



Universidad Nacional

SAN LUIS GONZAGA



Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial, siempre y cuando den crédito y licencia a nuevas creaciones bajo los mismos términos.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUÍS GONZAGA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica



Tesis

"Determinación de los parámetros del combustible diésel con un agregado de 10% de biodiesel obtenido por transesterificación a partir del aceite de girasol "

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

Línea de investigación: Ciencias Naturales, ingeniería y tecnologías sostenibles.

AUTOR: Bach. VARGAS SALINAS RICARDO RUBEN

ASESOR: Mag. JORGE ESPINOZA LA ROSA

Ica – Perú

2026

A todas las personas que me apoyaron, en especial a mis padres, por su apoyo constante, su esfuerzo silencioso y la confianza depositada en mí. Este logro es también fruto de su dedicación y ejemplo.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por acompañarme en este proceso con esfuerzo, paciencia y confianza. Por el apoyo constante en los momentos de cansancio y duda, y por brindarme las herramientas necesarias para no rendirme y culminar esta etapa académica.

INDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
PORTADA	01
DEDICATORIA	02
AGRADECIMIENTO	03
ÍNDICE DE CONTENIDOS	04
ÍNDICE DE TABLAS	05
ÍNDICE DE FIGURAS	06
RESUMEN	07
ABSTRACT	08
I. INTRODUCCIÓN	09
II. ESTRATEGIA METODOLOGICA	12
2.1. Antecedentes.	12
2.2. Marco teórico.	13
2.3. Marco conceptual.	21
2.4. Estrategia metodológica.	22
2.5. Procedimiento experimental.	23
III. RESULTADOS.	29
IV. DISCUSIÓN.	58
V. CONCLUSIONES	59
VI. RECOMENDACIONES.	60
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	61
VIII. ANEXOS.	62

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados del índice de acidez del aceite de girasol.	29
Tabla 2. Resultados del índice de yodo del aceite de girasol.	30
Tabla 3. Resultados del índice de peróxidos del aceite de girasol.	31
Tabla 4. Resultados de la densidad del aceite de girasol.	32
Tabla 5. Resultados del contenido de humedad en el aceite de girasol.	33
Tabla 6. Resultados de la viscosidad cinemática del aceite de girasol.	34
Tabla 7. Resultados del análisis del aceite de girasol.	35
Tabla 8. Determinación de la relación aceite: metanol.	36
Tabla 9. Determinación de la dosificación adecuada de catalizador.	37
Tabla 10. Determinación de la temperatura a la cual se lleva el proceso.	38
Tabla 11. Determinación de la velocidad de agitación a la cual se lleva el proceso.	39
Tabla 12. Determinación del tiempo de transesterificación.	40
Tabla 13. Parámetros óptimos para la obtención del biodiesel.	41
Tabla 14. Determinación de la densidad del biodiesel a 15°C.	42
Tabla 15. Determinación de la Viscosidad cinemática a 40°C.	43
Tabla 16. Determinación del punto de inflamación en crisol cerrado.	44
Tabla 17. Determinación del contenido de agua.	45
Tabla 18. Determinación del índice de yodo.	46
Tabla 19. Determinación del valor ácido.	47
Tabla 20. Parámetros del biodiesel elaborado con aceite de girasol.	48
Tabla 21. Determinación de la Viscosidad cinemática a 40°C del Diesel B10.	49
Tabla 22. Determinación de la densidad del Diesel B10.	50
Tabla 23. Determinación del punto de inflamación del Diesel B10.	51
Tabla 24. Determinación del número de acidez del Diesel B10.	52
Tabla 25. Determinación del total de insolubles en el Diesel B10.	53
Tabla 26. Determinación de partículas contaminantes en el Diesel B10.	54
Tabla 27. Determinación de la corrosión en lámina de cobre en el Diesel B10.	55
Tabla 28. Determinación de la volatilidad del Diesel B10.	56
Tabla 29. Parámetros de Diesel B10.	57

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Reacciones de transesterificación catalítica de glicéridos.	15
Figura 2. Esquema del proceso para obtener biodiesel.	15
Figura 3. Reacción de transesterificación de los aceites vegetales.	17
Figura 4. Reacción estequiométrica de la formación de jabón.	18
Figura 5. Reacción estequiométrica de transesterificación.	18
Figura 6. Aceite de girasol empleado en la elaboración del biodiesel.	23

RESUMEN

La presente investigación titulada **Determinación de los parámetros del combustible diésel con un agregado de 10% de biodiesel obtenido por transesterificación a partir del aceite de girasol**, es un estudio Teórico experimental que tiene como objetivo determinar los parámetros de un combustible denominado Diesel B10 que fue elaborado con un 10% en volumen de biocombustible B100 y 90% en volumen de Diesel N°2 (D2), lo cual se hizo experimentalmente determinándose la viscosidad que fue de 4,2cSt, la densidad de 0,845g/mL, la temperatura de inflamación 67°C, el número de acidez 0,28mgKOH/Kg, la corrosión en lámina de cobre N°2, y la volatilidad del combustible el 90% del recuperado se destiló a 350°C y la Temperatura final de ebullición fue de 382°C, valores que están dentro de los establecidos para el combustible Diesel N°2 y el Diesel B5 lo que permite concluir que el Diesel B10, es una mezcla combustible que se puede utilizar sin ningún inconveniente en motores dedicados al combustible gasoil (motores encendidos por compresión o motores Diésel).

PALABRAS CLAVES: Biocombustible, biodiesel, transesterificación, aceite de girasol.

ABSTRACT

The present investigation titled Determination of the parameters of diesel fuel with an addition of 10% biodiesel obtained by transesterification from sunflower oil, is a theoretical experimental study that aims to determine the parameters of a fuel called Diesel B10 that was made with 10% by volume of biofuel B100 and 90% by volume of Diesel No. 2 (D2), which was done experimentally determining the viscosity which was 4.2 cSt, the density of 0.845 g / mL, the flash point 67 ° C, the acid number 0.28 mgKOH / Kg, the corrosion in copper sheet No. 2, and the volatility of the fuel 90% of the recovered was distilled at 350 ° C and the final boiling temperature was 382 ° C, values that are within those established for Diesel No. 2 fuel and Diesel B5 which allows us to conclude that Diesel B10 is a A fuel mixture that can be used without any problems in diesel-powered engines (compression-ignition or diesel engines).

KEY WORDS: Biofuel, biodiesel, transesterification, sunflower oil.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú existe en el mercado de los combustibles para automotores el Diésel B5, un combustible constituido por una mezcla de 95% en volumen de Diesel N°2 que es un derivado del petróleo obtenido por destilación fraccionada del crudo y 5% en volumen de biodiésel (B100), es decir de biodiesel obtenido integralmente del aceite vegetal mediante la transesterificación. A pesar de que el porcentaje de este último es mínimo (5%) ofrece al combustible fósil grandes ventajas que favorecen tanto al funcionamiento del motor como a la reducción de contaminantes que afectan el medio ambiente. Esto demuestra en la práctica que la adición de biodiesel al Diesel derivado del petróleo ofrece varias ventajas tanto desde el punto de vista ambiental, técnico como económico (en algunos contextos). Dentro de las ventajas ambientales están: La reducción de emisiones contaminantes ya que emite con los gases de la combustión menos CO₂ (dióxido de carbono), menos material particulado, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados, así mismo hay una reducción significativa de emisiones de SO₂ (dióxido de azufre), ya que el biodiesel no contiene azufre. Por otro lado, el biodiesel es biodegradable y no tóxico, lo que reduce el impacto en caso de derrames. Otra de las ventajas que ofrece al medio ambiente es la reducción de gases de efecto invernadero.

La adición de biodiesel al Diesel fósil ofrece también ventajas técnicas, como una mayor lubricidad, es decir, mejora la lubricación del sistema de inyección, prolongando la vida útil de bombas e inyectores, especialmente en motores que usan Diesel con bajo contenido de azufre (ULSD). Su índice de cetano es más alto, lo que mejora el encendido y el rendimiento de combustión del motor y además, es compatible con los motores existentes, lo que quiere decir que mezclas comunes como B5 o B20 pueden utilizarse sin necesidad de modificaciones en la mayoría de los motores Diesel modernos.

Teniendo en cuenta estas ventajas de las mezclas del combustible Diesel convencional con el biodiesel en la presente tesis se ha desarrollado el estudio experimental del comportamiento del Diesel B10%, cuyo porcentaje de biodiesel ha sido elaborado a partir del aceite de girasol mediante transesterificación con etanol e hidróxido de sodio y sometido a ensayos para caracterizarlo y a la vez establecer comparativamente la diferencia de sus parámetros operativos dentro del motor de combustión interna, en relación al Diesel convencional y al Diesel B5.

La situación problemática:

En el mercado nacional, el combustible Diesel que se vende para abastecer vehículos es el Diesel B5, es una mezcla combustible conformada por un 5% de biodiesel (B100) y un 95% de Diesel N°2, su formulación se hizo con el fin de disminuir las emisiones contaminantes que genera la combustión del Diesel N°2 el cual contiene una elevada concentración de azufre, que incluso puede llegar a 1000 ppm, mientras que el biodiesel no contiene azufre y ofrece una serie de ventajas desde el punto de vista mecánico y ambiental. De acuerdo con las especificaciones dadas por Petroperú el Diesel B5 posee un elevado índice de cetano que le permite una elevada calidad de encendido un arranque inmediato en el cual el motor produce menor ruido. El 5% de Biodiesel que se le agregado disminuye un porcentaje mínimo de azufre lo que equivale a una disminución en el mismo porcentaje de azufre en su constitución,

y por ende habrá un menor desgaste en el motor, pero no “una protección efectiva contra el desgaste”, ya que esta protección se reduce en un mínimo porcentaje, aunque ya es positiva, el resto de propiedades de este combustible está en función a la composición química del Diesel N°2; en otras palabras las ventajas ecológicas y mecánicas que ofrece este combustible son mínimas, debido a que se ha adicionado solo un 5% de biodiesel B100 (B100 es la denominación que corresponde al biodiesel puro o totalmente obtenido por transesterificación a partir de aceites vegetales). Frente a esto se propone la presente investigación que hará el estudio correspondiente sobre las propiedades funcionales del combustible Diesel N°2 al cual se le agregará un 10% de biodiesel B100, conformando una mezcla que se denominará Diesel B10.

