

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Química y Textil



TESIS

Obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal residual de fritura, mediante ataque con soda cáustica

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Químico

Elaborado por

Marco Antonio Uriel Martínez Sánchez

 [0000-0002-2081-5122](https://orcid.org/0000-0002-2081-5122)

Asesor

MSc. Ing. Magali Camila Vivas Cuellar

 [0000-0003-0880-2078](https://orcid.org/0000-0003-0880-2078)

LIMA - PERÚ

2023

Citar/How to cite	Martínez Sánchez [1]
Referencia/Reference	[1] M. Martínez Sánchez, “ <i>Obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal residual de fritura, mediante ataque con soda cáustica</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Martínez, 2023)
Referencia/Reference	Martínez, Marco. (2023). <i>Obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal residual de fritura, mediante ataque con soda cáustica</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Con profundo agradecimiento a Dios, quien me brindó la fortaleza para avanzar en la elaboración de mi tesis, y a mis progenitores, ya que son mi cimiento y denuedo para seguir adelante con determinación.

Agradecimientos

Expreso mi gratitud a Dios, a mí mismo, a mi familia y a mi asesora, quienes han brindado apoyo continuo durante la elaboración de este proyecto. También a la ilustre Universidad Nacional de Ingeniería, en especial a la célebre Facultad de Ingeniería Química y Textil por proporcionarme las herramientas esenciales que me permitieron concluir esta investigación.

Resumen

La investigación se enfoca en la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales residuales generados en procesos culinarios, con el propósito de transformarlos en biodiesel, contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental. Se resalta la capacidad de alcanzar rendimientos óptimos mediante la aplicación de la transesterificación bajo determinadas condiciones. Por lo cual, la materia prima es evaluada mediante titulación para determinar el valor ácido y también, el porcentaje de ácidos grasos libres. El proceso abarca la transesterificación directamente ya que el porcentaje de ácidos grasos libres es inferior al 2%, utilizando etanol de 96° y como catalizador al hidróxido de sodio. Se logra un rendimiento de producción de biodiésel del 85% al emplear una concentración del 1% de hidróxido de sodio. La pureza del biodiésel se garantiza llevando a cabo lavados para expeler impurezas a escala laboratorio. El diseño factorial para el análisis estadístico se implementa para examinar las propiedades físicas del biodiésel, incluyendo el valor ácido y la densidad, con el propósito de lograr los estándares de calidad. La evaluación del proyecto se realiza técnicamente como económicamente para una planta de biodiésel indican que el planteamiento es rentable, respaldado por un valor presente neto no negativo, y también se confirma la viabilidad financiera gracias a la tasa interna de retorno (TIR), cumpliendo con los objetivos anuales de producción que demanda el mercado peruano.

Palabras clave – biodiésel, aceite vegetal residual de fritura, transesterificación, etanol.

Abstract

The study concentrates on generating biodiesel from residual vegetable oils generated during culinary processes. Its objective is to transform them into biodiesel, thereby aiding in mitigating environmental impact. The study accentuates the achievement of optimal yields through applying transesterification under specific conditions. Thus, residual frying oil is assessed through titration to determine its acid value and also the percentage of free fatty acids. The process of direct transesterification is employed for biodiesel production, given that the percentage of free fatty acids is less than 2%. A biodiesel yield of 85% is achieved through the use of a 1% sodium hydroxide concentration, with 96° ethanol and sodium hydroxide acting as the catalysts. To ensure the purity of the biodiesel, washings are carried out at a laboratory scale to remove impurities. The factorial design has been employed to undertake statistical analysis aiming to investigate the physical features of biodiesel, specifically acid value and density, with the objective of achieving quality standards. The assessment of the projet has been executed both technically and economically for a biodiesel factory. It illustrates the profitability of the strategy, backed by a non-negative net present value and confirmed financial sustainability through the internal rate of return (IRR). Additionally, the objectives of annual production demanded by the Peruvian market are met.

