $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$. *Energy & Fuels* 23, 569–572.

Fukuda H. et al. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils, *Journal of Bioscience and Bioengineering* 92(5), 405–416.

González M. (2007). Programa Nacional de Biocombustibles, Primer Simposio ECUADOR-BRASIL de Biocombustibles.

Han Minghan et al. (2009). Preparation of biodiesel from waste oils catalyzed by a Brønsted acidic ionic liquid. *Bioresource Technology*. 100, 2308–2310.

IDAE , Instituto para la diversificación y ahorro de energía

Leadbeater Nicholas E. and Stencel Lauren M. (2006). Fast, Easy Preparation of Biodiesel Using Microwave Heating, *Energy & Fuels*. 20, 2281-2283.

Liu Shaoyang et al. (2008). Efficient Production of Biodiesel Using Radio Frequency Heating. *Energy & Fuels* 22, 2116–2120.

Loaiza Francia. (2003). Cinética de la reacción de transesterificación del aceite de higuera en la obtención de biodiesel, Manizales, Trabajo de Grado para optar al Título Ingeniera Química, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Ingeniería Química

Mangesh G. Kulkarni and Ajay K. Dalai. (2006), Waste Cooking Oils An Economical Source for Biodiesel. *Ind. Eng. Chem.* 45, 2901-2913

Mazo Paula et al. (2008). Esterificación de los ácidos grasos libres (FFA) del aceite crudo de palma. Calentamiento convencional vs microondas, *Scientia et Technica Año XIII, No 35. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701*. Optimización de la Producción de Alquil Ésteres a partir de Aceite de Palma, empleando la Metodología de Superficie de Respuesta *Información Tecnológica 19(5) 37-48*

Meher et al. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification, *Energy & Fuels 10, 248–268*.

Ministerio de Electricidad y Energía Renovable Ministerio de Minas y Petróleo Diciembre, 2007 ,Accedido el 6.06.2011 desde:
http://www.bnamericas.com/news/petroleoygas/Congreso_aprueba_proyecto_de_ley_de_biocombustibles_en_1er_debate.

Pinzi S. et al. (2009). The Ideal Vegetable Oil-based Biodiesel Composition: A Review of Social, Economical and Technical Implications. *Energy & Fuels 23, 2325–2341*.

Plan Nacional de Desarrollo para El Buen Vivir 2009 -2013, SENPLADES, Decreto Ejecutivo 1577 de febrero de 2009.

Van Gerpen J. (2005). Biodiesel processing and production, *Fuel Processing Technology 86, 1097–1107*.

Xiangmei Menga et al. (2008). Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test. *Fuel Processing Technology 89, 851 – 857*

Yong Wang et al. (2007). Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process, *Energy Conversion and Management 48,184–188*.

Yuan H. et al. (2009). Synthesis of Biodiesel Using Microwave Absorption Catalysts, *Energy & Fuels* 23, 548–552

Zheng S. et al. (2006). Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil, *Biomass and Bioenergy*. 30, 267–272.

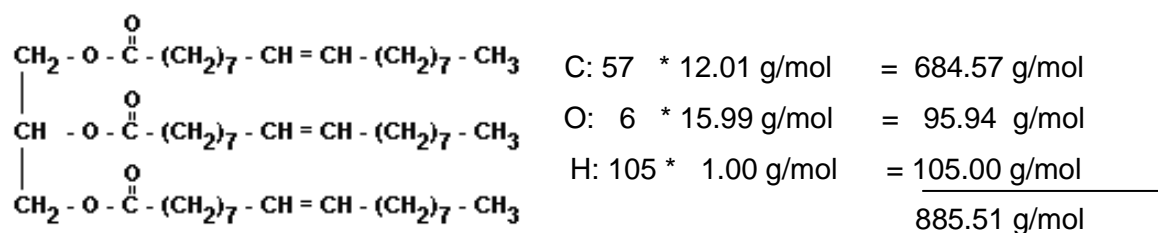
ANEXOS

ANEXO A

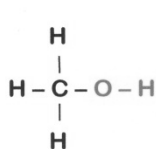
Ejemplo de cálculo para las cantidades de reactivos en el proceso de transesterificación

Ejemplo de cálculo para la estimación de la relación molar metanol aceite

Para la realización del cálculo del peso molecular del aceite vegetal se va a asumir que los ácidos grasos que componen al triglicérido son de ácido oléico, es decir el peso molecular será de una trioleína.