Problemas de investigación:

Problema general:

¿Experimentalmente se pueden determinar los parámetros funcionales del combustible diésel con un agregado de 10% de biodiesel obtenido por transesterificación a partir del aceite de girasol?

Problemas específicos:

- ¿En qué medida influye en las propiedades funcionales el agregado del 10% de biodiesel al Diesel N°2?
- ¿Qué características fisicoquímicas tiene el biodiesel obtenido por transesterificación a partir del aceite de girasol?

Objetivos.

Objetivo general

Determinar experimentalmente los parámetros funcionales del combustible diésel con un agregado de 10% de biodiesel obtenido por transesterificación a partir del aceite de girasol.

Objetivos específicos:

- Determinar en qué medida influye en las propiedades funcionales el agregado del 10% de biodiesel al Diesel N°2.
- Determinar las características fisicoquímicas del biodiesel obtenido por transesterificación a partir del aceite de girasol.

Las hipótesis y variables:

Hipótesis general.

Los parámetros funcionales del combustible diésel con un agregado de 10% de biodiesel obtenido por transesterificación a partir del aceite de girasol se pueden determinar experimentalmente.

Hipótesis específicas:

- El agregado del 10% de biodiesel al Diesel N°2 influye significativamente.
- Las características fisicoquímicas que tiene el biodiesel obtenido por transesterificación a partir del aceite de girasol son similares a las del Diesel N°2

Variables:

Variable independiente:

Parámetros funcionales del combustible diésel

Variable dependiente.

Agregado del 10% de biodiesel.

Justificación e importancia.**Justificación teórica:**

Desde el punto de vista teórico la presente investigación se justifica porque en ella se hará un estudio sobre mezcla de combustibles en la cual participará un combustible cuya materia prima es renovable como es el caso del biodiesel B10 y un combustible fósil como es el Diesel N°2, para caracterizarlo y estudiar sus propiedades funcionales a partir de los cuales se podrá establecer cómo funcionará en el motor de combustión interna que se abastece con combustible Diesel.

Justificación metodológica:

Desde el punto de vista metodológico, esta investigación es de tipo aplicada y de diseño experimental, la demostración de la validez de su hipótesis requerirá de ensayos de laboratorio para recabar los datos necesarios por lo tanto se tendrá que aplicar el método científico.

Justificación ambiental:

Desde el punto de vista ambiental, la investigación se justifica porque plantea el uso adicional de un combustible que es amigable con la naturaleza, que genera menos contaminantes como es el caso del biodiesel B10.

II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Generalidades

Antecedentes internacionales.

P. Benjumea y colaboradores [1] publicaron su trabajo de investigación la cual aborda el estudio del efecto de la temperatura sobre la viscosidad del combustible que resulta de la mezcla del biodiesel obtenido a partir del aceite de palma y el Diesel obtenido a partir del petróleo mediante la destilación fraccionada a temperatura que van desde 180 a 240°C El estudio es de diseño experimental, en el cual para demostrar la hipótesis planteada se procedió a realizar pruebas experimentales en los cuales se determinó la viscosidad cinemática tanto para el aceite de palma como para el Diesel convencional y la mezcla de ambos, las cuales fueron formuladas para obtener el B5, B10, B15, B20 y B30. La temperatura a la cual se determinó la viscosidad cinemática fue de 40°C y 100°C. Como resultados de la investigación se llegó a la conclusión de que la mezcla Biodiesel - Diesel se comporta como un fluido newtoniano a 20°C y las variaciones de la viscosidad cinemática son las mismas que las que se obtienen con el Diesel convencional.

V. Domínguez [2] presentó su tesis sobre caracterización de mezclas de biodiesel. En este trabajo se realizaron pruebas fisicoquímicas de mezclas de diésel biodiesel con el objetivo de minimizar los contaminantes de la combustión de los motores de vehículos. En este caso el tesista adquirió el biodiesel en un grifo al igual que el combustible diésel. Con ambos combustibles preparó mezclas al 5, 10, 15 y 20%. Los ensayos se realizaron en un laboratorio de hidrocarburos de la Escuela y una vez obtenidos los combustibles se procedió a hacer pruebas de campo con motores de vehículos que son alimentados por gasoil. Se concluye que la mezcla que mejores resultados dio fue la que posee un 10% de biodiesel. Los ensayos sobre las propiedades funcionales de los combustibles involucraron el tiempo de encendido y de combustión, el punto de anilina y el índice de cetano. Se comprobó que la mezcla que tiene el 10% de biodiesel en su composición tuvo mejores propiedades de ignición y combustión, así como un mejor índice de cetano, punto de anilina y poder calorífico, en comparación con las otras mezclas ensayada, así mismo produjo menos material contaminante.

A nivel nacional.

L. Santivañez [3] presentó su tesis que aborda el estudio del consumo de combustible y las emisiones que producen las mezclas de combustible Biodiesel de varias concentraciones con el Diesel obtenido del petróleo. La investigación es experimental, de tipo aplicada y de nivel explicativo, las pruebas se hicieron en laboratorio y en un banco de pruebas con un motor mono cilíndrico en el cual se tomaron las muestras correspondientes de los gases de la combustión de cada una de las mezclas para medir la concentración de las emisiones. Las emisiones estudiadas en la tesis fueron el dióxido de carbono, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno (monóxido y dióxido) los cuales se producen en mayor volumen junto con el óxido de azufre y

su proporción disminuye conforme aumenta el porcentaje de biodiesel en la mezcla. De la misma manera el consumo específico de combustible es mayor cuando mayor es el porcentaje de biodiesel en los tres tipos de mezclas.

J. Villegas [4] en su tesis sobre el empleo de aceite obtenido a partir de semillas oleaginosas como el girasol o el algodón en la fabricación del combustible biodiesel empleando el método de la transesterificación del aceite empleando metanol e hidróxido de sodio, establece los parámetros de dicha elaboración los cuales son muy similares a los industriales, llevando el proceso a una temperatura de 60°C. En la Tesis teniendo en cuenta que en el Perú se emplea el Diesel B%, se prepararon varias muestras conformadas por el aceite de semillas oleaginosas y Diesel 2 para mediante varios ensayos determinar las características de empleo en un motor Diesel convencional, a fin de no hacer ningún cambio en la estructura del motor que es un motor dedicado, se pudo comprobar que las características de las mezclas elaboradas se comportan en el motor de igual forma que el biodiesel comercial, con la ventaja de una menor cantidad de emisiones contaminantes.

A nivel local.

La revisión bibliográfica sobre el tema que se aborda en esta investigación ha resultado negativa en las bibliotecas de las universidades locales.

2.2. Bases teóricas.

2.2.1. Biocombustibles.

Desde el punto de vista técnico un biocombustible se define como un combustible derivado de materia orgánica renovable, producido a partir de biomasa vegetal o animal, que puede ser utilizado como fuente de energía térmica, eléctrica o mecánica, en sustitución parcial o total de combustibles fósiles.

Desde el punto de vista químico y termodinámico, los biocombustibles están compuestos principalmente por moléculas orgánicas oxigenadas (como ésteres, alcoholes o hidrocarburos producidos por rutas biológicas o termoquímicas), y presentan características energéticas comparables a las de los combustibles convencionales.

La International Energy Agency (IEA), define los biocombustibles como combustibles que se obtienen de la biomasa o residuos de materias primas vegetales o animales. Son también llamados combustibles alternativos o renovables y se usan mezclándolos con los combustibles fósiles en una proporción normada por los organismos normativos de cada país. Algunos países establecen metas en función de contenido energético, otros del contenido volumétrico, y últimamente en función a la disminución de contaminantes atmosféricos.

Pertenecen a este tipo de combustibles que también son llamados combustibles renovables: el biodiesel y el alcohol etílico.

2.2.2. Biodiesel.

2.2.2.1. Definición.

Para definir de manera concreta el biodiesel tomaremos la definición dada por la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) la cual dice que el biodiesel es esteres mono alquílico de ácidos grasos de cadena larga derivados de insumos grasos renovables, como los aceites vegetales o grasas animales. vegetales. Esta definición se basa en la composición química del biodiesel, el cual está compuesto por una mezcla de ésteres de alquilo (metilo y etilo, principalmente), con cadenas largas de ácidos grasos que contienen oxígeno, lo cual le otorga al combustible una combustión mucho más limpia. Físicamente este biocombustible es una sustancia oleaginosa conformada por un conjunto de ácidos grasos saturados e insaturados derivados de la transesterificación de aceites y grasas de origen vegetal. A gran escala para la industria este biocombustible se produce a partir del aceite de soya, canola, girasol o piñón blanco. También se emplea el aceite de palma aceitera, higuerilla y aceites usados.

2.2.2.2. Proceso de producción del biodiesel

La producción industrial del biodiesel se desarrolla básicamente realizando las siguientes etapas:

Acondicionamiento de la materia prima.

Consiste en el tratamiento del aceite que se va a emplear, esta primera etapa de acondicionamiento permite eliminar del aceite base (materia prima), los contaminantes que contiene, hasta obtener un producto limpio, consiste en el filtrado, desgomado, neutralización.

Esterificación

Es un proceso en el cual se eliminan los ácidos grasos libres del aceite empleadas como insumos.

Transesterificación.

