



**UNIVERSIDAD NACIONAL
"PEDRO RUIZ GALLO"
ESCUELA POSTGRADO**



DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**"SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA DE UNA
EMULSION DE GLICERINA EN BIODIESEL CON
APLICACIÓN DE DIFERENTES VOLTAJES Y
DISTANCIAS ENTRE ELECTRODOS"**

TESIS

**Presentada para optar el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

AUTOR:

MSc. Sebastian Huangal Scheineder

ASESOR:

Dr. Jaime Lucho Cieza Sánchez

**LAMBAYEQUE – PERÚ
2019**

“SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA DE UNA EMULSION DE GLICERINA EN BIODIESEL CON APLICACIÓN DE DIFERENTES VOLTAJES Y DISTANCIAS ENTRE ELECTRODOS”

MSc. Sebastian Huangal Scheineder

AUTOR

Dr. Jaime Lucho Cieza Sánchez

ASESOR - UNPRG



Dr. Antonio Gil Bravo

CO-ASESOR – UPNA (Universidad Pública de Navarra – España)

Tesis presentada a la escuela de Postgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Para optar por el Grado de: DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

APROBADO POR:

Dr. Nicolás Walter Morales Uchofen
PRESIDENTE DEL JURADO

Dra. Rosario Verástegui León
SECRETARIA DEL JURADO

Dr. Walter Antonio Campos Ugaz
VOCAL DEL JURADO

**LAMBAYEQUE – PERÚ
2019**

DEDICATORIA

A DIOS

Él Amigo que nunca falla.

A MI FAMILIA: ELMER, FLORA, MILKO Y MARIANGELA, Por haber confiado en mí y por el apoyo incondicional. Gracias por sus consejos, sus notables ejemplos de perseverancia, por incentivarme a luchar cada día en bien de mi superación y porque son los verdaderos portadores de la verdad, el amor y la paz en mi vida.

AGRADECIMIENTO.

A la universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo y su Escuela de Postgrado, por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional en constante desarrollo.

A la Universidad Pública de Navarra, a su Departamento de Química Aplicada. Por brindarme la oportunidad por medio del Programa Erasmus +, por haberme acogido y guiado en todo el proceso, con el fin de cumplir los objetivos académicos trazados.

A los laboratorios de química orgánica y físico química de la facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias por las facilidades brindadas para el desarrollo y experimentación del presente trabajo de investigación.

A mis Co- Asesores de tesis, Dr. JAIME LUCHO CIEZA SÁNCHEZ, docente de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo y al Dr. ANDONI GIL BRAVO, quien fue mi tutor en la Universidad Pública de Navarra. Agradecerles por el importante aporte con sus conocimientos, sus experiencias y sus consejos durante el desarrollo de toda la tesis.

A todos los Profesores del Doctorado en Ciencias Ambientales de la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo por los conocimientos brindados.

EL AUTOR

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE.....	v-vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS Y FOTOS.....	viii-ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	01
II. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	03
2.1. Antecedentes Investigativos.....	03
2.2. Fundamentación Legal.....	05
2.3. Base teórica.....	14
2.3.1. Producción de Biodiesel.....	14
2.3.2. Separación de la Glicerina del Biodiesel.....	17
2.3.2.1. Método de separación de la	
Glicerina por gravedad.....	17
2.3.2.2. Método de separación con	
Centrífuga.....	18
2.3.2.3. Método de separación con	
Corriente electrostática.....	18
2.3.3. Separación Electrostática de fases:	
Una revisión.....	19

2.3.3.1.	Dinámica de Electrocoalescencia.....	20
2.3.3.2.	Condiciones Críticas para la Coalescencia.....	23
2.3.3.3.	Formación de Cadenas.....	24
2.3.3.4.	Coalescencia Parcial.....	25
2.3.3.5.	Efectos de los Parámetro de Operación y Propiedades del Fluído.....	25
2.4	Hipótesis.....	27
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
3.1.	Población y muestra.....	27
3.2.	Operacionalización de variables.....	28
3.2.1.	Distancia entre electrodos.....	28
3.2.2.	Voltaje aplicado.....	28
3.2.3.	Tiempo de separación.....	28
3.3.	Recolección de información.....	28
3.4.	Método de construcción del separador electrostático y procedimiento	29
3.4.1.	Construcción del Separador Electrostático.....	29
3.4.2.	Procedimiento.....	30
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31-37
V.	CONCLUSIONES.....	37
VI.	RECOMENDACIONES.....	38
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38 -40

VIII. ANEXOS.....	41
8.1. ANEXO 01:.....	41
8.2. FOTOGRAFÍAS.....	42-50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distancia entre Electrodo y Voltaje aplicado	29
Tabla 2. Caracterización del biodiesel adquirido y comprobación del cumplimiento de normas.....	31
Tabla 3. Tiempo promedio de separación electrostática de emulsiones de glicerina en biodiesel empleando combinación de voltajes y distancias entre electrodos.....	32
Tabla 4. Análisis factorial de varianza del tiempo de separación electrostática aplicando diferentes voltajes y distancias entre electrodos.....	34
Tabla 5. Tiempo empleado (segundos) para la separación electrostática de glicerina emulsionada con biodiesel con diferentes voltajes y distancias entre electrodos.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS Y FOTOS

Figura 1. Esquema tradicional de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales.....	17
Figura 2. Efecto individual del voltaje aplicado durante la separación Electrostática de una emulsión de glicerina en biodiesel.....	35
Figura 3. Efecto individual de la distancia entre electrodos durante la separación electrostática de una emulsión de glicerina en biodiesel.....	36
Foto 1. Agitador ó Batidora Industrial y Medidor de Conductividad Eléctrica.....	32
Foto 2. Inicio de la agitación continua	42
Foto 3. Vista superior 1 de la muestra después de la agitación	43
Foto 4. Vista superior 2 de la muestra después de la agitación.....	43
Foto 5. Vista lateral 1 de la muestra después de la agitación.....	44
Foto 6. Vista lateral 2 de la muestra después de la agitación.....	44
Foto 7. Vista de la mesa de trabajo con el material a utilizar.....	45
Foto 8. Vista de la fuente de poder y electrodos acoplados al recipiente para la separación electrostática.....	45
Foto 9. Vista de los electrodos de cobre dentro de la muestra a separar....	46
Foto 10. Vista del recipiente y fuente de poder – contacto de 3000 V	46

Foto 11. Vista del recipiente con 1 l de muestra a punto de someterse a separación electrostática a 3000 V.....	47
Foto 12. Vista del recipiente con la muestra en el momento de la separación electrostática a 3000 V.....	47
Foto 13. Vista del recipiente con la muestra luego de la separación a 3000 V.....	48
Foto 14. Vista del recipiente con la muestra en el momento de la separación electrostática a 6000 V.....	48
Foto 15. Recipiente con la muestra y fuente de poder después de la separación electrostática a 6000 V.....	49
Foto 16. Vista de la fuente de poder y el recipiente con la muestra - contacto 9000 V.....	49
Foto 17. Vista del recipiente con la muestra en el momento de la separación electrostática a 9000 V.....	50
Foto 18. Vista del recipiente con la muestra después de la separación electrostática a 9000 V.....	50

RESUMEN

Con el propósito de aplicar una tecnología limpia y de bajo consumo energético en la separación de emulsiones se desarrolló la presente investigación denominada “Separación electrostática de una emulsión de glicerina en biodiesel con aplicación de diferentes voltajes y distancias entre electrodos”.

Para realizar los ensayos se construyó un separador electrostático de 1.0 litros de volumen de trabajo. El depósito fue calibrado en volumen para control de la separación. Se utilizó electrodos de cobre en forma de barras de 3.5 cm de ancho, 13 cm de largo y 2 mm de espesor. Para los ensayos se prepararon emulsiones sintéticas de glicerina (10% v/v) en biodiesel. Como agente emulsificante se utilizó lecitina. Los voltajes empleados fueron 3000, 6000 y 9000 voltios; y las distancias entre electrodos ensayadas fueron 2, 4 y 6 cm. Se realizó un diseño factorial, que dio como resultado 9 combinaciones y un total de 27 ensayos.

Para cada ensayo se llevó a separación completa de la emulsión y se registró los tiempos alcanzados para cada combinación, y los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis factorial de varianza con el programa SPSS-IBM. Se determinó que si existe influencia tanto individual como combinado de los factores ensayados. Mayor influencia ejerció la distancia entre electrodos, seguidos del voltaje y luego la combinación de voltaje/distancia. .

Los tiempos de separación logrados varían entre 45.33 y 8.33 segundos. Valores aceptables si se compara con la centrifugación (minutos) y la sedimentación por gravedad (horas). El mejor resultado se obtuvo con la combinación de 9000 V y una distancia entre electrodos de 2 cm, lográndose un tiempo de separación promedio de solo 8.33 segundos.

Se concluye que existe efecto individual y combinado de voltaje y distancia entre electrodos sobre el tiempo de separación electrostática de una emulsión de glicerina en biodiesel.

Se recomienda su aplicación por ser una tecnología limpia de bajo consumo de energía.

Palabras claves: separación electrostática, biodiesel, glicerina

ABSTRACT

In order to apply a clean and low energy consumption technology in the separation of emulsions, the present research entitled "Electrostatic separation of a glycerin emulsion in biodiesel with application of different voltages and distances between electrodes" was developed.

To perform the tests, an electrostatic separator of 1.0 liters of work volume was built. The deposit was calibrated in volume for separation control. Copper electrodes were used in the form of bars 3.5 cm wide, 13 cm long and 2 mm thick. For the tests, synthetic glycerin emulsions (10% v / v) were prepared in biodiesel. Lecithin was used as the emulsifying agent. The voltages used were 3000, 6000 and 9000 volts; and the distances between electrodes tested were 2, 4 and 6 cm. A factorial design was carried out, which resulted in 9 combinations and a total of 27 trials.

For each test, the emulsion was completely separated and the times reached for each combination were recorded, and the results obtained were subjected to a factorial analysis of variance with the SPSS-IBM program. It was determined that there is both individual and combined influence of the tested factors. Greater influence exerted the distance between electrodes, followed by the voltage and then the combination of voltage / distance.

The separation times achieved vary between 45.33 and 8.33 seconds. Acceptable values when compared to centrifugation (minutes) and sedimentation by gravity (hours). The best result was obtained with the combination of 9000 V and a distance between electrodes of 2 cm, achieving an average separation time of only 8.33 seconds.

It is concluded that there is an individual and combined effect of voltage and distance between electrodes on the electrostatic separation time of a glycerin emulsion in biodiesel. Its application is recommended because it is a clean technology with low energy consumption.

Keywords: electrostatic, separation, biodiesel, glycerin.

I. INTRODUCCIÓN

Los recursos energéticos limitados y las regulaciones de emisiones cada vez más estrictas han motivado una intensa búsqueda de combustibles de transporte alternativos durante las últimas tres décadas (Abbaszaadeh, 2012). El biodiesel, un combustible alternativo, se define como los monoésteres de alquilo de ácidos grasos a partir de recursos renovables tales como aceites vegetales, grasas animales, grasas residuales de restaurante y aceite de algas (Malhotra & Sarin, 2004).