TRIOLEÍNA



$$\text{C: } 1 * 12.01 \text{ g/mol} = 12.01 \text{ g/mol}$$

$$\text{O: } 1 * 15.99 \text{ g/mol} = 15.99 \text{ g/mol}$$

$$\text{H: } 4 * 1.00 \text{ g/mol} = 4.00 \text{ g/mol}$$

$$32.00 \text{ g/mol}$$

METANOL

$$1 \text{ mol aceite} = 885.51 \text{ g} \quad \text{densidad aceite} = 0.9000 \text{ g/ml}$$

$$1 \text{ mol metanol} = 32.00 \text{ g} \quad \text{densidad metanol} = 0.7914 \text{ g/ml}$$

RELACIÓN MOLAR METANOL ACEITE 6:1

$$6 \text{ moles metanol} : 1 \text{ mol aceite}$$

$$192.00 \text{ g metanol} : 885.51 \text{ g aceite}$$

$$242.60 \text{ ml metanol} : 983.90 \text{ ml aceite}$$

$$983.90 \text{ ml aceite} \longrightarrow 242.60 \text{ ml metanol}$$

$$100.00 \text{ ml aceite} \longrightarrow X$$

$$X = 24.65 \text{ ml metanol}$$

Ejemplo de cálculo para la estimación de la cantidad de catalizador

Catalizador: Hidróxido de sodio (NaOH)

100ml de aceite = 90g de aceite

$$\begin{array}{rcl} 90\text{g aceite} & \longrightarrow & 100\% \\ X & \longrightarrow & 1\% \\ X = 0.9 \text{ g de NaOH} \end{array}$$

Por cada 100ml de aceite se debe colocar 0.9g de NaOH y disolverlo en la respectiva cantidad de metanol.

Catalizador: Sodio metálico (Na)

Si queremos obtener la misma concentración de sodio entonces:

$$\frac{0.9\text{g NaOH}}{0.100 \text{ L}} \left| \frac{1\text{mol NaOH}}{40\text{g NaOH}} \right. = \mathbf{0.225M}$$

Entonces tenemos 0.225 moles de Na por cada litro de aceite

$$\frac{0.225 \text{ moles}}{0.1 \text{ L}} \left| \frac{23 \text{ g Na}}{1\text{mol Na}} \right. = \mathbf{0.518 \text{ g de Na}}$$

Entonces por cada 100 ml aceite debemos disolver 0.518 gramos de sodio metálico en la cantidad respectiva de metanol.

ANEXO B

Análisis estadístico de la evaluación de AGL tras el pre-tratamiento con las metodologías A y B

Para el análisis estadístico se tomaron los datos como apareados para la prueba *t* de student.

	Metodología A	Metodología B
% AGL tras el pre-tratamiento	1.85	1.23
	1.87	1.20
	1.88	1.22

Prueba *t* para porcentaje de AGL tras el pre-tratamiento

	Metodología A	Metodología B	Comparación
Media	1.86667	1.21667	
Varianza	0.00023	0.00023	
Observaciones	3	3	
Grados de libertad	2	2	
Estadístico <i>t</i>			42.55249
P(T<=t) una cola			0.00028
Valor crítico de <i>t</i> (una cola)			2.91999
P(T<=t) dos colas			0.00055
Valor crítico de <i>t</i> (dos colas)			4.30265

Valor estadístico *t* > Valor crítico de *t*, existe significancia estadística entre el porcentaje de ácidos grasos libres tras el pre-tratamiento con cada una de las metodologías descritas, un menor porcentaje se obtiene usando microondas.

ANEXO C

Porcentaje promedio de rendimiento, densidad y viscosidad del biodiesel obtenido con la metodología A

Tratamientos.					Rendimiento (%biodiesel)	Densidad 20°C (g/ml)	Viscosidad 40°C (cSt)
Cod.	Relación molar (metanol:aceite)	Concentración Catalizador (%)	Tiempo de reacción (minutos)	Tipo Catalizador			
T1	6.0:1	0.5	30	NaOH	56.6	0.89	4.8
T2	7.5:1	0.5	30	NaOH	60.0	0.90	4.8
T3	6.0:1	1.0	30	NaOH	57.8	0.90	4.9
T4	7.5:1	1.0	30	NaOH	60.3	0.89	4.8
T5	6.0:1	0.5	60	NaOH	57.4	0.89	4.8
T6	7.5:1	0.5	60	NaOH	61.5	0.89	4.8
T7	6.0:1	1.0	60	NaOH	58.0	0.89	4.9
T8	7.5:1	1.0	60	NaOH	62.0	0.89	4.8
T9	6.0:1	0.5	30	Na	60.0	0.90	4.8
T10	7.5:1	0.5	30	Na	61.6	0.88	4.7
T11	6.0:1	1.0	30	Na	61.1	0.89	4.7
T12	7.5:1	1.0	30	Na	57.9	0.89	4.8
T13	6.0:1	0.5	60	Na	61.0	0.90	4.9
T14	7.5:1	0.5	60	Na	70.4	0.89	4.8
T15	6.0:1	1.0	60	Na	64.8	0.89	4.8
T16	7.5:1	1.0	60	Na	70.3	0.89	4.7