En esta etapa el aceite se transforma químicamente en glicerina y en biodiesel gracias a la acción del hidróxido de sodio o el ácido sulfúrico empleados como catalizadores y un alcohol.

Lavado.

La finalidad del lavado es eliminar del biodiesel cualquier sustancia soluble en agua.

Deshidratado.

Mediante aplicación gradual del calor hasta una temperatura de 90 – 100°C para eliminar el agua por evaporación.

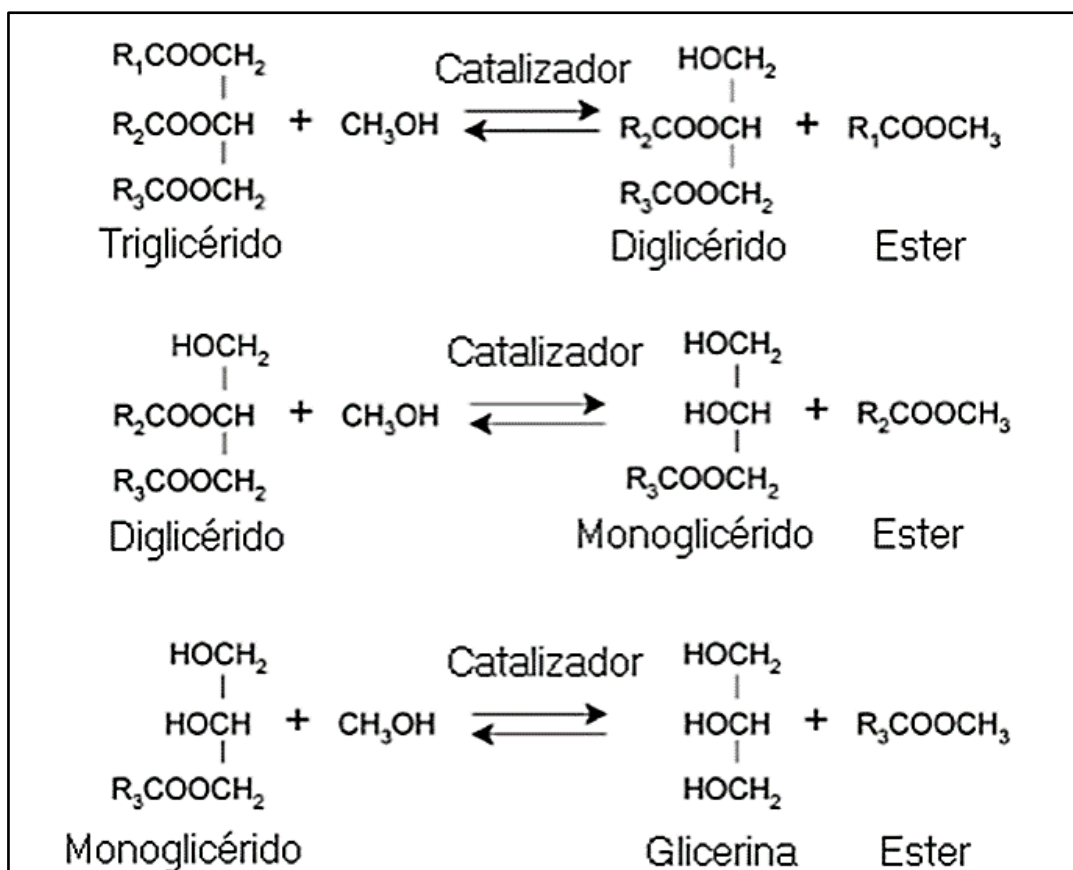


Figura 1: Reacciones de transesterificación catalítica de glicéridos.

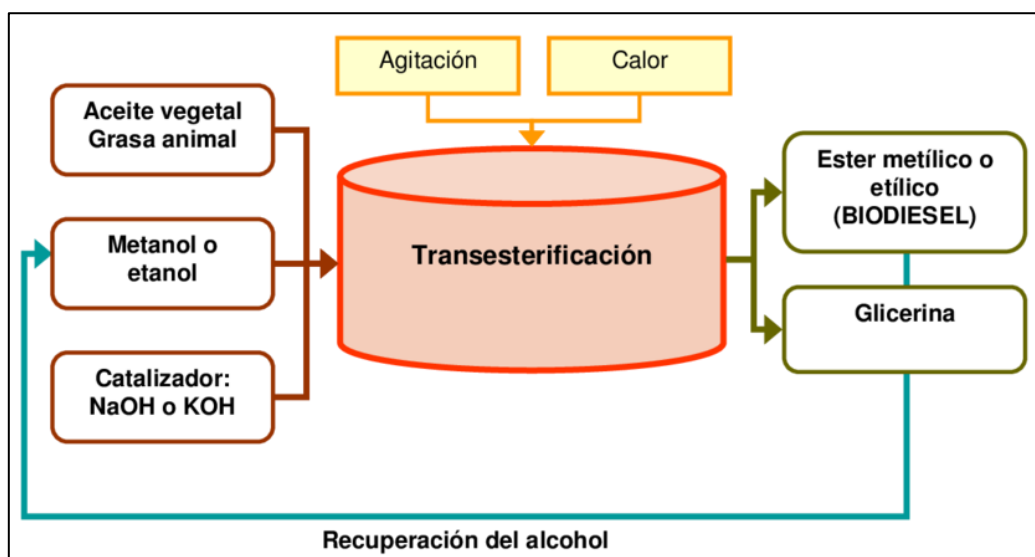


Figura 2. Esquema del proceso para obtener biodiesel.

2.2.2.3. Beneficios del uso del biodiesel en el motor de combustión interna.

Un motor de combustión interna que emplea como combustible el biodiesel se ve favorecido desde el punto de vista técnico, económico y medio ambiental, los cuales de manera concreta se exponen a continuación:

- Su empleo permite disminuir significativamente la emisión de muchos gases de efecto invernadero y partículas contaminantes de la atmósfera. Gracias a la presencia de oxígeno en las moléculas de este combustible, el biodiesel tiene una combustión más completa que el diésel, mejorando por eso la composición de las emisiones.
- En los gases de la combustión del biodiesel se reduce las emisiones de partículas sólidas menores a 10 micrones (PM10), monóxido de carbono (CO) y óxidos de azufre (SOx), que son peligrosos agentes contaminantes.
- Debido a su viscosidad el biodiesel posee un alto poder lubricante y protege al motor reduciendo el desgaste, así como los gastos por mantenimiento.
- En la constitución química del biodiesel no hay benceno, ni otras sustancias cancerígenas asociadas a los hidrocarburos aromáticos policíclicos, por lo que estas sustancias no se emiten lo cual disminuye el riesgo de enfermedades respiratorias y alergias.
- El biodiesel se degrada con mucha facilidad, en otras palabras, es altamente biodegradable y de baja toxicidad, el biodiesel puro prácticamente no es tóxico en caso de ingestión, tanto para los peces como para los mamíferos. En caso de derrame o accidente, no pone en peligro ni el suelo ni las aguas subterráneas.

2.2.2.4. Química del biodiesel.

Partiendo de consideraciones estequiométricas la reacción de transesterificación es aquella que se lleva a cabo en una relación molar de alcohol: triglicérido de 3:1, lo que genera una reacción de metanólisis 1 mol de triglicérido con 3 moles de alcohol agregando una cierta cantidad adicional de alcohol a fin de desplazar la reacción hacia la formación del éster metílico. En este proceso se suceden una serie de reacciones propias de la transesterificación, las cuales son catalizadas por el alcohol, son tres, de carácter irreversible y consecutivas, durante estas reacciones el triglicérido se transforma en diglicérido, seguidamente monoglicérido y luego en glicerol.

La reacción de transesterificación con catalizador alcalino se lleva a cabo en tres etapas: La primera es una reacción del átomo de carbono carbonilo de la molécula de triglicérido con el anión del alcohol (ion metóxido). En la segunda etapa, la reacción es con un alcohol para regenerar el anión del alcohol (ion metóxido). Finalmente, en la última etapa se obtiene un éster de ácido graso y un diglicérido. Cuando cualquier catalizador es mezclado con alcohol, se forma el grupo alcóxido. Cuando concluyen las reacciones de transesterificación de triglicéridos, se han formado una mezcla de ésteres, glicerol, alcohol, catalizador y tri-, di- y monoglicéridos

Triglicérido + Alcohol $\rightarrow$ Diglicérido + Éster

Diglicérido + Alcohol $\rightarrow$ Monoglicérido + Éster

Monoglicérido + Alcohol $\rightarrow$ Glicerina + Éster

La reacción general de la transesterificación es:

Triglicérido + 3Alcohol $\rightarrow$ 3 ésteres + Glicerina

Para que la esterificación se realice completamente se emplea en el proceso un exceso de alcohol lográndose de esta manera eliminar toda el agua que se forma en las reacciones para lo cual se puede agregar ácido sulfúrico concentrado (~5-10%, referido a la masa de ácido esterificado), ya que este tiene la capacidad de captar agua. Cuando la esterificación se realiza ligeramente por encima del punto de ebullición de la mezcla azeotrópica, se elimina paulatinamente el agua por destilación fraccionada a una temperatura relativamente baja, haciendo que el equilibrio se desplace hacia la formación del éster. La transesterificación es la transformación de un éster en otro éster. Los ésteres resultantes de la reacción reciben el nombre de ácidos grasos y metil-ésteres.