La producción de biodiesel a partir de abundantes bio-fuentes ha atraído la atención de las comunidades académica, así como industrial en los últimos años. Sin embargo, uno de los obstáculos más serios para el uso del biodiesel como combustible alternativo es el complicado y costoso proceso de purificación involucrado en su producción. Las dificultades relacionadas con la separación de la glicerina y otros reactivos y subproductos que no han reaccionado requieren el desarrollo de nuevos procesos competentes de separación a bajo coste para este fin (Maan, 2010).

El uso del método de la gravedad no es una solución adecuada para las instalaciones de producción que buscan pasar a una configuración de flujo continuo. Después de la reacción, la glicerina se separa por decantación o centrifugación y la capa obtenida se purifica antes de usarla para sus aplicaciones tradicionales (farmacéutica, cosmética y alimentaria) o para las aplicaciones desarrolladas recientemente como piensos para animales, cargas de carbono en fermentaciones, polímeros, tensioactivos, intermedios y lubricantes (Vicente, Martínez & Aracil, 2007). Eliminar la glicerina del biodiesel es importante ya que el contenido de glicerina es uno de los precursores más significativos para la calidad del biodiesel. Los

medios tradicionales para eliminar la glicerina son principalmente por separación por gravedad o por centrifugación (Demirbas, 2007).

Los sistemas de separación de glicerina del biodiesel con centrífuga son caros ya que su consumo de energía es elevado. En algunos casos, el uso del método de centrífuga lleva a transferir parte de la fase de biodiesel a la fase de glicerina. En última instancia, otros métodos deben ser encontrados para hacer la separación fácil, rápida y menos tiempo. La idea de usar una corriente de alto voltaje para separar el biodiesel de la glicerina vino de Graham Laming del Reino Unido. Existen también empresas que utilizan la carga electrostática para separar líquidos insolubles, pero que la tecnología es propietaria y fabricada principalmente para la industria de filtración de petróleo.

En el presente trabajo de investigación se formula el siguiente problema: ¿En qué medida la aplicación de diferentes voltajes y distancias entre electrodos afectará la eficiencia de separación de la glicerina emulsionada en biodiesel?

Por tal motivo se plantea la hipótesis de que la aplicación de distintos voltajes y distancias entre electrodos tendrá un efecto individual y combinado sobre el tiempo de separación de la glicerina y biodiesel por coagulación electrostática de la glicerina.

Según la hipótesis planteada se propone como objetivo general determinar la variación del tiempo de separación de la glicerina del biodiesel por coagulación electrostática aplicando diferentes voltajes y distancias entre electrodos. Para lograr este objetivo general se formuló tres objetivos específicos: determinar las condiciones en que se aplicará campos eléctricos para separar la glicerina del biodiesel, fijar los voltajes y separación entre electrodos que se van a ensayar, y determinar la combinación de voltaje y separación entre electrodos más adecuada para separar la glicerina del biodiesel.

Este trabajo de investigación se justifica porque se obtiene un biodiesel y glicerina de alta calidad. Económicamente es menos costoso que el proceso tradicional de centrifugación. En el método de separación electrostática se considera una tecnología limpia, sin uso de reactivos y sin uso de agua, cada vez más escasa (Singhabhandhu & Tezuka, 2010). Otro factor importante es el tiempo de procesamiento, el cual será de segundos en lugar de horas cuando se aplica separación por gravedad, o de minutos cuando se usa la centrifugación. Implícitamente, la investigación permitirá aplicar los conocimientos teóricos en la separación real de emulsiones de glicerina en biodiesel, o en forma más general en emulsiones de agua en aceite.

En este estudio, para separar la glicerina de la mezcla de glicerina y biodiesel, se utiliza un campo electrostático causado por un voltaje alto (más de 1 kV) y una corriente AC de bajo amperaje (mA). La técnica de separación se va ensayar con una mezcla de biodiesel y glicerina comercial, que será sometida a diferentes voltajes y se probará también el efecto de la distancia entre electrodos.

II. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1 Antecedentes Investigativos

Se presenta algunos antecedentes sobre la separación de glicerina del biodiesel.

- Austic & Shore, en el año 2009, publicaron su investigación “Caracterización del efecto de corriente de alto voltaje sobre el mejoramiento de la separación biodiesel/glicerina”. Ellos indican que todas las industrias buscan aumentar la eficiencia en su producción. Un área donde la industria de biodiesel podría mejorar su eficiencia es la etapa de separación, especialmente para reducir la cantidad de tiempo necesario para separar y retirar la capa

de glicerina del biodiesel. Indican que el alto voltaje ha demostrado ser capaz de hacer que la capa de glicerina se vaya al fondo rápidamente, pero los límites de esta tecnología no han sido caracterizados. La investigación se centra en comenzar a caracterizar la separación de glicerina aplicando alto voltaje para que se pueda aplicar al proceso de producción de biodiesel y definir algunos parámetros que puedan permitir su aplicación en otros procesos.

- Saofiddin, Refal & Kumaran., en el año 2014 presentaron su investigación “Purificación rápida del glicerol un subproducto de la producción de biodiesel a través del proceso combinado de acidificación asistido por microondas y adsorción vía quitosano inmovilizado con levadura”. Los autores indican que el glicerol subproducto de la producción de biodiesel tiene impurezas como jabón, sales, catalizador de sodio y otros. Tradicionalmente, dos de las técnicas más usadas para la purificación del glicerol son la destilación y el intercambio iónico. Sin embargo, estas técnicas son muy costosas para generar glicerol de alta pureza. Recientemente, varios procedimientos de tratamiento alternativo comprenden la combinación de diferentes métodos. Estos tratamientos tienen las ventajas sobre otros métodos tales como la producción de grandes cantidades de una capa de glicerol que requiere tratamientos simples y no causan ningún alto costo operacional. En su estudio, los autores, el procedimiento en varias etapas se inicia con un proceso de acidificación asistido con microondas y luego un proceso donde se usa un bioadsorbente sintetizado de células de levadura muertas inmovilizadas sobre quitosano. El rendimiento final de glicerol fue cerca de 93.1 – 94.2 % en peso.

- Abbaszadeh, y colaboradores, en el 2014 publicaron su investigación “Coagulación Electrostática para la separación de glicerina cruda del biodiesel”. Los autores indican que conforme se presentan cambios en la tecnología de producción de biodiesel, todos los aspectos del proceso se están probando y afinando para lograr una producción más eficiente, más rápida y más fácil. Indican que el método de separación por gravedad no es una solución adecuada para instalaciones que quieren pasar a una producción continua de grandes cantidades. Los sistemas de centrifugación son muy costosos. En su estudio, ellos utilizan un nuevo método para separar la glicerina de la mezcla glicerina—biodiesel en el cual se aplica un campo electrostático causado por un alto voltaje (más de 1 kW) y bajo amperaje de corriente alterna (mA). En este método, gracias a un campo electrostático las partículas o gotas de glicerina se coagulan y sedimentan.

Existe información limitada sobre este tema. En nuestro país no existe ninguna referencia sobre la coagulación electrostática de la glicerina para ser separado del biodiesel.

2.2. Fundamentación Legal y Normativa

- **Constitución Política del Perú** (30 de Diciembre de 1993)

La Constitución constituye la norma matriz dentro de toda la legislación peruana; en ella se resaltan los derechos fundamentales de la persona, respecto al desarrollo normal de su vida, en armonía con el medio que lo rodea y el respeto de la propiedad privada.

Artículo N° 22 Inciso 22: Derecho a la paz

“A la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”

Según Chanamé Orbé, Raúl indica que este artículo se refiere al derecho al medio ambiente el cual tiene que reunir características para que pueda cumplir la finalidad de su reconocimiento: desarrollo de la persona. Las características que debe tener el medio ambiente son: equilibrio y adecuación. Un medio ambiente equilibrado es un medio ambiente entendido como un sistema complejo y dinámico en el que se desarrolla la vida, y no como una mera yuxtaposición de bienes o desde una perspectiva fragmentaria con referencia a cada uno de sus elementos.

Artículo N° 66. Recursos Naturales: Preservación, Utilización y concesión

“Los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación. El Estado es soberano en su aprovechamiento. Por ley orgánica se fijan las condiciones de su utilización y de su otorgamiento a particulares. La concesión otorga a su titular un derecho real, sujeto a dicha norma legal.”

Este artículo dispone que los recursos naturales son patrimonio nacional, es decir, que no pueden ser propiedad privada y exclusiva de personas particulares. Sin embargo, teniendo en cuenta que los recursos naturales deben ser aprovechados para que no sea recurso dormido e inerte, y beneficie al país, su utilización puede ser efectuada por el Estado como por los particulares, dentro de los límites que establecen las leyes.

Artículo N° 67 .Medio Ambiente

“El Estado determina la política nacional del ambiente. Promueve el uso sostenible de sus recursos naturales “

Este artículo se refiere a que debe haber provisiones para cubrir las necesidades de protección de todos los ámbitos del país y no sólo de los núcleos centrales de la vida nacional, puesto que la política nacional entendida como el conjunto de directivas para la acción orgánica del Estado en pro de la defensa y conservación del ambiente permitirá el desarrollo integral de todos los peruanos que tienen el derecho de gozar de un ambiente equilibrado y adecuado (Chaname O. R.; 2009).

Artículo N° 66. Recursos Naturales: Preservación, Utilización y concesión

“Los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación .El Estado es soberano en su aprovechamiento. Por ley orgánica se fijan las condiciones de su utilización y de su otorgamiento a particulares. La concesión otorga a su titular un derecho real, sujeto a dicha norma legal.”

Este artículo dispone que los recursos naturales son patrimonio nacional, es decir, que no pueden ser propiedad privada y exclusiva de personas particulares. Sin embargo, teniendo en cuenta que los recursos naturales deben ser aprovechados para que no sea recurso dormido e inerte, y beneficie al país, su utilización puede ser efectuada por el Estado como por los particulares, dentro de los límites que establecen las leyes.

➤ **Código Penal. Título XIII. Delitos Ambientales**

Las nuevas tipificaciones del ahora llamado Capítulo de “Delitos ambientales” antes “delitos contra la ecología “, de acuerdo a las modificatorias introducidas por el Art.3 de la Ley N° 29263, fue publicada el 2 de octubre del 2008, en donde nos permite tener un régimen de sanciones penales más severas para aquellos que causen perjuicio, alteración, daño o degradación del ambiente y de sus componentes. Dentro de este régimen se sancionan la contaminación del ambiente, el tráfico ilegal de residuos, el tráfico ilegal de especies de flora y fauna silvestre protegida, ya sea acuático o terrestre, el tráfico de recursos genéticos entre otros ;es decir se incluyen delitos de peligro abstracto (la sola comisión del hecho constituye delito),de peligro concreto (tiene que acreditarse el riesgo o peligro inminente);o, de daño(detrimento de la calidad ambiental, o de alguno de los componentes del ambiente).

➤ **Ley General del Ambiente .Ley 28611.** (13 de octubre de 2005)

El ámbito de acción de la presente Ley comprende el suelo, subsuelo, dominio lacustre, hidrológico e hidrogeológico; en la cual se presentan lineamientos que deben ser cumplidos, con la finalidad de permitir que las personas puedan desarrollar su vida en ambientes saludable y equilibrados, contribuyendo a proteger el ambiente, conservando la diversidad biológica, y promoviéndose en su ejecución el desarrollo sostenible del país.