ANEXO D

Porcentaje promedio de rendimiento, densidad y viscosidad del biodiesel obtenido con la metodología B.

Tratamientos.					Rendimiento (%biodiesel)	Densidad 20°C (g/ml)	Viscosidad 40°C (cSt)
Cod.	Relación molar (metanol:aceite)	Concentración Catalizador (%)	Tiempo de reacción (minutos)	Tipo Catalizador			
T1	6.0:1	0.5	200	NaOH	69.1	0.89	4.8
T2	7.5:1	0.5	200	NaOH	69.0	0.89	4.9
T3	6.0:1	1.0	200	NaOH	69.8	0.89	4.8
T4	7.5:1	1.0	200	NaOH	73.8	0.90	4.9
T5	6.0:1	0.5	500	NaOH	63.3	0.88	4.8
T6	7.5:1	0.5	500	NaOH	58.8	0.90	4.8
T7	6.0:1	1.0	500	NaOH	61.2	0.89	4.9
T8	7.5:1	1.0	500	NaOH	56.6	0.89	4.8
T9	6.0:1	0.5	200	Na	73.3	0.89	4.9
T10	7.5:1	0.5	200	Na	75.6	0.90	4.9
T11	6.0:1	1.0	200	Na	76.4	0.89	4.8
T12	7.5:1	1.0	200	Na	75.3	0.89	4.9
T13	6.0:1	0.5	500	Na	69.6	0.89	4.8
T14	7.5:1	0.5	500	Na	67.8	0.89	4.8
T15	6.0:1	1.0	500	Na	67.8	0.89	4.8
T16	7.5:1	1.0	500	Na	70.0	0.89	4.9

ANEXO E

Análisis estadístico del rendimiento de acuerdo con la metodología A para la obtención de biodiesel.

ANEXO E1

Tabla de análisis de varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón F	Valor Medio P
A:Relación Molar	138.7	1	138.7	244.77	0.0000
B:[catalizador]	2.341	1	2.341	4.13	0.0508
C:Tiempo de reacción	168.8	1	168.8	297.76	0.0000
D:Tipo de catalizador	212.5	1	212.5	374.99	0.0000
AB	17.76	1	17.76	31.34	0.0000
AC	65.8	1	65.8	116.11	0.0000
AD	0.083	1	0.083	0.15	0.7040
BC	6.453	1	6.453	11.39	0.0020
BD	0.3008	1	0.3008	0.53	0.4717
CD	88.56	1	88.56	156.27	0.0000
ABC	0.5208	1	0.5208	0.92	0.3452
ABD	11.21	1	11.21	19.79	0.0001
ACD	38.52	1	38.52	67.97	0.0000
BCD	8.333	1	8.333	14.70	0.0006
bloques	8.665	2	4.333	7.65	0.0020
Error total	17.57	31	0.5667		
Total (corr.)	786.1	47			

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Rendimiento en piezas separadas para cada uno de los efectos. Muestra la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio frente un estimado del error experimental. En este caso, 11 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