Reacciones Químicas en la producción del biodiesel

La reacción de transesterificación depende de varios factores tales como: la naturaleza de la materia prima, la concentración del catalizador, la relación molar alcohol-aceite, la temperatura, la agitación, presión y tiempo de reacción, el contenido de humedad, y de ácidos grasos libres. La sustancia que reacciona con el triglicérido es el alcohol, este puede ser, el metanol o el etanol y su función es reaccionar con un éster que ha quedado libre cuando la molécula de aceite se rompe ésteres y glicerol. Ya que la reacción es reversible, un exceso de alcohol altera el equilibrio desplazando la reacción hacia la derecha, hacia la formación de los productos (ésteres y glicerol). La reacción total de transesterificación es la que a continuación se muestra:

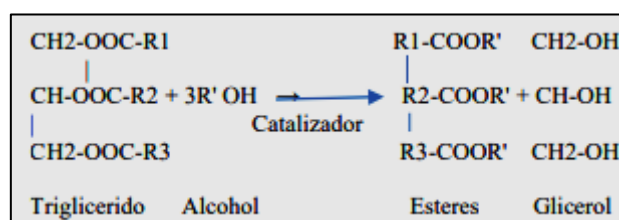


Figura 3. Reacción de transesterificación de los aceites vegetales.

Variables que influyen en las reacciones estequiométricas en la elaboración de biodiesel

Humedad y ácidos grasos

El aceite usado que se emplea en la elaboración del biodiesel debe de tener un índice de acidez menor a 1 y el reactivo alcohol a emplearse, etanol o metanol, debe de ser anhidro, es decir, debe estar exento de agua. Cuando la acidez del aceite es superior a 1 debe de ser neutralizado, requiriéndose una mayor cantidad de hidróxido de sodio para disminuir dicho índice de acidez hasta un valor inferior a la unidad. De otra parte, la presencia de agua ayuda a que se lleve a cabo una mayor saponificación lo que influye en el bajo rendimiento de biodiesel. Por este motivo es conveniente que el aceite no contenga ni humedad, ni ácidos grasos libres; de estos últimos debe de contener una cantidad menor al 0,5%. Como consecuencia de la presencia de humedad (agua) en el alcohol o en el aceite el jabón que se forma durante la saponificación

genera un aumento de viscosidad y la aparición de geles que actúan negativamente durante la reacción de transesterificación y en la separación del glicerol.

Saponificación y esterificación

El triglicérido reacciona con el catalizador básico consumiendo el hidróxido, mientras que el agua absorbida por este ayuda a la formación de jabones en una reacción de saponificación. Este problema se suscita cuando la cantidad del catalizador no ha sido adecuada ya sea que se encuentre en exceso el catalizador haya absorbido humedad del ambiente, tal y como se puede ver en la reacción química como lo indica estequiométricamente:

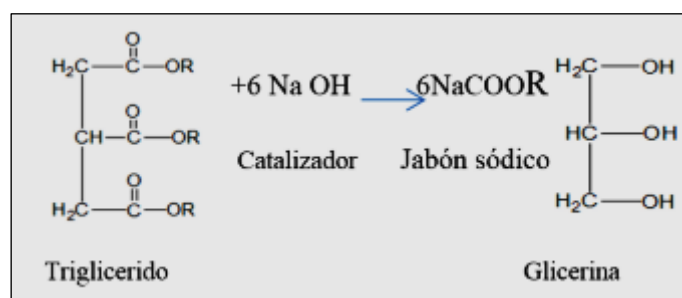


Figura 4. Reacción estequiométrica de la formación de jabón

Esto sucede cuando el aceite usado no es convenientemente deshidratado y la cantidad de producto final obtenido es baja. En la misma etapa, los ácidos grasos libres se esterifican para convertirse en alquil-ésteres, lo cual permite obtener, por un lado, una mayor producción de biodiesel y una mínima cantidad de jabones ya que disminuye la reacción de saponificación es decir también aumenta la eficiencia. La reacción estequiométrica de la transesterificación es la que a continuación se muestra:

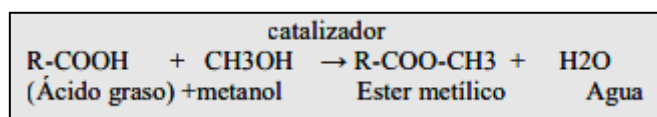


Figura 5. Reacción estequiométrica de transesterificación.

Relación Molar alcohol/ aceite

Esta relación es muy importante y está asociada al tipo de catalizador empleado. Cuando se emplea metanol una relación molar de 6:1 con el aceite usado de cocina, permite la liberación de una cantidad significativa de glicerina si se emplea un 1% de hidróxido de sodio.

Catalizador

Los catalizadores empleados en las reacciones de transesterificación pueden ser: las bases pertenecientes a los hidróxidos alcalinos, ácidos o enzimas. Las pruebas experimentales e industriales de transesterificación con catalizador alcalino han demostrado ser mucho más rápidas que la catalizada con ácido. Los ácidos empleados en este caso son el ácido sulfúrico,

ácido fosfórico, ácido clorhídrico y el ácido sulfónico. Por otro lado, los catalizadores de carácter básico comprenden al hidróxido de sodio, metóxido de sodio, hidróxido de potasio, metóxido de potasio.

El hidróxido de sodio se emplea con mayor frecuencia ya que al reaccionar con el metanol no genera mucha agua y es más barato de todos los catalizadores alcalinos. Las conversiones del aceite usado a éster empleando una relación molar 6:1 con un agregado del 1% de hidróxido de sodio en un tiempo de reacción de 60 minutos, se considera la más exitosa, productiva y eficiente. La transesterificación, usando 1% de ácido sulfúrico concentrado, es insatisfactoria cuando la relación molar son 6:1. Una relación molar 30:1 da como resultado una alta conversión a metil-éster, según datos experimentales de algunos investigadores.

Tiempo de reacción

Experimentalmente se ha demostrado que, con un mayor tiempo de reacción, el porcentaje de conversión del aceite usado en metil o etil éster se incrementa. El rendimiento de la transesterificación es directamente proporcional al tiempo de reacción, sin embargo, puede variar dependiendo del tipo de aceite comestible usado y del catalizador que se utilice. La formación de metil-ésteres es abundante en los primeros minutos con una buena agitación y condiciones óptimas, pero es casi nula con el avance de la reacción después de 90 minutos

Temperatura

La transesterificación del aceite usado se puede realizar a diferentes temperaturas, pero se ha demostrado que una temperatura más elevada permite una mayor producción de biodiesel, pero esta no debe de ser mayor a la temperatura de ebullición del alcohol empleado. Cuanto más baja es la temperatura menor es la cantidad de producto final que se obtiene. La temperatura influye claramente en la velocidad de reacción y el rendimiento de los ésteres. La transesterificación se lleva a cabo a una temperatura cercana al punto de ebullición del alcohol (a 60°C del metanol); teniendo cuidado cuando se mezcla con los catalizadores, pues reacciona con estos generando una gran cantidad de calor. Las reacciones son exotérmicas.

Temperatura y tiempo de reacción

Como ya se manifestó anteriormente la temperatura de transesterificación es muy diversa, así, como el tiempo de reacción, ya que estos dependen de muchos factores como el tipo de aceite usado, del catalizador, de la tecnología empleada, etc. Para los aceites usados de cocina, se estipula una temperatura entre 30 y 60°C y un tiempo que puede ir desde 5 minutos a 20 horas.

Prelavado/Secado

La adición de agua destilada para lavar el biodiesel garantiza la separación de moléculas diminutas de catalizador y de metanol que no se hayan podido eliminar mediante la decantación. Un calentamiento asegura la eliminación de humedad en el biodiesel, para posteriormente someterlo a destilación y eliminar algunos residuos de agua, que no se hayan eliminado en los procesos anteriores.

2.2.2.5. Fundamento de mezcla del Diesel N°2 con el Biodiesel.

Interacciones Moleculares y Compatibilidad Termodinámica

Termodinámicamente, la mezcla de biodiesel (conformada por ésteres metílicos de ácidos grasos) con diésel fósil que constituye una mezcla compleja de hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos, implica una interacción entre moléculas polares (biodiesel) y apolares (diésel fósil).

Según la teoría de Hildebrand y Hansen, el parámetro de solubilidad (δ) predice la miscibilidad. Biodiesel tiene un δ más alto cuyos valores llegan a aproximadamente $\sim 17\text{--}21 \text{ MPa}^{1/2}$ comparado con el diésel cuyo δ equivale a $\sim 15\text{--}16 \text{ MPa}^{1/2}$, lo que sugiere miscibilidad parcial que depende de la temperatura y del porcentaje en volumen. Una temperatura mayor de 40°C , reduce la incompatibilidad entre fases, aumentando la miscibilidad. Esto sugiere que existe un umbral crítico de temperatura por encima del cual la entropía de mezcla compensa la entalpía desfavorable de interacción, estabilizando la solución binaria.

Cinética de Combustión y Perfil Termoquímico

Debido a que el biodiésel contiene una estructura molecular con presencia de oxígeno tiene una cinética de combustión distinta al diésel fósil.

Los efectos que produce el biodiesel en la cinética de la combustión se resumen en los siguientes:

- La presencia de oxígeno en los ésteres mejora la reactividad inicial, favoreciendo una fase de premezcla más intensa.
- Se generan más radicales intermedios ($\text{OH}\cdot$, $\text{H}\cdot$) durante la ignición.
- La adición de biodiésel disminuye el tiempo de retardo de ignición en motores CI (compresión-ignición).

Estas particularidades del biodiesel permiten inferir que el contenido de oxígeno del biodiesel actúa como un "co-oxidante molecular", alterando la distribución energética en la zona de llama y promoviendo una combustión más completa a nivel molecular.

Estabilidad Química y Oxidativa del Blend

La estructura molecular del biodiesel lo hace más susceptible a la oxidación por la presencia de dobles enlaces en los ácidos grasos insaturados, lo que puede afectar la estabilidad a largo plazo de la mezcla.

Aplicando la Teoría del Radical Libre de Autooxidación, los peróxidos formados atacan los hidrocarburos del diésel, generando compuestos oxigenados de mayor peso molecular, lo cual afecta la viscosidad, el punto de enturbiamiento y la capacidad de almacenamiento.