➤ **Decreto Legislativo N° 1055.Decreto Legislativo que modifica la Ley N° 28611.Ley General del Ambiente**

Las modificaciones planteadas se realizan con la finalidad de complementar la Ley General del Ambiente para que incorpore los mecanismos de transparencia, participación ciudadana y las sanciones aplicables al incumplimiento de las obligaciones contenidas en ella. Asimismo, se busca precisar la definición de Límite Máximo Permisible y conciliar algunas -competencias del Ministerio del Ambiente referidas al Sistema Nacional de Información Ambiental. Modifico los artículos 32°,42°,43° y 51 °.de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente.

➤ **Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental** (04 de junio de 2004)

La Gestión Ambiental Nacional se ejerce en base a la Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental, la cual tiene por finalidad orientar, integrar coordinar, supervisar, evaluar y garantizar la aplicación de las políticas, planes y acciones destinadas a la protección del ambiente y contribuir a la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. Para que la gestión ambiental sea eficiente se requiere promover el involucramiento y toma de conciencia de la población y autoridades competentes en los temas de desarrollo y en la conservación del ambiente y los recursos naturales constituye un eje sobre el cual se debe seguir trabajando a fin de lograr un cambio de actitud de la población.

➤ **Decreto Supremo N° 008-2005-PCM.Reglamento de la Ley N° 28245**

Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (28 de enero de 2005)

El presente Reglamento desarrolla los contenidos de la Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental. Señala que el Sistema Nacional de Gestión Ambiental (SNGA) se constituye sobre la base de las instituciones estatales, órganos y oficinas de los distintos ministerios, organismos públicos descentralizados e instituciones públicas a nivel nacional, regional y local que ejerzan competencias, atribuciones y funciones en materia de ambiente y recursos naturales.

Los Sistemas Regionales y Locales de Gestión Ambiental forman parte integrante del SNGA, el cual cuenta con la participación del sector privado y la sociedad civil.

De igual manera, en su artículo N° 3 el Reglamento indica que el objetivo de la Política Nacional Ambiental es el mejoramiento continuo de la calidad de vida de las personas, mediante la protección y recuperación del ambiente y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales garantizando la existencia de ecosistemas viables y funcionales en el largo plazo.

La Constitución Nacional de 1993 en su Capítulo VI sobre el Régimen Agrario y de las Comunidades Campesinas y Nativas, establece que el Estado apoya preferentemente el desarrollo agrario, garantizando la propiedad privada o comunal de la tierra, que cuando son abandonadas pasan a ser de dominio del Estado para su adjudicación en venta (Art. 88); y que el Estado respeta la identidad cultural de las Comunidades Campesinas y Nativas.

- **La Ley 26505, ley de la inversión privada en el desarrollo de las actividades económicas en las tierras del territorio nacional y de las comunidades campesinas y nativas (18 de julio de 1995), establece los principios generales necesarios para**

promover la inversión privada en el desarrollo de las actividades económicas en las tierras del territorio nacional.

- **El artículo 61 señala que el Estado facilita la libre competencia, combatiendo toda práctica que la limite. El Decreto Legislativo N° 701, (noviembre de 1991),** señala en su artículo 1 la finalidad de la misma, la cual es eliminar las prácticas monopólicas, controlistas y restrictivas de la libre competencia en la producción y comercialización de bienes y en la prestación de servicios, procurando el mayor beneficio de los usuarios y consumidores.
- **El Decreto Ley N° 25868 (Noviembre de 1992) se creó el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI).** La Comisión de Libre Competencia de INDECOPI es un organismo con autonomía técnica y administrativa que tiene por objetivo velar por el cumplimiento de las normas de defensa de la competencia, contenidas en el Decreto Legislativo N° 701. (INDECOPI, n.d.). En el Perú, en un contexto de libre competencia y fomento de la inversión privada, el gobierno y diversos organismos privados vienen realizando actividades orientadas a fomentar y reglamentar la industria de los biocombustibles.

El 22 de noviembre de 2002, el Consejo Directivo del Consejo Nacional del Ambiente (CONAM) aprobó la propuesta para la promoción del uso de biocombustibles líquidos en el Perú elaborada por el Grupo Técnico de Biocombustibles⁴⁰. Dicha propuesta está orientada a definir las acciones que se deben realizar para la promoción del uso de los biocombustibles líquidos en el país. Como conclusión del estudio se determinó que el uso del etanol y el biodiesel se presentan como una oportunidad para reducir la contaminación ambiental, promover la agricultura, la agroindustria, generar nuevas

inversiones, nuevas fuentes de trabajo y de promover cultivos alternativos rentables en el país.

➤ **Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles - Ley N° 28054 (2003)**

Establece marco general para promover el desarrollo del mercado de los Biocombustibles en el Perú sobre la base de la libre competencia y el libre acceso de la actividad económica.

Objetivos:

- ✓ Diversificar la matriz energética
- ✓ Fomentar el desarrollo agroindustrial
- ✓ Disminuir la contaminación ambiental y
- ✓ Ofrecer un mercado alternativo en la lucha contra las drogas

➤ **Reglamento para la comercialización de Biocombustibles - D.S. N° 021-2007-EM (Abril 2007)**

Establece requisitos para la comercialización de Biocombustibles y aplicación de sus normas técnicas de calidad.

Contenido:

- ✓ Competencias sectoriales del mercado de Biocombustibles.
- ✓ Cronograma de Comercialización Obligatoria de Biocombustibles.
- ✓ Normas correspondientes a comercialización y distribución de Biocombustibles y sus mezclas con combustibles líquidos.

- ✓ Aplicación de Normas Técnicas de Calidad

➤ **Procedimiento de Control de Calidad de Biocombustibles y sus Mezclas Resolución de Consejo Directivo N° 206-2009-OS/CD**

- ✓ **Base Legal**

Según el Reglamento de Comercialización de Biocombustibles DS N° 021-2007-EM, el OSINERGMIN es el órgano competente para la supervisión del control de calidad de los Biocombustibles y sus mezclas, conforme a las Especificaciones Técnicas de Calidad vigentes.

- ✓ **Objetivo**

Supervisión y fiscalización de la calidad de los biocombustibles y sus mezclas

- ✓ **Productos a supervisar**

Biocombustibles (Biodiesel B100 y Etanol)

Mezclas (Diesel B5 y Gasoholes)

- **El Protocolo de Kioto.** La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático realizada en el año 1992, fue el punto de partida para que los países industrializados, señalados en el anexo I del documento, reconocieran que los cambios del clima en el planeta y sus efectos adversos son producto de las actividades humanas las cuales han aumentado la concentración de gases de efecto invernadero, lo cual ha dado como resultado el calentamiento global del planeta. En dicha convención no se establecieron metas concretas correspondientes a la reducción de gases de efecto invernadero (Naciones Unidas, 1992). En la ciudad de Kyoto, Japón se llevó a cabo con

fecha 11 de diciembre de 1997 una conferencia en donde se aprobó el protocolo que lleva el nombre de dicha ciudad. Los países incluidos en el anexo I se comprometían a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, de acuerdo a lo señalado en el artículo 3 del protocolo, a un nivel inferior no menor al 5% respecto al año 1990, para el periodo del 2008 al 2012.

- **En el Perú, la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAM)**, es la autoridad nacional designada para el desarrollo de proyectos MDL (Mecanismos para el Desarrollo Limpio), la misma que ha implementado un procedimiento para evaluarlos en un plazo no mayor a 45 días. El Fondo Nacional del Ambiente (FONAM) es la entidad nacional promotora de proyectos MDL encargada de dar asesoría a las empresas nacionales en el desarrollo y financiamiento de los mismos.

2.3 BASE TEÓRICA

2.3.1. PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

El biodiesel es producido de fuentes renovables, como aceites vegetales o productos residuales tales como aceite de pescado, y puede ser mezclado en cualquier proporción con diésel mineral (originado del petróleo) para ser usado en la mayoría de motores diésel. Sin embargo, hasta ahora los fabricantes de vehículos permiten mezclas hasta de 20% de biodiesel, llamado B20. Solo algunos fabricantes de vehículos alemanes ofrecen motores adaptados para usarse con biodiesel al 100%.

El biodiesel o FAME es biodegradable y tiene una huella de CO₂ más baja que el diésel común. Excepto por los NO_x (Óxidos de Nitrógeno), las emisiones de los tubos de escape de los

vehículos que usan biodiesel es menor. Debido a su punto de inflamación más alto, es más seguro tanto en su uso como en el almacenamiento que el diésel mineral. Sin embargo, el almacenamiento por largo tiempo de biodiesel u otros biocombustibles, necesita especial atención. El biodiesel es fuertemente higroscópico y puede adsorber humedad del aire, ocasionado diferentes tipos de problemas.

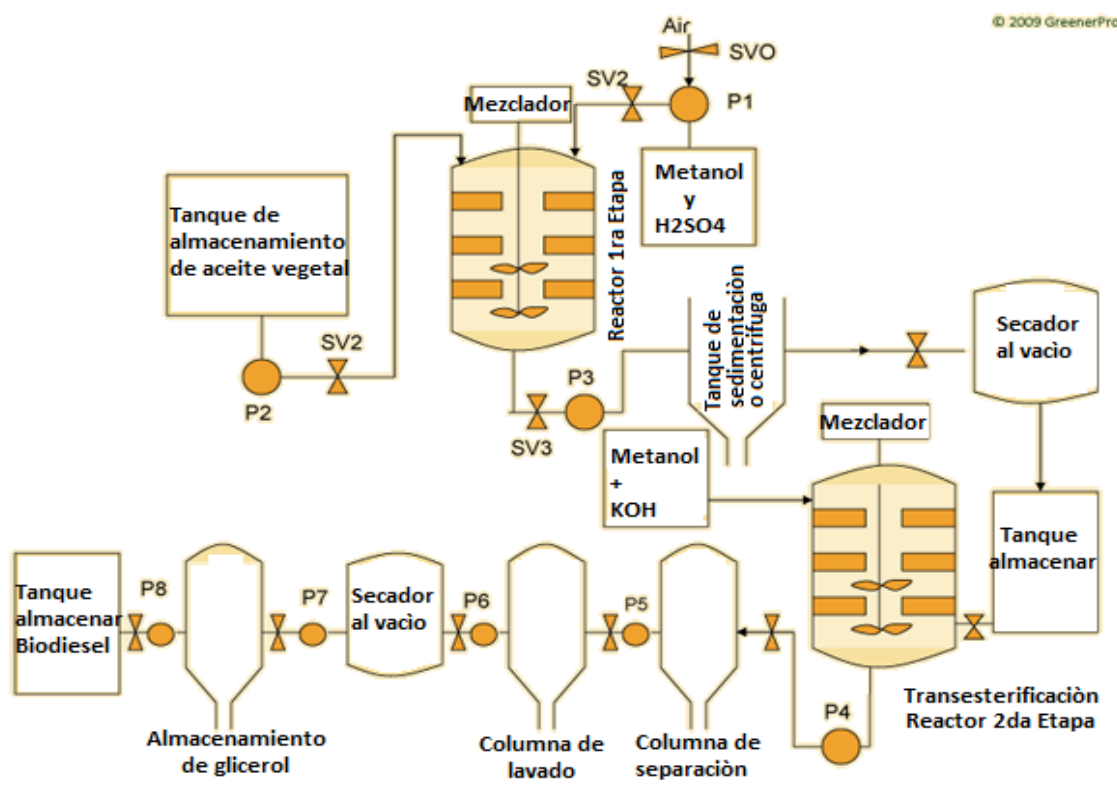
Los hongos y las bacterias pueden causar problemas en grandes tanques de almacenamiento mientras se encuentran en presencia de agua condensada. La polimerización debido a la oxidación es otro problema común con el biodiesel. Las gomas resultantes obstruyen los filtros de combustible con bastante rapidez.