ANEXO E2

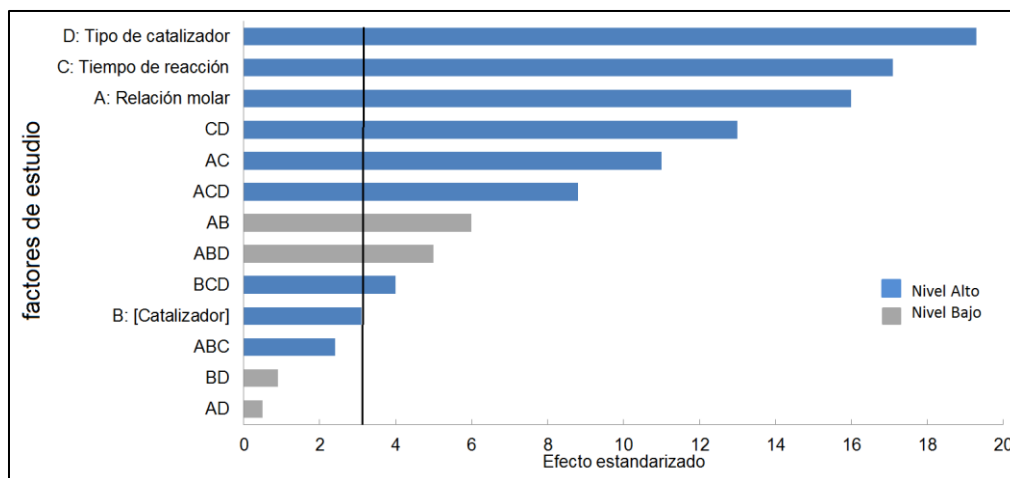
Optimización de respuesta

Los datos de optimización obtenidos con el programa StatGraphics Centurion XV.II, nos muestran las condiciones en las cuales se obtiene un mayor rendimiento optimizando los recursos, es decir tomando en cuenta la influencia de los factores en el rendimiento final.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Relación Molar	6.0	7.5	7.5
[catalizador]	0.5	1.0	0.5
Tiempo de reacción	30.0	60.0	60.0
Tipo de catalizador	NaOH	Na	Na

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Rendimiento para este caso el porcentaje de catalizador no influye en el rendimiento, por lo que es igual usar 1% o 0.5%, con el fin de ahorrar reactivos el proceso puede realizarse utilizando únicamente 0.5% de catalizador

Diagrama de Pareto para rendimiento de biodiesel utilizando calor por convección



El diagrama de Pareto muestra la influencia que tiene cada factor y sus respectivas combinaciones en el rendimiento de biodiesel

ANEXO F

Análisis estadístico de los valores de densidad de acuerdo con la metodología A para la obtención de biodiesel.

Tabla de análisis de varianza de densidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón F	Valor Medio P
A:Relacion Molar	0,00003333	1	0,00003333	0,66	0,4235
B:[catalizador]	0,00003333	1	0,00003333	0,66	0,4235
C:Tiempo de reacción	0,00000833	1	0,00000833	0,16	0,6879
D:Tipo de catalizador	0,00000833	1	0,00000833	0,16	0,6879
AB	0,00003333	1	0,00003333	0,66	0,4235
AC	0,00007500	1	0,00007500	1,48	0,2329
AD	0,00000833	1	0,00000833	0,16	0,6879
BC	0,00000833	1	0,00000833	0,16	0,6879
BD	0,00007500	1	0,00007500	1,48	0,2329
CD	0,00013333	1	0,00013333	2,63	0,1149
ABC	0,00000833	1	0,00000833	0,16	0,6879
ABD	0,00020833	1	0,00020833	4,11	0,0513
ACD	0,00000000	1	0,00000000	0,00	1,0000
BCD	0,00013333	1	0,00013333	2,63	0,1149
bloques	0,00002916	2	0,00001458	0,29	0,7519
Error total	0,00157083	31	0,00005067		
Total (corr.)	0,00236667	47			

Ningún valor de P esta por debajo de 0,05 lo que indica que no existe diferencia significativa entre los valores de densidad del biodiesel obtenido con los tratamientos de la metodología A. El análisis fue realizado con un nivel de confianza del 95,0%.

ANEXO G

Análisis estadístico de valores de viscosidad de acuerdo con la metodología A para la obtención de biodiesel.

Tabla de análisis de varianza de viscosidad

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón F	Valor Medio P
A:Relacion Molar	0,00003333	1	0,00003333	0,66	0,4235
B:[catalizador]	0,00003333	1	0,00003333	0,66	0,4235
C:Tiempo de reacción	0,00000833	1	0,00000833	0,16	0,6879
D:Tipo de catalizador	0,00000833	1	0,00000833	0,16	0,6879
AB	0,00003333	1	0,00003333	0,66	0,4235
AC	0,00007500	1	0,00007500	1,48	0,2329
AD	0,00000833	1	0,00000833	0,16	0,6879
BC	0,00000833	1	0,00000833	0,16	0,6879
BD	0,00007500	1	0,00007500	1,48	0,2329
CD	0,00013333	1	0,00013333	2,63	0,1149
ABC	0,00000833	1	0,00000833	0,16	0,6879
ABD	0,00020833	1	0,00020833	4,11	0,0513
ACD	0,00000000	1	0,00000000	0,00	1,0000
BCD	0,00013333	1	0,00013333	2,63	0,1149
bloques	0,00002916	2	0,00001458	0,29	0,7519
Error total	0,00157083	31	0,00005067		
Total (corr.)	0,00236667	47			

Ningún valor de P esta por debajo de 0,05 lo que indica que no existe diferencia significativa entre los valores de viscosidad del biodiesel obtenido con los tratamientos de la metodología A. El análisis fue realizado con un nivel de confianza del 95,0%.