La presencia de insaturaciones en el biodiesel actúa como un iniciador catalítico de reacciones de autooxidación en la fase fósil, acelerando la degradación de la mezcla a temperaturas superiores a 30°C .

Aspectos Medioambientales y Modelado de Emisiones

Ambientalmente los blends biodiésel-diésel (Bx) muestran una reducción neta de emisiones de CO y HC, aunque en ciertos casos un leve aumento en NO_x.

Usando el Modelo de Zeldovich Termal modificado, se puede estimar la formación de NO_x con la temperatura de la llama y el contenido de oxígeno.

La relación aire-combustible y el perfil de inyección cambian con el índice de cetano del biodiesel, lo que repercute en la temperatura pico de combustión.

El enriquecimiento de la mezcla con oxígeno produce zonas localizadas de mayor temperatura durante la combustión en motores CI, favoreciendo la formación de NO_x por mecanismos térmicos dominantes.

Teoría de Mezclas Óptimas: Punto de Eficiencia Termodinámica Máxima (PETM)

La eficiencia global del motor (rendimiento térmico + eficiencia volumétrica + reducción de emisiones) puede modelarse en función del % de biodiésel (B) usando un enfoque multivariable:

$$\eta_{total}(B) = aB^2 + bB + c \quad \eta_{total}(B) = aB^2 + bB + c$$

Donde a, b, y c son coeficientes que dependen del tipo de motor, condiciones de carga y composición del biodiesel.

Existe un punto de mezcla óptimo (PETM), normalmente entre B20 y B30, donde la eficiencia termodinámica total es máxima, debido al equilibrio entre energía liberada, oxidación homogénea y reducción de pérdidas térmicas.

La mezcla biodiésel-diésel no es simplemente una sustitución volumétrica, sino una interacción compleja entre polaridades moleculares, mecanismos de combustión, estabilidad oxidativa y respuesta termodinámica del sistema. Comprender y modelar estas interacciones permite optimizar el uso de biocombustibles en motores modernos, minimizando emisiones sin sacrificar rendimiento.

2.3. Marco conceptual.

Biodiésel

Combustible renovable derivado de aceites vegetales o grasas animales, utilizado como sustituto del diésel convencional.

Transesterificación

Proceso químico mediante el cual los triglicéridos (grasas o aceites) reaccionan con un alcohol (como el metanol) para formar ésteres (biodiésel) y glicerina.

Éster metílico de ácidos grasos (FAME)

Componente principal del biodiésel producido por transesterificación; es el combustible que se utiliza en motores diésel.

Cetano

Índice que mide la capacidad de ignición del combustible en un motor diésel. Un número de cetano alto indica mejor eficiencia de combustión.

Motor de compresión

Tipo de motor en el que la mezcla de aire y combustible se enciende por compresión y no por chispa, como en los motores de gasolina.

Inyección directa

Sistema donde el combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión, común en motores diésel modernos.

Premezcla

Etapa inicial de la combustión en la que el combustible se mezcla con el aire antes de la ignición.

Combustión retardada

Ocurre cuando hay un retraso entre la inyección del combustible y su encendido; puede generar emisiones contaminantes.

Glicerina

Subproducto de la producción de biodiésel, separado durante la transesterificación.

Eficiencia térmica

Medida del rendimiento del motor en función de cuánta energía del combustible se convierte en trabajo útil.

Óxidos de nitrógeno (NOx)

Contaminantes formados durante la combustión a alta temperatura; los motores diésel son conocidos por emitir altos niveles de NOx.

Partículas (PM)

Pequeñas partículas sólidas o líquidas emitidas en los gases de escape; los motores diésel pueden producir partículas si la combustión no es completa.

Viscosidad

Propiedad del fluido que afecta su capacidad para fluir; los combustibles con alta viscosidad pueden afectar la inyección y la combustión.

B100 / B20

Nomenclatura que indica la proporción de biodiésel en la mezcla: B100 es biodiésel puro, B20 es 20% biodiésel y 80% diésel convencional.

Oxigenado

Característica del biodiésel que contiene oxígeno en su estructura molecular, lo cual mejora la combustión y reduce ciertas emisiones.

2.4. Metodología de la investigación.

Por su tipo esta investigación le corresponde la clasificación de aplicada porque busca que crear una mezcla combustible que sea menos contaminante y de mayor calidad para los motores Diesel. Por su nivel es explicativa y por su diseño es experimental ya que se manipula la variable independiente: Parámetros funcionales del combustible Diesel. La población está conformada el combustible Diesel de Petroperú que se vende en todo el país y la muestra estará representada por la mezcla biodiesel B10 en una cantidad de 2 galones con la cual se harán los ensayos

correspondientes para recabar información de la tesis. El Biodiesel se obtuvo en laboratorio mediante el método de transesterificación con metanol, hidróxido de sodio y aceite de girasol. Para el desarrollo experimental se aplicaron técnicas del análisis químico y el instrumento fue el análisis instrumental, el cual permitió cuantificar las proporciones de cada uno de los componentes del biodiesel B10 y determinar sus propiedades funcionales. Los datos obtenidos fueron tratados estadísticamente, tabulados, interpretados, discutidos de acuerdo con los resultados obtenidos por otros investigadores.

2.5. Procedimiento experimental.

2.5.1. Generalidades.

Las pruebas experimentales para elaborar la parte aplicativa o el estudio de campo de esta tesis, se desarrolló teniendo como materia prima el combustible Diesel N°2 Petroperú adquirido en grifos locales y el aceite de girasol comestible puro de marca Huerto Alamein, que presenta un aspecto límpido, sin impurezas, de color amarillento, oleoso. De venta en los diferentes centros comerciales de la ciudad de Ica. Se recolectaron 5 galones de combustible Diesel N°2 y 4 litros de aceite vegetal.



Figura 6. Aceite de girasol empleado en la elaboración del biodiesel.

2.5.2. Obtención experimental del biodiesel.

El biodiesel que se empleó en la elaboración de la mezcla combustible Diesel B10 experimentalmente se preparó de acuerdo con la secuencia que a continuación se describe:

- a. Previamente se mezcló metanol con el hidróxido de Sodio para obtener el metóxido de sodio que es el reactivo base para obtener el biocombustible.
- b. De la misma forma se prepararon las soluciones acuosas de ácido cítrico al 0,05% y 0,025% necesarias para lavar el biodiesel una vez preparado.
- c. Se carga el reactor con la cantidad calculada de aceite de girasol.
- d. Se conecta y enciende el reactor para que caliente hasta los 60°C agitando siempre el aceite que se ha cargado.
- e. Cuando se ha alcanzado los 60°C y manteniendo el aceite en agitación constante se va adicionando el metóxido de sodio y luego se continúa agitando durante una hora para que la reacción de transesterificación se lleve a cabo totalmente.
- f. Una vez que se ha logrado la reacción de transesterificación se deja en reposo el contenido del reactor durante 45 minutos a fin de que se produzca la separación de las dos fases: la fase metil-éster y la fase glicerina, ambas se separan por sus densidades decantándose al fondo del reactor la glicerina para luego ser separada.
- g. Concluida la separación de la glicerina el metil-éster se lava con la solución acuosa de ácido cítrico al 0,05% preparada inicialmente, agregándola paulatinamente mientras se agita el biodiesel obtenido.
- h. Vertida toda el agua de lavado se deja reposar durante 45 minutos para que la fase acuosa se separe totalmente y pueda ser desechada con los residuos de jabón y glicerina.
- i. Luego se lava el biodiesel con la solución acuosa de ácido cítrico al 0,025% también manteniendo el producto obtenido en agitación constante, para luego dejar en reposo durante 45 minutos para que se separen ambas fases y eliminar el agua que contiene los últimos residuos de jabón y glicerina.
- j. Finalmente se lleva a secado el biodiesel a una temperatura de 115°C, hasta que su humedad sea menor a 0,05%.

Cálculo de la cantidad de Catalizador:

En la elaboración del biodiesel se ha empleado como catalizador el hidróxido de sodio, cuya concentración se calcula midiendo el pH del aceite mediante valoración con el cuidado necesario para lograr la máxima exactitud.

1. 1g de NaOH se disuelve totalmente en un litro de agua destilada y se emplea dicha solución como patrón para la valoración.
2. En un Erlenmeyer de 100mL se mezclan 10mL de alcohol isopropílico con 1mL del aceite de girasol caliente.

3. A dicha mezcla se le adiciona 4 gotas de fenolftaleína, que es un indicador ácido-base incoloro en presencia de ácidos, y rojo en presencia de bases.
4. Se realiza la valoración de la solución de hidróxido de sodio preparada y se carga a la bureta y con ella se titula la solución que contiene el aceite, hasta el viraje de color.
5. Terminada la titulación se calcula la cantidad de hidróxido de sodio necesario para la reacción para ello se multiplica el gasto de NaOH empleado en la titulación por el número de litros de aceite que se desea convertir en biodiesel, el resultado es la cantidad de hidróxido de sodio que se requieren para realizar la reacción.

Cálculo de la cantidad de metanol

La cantidad de metanol que generalmente se emplea para la transesterificación es del 20% en peso con relación al aceite a emplear. Para medir esta cantidad se emplea un tubo graduado que se pesa primeramente y luego se carga con una cantidad exacta de aceite y se pesa nuevamente para por diferencia de pesos calcular el peso del aceite.

1. Luego se multiplica el peso del aceite por 20% para calcular el peso del metanol
2. Dicho peso se divide entre la densidad del metanol y se determina la cantidad volumétrica
3. A partir de este punto se tomó arbitrariamente valores de hidróxido de sodio y metanol para el resto de los ensayos.