Keywords - biodiesel, residual vegetable oil from frying, transesterification, ethanol.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción.....	xv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.1.1 Justificación ambiental	3
1.1.2 Justificación técnica	3
1.1.3 Justificación económica.....	4
1.2 Descripción del problema de investigación.....	4
1.3 Objetivos del estudio.....	5
1.1.1. Objetivo general	5
1.1.2. Objetivos específicos.....	5
1.4 Antecedentes investigativos.....	6
Capítulo II. Marco teórico y conceptual.....	11
2.1 Marco teórico	11
2.1.1 Parámetros en la obtención de biodiésel	11
2.1.1.1 Temperatura.	11
2.1.1.2 Catalizador.....	12
2.1.1.3 Relación alcohol-aceite.....	12
2.1.1.4 Velocidad de agitación.	13
2.1.1.5 Calidad del biodiésel.....	13
2.2 Marco conceptual	15
2.2.1 Biodiésel	15
2.2.2 Aceite vegetal residual de fritura	16
2.2.2.1 Composición química.	16

2.2.3 Reacción de esterificación.....	16
2.2.4 Reacción de transesterificación.....	17
2.2.5. Catalizadores	18
2.2.6 Alcoholes.....	19
2.7 Marco legal.....	20
2.7.1 Ley de promoción del mercado de biocombustibles	20
2.7.2 Reglamento de Comercialización de Biocombustibles.....	20
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	22
3.1 Universo de estudio.....	22
3.2 Tipo y nivel investigación.....	23
3.2.1 Nivel experimental.....	23
3.3 Período de análisis.....	24
3.4 Materiales y reactivos utilizados.....	25
3.5 Método de muestreo	26
3.6 Trabajo experimental.....	26
3.6.1 Evaluación de materia prima	29
3.6.2 Transesterificación	31
3.6.2.1 Condiciones de las variables en la transesterificación.	31
3.6.3 Separación	36
3.6.4 Lavado	37
3.6.5 Secado.....	38
3.7 Análisis factorial de las variables de operación	39
3.7.1 Diseño factorial.....	39
3.8 Balance de materia	40
3.8. Proyección de escalamiento a nivel industrial	41
3.9 Evaluación técnica - económica para la producción de biodiésel	41

3.8.2. Costo de equipos	42
3.8.2.1 Sistema de materias primas.....	43
3.8.2.2 Sistema de reacción.	43
3.8.2.3 Sistema de separación.....	43
3.8.3 Capital fijo	44
3.8.3.1. Depreciación.....	44
3.8.3.2 Amortización.	45
3.8.4 Costo de materia prima	45
3.8.5 Costo de producción.....	46
3.8.6 Financiamiento	47
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.....	49
4.1 Masa de biodiésel	49
4.4 Análisis fisicoquímico	52
4.4.1 Índice de acidez	52
4.4.2 Densidad	52
4.4 Análisis estadístico	52
4.4.1 Prueba de hipótesis	54
4.4.1.1 Normalidad de residuales.	54
4.4.4.2 Prueba de hipótesis estadística.	55
4.4.4.3 Resultados de software estadístico.....	56
4.4.4.5 Modelo de regresión multivariable.	57
4.4.4.6 Gráficas de efectos principales.	57
4.5 Evaluación de inversiones	58
4.5.1 Evaluación del VAN económico.....	58
4.5.2 Evaluación del VAN financiero	60
Conclusiones.....	63

Recomendaciones.....	64
Referencias Bibliográficas	65
Anexos... ..	70

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Evaluación de catalizadores en la producción de biodiésel	7
Tabla 2: Pruebas experimentales con etanol/aceite de 7:1	8
Tabla 3: Propiedades fisicoquímicas del biodiésel	14
Tabla 4: Normas técnicas de calidad para el biodiésel (B100)	15
Tabla 5: Comparación entre las propiedades FAME y FAEE	20
Tabla 6: Equipos utilizados	25
Tabla 7: Propiedades de los aceites vegetales de la materia prima	29
Tabla 8: Condiciones óptimas de aceites vegetales para la transesterificación.....	36
Tabla 9: Características de FAEE producido de distintos aceites vegetales	36
Tabla 10: Factores que intervienen en la obtención de biodiésel	40
Tabla 11: Formulaciones de los factores de estudio	40
Tabla 12: Flujos máxicos en la proyección de obtención de biodiésel.....	41
Tabla 13: Compra de biocombustible (103 bls)	42
Tabla 14: Balance energético nacional 2021 (103 bbl).....	42
Tabla 15: Costos de equipos	44
Tabla 16: Capital fijo	44
Tabla 17: Depreciación	45
Tabla 18: Amortización	45
Tabla 19: Costo de materia prima	45
Tabla 20: Ventas de biodiésel.....	46
Tabla 21: Costos de producción	46
Tabla 22: Capital de trabajo	47
Tabla 23: Financiamiento a 5 años	48
Tabla 24: Financiamiento a 10 años	48