ANEXO H

Análisis estadístico del rendimiento de acuerdo con la metodología B para la obtención de biodiesel.

ANEXO H1

Tabla de análisis de varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón F	Valor Medio P
A:Relacion Molar	2,47521	1	2,47521	2,34	0,1366
B:[catalizador]	3,36021	1	3,36021	3,17	0,0848
C:Tiempo de reacción	849,242	1	849,242	801,32	0,0000
D:Tipo de catalizador	547,425	1	547,425	516,53	0,0000
AB	4,26021	1	4,26021	4,02	0,0538
AC	35,8802	1	35,8802	33,86	0,0000
AD	8,41687	1	8,41687	7,94	0,0083
BC	28,0602	1	28,0602	26,48	0,0000
BD	0,585208	1	0,585208	0,55	0,4630
CD	51,0469	1	51,0469	48,17	0,0000
ABC	2,12521	1	2,12521	2,01	0,1667
ABD	2,21021	1	2,21021	2,09	0,1587
ACD	28,0602	1	28,0602	26,48	0,0000
BCD	10,3602	1	10,3602	9,78	0,0038
bloques	0,322917	2	0,161458	0,15	0,8593
Error total	32,854	31	1,05981		
Total (corr.)	1606,68	47			

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de rendimiento en piezas separadas para cada uno de los efectos. Muestra la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio frente a un estimado del error experimental. En este caso, 8 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

ANEXO H2

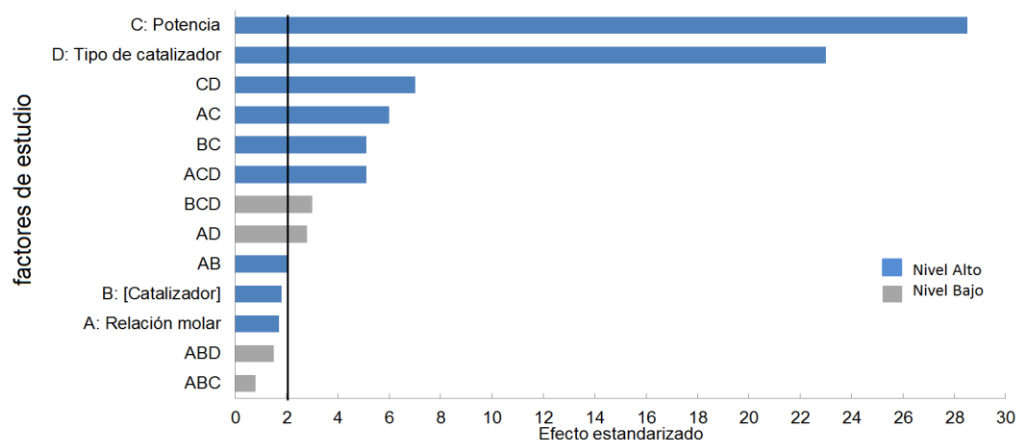
Optimización de respuesta

Los datos de optimización obtenidos con el programa StatGraphics Centurion XV.II, nos muestran las condiciones en las cuales se obtiene un mayor rendimiento optimizando los recursos, es decir tomando en cuenta la influencia de los factores en el rendimiento final.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Relación Molar	6.0	7.5	6.0
[catalizador]	0.5	1.0	0.5
Potencia Microondas (w)	200	500	200
Tipo Catalizador	NaOH	Na	Na

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Rendimiento para este caso el porcentaje de catalizador y la relación molar metanol:aceite no influye en el rendimiento, por lo que es igual usar 1% ó 0.5%, de igual forma si se disminuye la relación molar de 7.5 a 6 el rendimiento no se ve afectado significativamente con el fin de ahorrar reactivos el proceso puede realizarse utilizando únicamente 0.5% de catalizador y una relación molar metanol aceite de 6:1.

Diagrama de Pareto para rendimiento de biodiesel utilizando microondas



El diagrama de Pareto muestra que el factor que más influye en el rendimiento es la potencia de salida del microondas.

ANEXO I

Análisis estadístico de densidad de acuerdo con la metodología B para la obtención de biodiesel.