Proceso de transesterificación del aceite:

La transesterificación se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. Se calienta el aceite hasta los 55°C en un vaso de precipitado al cual se adapta un agitador magnético y se coloca sobre una plancha de calentamiento.
2. Alcanzados los 55°C se comienza a agregar metóxido de sodio lentamente hasta agotamiento.
3. Luego con un vidrio de reloj se tapó el vaso de precipitado y se mantuvo a una temperatura aproximada de 55°C y velocidad de agitación constante por lo menos 60 minutos.

En el transcurso de la reacción, los ácidos grasos se separan de la glicerina, y se unen al metanol formando metilésteres, y el hidróxido de sodio estabiliza la glicerina. Concluida la reacción se pasa el contenido del vaso de precipitado a un embudo de separación, dejando reposar mínimo 8 horas para observar claramente las fases formadas por el biodiesel y el glicerol, transcurrido el tiempo mínimo se procedió a separar ambas fases de la siguiente manera:

1. En un vaso de precipitado de 2000mL se agregó agua y se calentó mediante una plancha de calentamiento, se midió la temperatura del agua gradualmente con un termómetro graduado.

2. Calentada el agua a 60°C se introduce el embudo para calentar el glicerol disminuyendo su viscosidad.
- 3.- Se saca del agua el embudo se seca externamente se coloca en un soporte y se abre la llave de paso para retirar el glicerol hacia un vaso de precipitados tarado.
4. Se pesó el vaso de precipitado con el glicerol, y por diferencia se calcula el peso del glicerol obtenido.
5. En otro vaso de precipitado limpio y seco se descargó el biodiesel, se pesa el vaso antes y después de agregar el biodiesel y se calcula el peso del biodiesel obtenido. Estos pasos se repiten para cada uno de los ensayos.

Lavado del biodiesel.

Para eliminar las impurezas que quedan retenidas en el biodiesel obtenido (restos de metanol, hidróxido de sodio, glicerol y ácidos grasos que no hayan reaccionado), se somete a lavado el cual se realiza así:

1. En una pera de bromo de 250mL se vierte el biodiesel junto con 1/3 de agua y unas gotas de vinagre, hasta alcanzar un pH 7.
2. Se agitó cuidadosamente para que el agua arrastre consigo las impurezas presentes en el biodiesel.
3. Se dejó reposar por unas horas para retirar el agua.
4. El proceso se repitió al hasta que el agua
5. Cabe destacar que el vinagre se agregó solo en el primer lavado.

Secado del biodiesel.

El biodiesel obtenido se pone en un vaso de precipitados de 1 litro y se lleva a la plancha a 120°C hasta eliminar toda el agua que se logra cuando ya no hay burbujeo.

2.5.3. Análisis del aceite girasol.

Con el fin de caracterizar el aceite de girasol empleado en la elaboración del biodiesel este fue sometido a análisis para determinar sus parámetros y compararlos con los dados en las normas ASTM, esto nos permitirá establecer si el aceite cumple con las especificaciones dadas y si su uso es conveniente para la elaboración del biodiesel. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- Índice de acidez.

Se determinó los mg de KOH necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres que contiene un gramo de aceite de girasol. Se calcula con la ecuación:

$$G \times N \times \text{mEq} = g$$

Donde: G es el gasto de KOH, N es la normalidad del KOH, mEq es el miliequivalente del KOH.

- Índice de yodo.

Se determinó como los gramos de yodo que pueden calcularse por cada 100 gramos de aceite. Se calcula con la fórmula:

$$\text{Índice de yodo} = [(B - M) \times NT \times 12,69] / PM$$

Donde: B es el consumo del blanco, M es el consumo de la muestra, NT es la normalidad total, PM es el peso de la muestra.

- Densidad.

Se determino con el picnómetro calentando el aceite por un minuto a 60°C, se deja enfriar y se pesó (W0), se aforó el picnómetro y se pesa (Wf), se calculó la densidad del aceite con la fórmula:

$$P = (WF - W0) / VM$$

Donde: VM es el volumen de la muestra.

- Viscosidad cinemática.

Se determinó con el viscosímetro Fenske-Cannon a 40°C y la viscosidad se calculó con la fórmula:

$$v = CTp \times g / 980,7 \times K$$

Donde:

Tp es el tiempo promedio de paso del aceite por el capilar del viscosímetro, en segundos.

C es la constante del viscosímetro.

g es la fuerza de la gravedad en el lugar donde se determina la viscosidad, cm/s²

k constante de dilatación térmica del vidrio del viscosímetro.

- Porcentaje de humedad.

Método azeotrópico, con el equipo de DARK, empleando como solvente tolueno. El porcentaje de agua se calcula con la fórmula:

$$\%H = (V/PM) \times 100$$

V es el volumen del agua en el receptor, mL

PM es el peso de la muestra tomada, en g

- Porcentaje de acidez.

Porcentaje de ácidos libres que contiene el aceite, expresado como ácido oleico, determinado por titulación, se calcula con la fórmula:

$$\% \text{ de acidez} = [(CT \times N \times mEq) / PM] 100$$

Donde: CT es el consumo total, N normalidad del KOH, mEq es el miliequivalente del ácido graso (ácido oleico) y PM es el peso de la muestra.

2.5.4. Métodos de análisis del biodiesel.

El biodiesel y el Diesel B10 obtenidos se someten a ciertos análisis comunes para ambos de acuerdo con las normas ASTM y estos fueron los siguientes:

- Determinación de la volatilidad del combustible, °C a 760mm de Hg.
- Determinación de la viscosidad cinemática a 40°C, cSt.

- Determinación de cenizas, % en masa
- Densidad, g/mL a 15,5°C
- Grados API
- Corrosión en lámina de cobre, 3 horas, 50°C, N°
- Agua, %V.
- Agua y sedimentos, %V.
- Estabilidad a la oxidación, mg/100mL

2.5.5. Elaboración del Diesel B10.

Para elaborar el Diesel B10 se empleó el Diesel D2 de venta en los grifos de la ciudad como combustible para vehículos pesados, del cual se tomaron 900mL y se le agregó 100mL del biodiesel preparado con el aceite de girasol. La mezcla durante 30 minutos se tuvo en constante agitación a 600 rpm a una temperatura de 50°C y luego se dejó reposar durante 2 horas tiempo que sirvió para que enfríe y se pueda tomar las muestras necesarias para los análisis de control de calidad.

III. RESULTADOS

3.1. Resultados del análisis del aceite de girasol.

Tabla 1

Resultados del índice de acidez del aceite de girasol

N° de ensayo	Resultado obtenido	Unidades	Norma ASTM
01	1,85	mg KOH/g de aceite	Máx. 0,2
02	1,82		
03	1,86		
04	1,83		
05	1,84		
Promedio	1,84		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 1 es el reporte del resultado promedio en la determinación del índice de acidez del aceite de girasol empleado en la elaboración del biodiesel, como se observa en ella, el promedio obtenido es 1,84mgKOH/g de aceite, valor que está por debajo del límite máximo permitido que es de 0,2mg KOH/g de aceite.

Tabla 2

Resultados del índice de yodo del aceite de girasol

N° de ensayo	Resultado obtenido	Unidades	Norma ASTM
01	124,5	g I ₂ /g de aceite	Min. 123 Máx. 137
02	124,4		
03	124,3		
04	123,9		
05	124,5		
Promedio	124,3		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 2 es el reporte del resultado promedio en la determinación del índice de yodo del aceite de girasol empleado en la elaboración del biodiesel, como se observa en ella, el promedio obtenido es 124,3gI₂/g de aceite, valor que está por debajo del límite máximo permitido que es de 137gI₂/g de aceite.

Tabla 3

Resultados del índice de peróxidos del aceite de girasol

N° de ensayo	Resultado obtenido	Unidades	Norma ASTM
01	5,5	mEq O ₂ /Kg	Máx. 10,0
02	5,5		
03	5,6		
04	5,5		
05	5,6		
Promedio	5,5		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3 es el reporte del resultado promedio en la determinación del índice de peróxidos del aceite de girasol empleado en la elaboración del biodiesel, como se observa en ella, el promedio obtenido es 5,5mEq O₂/Kg, valor que está por debajo del límite máximo permitido que es de 10,0mEqO₂/Kg.

Tabla 4

Resultados de la densidad del aceite de girasol

N° de ensayo	Resultado obtenido	Unidades	Norma ASTM
01	0,916	g/mL	Mín. 0,910 Máx. 0,921
02	0,917		
03	0,916		
04	0,917		
05	0,915		
Promedio	0,916		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 4 es el reporte del resultado promedio en la determinación de la densidad del aceite de girasol empleado en la elaboración del biodiesel, como se observa en ella, el promedio obtenido es 0,916g/mL, valor que está por debajo del límite máximo permitido que es de 0,921g/mL.

Tabla 5

Resultados del contenido de humedad en el aceite de girasol

N° de ensayo	Resultado obtenido	Unidades	Norma ASTM
01	0,03	%	Reportar
02	0,03		
03	0,02		
04	0,03		
05	0,03		
Promedio	0,03		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 5 es el reporte del resultado promedio en la determinación del contenido de humedad en el aceite de girasol empleado en la elaboración del biodiesel, como se observa en ella, el promedio obtenido es 0,03%, valor que es muy pequeño para afectar la reacción de transesterificación y la calidad del biodiesel obtenido.

Tabla 6

Resultados de la viscosidad cinemática del aceite de girasol

N° de ensayo	Resultado obtenido	Unidades	Norma ASTM
01	33,51	cSt	Reportar
02	33,53		
03	33,54		
04	33,52		
05	33,51		
Promedio	33,52		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 6 es el reporte del resultado promedio en la determinación de la viscosidad cinemática del aceite de girasol empleado en la elaboración del biodiesel, como se observa en ella, el promedio obtenido es 33,52cSt, valor obtenido en ensayo a 40°C y que es normal para un aceite vegetal puro.