Se pueden formar vapores de metanol como resultado de la descomposición o polimerización de biodiesel y esto puede conducir a riesgos más altos de explosión en combinación con electricidad estática. La formación de electricidad estática debe evitarse mediante una puesta a tierra adecuada y otras precauciones.

La producción de biodiesel a partir de aceite vegetal sigue las siguientes etapas que se resumen en la Figura 2.1 (GreenerPro, 2010).

- Primero, el aceite que forma la materia prima puede necesitar un tratamiento previo tal como la eliminación de suciedad o agua usando equipos como centrífugas o secadores de aceite. El agua es el peor enemigo para cualquier proceso de biodiesel y debe evaporarse.
- El aceite se calienta en los tanques de precalentamiento.
- Se añaden metanol y ácido sulfúrico para iniciar la etapa de esterificación.

- La mezcla de aceite y biodiesel se seca y se neutraliza.
- Metanol y NaOH (o KOH) disueltos en alcohol son adicionados al aceite (se prefiere una liquido con 30% de metilato de sodio o potasio). La cantidad total de reactivos (el catalizador) que se necesita depende del nivel de ácidos grados remanentes. Esto se determinar por un procedimiento simple de titración para probar el valor del ácido.
- Mientras que la temperatura se eleva a 65°C el procesador opera bajo una presión de 3 atm para prevenir perdidas de vapor de metanol o facilitar una rápida transesterificación.
- Después que se alcanzado la temperatura correcta, el procesador automáticamente lo mantiene durante toda la reacción química. El proceso completo termina en aproximadamente 60 minutos.
- Se purga del procesador la mezcla biodiesel/glicerol
- El proceso de separación del biodiesel del glicerol usando centrifugas o tanques de sedimentación empieza aquí. Después de la remoción de la glicerina del biodiesel, este es transferido a una estación de lavado donde el biodiesel se pasa a través de centrifugas o filtros prensa para remover contaminantes disueltos tales como el jabón, MAG y glicerol.
- La unidad de recuperación de metanol completa la extracción de la mayor parte de metanol tanto de la glicerina como del biodiesel.
- La glicerina puede ser neutralizada y luego vendida a la industria de jabones.
- A fin de asegurar un biodiesel 100% limpio, este es pulido, incluyendo una filtración de hasta 1 micra.



Fuente: GreenerPro, 2010.

Figura 2.1. Esquema tradicional de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales.

2.3.2. SEPARACIÓN DE LA GLICERINA DEL BIODIESEL

2.3.2.1. Método de separación de la glicerina por gravedad

Para automatizar el proceso de remoción de glicerol, se requieren una serie de válvulas programables, una bomba, un sensor de densidad y un tanque de residuos. Una vez que el calentador (de una etapa previa) se apaga, el microcontrolador (MCU) se programará para empezar automáticamente otro tiempo de 18 horas, el cual es tiempo necesario para que el glicerol se separe y sedimente al fondo de la cámara deposito. El control de la densidad se hace 60 segundos y se fija en menos que 1100 kg/m^3 .

Se ha investigado que se requieren múltiples adiciones de metóxido de sodio y 25% de la mezcla podría ser adicionado a la cámara de calentamiento, con lo cual se requiere otro ciclo de mezclado, calentamiento, sedimentación y remoción del glicerol.

2.3.2.2. Método de separación con centrifuga

La separación vía centrifuga es un método bien conocido de separación de la glicerina. Desde que la centrifuga gira a velocidades altas, esta fuerza a que el líquido más denso se dirija al borde exterior del recipiente cilíndrico. Este proceso se repite varias veces para asegurarse que todo el glicerol ha sido eliminado de los esteres metílicos. Como ventaja adicional, este sistema puede potencialmente eliminar los gránulos de hidróxido sódico y puede usarse para reemplazar o eliminar otros pasos requeridos en el proceso por lotes. Los beneficios de una centrífuga son numerosos y evidentes, especialmente porque se puede eliminar el tiempo necesario para permitir que el glicerol se deposite en el fondo de la cámara que se vaciará, permitiendo así que la producción de biodiesel sea un proceso continuo. Aunque este proceso también puede reducir drásticamente el tiempo de sedimentación, válvulas programables adicionales, tuberías, fuentes de alimentación, motores y contenedores añaden otra capa de complejidad y costo al diseño. Los costos van desde \$ 750 a \$ 2000, dependiendo del tamaño y el nivel de automatización.

2.3.2.3. Método de separación con corriente electrostática

Otro método que puede reducir drásticamente el tiempo de la separación por gravedad es la separación electrostática, la cual es por lejos, un método que falta probar. El concepto básico es que al introducir un alto voltaje a la mezcla, el líquido con una mayor conductividad caerá al fondo del recipiente y el líquido con menor conductividad se depositara en la parte superior.

Algunos desafíos con este método incluyen la falta de caracterizar ciertas mediciones que pueden afectar la separación con alto voltaje, tales como las distancias entre electrodos, voltaje, configuración del electrodo, configuración del recipiente, por nombrar algunos. Greg Austic y Scott Shore llevaron a cabo una serie de experimentos y, debido a la cantidad mínima de información disponible sobre las mediciones de resistencia o conductancia del glicerol o del biodiesel, comenzaron con una derivación indirecta de estas mediciones aplicando un voltaje constante y midiendo la potencia del sistema, simplemente, $\text{Conductancia} = \text{Potencia}/\text{Voltaje}^2$. Un análisis similar debe ser conducido, si este método se escoge para separación del glicerol. Los resultados de este experimento indican que una combinación de alto voltaje, distancias grandes entre electrodos y bajo contenido de ácidos grasos pueden separar rápidamente el glicerol, en aproximadamente 90% de separación en 1 minuto. Además hay un voltaje de umbral que se puede alcanzar para maximizar el proceso. Sin embargo, una vez superado este umbral, no proporciona un mayor beneficio la adición de más voltaje. Aunque el análisis y viabilidad de este método parece bastante simple, las consideraciones de seguridad asociadas con altos voltajes sumergidos en líquidos deben explorarse para determinar aún más su plausibilidad.

2.3.3. SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA DE FASES: UNA REVISIÓN

Las dispersiones de un fluido en otro fluido inmiscible pueden encontrarse en muchos productos naturales como sintéticos, tales como leche, petróleo, productos alimenticios, drogas, pinturas, etc. La separación de las dos fases se vuelve necesaria para recuperar o purificar el producto, como por ejemplo la separación de la glicerina del biodiesel (Abeynaïke., 2012). En estos tipos de sistemas pequeñas gotas de líquido están dispersas dentro de la otra fase líquida, haciendo que la separación por gravedad tome demasiado tiempo. De allí que, el proceso de

separación puede ser mejorado estimulando el movimiento relativo de las gotas, usando fuerzas externas tales como mecánicas, térmicas, electrostáticas, químicas o una combinación de ellas.

Inspirado por la invención de un precipitador electrostático por Frederick Cottrel a inicios del siglo 20, el uso de fuerzas electrostáticas para la separación de fases condujo a abundante publicaciones en el primer tercio de ese siglo. La técnica comprende el uso de campos eléctricos en la separación de fases de fases líquidas, conocido comúnmente como electrocoalescencia, y se ha desarrollado e investigado debido a que es un método rápido, limpio y eficiente. Al aplicar corriente eléctrica las pequeñas gotas se juntan unas con otras formando gotas más grandes, estas últimas se separan con mayor facilidad (Eow, 2001).

Los factores que afectan directamente la velocidad de electrocoalescencia son muchos; a saber, la formación de la cadena, el movimiento del fluido, el tipo (CD o CA) y frecuencia del campo aplicado, la coalescencia parcial, las propiedades eléctricas y físicas de los fluidos, etc. En base a estas propiedades físicas se debe intentar buscar los valores óptimos de estas variables que permiten una separación eficiente y rápida.

2.3.3.1. Dinámica de la Electrocoalescencia

Fuerza electrostática de atracción entre gotas: el mecanismo de coalescencia de dos gotas en la presencia de un campo eléctrico comprende tres etapas distintas. El campo aplicado polariza una gota individual y cada gota actúa como un dipolo el cual induce cargas negativas y positivas en los dos extremos polares. El dipolo se alinea en la dirección del campo eléctrico aplicado. El primer paso de la electrocoalescencia implica la interacción de dos gotas debido a la atracción entre polos opuestos de polaridad. En los grandes límites de separación, las diferentes fuerzas que actúan sobre una gota pueden ser

la fuerza electrostática, la fuerza de arrastre y la fuerza gravitatoria (si las gotas son gruesas). Cuando dos gotas se mueven una hacia la otra, en la pequeña separación existe una película intersticial del medio fluido entre las caras delanteras de las gotas. El segundo paso de electrocoalescencia implica la compresión de fluido en el borde de meseta de la película delgada. A medida que las gotas se acercan, el espesor de la película se reduce aún más. En la tercera etapa, cuando la película se vuelve muy delgada, la acción acoplada de fuerzas electrostáticas y moleculares rompe la película permitiendo que las dos gotas se fusionen entre sí.

Si las gotas llevan cargas inherentes, los resultados de la "coalescencia migratoria" se deben a la electroforesis. Además de conducir las gotas más cerca, un campo eléctrico también mejora la disolución de la película delgada. En uno de los primeros estudios de electrocoalescencia, Berg, (1963) encontró que para dos gotas ancladas, la tasa de coalescencia era proporcional a la longitud del campo eléctrico aplicado (E_0) cuando E_0 era pequeño, mientras que si E_0 era alto, se encontró que la relación era proporcional a E_0^2 .

Aparte de la magnitud del campo eléctrico aplicado, hay muchos otros parámetros que pueden influir en la fuerza de atracción entre las gotas coalescentes. Tenemos la separación entre gotas, el tamaño de las gotas, la distorsión de la forma y las propiedades de los fluidos tales como la conductividad, la permitividad, la viscosidad, la tensión interfacial, etc. Los estudios posteriores en electrocoalescencia se centraron en estos parámetros, su optimización y consecuentemente haciendo el proceso más rápido (Raisin, 2011).

Formas de las gotas coalescentes: Un efecto inmediato que una gota muestra al aplicar un campo eléctrico es la deformación de la forma. Dos gotas estrechamente colocadas en un campo eléctrico muestran deformación cuando el número de electrocapilaridad (o el número de Weber eléctrico) es grande. Una gota también puede mostrar una deformación asimétrica en la parte delantera y trasera cuando está cerca de la superficie del electrodo. La presencia de gotas en la proximidad de electrodos no sólo induce deformación, sino que también protege las gotas internas en la emulsión.