Tabla de análisis de varianza de densidad

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón F	Valor Medio P
A:Relación Molar	0,00013333	1	0,00013333	3,21	0,0829
B:[catalizador]	0,00000833	1	0,00000833	0,20	0,6573
C:Potencia Microondas	0,00003333	1	0,00003333	0,80	0,3772
D:Tipo Catalizador	0,00000000	1	0,00000000	0,00	1,0000
AB	0,00003333	1	0,00003333	0,80	0,3772
AC	0,00003333	1	0,00003333	0,20	0,6573
AD	0,00000833	1	0,00000833	0,20	0,6573
BC	0,00003333	1	0,00003333	0,80	0,3772
BD	0,00003333	1	0,00003333	0,80	0,3772
CD	0,00000833	1	0,00000833	0,20	0,6573
ABC	0,00007500	1	0,00007500	1,81	0,1888
ABD	0,00000833	1	0,00000833	0,20	0,6573
ACD	0,00003333	1	0,00003333	0,80	0,3772
BCD	0,00000833	1	0,00000833	0,20	0,6573
bloques	0,00007916	2	0,00003958	0,95	0,3966
Error total	0,00128750	31	0,00004153		
Total (corr.)	0,00179167	47			

Ningún valor de P esta por debajo de 0,05 lo que indica que no existe diferencia significativa entre los valores de densidad del biodiesel obtenido con los tratamientos de la metodología A. El análisis fue realizado con un nivel de confianza del 95,0%.

ANEXO J

Análisis estadístico de la viscosidad de acuerdo con la metodología B para la obtención de biodiesel.

Tabla de análisis de varianza de viscosidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón F	Valor Medio P
A:Relación Molar	0,0102083	1	0,0102083	1,36	0,2529
B:[catalizador]	0,0052083	1	0,0052083	0,69	0,4117
C:Potencia Microondas	0,0252083	1	0,0252083	3,35	0,0767
D:Tipo Catalizador	0,0018750	1	0,0018750	0,25	0,6211
AB	0,0002083	1	0,0002083	0,03	0,8689
AC	0,0102083	1	0,0102083	1,36	0,2529
AD	0,0018750	1	0,0018750	0,25	0,6211
BC	0,0102083	1	0,0102083	1,36	0,2529
BD	0,0018750	1	0,0018750	0,25	0,6211
CD	0,0002083	1	0,0002083	0,03	0,8689
ABC	0,0052083	1	0,0052083	0,69	0,4117
ABD	0,0052083	1	0,0052083	0,69	0,4117
ACD	0,0168750	1	0,0168750	2,24	0,1443
BCD	0,0018750	1	0,0018750	0,25	0,6211
bloques	0,0087500	2	0,0043750	0,58	0,5649
Error total	0,2331250	31	0,0075201		
Total (corr.)	0,3381250	47			

Ningún valor de P esta por debajo de 0,05 lo que indica que no existe diferencia significativa entre los valores de viscosidad del biodiesel obtenido con los tratamientos de la metodología A. El análisis fue realizado con un nivel de confianza del 95,0%.

ANEXO K

Análisis estadístico del porcentaje de rendimiento de biodiesel de las metodologías A y B

Para el análisis estadístico se tomaron los datos como apareados para la prueba t de student, y un $\alpha=0.5$

	Máximo rendimiento (%) Metodología A	Máximo rendimiento (%) Metodología B
R1	70.9	75.9
R2	69.1	76.9
R3	71.3	75.9

Prueba t para porcentaje de rendimiento con las dos metodologías.

	Metodología A	Metodología B	Comparación
Media	70.4333	76.2333	
Varianza	1.3733	0.3333	
Observaciones	3	3	
Grados de libertad	2	2	
Estadístico t			5.762
$P(T \leq t)$ una cola			0.014
Valor crítico de t (una cola)			2.920
$P(T \leq t)$ dos colas			0.029
Valor crítico de t (dos colas)			4.303

Valor estadístico $t >$ Valor crítico de t , existe significancia estadística entre el porcentaje de rendimiento de biodiesel con cada una de las metodologías descritas, un mayor rendimiento se obtiene usando microondas.

ANEXO L

Análisis estadístico del contenido de glicerina ligada en la fase glicérica de las metodologías A y B

Para el análisis estadístico se tomaron los datos como apareados para la prueba t de student, y un $\alpha=0.5$

	Metodología A	Metodología B
Glicerina ligada de la fase glicérica (%)	9.67	4.14
	9.85	3.89

Prueba t para porcentaje de glicerina ligada.