Tabla 7

Resultados del análisis del aceite de girasol

Parámetros	Unidades	resultados
Índice de acidez	mgKOH/g de aceite	1,84
Índice de yodo	gI ₂ /g de aceite	124,3
Índice de peróxidos	mEq O ₂ /kg	5,5
Densidad	g/mL	0,916
Humedad	%	0,03
Viscosidad cinemática	cSt, a 40°C	33,52

Fuente: Datos de las tablas 2 – 6

La tabla 7 muestra el resumen de los datos obtenidos del análisis del aceite de girasol en la cual se dan los resultados para cada uno de los parámetros analizados.

3.2. Resultados de los ensayos para elaborar el biodiesel.

Tabla 8

Determinación de la relación aceite: metanol

N° Ensayo	Aceite, mL	Metanol, mL	Rendimiento, %
01	200	36	81
02	200	38	85
03	200	40	87
04	200	42	90
05	200	44	89

Fuente: Datos experimentales.

Temperatura del proceso: 60°C

Catalizador NaOH 1M: 4 mL

La tabla 8 muestra los resultados de los ensayos hechos para seleccionar la relación aceite: metanol más adecuada o eficiente, según los datos reportados la relación que tiene mejor rendimiento es 200mL de aceite y 42mL de metanol. Una mayor cantidad de metanol disminuye el rendimiento en biodiesel.

Tabla 9

Determinación de la dosificación adecuada de catalizador

N° Ensayo	Aceite, mL	Metanol, mL	NaOH 1M, mL	Rendimiento, %
01	200	42	3,00	73
02	200	42	3,50	77
03	200	42	4,00	84
04	200	42	4,50	91
05	200	42	5,00	87

Fuente: Datos experimentales.

Temperatura de ensayo 60°C

La tabla 9 muestra los resultados de los ensayos hechos para seleccionar la dosis correcta de catalizador NaOH para la transesterificación del aceite de girasol en presencia de metanol, según los datos reportados el volumen adecuado de NaOH 1M para lograr el máximo rendimiento de biodiesel con la relación 200mL de aceite y 42mL de metanol es de 4,50mL. Una mayor cantidad de NaOH disminuye el rendimiento en biodiesel.

Tabla 10

Determinación de la temperatura a la cual se lleva el proceso

N° Ensayo	Aceite, mL	Metanol, mL	NaOH 1M, mL	Temperatura, °C	Rendimiento, %
01	200	42	4,50	56	73
02	200	42	4,50	58	77
03	200	42	4,50	60	84
04	200	42	4,50	62	91
05	200	42	4,50	64	91

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 10 muestra los resultados de los ensayos hechos para seleccionar la temperatura adecuada a la cual se llevará el proceso de transesterificación del aceite de girasol en presencia de metanol, según los datos reportados la temperatura adecuada es de 62°C para lograr el máximo rendimiento de biodiesel con la relación 200mL de aceite y 42mL de metanol y 4,50mL de catalizador.

Tabla 11

Determinación de la velocidad de agitación a la cual se lleva el proceso

Aceite, mL	Metanol, mL	NaOH 1M, mL	Temperatura, °C	rpm	Rendimiento, %
200	42	4,50	62	500	75
200	42	4,50	62	550	79
200	42	4,50	62	600	85
200	42	4,50	62	650	91
200	42	4,50	62	700	91

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 11 muestra los resultados de los ensayos hechos para seleccionar la velocidad de agitación a la cual se llevará el proceso de transesterificación del aceite de girasol en presencia de metanol, según los datos reportados la velocidad de agitación adecuada fue de 650 rpm para lograr el máximo rendimiento de biodiesel con la relación 200mL de aceite y 42mL de metanol y 4,50mL de catalizador.

Tabla 12

Determinación del tiempo de transesterificación

Aceite, mL	Metanol, mL	NaOH 1M, mL	Tiempo, Min	rpm	Rendimiento, %
200	42	4,50	45	500	75
200	42	4,50	50	550	79
200	42	4,50	55	600	85
200	42	4,50	60	650	91
200	42	4,50	65	700	91

Fuente: Datos experimentales.

Temperatura del proceso: 62°C

La tabla 12 muestra los resultados de los ensayos hechos para seleccionar el tiempo que requiere el proceso de transesterificación para completar la reacción entre el aceite de girasol y el metóxido de sodio, según los datos reportados el tiempo requerido fue de 60 minutos para lograr el máximo rendimiento de biodiesel con la relación 200mL de aceite y 42mL de metanol y 4,50mL de catalizador.

Tabla 13

Parámetros óptimos para la obtención del biodiesel

Parámetros	Unidades	Resultados
Aceite de girasol	mL	200
Metanol	mL	42
Hidróxido de sodio 1M	mL	4,5
Temperatura	°C	62
Velocidad de agitación	rpm	650
Tiempo de residencia	minutos	60

Fuente: Datos de las tablas 8 – 12

La tabla 13 muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos realizados para la elaboración del biodiesel en ella se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros analizados.

3.3. Análisis para determinar los parámetros del biodiesel obtenido.

Tabla 14

Determinación de la densidad del biodiesel a 15°C

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	0,879	g/mL	ISO 3675
02	0,880		
03	0,878		
04	0,876		
05	0,879		
Promedio	0,878		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 14 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar la densidad del biodiesel elaborado con el aceite de girasol puro, el resultado promedio obtenido indica que la densidad del biodiesel es 0,878 g/mL determinado a 15°C. El método empleado corresponde a la Norma ISO 3675 modificada.

Tabla 15

Determinación de la Viscosidad cinemática a 40°C

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	4,5	cSt	ISO 3104
02	4,4		
03	4,5		
04	4,3		
05	4,4		
Promedio	4,4		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 15 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar la viscosidad cinemática del biodiesel elaborado con el aceite de girasol puro, el resultado promedio obtenido indica que la viscosidad cinemática del biodiesel es 4,4 cSt. El método empleado corresponde a la Norma ISO 3104 modificada.

Tabla 16

Determinación del punto de inflamación en crisol cerrado

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	163	°C	ISO 3679
02	163		
03	161		
04	162		
05	162		
Promedio	162		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 16 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar el punto de inflamación del biodiesel elaborado con el aceite de girasol puro, el resultado promedio obtenido indica que el punto de inflamación del biodiesel es 162°C. El método empleado corresponde a la Norma ISO 3679 modificada.

Tabla 17

Determinación del contenido de agua

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	72	mg/kg	ISO 12937
02	72		
03	73		
04	73		
05	72		
Promedio	72		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 17 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar el contenido de agua en el biodiesel elaborado con el aceite de girasol puro, el resultado promedio obtenido indica que el contenido de agua en el biodiesel es de 72mg/kg. El método empleado corresponde a la Norma ISO 12937 modificada.

Tabla 18
Determinación del índice de yodo

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	114	g	ISO 14111
02	113		
03	114		
04	113		
05	112		
Promedio	113		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 18 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar el índice de yodo en el biodiesel elaborado con el aceite de girasol puro, el resultado promedio obtenido indica que el índice de yodo del biodiesel es en promedio 113g. El método empleado corresponde a la Norma ISO 14111 modificada.

Tabla 19
Determinación del valor ácido

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	0,45	mgKOH/g	ISO 14104
02	0,44		
03	0,45		
04	0,45		
05	0,45		
Promedio	0,45		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 19 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar el valor ácido del biodiesel elaborado con el aceite de girasol puro, el resultado promedio obtenido indica que el valor ácido del biodiesel es en promedio 0,45mgKOH/g de biodiesel. El método empleado corresponde a la Norma ISO 14104 modificada.

Tabla 20

Parámetros del biodiesel elaborado con aceite de girasol

Parámetros	Valor
Densidad, a 15°C, g/mL	0,878
Viscosidad cinemática, a 40°C, cSt	4,4
Punto de inflamación, °C	62
Contenido de agua, mg/Kg	72
Índice de yodo, g	113
Valor ácido, mgKOH/g	0,45

Fuente: Datos de las tablas 14 - 19

La tabla 20 muestra el resumen de los parámetros determinados para el combustible biodiesel elaborado con aceite de girasol.

3.4. Análisis del Diesel B10 elaborado.

Tabla 21

Determinación de la Viscosidad cinemática a 40°C del Diesel B10

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	4,2	cSt a 40°C	D-445
02	4,2		
03	4,3		
04	4,3		
05	4,2		
Promedio	4,2		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 21 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar la viscosidad cinemática del diésel B10 elaborado con el 10% de biodiesel B100 obtenido por transesterificación del aceite de girasol puro y el Diésel D2 derivado del petróleo, el resultado promedio obtenido indica que la viscosidad cinemática del diésel B10 es 4,2cSt. El método empleado corresponde a la Norma ASTM D 445 modificada.

Tabla 22

Determinación de la densidad del Diesel B10

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	0,845	g/mL, a 15°C	D-1298
02	0,847		
03	0,845		
04	0,846		
05	0,844		
Promedio	0,845		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 22 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar la densidad del diésel B10 elaborado con el 10% de biodiesel B100 obtenido por transesterificación del aceite de girasol puro y el Diésel D2 derivado del petróleo, el resultado promedio obtenido indica que la densidad del diésel B10 es 0,845g/mL. El método empleado corresponde a la Norma ASTM D 1298 modificada.

Tabla 23

Determinación del punto de inflamación del Diesel B10

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	67	°C	D-93
02	66		
03	67		
04	68		
05	66		
Promedio	67		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 23 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar el punto de inflamación del diésel B10 elaborado con el 10% de biodiesel B100 obtenido por transesterificación del aceite de girasol puro y el Diésel D2 derivado del petróleo, el resultado promedio obtenido indica que el punto de inflamación del diésel B10 es de 67°C. El método empleado corresponde a la Norma ASTM D 93 modificada.