Fuerzas de amortiguación: cuando dos gotas se aproximan a una distancia de separación bastante grande, la fuerza de arrastre se opone al movimiento. Para una esfera rígida la fuerza de arrastre sigue la Ley de Stokes.

Sin embargo, en el caso de una gota moviéndose en un medio viscoso la fuerza de arrastre experimentado por la gota es mucho más baja que el dado por la Ley de Stokes.

La resistencia al movimiento de las gotas coalescentes a distancias de separación grandes (distancia entre los bordes delanteros de gotas $<$ radio de las gotas, $d_0 < a$) es predominantemente debido a la fuerza de arrastre mientras que el caso contrario es gobernado por la fuerza de adelgazamiento de la película. La fuerza de adelgazamiento de la película es la fuerza debido del drenaje de película de líquido intersticial entre dos gotas coalescentes.

La viscosidad tiene un efecto significativo en el fuerza de adelgazamiento de la película, así como sobre la fuerza de arrastre de las gotas coalescedoras.

La presencia de tensoactivos en la interfase, acompañada de un alargamiento de la gota, hace que el gradiente de tensión interfacial conduzca a tensiones de Marangoni. Esto inhibe la generación de circulaciones internas.

Separación de la película delgada: Las gotas que se aproximan contienen una película del fluido medio entre sus caras principales. A medida que las gotas se acercan, el espesor de la película se reduce continuamente apretando en el borde de la meseta. En la reducción adicional en el grueso de la película por debajo de 1000°\AA , las fuerzas moleculares comienzan a jugar su papel. La atractiva fuerza de van der Waals ayuda a reducir el espesor, mientras que la repulsión de doble capa trata de separar las gotas.

Cuando dos gotas se encuentran a una distancia crítica entre sí, la película microscópicamente delgada que las separa puede romperse rápidamente, seguida por la coalescencia gota-gota. El mecanismo propuesto por el cual se realiza la ruptura de la película, indica que la película se rompe cuando el campo eléctrico a través de la película alcanza la resistencia a la rotura dieléctrica de la fase media.

2.3.3.2. Condiciones críticas para la electrocoalescencia

Las condiciones umbral para un par de gotas en el campo eléctrico, por encima de las cuales la distorsión de forma y la coalescencia pueden ocurrir, han sido sugeridas en la literatura. Latham y Roxburgh (1966) obtuvieron una expresión para el campo crítico aplicado para dos gotas estrechamente espaciadas. Debido al movimiento de las gotas coalescentes con el tiempo, no hay solución estática para las gotas deformadas en separaciones muy pequeñas.

Diversas investigaciones concluyen que para un ratio de separación $d_o/a < 1.2$, las gotas se deforman, se atraen fácilmente y finalmente se aglutinan, mientras que para $d_o/a > 1.2$, las superficies enfrentadas se deforman, asumen una forma cónica con un ángulo igual al ángulo del cono de Taylor estático.

En un emulsión sometida a coalescencia, la orientación de dos gotas vecinas con respecto a la dirección del campo aplicado también afecta la posibilidad de coalescer. En un campo eléctrico, para dos gotas que se atraen una a otras, la energía potencial del momento dipolar deber negativo. Para un par de gotas en un campo eléctrico, la coalescencia puede ser posible cuando el ángulo producido por la línea que une los centros de las dos gotas con la dirección del campo aplicado es tal que, $54.71^\circ < \theta < 125.19^\circ$ (Ghadiri, 2006).

2.3.3.3. Formación de cadenas

La formación de cadenas ha sido considerada como una de los principales factores retardantes en la electrocoalescencia. Las cadenas estables no solo reducen la velocidad de coalescencia sino que también pueden extenderse y hacer puente con los electrodos, conduciendo a un corto circuito. La formación de cadenas en emulsiones con electrocoalescencia ha sido atribuida a la presencia de impurezas las cuales alteran las propiedades de la interfase.

A pesar de una vasta investigación para determinar el mecanismo de formación de las cadenas hasta ahora no existe una explicación convincente. Sin embargo, existen varios estudios que sugieren métodos para evitar la formación de cadenas. Por ejemplo se ha usado campos eléctricos de CD para la coalescencia de emulsiones de agua en aceite. Se encontró que para campos eléctricos CD pulsados en un rango de frecuencia entre 0.5 a 50 Hz, 8 Hz produjo una velocidad de coalescencia óptima. La aplicación de campos CD pulsados ha sido propuesto como una solución para evitar la formación de cadenas.

Los campos eléctricos de CA tienen una ventaja sobre los campos de CD debido a su capacidad para suprimir flujos hidrodinámicos en una emulsión. Además, el campo de CA por encima de una frecuencia crítica no da lugar a formación de la cadena y suprime el cortocircuito

subsecuente de los electrodos. Se ha sugerido un campo de CA de alta frecuencia como una solución para evitar la formación de cadenas (Zhang, 2011).

2.3.3.4. Coalescencia Parcial

Cuando una gota, moviéndose a través de otro fluido inmiscible, llega a la interfase de su homo-fase, puede fusionarse completamente con el fluido o parcialmente formar pequeñas gotas. Este último fenómeno, llamado coalescencia parcial, se puede observar tanto en la ausencia de fuerzas externas o en la presencia de campos fuertes para formar gotas grandes. Las gotas resultantes se conocen gotitas secundarias. Algunas veces también exhibe la formación en cascada de gotas secundarias en la interfase dando lugar a la formación de gotitas hijas más finas. El número de Ohnesorge (Oh) ha sido usado como un criterio para la ocurrencia de coalescencia parcial. El número de Ohnesorge es la relación de las fuerzas viscosas y de tensión superficial. En ausencia de fuerzas externas un sistema con Oh grande muestra una coalescencia completa. Un valor más alto de la fuerza viscosa, es decir $Oh \gg 1$, retarda la formación de gotas secundarias. Una solución planteada para resolver este problema es el uso de altos voltajes.

2.3.3.5. Efectos de los parámetros de operación y propiedades del fluido

Los diferentes parámetros operativos que rigen la velocidad de electrocoalescencia son la magnitud, la forma de onda y la frecuencia del campo eléctrico aplicado, la geometría del equipo coalescedor, la configuración de los electrodos, el flujo o la turbulencia, etc. También las propiedades de la emulsión tales como la tensión interfacial, la diferencia de densidad, las viscosidades, las conductividades y permitividades de los fluidos, el tamaño de las gotas, la

polidispersidad, el porcentaje de la fase dispersa desempeñan papeles significativos en la electrocoalescencia.

El efecto de varios parámetros sobre la eficiencia de la coalescencia en procesos continuos en un campo eléctrico fue estudiado por Kim et al. (2002). Aparte de la fuerza del campo eléctrico se estudió el efecto de parámetros tales como la frecuencia del campo aplicado, concentración del demulsificador, temperatura, y tiempo de contacto, sobre la velocidad de separación. Ellos atribuyeron un aumento en la velocidad de coalescencia por la temperatura a la reducción de la viscosidad de la fase continua.

El campo eléctrico de CD es eficaz para promover la coalescencia puesto que la fuerza motriz se mantiene continuamente alta. Sin embargo, con alto contenido de agua el riesgo de rotura eléctrica es alto. El aislamiento de los electrodos puede evitar el cortocircuito. Sin embargo, en presencia de un campo eléctrico de corriente continua, todos los iones y portadores de carga se mueven rápidamente a la barrera aislante. Como resultado, la caída de tensión entre los electrodos metálicos tiene lugar principalmente a través del aislamiento sólido. Por lo tanto, se recomienda campos de corriente continua pulsada o campos de CA de alta frecuencia para evitar este efecto. En estos casos, la frecuencia del campo aplicado debe ser lo suficientemente alta para que la duración de un medio período de la tensión sea corta en comparación con la escala de tiempo de la distribución de la carga en la gota. El campo eléctrico de corriente continua se considera adecuado para emulsiones que contienen una fase dispersa pequeña y escasamente espaciada; Mientras que el campo con CA se beneficia al manejar las emulsiones con alto contenido de agua, ya que resiste el cortocircuito de un campo eléctrico (Noik et al., 2006). El campo AC / DC combinado permite el manejo de las emulsiones con alto contenido de agua a alta velocidad de coalescencia.

2.4.- Hipótesis

H₀: La aplicación de distintos voltajes y distancias entre electrodos no tendrán un efecto individual y combinado sobre el tiempo de separación de la glicerina y biodiesel por coagulación electrostática de la glicerina.

H₁: La aplicación de distintos voltajes y distancias entre electrodos tendrá un efecto individual y combinado sobre el tiempo de separación de la glicerina y biodiesel por coagulación electrostática de la glicerina.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Población y muestra

Universo: estuvo constituido por las mezclas de biodiesel y glicerina que se obtienen a la salida del reactor de producción de biodiesel a partir de aceite vegetal, previa separación del exceso de metanol.

Población: se utilizaron muestras sintéticas que se formularon con 10% v/v de glicerina y 90% de biodiesel. La glicerina fue del grado comercial y el biodiesel se obtuvo de la unidad de producción de biodiesel de la Universidad Agraria La Molina. La composición utilizada se asemeja a la composición con que sale la emulsión glicerina en biodiesel del reactor de transesterificación. Se preparó un total de 9 litros de mezcla glicerina-biodiesel. Para ayudar a formar la emulsión se utilizó lícitina en una dosis de 2 gramos por litro.

Muestra: para cada ensayo se utilizó un litro de mezcla sintética de glicerina en aceite.

Para cada muestra se aplicó los diferentes voltajes y distancias entre electrodos, haciendo tres repeticiones para cada muestra.

3.2 Operacionalización de variables

3.2.1 Distancias entre electrodos: se define como la separación entre los electrodos. Se ensayaron tres separaciones de los electrodos de cobre: 2 cm, 4 cm y 6 cm. Las distancias se fijaron haciendo la lectura con un vernier digital.

3.2.2 Voltaje aplicado: se define como el potencial eléctrico y se expresa en voltios. Se aplicó tres voltajes: 3000 V (100 mA), 6000 V (50 mA) y 9000 V (35 mA). Para la medición se utilizó un multímetro digital.

3.2.3 Tiempo de separación: definido como la duración que se tomó el proceso de separación de la glicerina del biodiesel cuando se aplicó las distintas combinaciones de distancias entre electrodos y voltajes. Se midió en segundo. Se utilizó un cronometro.

3.3 Recolección de información

El método utilizado para la recolección de datos fue la observación estructurada, realizándose el registro sistemático en cuadros de comportamiento de las variables estudiadas (Voltaje aplicado, distancias entre electrodos y tiempo de separación). Los datos se recolectaron de acuerdo al siguiente esquema:

Tabla 1. Distancia entre electrodos y voltaje aplicado

		VOLTAJE APLICADO (voltios)		
		V1 3000 V	V2 6000 V	V3 9000 V
Distancia entre electrodos (cm)	D1 2 cm	D1-V1 Tiempo separación	D1-V2 Tiempo separación	D1-V3 Tiempo separación
	D2 4 cm	D2-V1 Tiempo separación	D2-V2 Tiempo separación	D2-V3 Tiempo separación
	D3 6 cm	D3-V1 Tiempo separación	D3-V3 Tiempo separación	D3-V3 Tiempo separación

3.4. Método de construcción del separador electrostático y procedimiento

3.4.1 Construcción de separador electrostático

Como separador electrostático se utilizó un depósito cilíndrico de PVC transparente de 1.5 litros de volumen total. El depósito tuvo una base de 10 cm de diámetro y una boca de 8 cm de diámetro. La altura total del cilindro fue 18 cm.