	Metodología A	Metodología B	Comparación
Media	9.7600	4.0150	
Varianza	0.0162	0.03125	
Observaciones	2	2	
Grados de libertad	1	1	
Estadístico t			26.7209
$P(T \leq t)$ una cola			0.0119
Valor crítico de t (una cola)			6.3138
$P(T \leq t)$ dos colas			0.0238
Valor crítico de t (dos colas)			12.7062

Valor estadístico $t >$ Valor crítico de t , existe significancia estadística entre el porcentaje glicerina ligada en la fase glicérica con cada una de las metodologías descritas, un menor porcentaje de glicerina liada obtiene usando microondas.

ANEXO M

Tabla de costos de materia prima, reactivos, e insumos para la obtención de biodiesel

Descripción	Costo grado comercial (\$)	Costo grado analítico (\$)
Aceite (L)	0.20	-
Metanol (L)	4.00	6.00
Ácido sulfúrico (L)	13.00	20.00
Sodio metálico (Kg)	155.00	180.00
Hidróxido de sodio (Kg)	22.00	30.00
Energía eléctrica (Kw-h)	0.0935	-

Ejemplo de cálculo de costos de materia prima e insumos para el proceso de obtención de biodiesel.

ACEITE

Entrada de aceite: 1 L → 0.9 Kg

Costo: 0.20 \$/L → \$ 0.20

Salida de biodiesel usando calor por convección

(Rendimiento 70.43%): 0.7043 L

Costo por litro: $0.20/0.7043L =$ \$ 0.28 por litro de biodiesel

METANOL (relación molar 6:1)

Entrada: 0.246 L

Costo: 6.00 \$/L → \$1.476

Salida de biodiesel

(Rendimiento 70.43%): 0.7043 L

Costo por litro: $1.476\$/0.7043L =$ \$2.09 por litro de biodiesel

HIDRÓXIDO DE SODIO (0.5%)

Entrada: 0.0045Kg

Costo: 30 \$/kg → \$0.135

Salida de biodiesel

(Rendimiento 70.43%): 0.7043 L

Costo por litro: $0.135\$/0.7043L =$ \$ 0.19 por litro de biodiesel

SODIO METÁLICO (0.5%)

Entrada: 0.0026 Kg

Costo: 180 \$/kg → \$0.468

Salida de biodiesel

(Rendimiento 76.37%): 0.7043L

Costo por litro: $0.468\$/0.7043L =$ \$ 0.66 por litro de biodiesel

ACIDO SULFÚRICO (1%, pretratamiento)

Entrada: 0.009Kg → 0.0048 L

Costo: 20 \$/L → \$0.097

Salida de biodiesel

(Rendimiento 70.43%): 0.7043 L

Costo por litro: $0.097\$/0.7043L =$ \$ 0.14 por litro de biodiesel

ENERGÍA

Cocineta (pre-tratamiento)

Potencia: 200W = 0.200kW

Tiempo: 1 hora

Trabajo: 0.200 kW-h.

Costo: 9.35 ctvs./kW-h

Costo total: 1.87 ctvs = \$ 0.0187 por litro de biodiesel

Cocineta (reacción)

Potencia: 200W = 0.200kW

Tiempo: 1 hora

Trabajo: 0.200 kW-h.

Costo: 9.35 ctvs./kW-h

Costo total: 1.87 ctvs = \$ 0.0187 por litro de biodiesel

Agitación

Potencia: 125W = 0.125kW

Tiempo: 1 hora

Trabajo: 0.125 kW-h.

Costo: 9.35 ctvs./kW-h

Costo total: 1.17 ctvs = \$ 0.0117 por litro de biodiesel

Microondas (pre-tratamiento)

Potencia: 1000W = 1.00kW

Tiempo: 0.5 horas

Trabajo: 0.500 kW-h.

Costo: 9.35 ctvs./kW-h

Costo total: 4.68 ctvs = \$ 0.0468 por litro de biodiesel

Microondas (reacción)

Potencia: 1000W = 1.00kW

Tiempo: 0.5 horas

Trabajo: 0.500 kW-h.

Costo: 9.35 ctvs./kW-h

Costo total: 4.68 ctvs = \$ 0.0468 por litro de biodiesel

Cocineta (secado)

Potencia: 200W = 0.200kW

Tiempo: 0.25 horas

Trabajo: 0.05 kW-h.
Costo: 9.35 ctvs./kW-h
Costo total: 0.47 ctvs = \$0.004 por litro de biodiesel

Total energía convección: pre-tratamiento + reacción + agitación + secado

Total energía convección: \$0.0187 + \$ 0.0187 + \$ 0.0117 + \$0.004

Total energía convección: \$0.0531

Total energía microondas: pre-tratamiento + reacción + secado

Total energía microondas: \$0.0468 + \$ 0.0468 + \$0.004

Total energía microondas: \$0.0976

** Los costos de los reactivos variarán si son de grado comercial o grado analítico y el rendimiento varia de acurdo a la metodología utilizada y a las condiciones establecidas

ANEXO N
PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES
COMESTIBLES VEGETALES USADOS.