Tabla 24

Determinación del número de acidez del Diesel B10

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	0,28	mgKOH/Kg	D-974
02	0,28		
03	0,27		
04	0,29		
05	0,27		
Promedio	0,28		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 24 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar el número de acidez del diésel B10 elaborado con el 10% de biodiesel B100 obtenido por transesterificación del aceite de girasol puro y el Diésel D2 derivado del petróleo, el resultado promedio obtenido indica que el número de acidez del diésel B10 es de 0,28mgKOH/Kg. El método empleado corresponde a la Norma ASTM D 974 modificada.

Tabla 25

Determinación del total de insolubles en el Diesel B10

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	2,9	mg/100mL	D-5304
02	2,9		
03	2,9		
04	3,0		
05	2,9		
Promedio	2,9		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 25 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar el total de insolubles en el diésel B10 elaborado con el 10% de biodiesel B100 obtenido por transesterificación del aceite de girasol puro y el Diésel D2 derivado del petróleo, el resultado promedio obtenido indica que el total de insolubles en el diésel B10 es de 2,9mg/100mL. El método empleado corresponde a la Norma ASTM D 5304 modificada.

Tabla 26

Determinación de partículas contaminantes en el Diesel B10

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	7	mg/L	D-6217
02	6		
03	6		
04	6		
05	6		
Promedio	6		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 26 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar partículas contaminantes en el diésel B10 elaborado con el 10% de biodiesel B100 obtenido por transesterificación del aceite de girasol puro y el Diésel D2 derivado del petróleo, el resultado promedio obtenido indica que el peso de partículas contaminantes en el diésel B10 es de 6mg/L. El método empleado corresponde a la Norma ASTM D 6217 modificada.

Tabla 27

Determinación de la corrosión en lámina de cobre en el Diesel B10

N° de muestra	Resultados	Unidades	Método de ensayo
01	2	3h 100°C, N°	D-130
02	2		
03	2		
04	2		
05	2		
Promedio	2		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 27 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar la corrosión en lámina de cobre en el diésel B10 elaborado con el 10% de biodiesel B100 obtenido por transesterificación del aceite de girasol puro y el Diésel D2 derivado del petróleo, el resultado promedio obtenido indica que la corrosión en lámina de cobre en el diésel B10 corresponde a N°2. El método empleado corresponde a la Norma ASTM D 130 modificada

Tabla 28

Determinación de la volatilidad del Diesel B10

Volumen recuperado, %	Temperatura, °C	Residuo + Pérdida, % vol.	Método de ensayo
PIE	42	3	D-86
10	75		
50	141		
90	350		
PFE	382		

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 28 muestra los resultados de los análisis realizados para determinar la volatilidad del diésel B10 elaborado con el 10% de biodiesel B100 obtenido por transesterificación del aceite de girasol puro y el Diésel D2 derivado del petróleo, el resultado promedio obtenido indica que la volatilidad de este combustible no afecta la curva de destilación del Diésel D-2 por lo que se considera óptimo. El método empleado corresponde a la Norma ASTM D 86 modificada

Tabla 29
Parámetros de Diesel B10

Parámetros	Valor
Densidad, a 15°C, g/mL	0,845
Viscosidad cinemática, a 40°C, cSt	4,2
Punto de inflamación, °C	67
Número de acidez, mgKOH/Kg	0,28
Insolubles, mg/100mL	2,9
Partículas contaminantes, mg/L	6
Corrosión en lámina de cobre, a100°C x 3h, N	2
Volatilidad del combustible, T°C 90%	350°C
Punto final de ebullición, T°C	382°C

Fuente: Datos de las tablas 22 - 28

La tabla 29 muestra el resumen de los parámetros determinados para el combustible biodiesel Dese B10 elaborado con aceite de girasol.

IV. DISCUSIÓN

La finalidad de la parte experimental de esta tesis es verificar las propiedades o parámetros del Diesel B10 el cual ha sido elaborado con un biodiesel B100 obtenido por transesterificación del aceite de girasol puro y el diésel D2 o Diesel N°2 que resulta de la destilación fraccionada de petróleo y se distribuye como un combustible para uso automotriz (para motores de vehículos pesados diseñados específicamente para gasoil pesado). En este caso, al Diésel N°2 se le adicionado un 10% en volumen de biodiesel B100 cuya base es el aceite de girasol. Durante el desarrollo del estudio se han realizados análisis del aceite de girasol para comprobar sus características como materia prima para la elaboración del biocombustible, entre estos, se determinaron: el índice de acidez, el índice de yodo, índice de peróxido, la densidad, el contenido de humedad y la viscosidad cinemática, parámetros que tiene incidencia directa en la calidad del biodiesel y su comportamiento como combustible en el motor de combustión interna. Propiedades fundamentales se consideran el índice de acidez y el índice de peróxido los cuales de ser mayores a los límites permitidos se produce la contaminación del biocombustible elaborado y que conforme pasa el tiempo en el almacenamiento aceleran la oxidación del biocombustible y del combustible diésel. La oxidación del combustible ocasiona la formación de compuestos de alto peso molecular que afectan no solo la combustión sino además obstruyen el sistema de lubricación y generan compuestos contaminantes para el medio ambiente.

Los ensayos que se han realizado al combustible Diésel B10 son los que se consideran necesarios para su control de calidad, entre ellos se ha tomado en cuenta la viscosidad cinemática que resultó ser igual en promedio a 4,2cSt, la densidad determinada por el método del densímetro que fue de 0,845g/mL, el punto de inflamación de 67°C, número de acidez cuyo valor hallado fue de 0,28mgKOH/Kg, la corrosión en lámina de cobre llevada a cabo a 100°C por 3horas dando como resultado el N°2 en la tabla de comparación de colores ASTM, y la volatilidad del combustible cuyos valores se encuentra dentro de los estipulados en las especificaciones del Diesel B5, actualmente en uso en motores encendido por compresión. Según estos resultados la mezcla combustible elaborado en la parte experimental de la esta tesis que es el Diesel B10, se puede emplear en un motor de combustión interna dedicado o alimentado con gasoil y diésel B5 ya que sus parámetros están dentro de los valores exigidos para estos.

V. CONCLUSIONES

1. Experimentalmente se han determinado los parámetros funcionales del combustible diésel con un agregado de 10% de biodiesel obtenido por transesterificación a partir del aceite de girasol, que se ha denominado Diesel B10, cuyos valores según los datos reportados se encuentran dentro de los estipulados para el combustible Diesel B5 y Diesel N°2 que actualmente se emplean en motores encendidos por compresión.
2. En las propiedades funcionales del Diesel N°2 el agregado de un 10% de combustible biodiesel B100 no afecta en nada, lo que sí influye es en la disminución de gases contaminantes como un menor porcentaje de CO₂, de óxidos de azufre y Compuestos orgánicos volátiles, así como inquemados.
3. Las características fisicoquímicas funcionales del biodiesel obtenido por transesterificación a partir del aceite de girasol están expresadas en la tabla 29 de esta tesis.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar pruebas de campo con un motor de encendido por chispa en el cual se pueda evaluar el comportamiento del combustible en el funcionamiento del motor, la eficiencia y el rendimiento, además de la composición de los gases de escape.
2. Se recomienda desarrollar un estudio para la elaboración de aceite de girasol, estableciendo los parámetros adecuados para la extracción y hacer la evaluación correspondiente para establecer si puede ser empleado en la elaboración de biocombustible.

VII. FUENTES DE INFORMACIÓN.

- [1] P. Benjumea y colaboradores, “Predicción del efecto de la temperatura sobre la viscosidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con Diesel convencional”, Artículo científico, Universidad Nacional de Colombia, Revista Energética 35 (2006) 33-38.
- [2] V. Domínguez, "Caracterización de mezclas de diésel biodiesel a diferentes proporciones con el fin de minimizar los impactos ambientales generados por el consumo de combustibles fósiles”, Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2018.
- [3] L. Santivañez, “Evaluación experimental del consumo de combustible y las emisiones gaseosas de un motor Diesel utilizando 3 mezclas de Diesel y biodiesel: Db5, Db7,5 y Db10”, Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2016
- [4] C. Oliveira y colaboradores, “Efecto de las condiciones relacionados con la transesterificación alcalina a partir de los aceites residuales”. Artículo, Colombia, Revista Tecnológica. 2015.
- [5] K. Rodríguez, y L. Villanueva, “Producción de Biodiesel a partir de Aceite Vegetal usado en Fritura por medio de la Transesterificación de Metanol”. Tesis, Perú, Universidad Nacional de Trujillo, 2011.
- [6] E. Mamani, E. Avendaño y O. Quispe, “Obtención y caracterización de biodiesel a partir de desechos de aceite de la cocina del comedor universitario de la UNJBG, mediante transesterificación alcalina”. Tesis, Perú, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna. 2017.
- [7] B. Castillo, “Aprovechamiento de los Desechos de Aceite Vegetal Generados por el Comedor Universitario de la U.N.T. Para la Producción de Biodiesel”. Tesis, Perú, Universidad Nacional de Trujillo, 2017



UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA
EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

CONSTANCIA

El que subscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud al documento cuyo título es:

"DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL COMBUSTIBLE DIÉSEL CON UN AGREGADO DE 10% DE BIODIESEL OBTENIDO POR TRANSESTERIFICACIÓN A PARTIR DEL ACEITE DE GIRASOL "

BACH. VARGAS SALINAS RICARDO RUBEN

Autor de la Tesis del nivel de **PREGRADO** de la Facultad de **INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA**. El Resultado obtenido es 3% (PORCENTAJE DE SIMILITUD) por lo cual, se otorga el calificativo de: **APROBADO**, según Reglamento de Evaluación de la Originalidad.

Se adjunta al presente el reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

Observaciones:

El porcentaje de similitud es menor del 20%, establecido como máximo por Reglamento de Evaluación de originalidad.

Ica, 17 de junio de 2026

Nº de Recibo:20144557