Al depósito se adaptó una regla que permitió graduar el volumen del separador electrostático de 0 a 1 litros, con separaciones de 10 ml. Esto permitió hacer el seguimiento del volumen de separación de la glicerina en todo instante.

Como electrodos se utilizó dos barras de cobre de 13 cm de largo, 3.5 cm de ancho y 2 mm de espesor. Para tener una separación fija entre los electrodos, estos se sostuvieron sobre un juego de barras de plástico con graduaciones de 2, 4 y 6 cm.

Como fuente poder se construyó un transformador de corriente eléctrica de 220 V a voltajes superiores con regulación fina a 3000 V (100 mA), 6000 V (50 mA) y 9000 V (35 mA). La corriente empleada fue corriente alterna.

3.4.2 Procedimiento

Primero se preparó un litro de la emulsión de glicerina en biodiesel con ayuda de lecitina como emulsificante. Se utilizó 10% (v/v) de glicerina y 2 gramos de lecitina. Para la preparación se utilizó un agitador magnético regulado a 500 rpm y se agito hasta que la mezcla se puso de aspecto lechoso.

Se llenó el equipo de separación electrostático con la emulsión y se conectó el transformador a la alimentación de electricidad. Se prendió el cronómetro y se registró el tiempo que se logró separar la emulsión a totalidad observado que llegue hasta los 100 ml de glicerina. La observación se facilitó porque la glicerina tiene un aspecto más oscuro que el biodiesel.

En todo momento se tuvo cuidado de medir que el voltaje empleado este en los niveles propuestos. Por el calentamiento que se produce en el transformador, se tuvo que dejar enfriar por 30 minutos para realizar el otro ensayo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La glicerina utilizada fue del grado comercial de “alta gravedad” que según sus especificaciones tiene una concentración superior a 99.0% en peso de glicerina.

El biodiesel utilizado, adquirido de la Planta de producción de Biodiesel de Universidad Agraria La Molina (UNALM), presentó el análisis que se muestra en la Tabla 4.1. En esta tabla se presenta a modo de comparación los valores de la Norma USA para el biodiesel (ASTM D-6751) y de Norma Europea para el biodiesel (D6751-09).

Tabla 2. Caracterización del biodiesel adquirido y comprobación del cumplimiento de normas.

Parámetro	Unidades	Biodiesel de palma (UNALM)	Norma USA biodiesel ASTM D-6751	Norma EU biodiesel 14214-2008
Punto de inflamación	°C, mín.	154	150	93
Agua y sedimentos	% vol, máx	0.070	0.05	0.05
Carbón Conradson	% masa, máx.	0.41	0.05	0.03
Cenizas	% masa, máx.	0.006	-	0.003
Temperatura de destilación	Al 90%, °C	343	360	350
Viscosidad cinemática 40°C	cSt	4.0	1.9 – 6.0	3.5
Corrosión lámina de cobre	máx.	N° 1 ^a	N° 3	N° 1
Número de cetano	mín.	48.6	47	51
Azufre	% masa, máx	0.03	0.05	0.01

De acuerdo a los datos de la Tabla 2, el biodiesel utilizado en el presente experimento cumple con mayor proximidad las características de la Norma USA, ASTM D-6751.

En la Tabla 3 se resume los promedios de los tiempos logrados durante la separación electrostática empleando la combinación de tres voltajes (3000 V, 6000 V y 9000 V) y tres distancias entre electrodos (2 cm, 4 cm y 6 cm). Los valores originales registrados para cada combinación y repeticiones se muestran en el Apéndice.

Tabla 3. Tiempo promedio de separación electrostática de emulsiones de glicerina en biodiesel empleando combinación de voltajes y distancias entre electrodos

		Voltaje aplicado (voltios)		
		V1 3000 V	V2 6000 V	V3 9000 V
1Distancia entre electrodos	D ₁ 2 cm	17.00	13.00	8.33
	D ₂ 4 cm	31.67	22.00	10.33
	D ₃ 6 cm	45.33	31.00	19.33

De la Tabla 3 se observa que el menor tiempo de separación de la emulsión de glicerina en biodiesel fue de 8.33 segundos, y se logró con la combinación de 9000 V y una separación entre electrodos de 2 cm. En cambio el tiempo más prolongado para lograr la misma separación fue de 45.33 segundos y se logró aplicando un voltaje de 3000 V y una distancia entre electrodos de 6 cm. Este comportamiento corrobora lo observado por Noik y colaboradores (2006) quienes

indicaron que un mayor campo eléctrico tiene una influencia directa sobre el tiempo de separación de emulsiones de agua en aceite. Se debe tener en cuenta que el campo eléctrico es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la distancia entre electrodos.

Por otro lado se debe tener en cuenta que los tiempos logrados en la separación electrostática de la emulsión de glicerina en biodiesel son muchos menores que los tiempos que se logran aplicando tecnologías tradicionales. Por ejemplo los tiempos que se logran en un coalescedor mecánico varía entre 1 a 2 horas (Santacesarial, 2012). En un sedimentador por gravedad la separación se toma cerca de un día (Hawash, 2016). La tecnología más cercana en tiempo de separación es la centrifugación, que toma sólo minutos para lograrlo, sin embargo el consumo de energía eléctrica elevado los costos de producción. Por ejemplo, según catálogo de fabricante de centrifugas se necesita un motor de 22 kW para procesar de 5 a 17 toneladas por día de biodiesel (Alfa Laval, 2014). Los procesos que demoran sólo segundos para separar la emulsión de glicerina en biodiesel son los que emplean agentes químicos conocidos como líquidos iónicos (Shahba., 2015), pero el inconveniente es la contaminación del producto principal (el biodiesel) y el subproducto (glicerina). La tecnología empleada en la presente investigación se considera una tecnología limpia debido a que no se usa otros reactivos y no se produce tampoco otros componentes, asegurando que el biodiesel y glicerina obtenidos sean de alta pureza.

En la Tabla 4 se presenta el análisis factorial de la varianza del tiempo de separación establecido por las combinaciones de los valores de las variables VOLTAJE y DISTANCIA.

Tabla 4. Análisis factorial de varianza del tiempo de separación electrostática aplicando diferentes voltajes y distancias entre electrodos.

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: TIEMPO

Origen	Suma de cuadrados tipo II	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	3464,667 ^a	8	433,083	285,201	,000
Intersección	13068,000	1	13068,000	8605,756	,000
VOLTAJE	1568,000	2	784,000	516,293	,000
DISTANCIA	1649,556	2	824,778	543,146	,000
VOLTAJE * DISTANCIA	247,111	4	61,778	40,683	,000
Error	27,333	18	1,519		
Total	16560,000	27			
Total corregida	3492,000	26			

a. R cuadrado = ,992 (R cuadrado corregida = ,989)

De los resultados de la Tabla 4, según los valores de significancia menores de 0.05, se puede asegurar con una confianza de 95% que las variables ensayadas, voltaje y distancia entre electrodos afectan el tiempo de separación de las emulsiones de glicerina en biodiesel, tanto en forma individual como combinados. Con los valores de F obtenidos se concluye que el factor que más influencia tiene en forma individual es la distancia entre electrodos, aunque no muy distante del efecto individual del voltaje aplicado. El valor de F combinado es menor que los valores individuales, dando como conclusión que el efecto combinado de los dos factores ensayados es menor que los factores individuales. Lo que se acaba de deducir se puede comprobar con las representaciones de las Gráficas en las figuras 2 y 3.

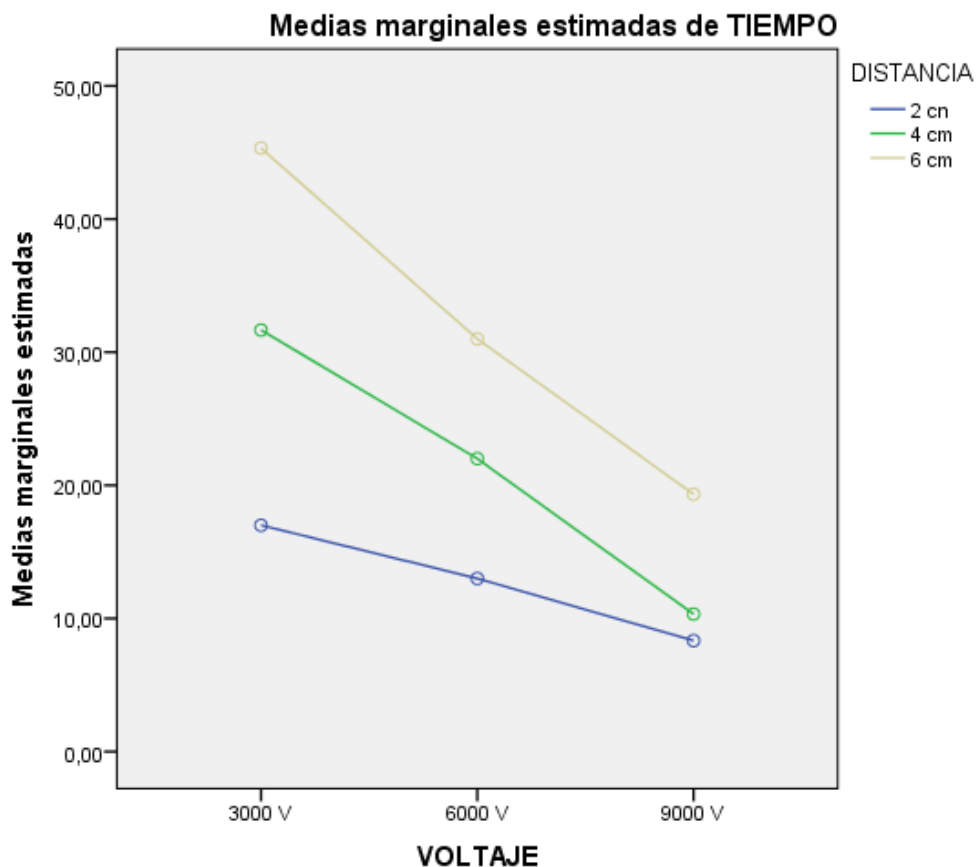


Figura 2. Efecto individual del voltaje aplicado durante la separación electrostática de una emulsión de glicerina en biodiesel

De la figura 2, se observa que hay una mayor pendiente similar para las distancias entre electrodos de 4 y 6 cm, lo que demuestra una mayor influencia del voltaje aplicado. Sin embargo, para la distancia de 2 cm la pendiente es menor, lo cual se interpreta como que el voltaje aplicado tiene una menor influencia. Por otro lado, para el voltaje de 9000 V, existe una cercanía entre los tiempos logrados en la separación de la emulsión, lo que indicaría que se puede ajustar el voltaje a valores menores de 9000 V con fines de ahorrar energía.