FILTRADO DEL ACEITE



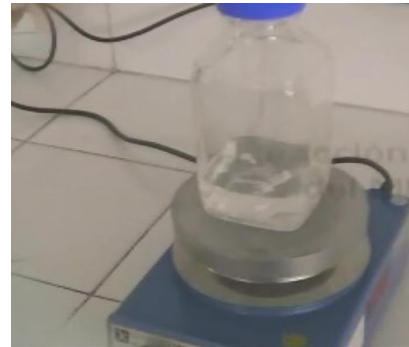
HIDRÓXIDO DE SODIO



SODIO METÁLICO



MEDICIÓN VOLUMEN METANOL



FORMACIÓN METÓXIDO



SECADO DEL ACEITE (120°C)



MEZCLA METÓXIDO Y ACEITE



TRANSESTERIFICACIÓN CALOR



TRANSESTERIFICACIÓN MICROONDAS



REPOSO



BIODIESEL Y GLICERINA



LAVADO



REPOSO



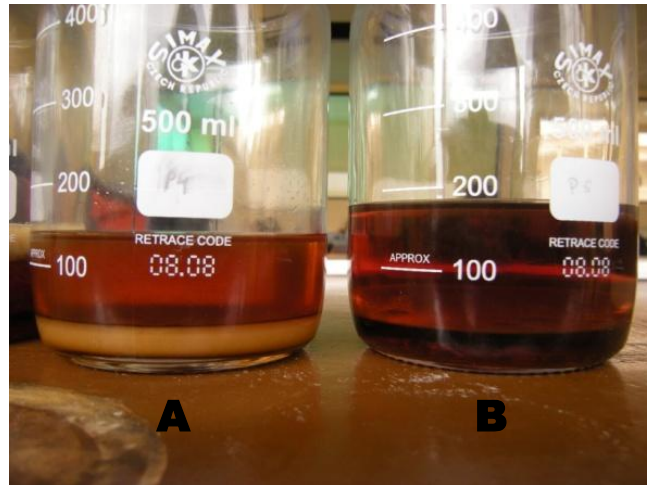
SEPARACIÓN



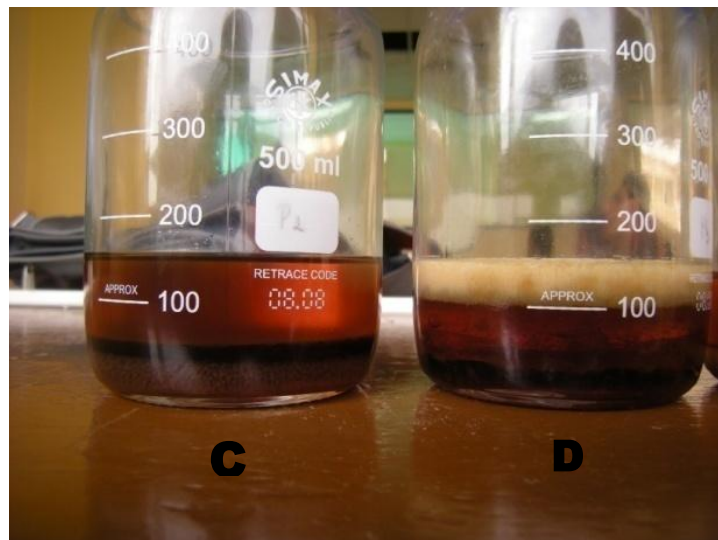
BIODIESEL

ANEXO O

Figuras de los Resultados de los tratamientos aplicados



(A) Biodiesel obtenido con calor e hidróxido como catalizador; (B) biodiesel obtenido con calor y sodio metálico como catalizador



(C) biodiesel obtenido con microondas al 20% de potencia; (D) biodiesel obtenido con microondas al 50% de potencia

ANEXO P
PRUEBA DE COMBUSTIÓN



ARANQUE DEL MOTOR
(SE OBSERVA EMANACIÓN DE HUMO)



RECORRIDO CON MEZCLA DE DIESEL Y BIODIESEL
(NO SE OBSERVA EMANACIÓN DE HUMO)