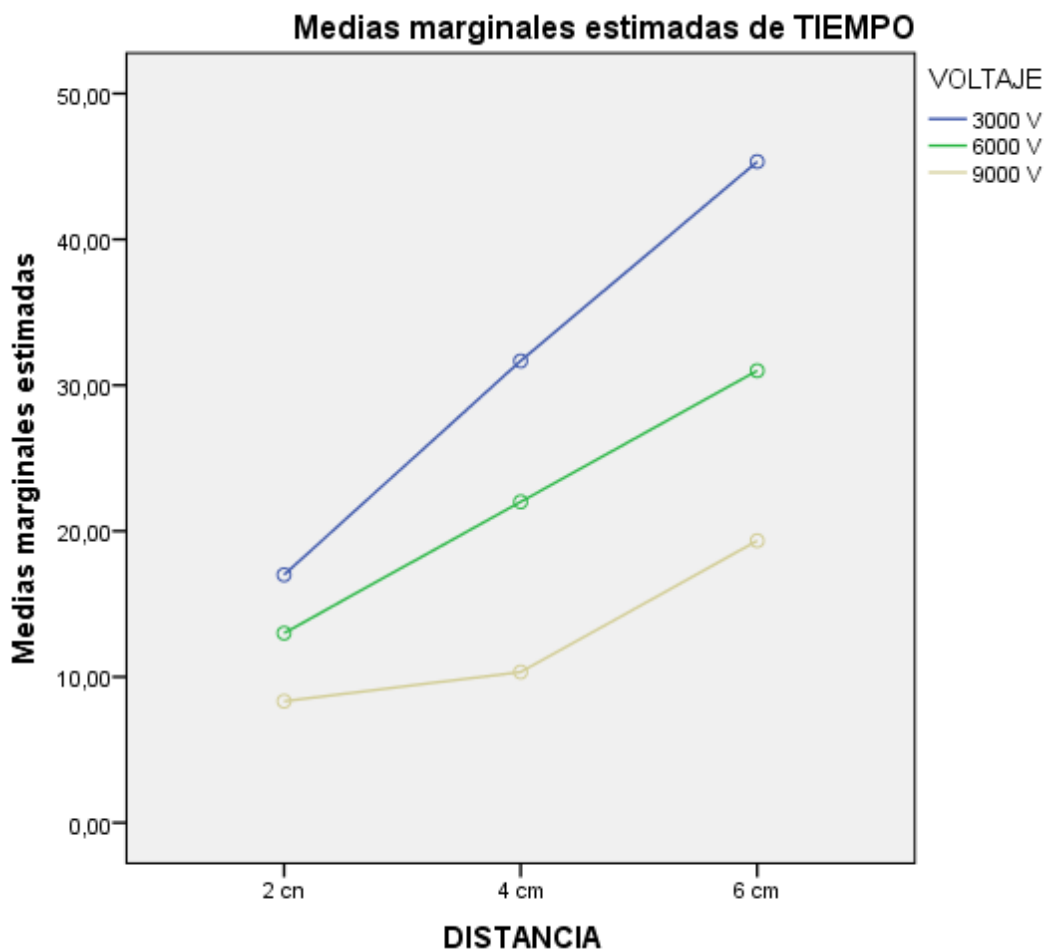


Figura 3. Efecto individual de la distancia entre electrodos durante la separación electrostática de una emulsión de glicerina en biodiesel

Observando la Figura 3, cuando se aplica el voltaje más bajo, la distancia entre electrodos tiene una mayor influencia que cuando se aplica 9000 V. Esto se deduce por las pendientes mostradas para cada voltaje, y se comprueba otra vez más lo mencionado anteriormente con la Figura 2.

La tecnología empleada en este proyecto se puede considerar limpia debido a que no se utiliza reactivos químicos, y además se consume una energía muy baja. Considerando que la combinación que dio mejores resultados fue 9000 V (35 mA) y 2 cm de distancia entre electrodos, lográndose un tiempo de 8.33 segundos, el consumo de energía calculado para un litro de solución llega a aproximadamente 7.29×10^{-4} kW-h. Para un volumen de 200 litros (capacidad de una centrifuga) el consumo seria 0.146 kW-h. En cambio una centrifuga para 200 litros con una demora de 2 minutos y una potencia instalada de 20 kW el consumo seria de 0.67 kW-h, un valor de casi 4.5 veces mayor que la energía que se consumiría en un separador electrostático.

V. CONCLUSIONES

- 5.1. Se rechaza la hipótesis nula, porque las variables independientes tuvieron efecto individual y combinado sobre la variable dependiente.
- 5.2. Se estableció que existe efecto individual y combinado de voltaje y distancia entre electrodos sobre el tiempo de separación electrostática de una emulsión de glicerina en biodiesel. El mayor efecto lo ejerció la distancia entre electrodos, seguido del voltaje, y menos efecto tuvo la combinación de voltaje y distancia entre los electrodos.
- 5.3. Se ensayó la combinación factorial de tres voltajes (3000 V, 6000 V y 9000) y tres distancias entre electrodos (2 cm, 4 cm y 6 cm), dando para todos tiempos de separación aceptables desde 45.33 hasta 8.33 segundos, y con bajo consumo de energía debido a que los amperajes utilizados fueron muy bajos (100, 50 y 35 mA respectivamente).

5.4. Se considera que es una tecnología limpia con bajo consumo de energía. Según cálculos, aproximadamente se consumiría 4.5 veces menos energía que la tecnología de centrifugas con el mismo fin.

VI. RECOMENDACIONES

- 6.1. Recomendar la aplicación de la separación electrostática como tecnología limpia en la etapa de separación de la emulsión de glicerina en biodiesel.
- 6.2. Ensayar otras combinaciones de electrodos, por ejemplo, hierro-aluminio, acero inoxidable-hierro.
- 6.3. Ensayar con emulsiones reales, para medir la influencia de otras sustancias presentes en una emulsión real.
- 6.4. Realizar una evaluación económica detallada del beneficio de esta tecnología limpia para ser usada a nivel industrial.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaszaadeh, A., B. Ghobadian, M.R. Omidkhah and G. Najafi. (2012).** Current biodiesel production technologies: A comparative review. *Energy Conversion and Management.*, 63: 138-148.
- Abeynaike, A., Sederman, A.J., Khan, Y., Johns, M.L., Davidson, J.F., Mackley, M.R.. (2012).** The experimental measurement and modeling of sedimentation and creaming for glycerol/biodiesel droplet dispersions. *Chem. Eng. Sci.* 79, 125–137.
- Alfa Laval, (2014).** BD 55. Separation system for biodiesel processing. Catalogue PCHS00001EN 0603.

Austic, G. & Shore, S. (2009). Characterization of the effect of high voltage current on the enhancement of biodiesel/glycerin separation. *Piedmont biofuels – clean renewable fuels*.

Berg, T.G.O., Fernish, G.C., Gaukler, T.A. (1963). The mechanism of coalescence of liquid drops. *J. Atmos Sci.* 20, 153–158.

Demirbas, A.(2007). Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy*, 35(9): 4661-4670.

Eow, J.S., Ghadiri, M., Sharif, A.O., Williams, T.J.(2001). Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding. *Chem. Eng. J.* 84, 173–192.

Ghadiri, M., Martin, C.M., Arteaga, P.A., Tüzün, U., Formisani, B.(2006). Evaluation of the single contact electrical clamping force. *Chem. Eng. Sci.* 61 (7), 2290–2300.

Hawash, S., Attia, N., Abdel, K., y ElDiwani G. (2016). Quality Improvement of Produced Biodiesel and Glycerol from Jatropha oil Transesterification. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 7, Issue 5.

Kim, B., Moon, J., Sung, T., Yang, S., Kim, J.(2002). Demulsification of water-in-crude oil emulsions by a continuous electrostatic dehydrator. *Sep. Sci. Technol.* 37 (6), 1307–1320.

Malhotra, R.K. & R. Sarin.(2004). Bio-diesel for energy security, environment protection and employment generation, SAE Publication. 2004-28-030.

Maan, H., S.M. Farouq, A.H. Mohd and M.A. Inas.(2010). A novel technique for separating glycerine from palm oil-based biodiesel using ionic liquids. *Fuel Processing Technology*, 91: 16-120.

Noik, C., Chen, J., Dalmazzone, C.S.H., January.(2006). Electrostatic demulsification on crude oil: a state-of-the-art review. *Soc.Pet. Eng., SPE-103808-PP*, 1–12

Raisin, J., Reboud, L., Atten, P. (2011). Electrocoalescence of water drops in oil shear flow: development of an experimental setup. In: IEEE-ICDL 2011.

Santacesaria, E, Vicente, G, Di Serio, M y Tesser, R, (2012). Main technologies in biodiesel production: State of the art and future challenges. *Catalysis Today*, 195(1), 2-13.

Singhabhandhu, A. & T. Tezuka. (2010). A perspective on incorporation of glycerin purification process in biodiesel plants using waste cooking oil as feedstock. *Energy*, 35: 2493-2504.

Shahbaz, K., Rashmi, W, Mjalli, F, Hshim, M., y Alnashef, I. (2015). Removal of glycerol from palm oil-based biodiesel using new ionic liquids analogues. *Journal of Engineering Science and Technology EURECA Special Issue January*, 98 – 111.

Vicente, G., M. Martinez y J. Aracil. (2007). Optimisation of integrated biodiesel production. Part I. A study of the biodiesel purity and yield. *Bioresource Technology*, 98: 1724-1733.

Zhang, Y., Liu, Y., Ji, R., Wang, F., Cai, B., Li, H. (2011). Application of variable frequency technique on electrical dehydration of w/oemulsion. *Colloids Surf., A: Physicochem. Eng. Aspects* 386,185–190.

LINKOGRAFIA

GreenerPro: Biodiesel Process:

<http://www.greenerpro.com/BiodieselProcess.html#HowToMakeBio>

VIII. ANEXOS

8.1. ANEXO 01

RESULTADOS

Tabla 5. Tiempo empleado (segundos) para la separación electrostática de glicerina emulsionada con biodiesel con diferentes voltajes y distancias entre electrodos.

		Voltaje aplicado (voltios)		
		V1 3000 V	V2 6000 V	V3 9000 V
1 Distancia entre electrodos	D ₁ 2 cm	17	13	8
		18	12	9
		16	14	8
	D ₂ 4 cm	32	21	10
		30	23	12
		33	22	9
	D ₃ 613 cm	47	31	18
		44	32	21
		45	30	19



Foto 1. Agitador ó Batidora Industrial y Medidor de Conductividad Eléctrica



Foto 2. Inicio de la agitación continua



Foto 3. Vista superior 1 de la muestra después de la agitación



Foto 4. Vista superior 2 de la muestra después de la agitación



Foto 5. Vista lateral 1 de la muestra después de la agitación



Foto 6. Vista lateral 2 de la muestra después de la agitación



Foto 7. Vista de la mesa de trabajo con el material a utilizar

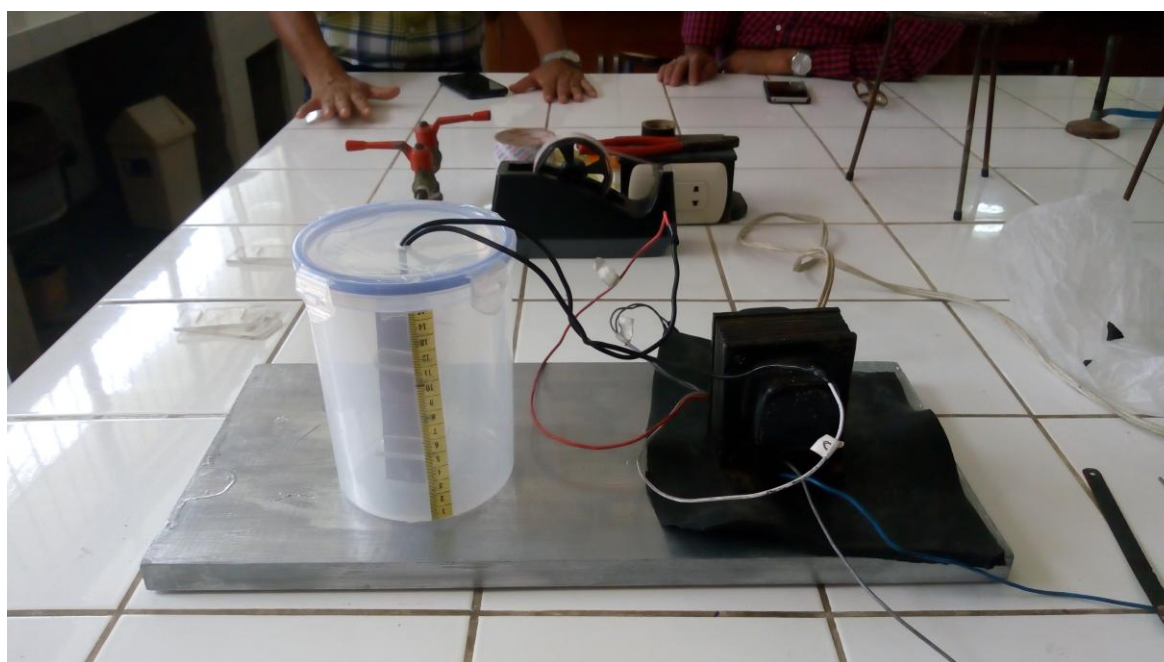


Foto 8. Vista de la fuente de poder y electrodos acoplados al recipiente para la separación electrostática



Foto 9. Vista de los electrodos de cobre dentro de la muestra a separar



Foto 10. Vista del recipiente y fuente de poder – contacto de 3000 V

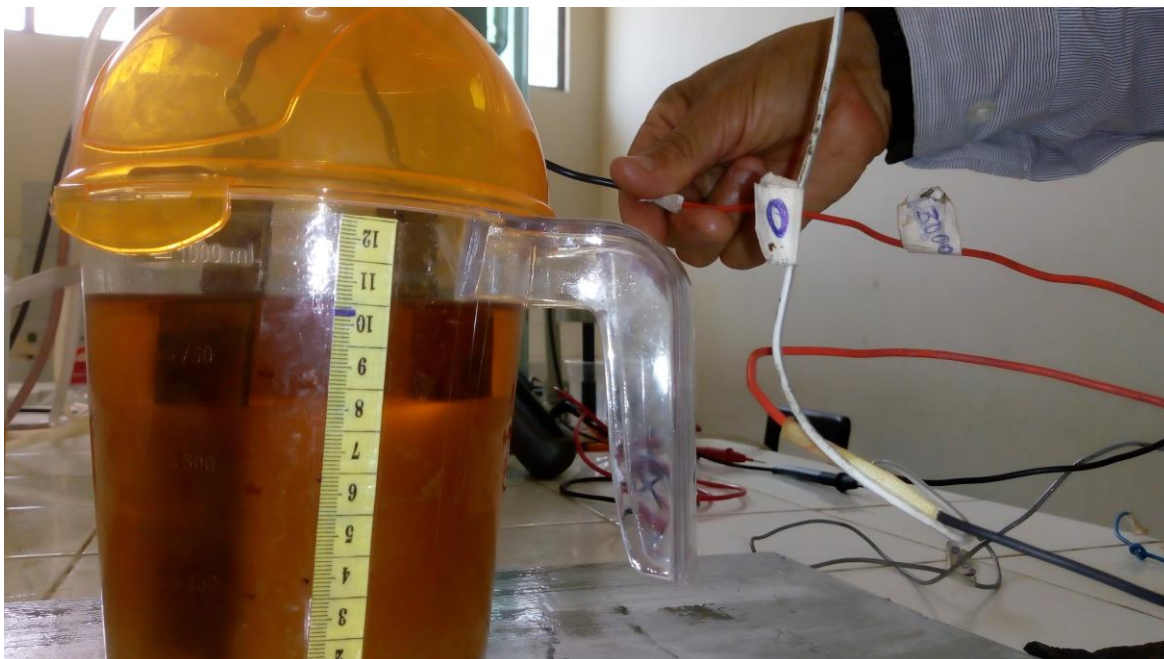
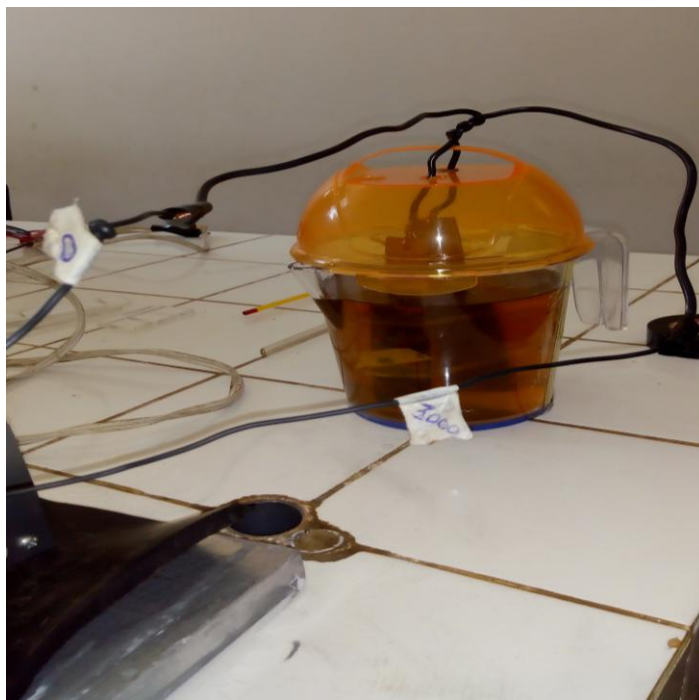


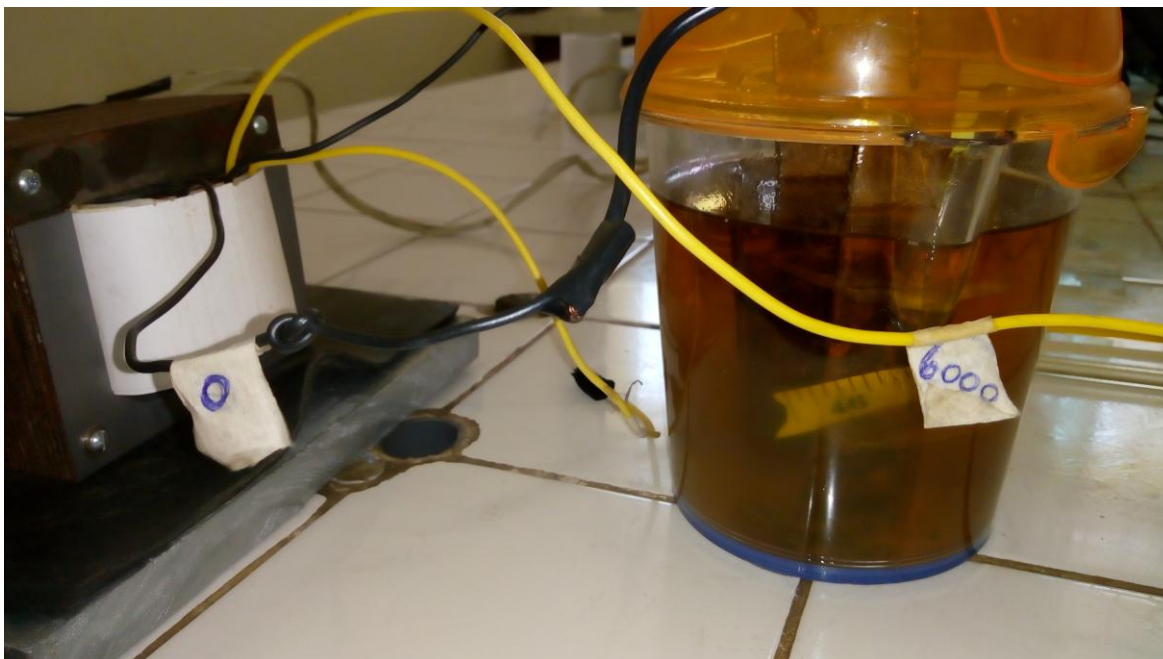
Foto 11. Vista del recipiente con 1 l de muestra a punto de someterse a separación electrostática a 3000 V



Foto 12. Vista del recipiente con la muestra en el momento de la separación electrostática a 3000 V



**Foto 13. Vista del recipiente con la muestra luego de la separación a
3000 V**



**Foto 14. Vista del recipiente con la muestra en el momento de la separación electrostática
a 6000 V**



Foto 15. Recipiente con la muestra y fuente de poder después de la separación electrostática a 6000 V

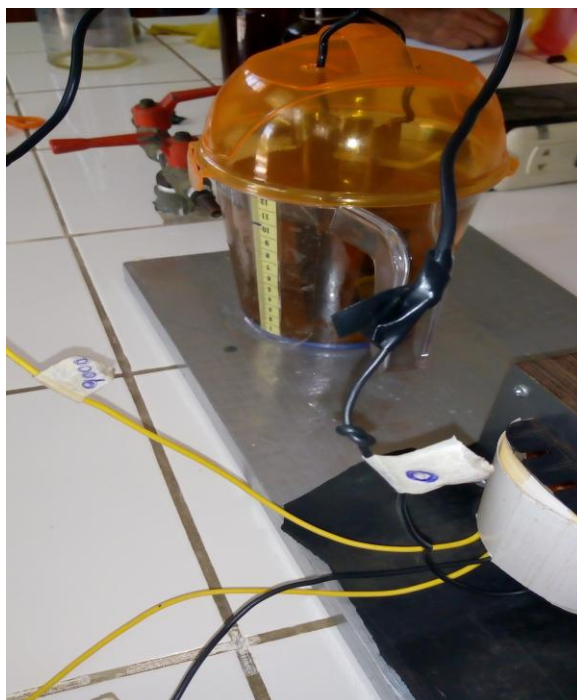


Foto 16. Vista de la fuente de poder y el recipiente con la muestra - contacto 9000 V



Foto 17. Vista del recipiente con la muestra en el momento de la separación electrostática a 9000 V



Foto 18. Vista del recipiente con la muestra después de la separación electrostática a 9000 V