Tabla 25: Resultados de tratamiento de datos	50
Tabla 26: Densidades del biodiésel producido	51
Tabla 27: Índice de acidez del biodiésel producido	51
Tabla 28: Análisis estadístico de los tratamientos	53
Tabla 29: Análisis de Varianza.....	55
Tabla 30: Resultados de software estadístico	56
Tabla 31: Evaluación del VAN económico y TIR a 5 años	59
Tabla 32: Evaluación del VAN económico y TIR a 10 años (año 0 al 5).....	59
Tabla 33: Evaluación del VAN económico y TIR a 10 años del año 6 al 10	60
Tabla 34: Evaluación del VAN financiero y TIR a 5 años	61
Tabla 35: Evaluación del VAN financiero y TIR a 10 años del año 0 al 5	61
Tabla 36: Evaluación del VAN financiero y TIR a 10 años del año 6 al 10	62

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Comparación de insumos para producir biodiésel en USA.....	2
Figura 2: Valor óptimo de biodiésel a diferentes temperaturas.....	8
Figura 3: Representación de las medias de concentración de lejía vs temperaturas	9
Figura 4: Impacto de la temperatura en la transesterificación	11
Figura 5: Efecto de catalizadores básicos en la transesterificación.....	12
Figura 6: Influencia de la proporción alcohol-aceite en la transesterificación	13
Figura 7: Reacción de esterificación	17
Figura 8: Reacción de transesterificación	17
Figura 9: Ubicación de las zonas de muestreo.....	22
Figura 10: Esquema de experimento y variables	24
Figura 11: Proceso de producción a escala laboratorio de biodiésel.....	27
Figura 12: Filtración al vacío del aceite residual de fritura.....	28
Figura 13: Determinación de índice de acidez del aceite vegetal residual de fritura.....	30
Figura 14: Montaje de la reacción de transesterificación.....	33
Figura 15: Mecanismo de reacción de triglicérido con etanol	34
Figura 16: Esquema de transesterificación del aceite vegetal residual de fritura.....	35
Figura 17: Decantación de biodiésel	37
Figura 18: Obtención final de biodiésel	38
Figura 19: Diagrama de corrientes con flujo másico	40
Figura 20: Temperatura y velocidad de agitación registradas	49
Figura 21: Determinación de la densidad.....	50
Figura 22: Gráfica de caja de masa de biodiésel (g)	53
Figura 23: Probabilidad de residuos contra los valores ajustados	54
Figura 24: Diagrama de Pareto.....	56

Figura 25: Masa de biodiésel media vs temperatura y concentración	57
Figura 26: Optimización de respuesta para hallar la mayor masa de biodiésel	58

Introducción

A lo largo del transcurso temporal, se ha observado un marcado incremento en el consumo global de energía, propiciado por la utilización y avance de diversos dispositivos y procedimientos que demandan diferente tipo de energía con el fin de funcionar. Mayoritariamente, estos dispositivos y procesos están vinculados a combustibles fósiles. No obstante, el consumo desmesurado de estos recursos desde hace muchos años ha generado repercusiones perjudiciales tanto económicamente, como desde el punto de vista social y medioambiental. La necesidad esencial de explorar vías sostenibles a fin de obtener combustibles; además, de tener en cuenta la futura escasez de combustibles no renovables y la vulnerabilidad asociada a la dependencia del petróleo, conduce a la producción de nuevas fuentes de energía tal y es el caso del biodiésel. No obstante, la industria del biodiesel enfrenta desafíos, como el uso de cultivos alimentarios; por otro lado, el reto de gestionar eficientemente aceites reciclados que podrían representar un grave problema ambiental. En respuesta a estos desafíos, la industria está focalizada en el estudio de aceites vegetales residuales de fritura. A partir de unos aceites residuales de fritura ya que se posiciona como una alternativa viable, mitigando la contaminación debido al uso de materias primas desechadas. El interés de esta tesis es encontrar las condiciones óptimas para producir biodiésel para aprovechar los beneficios ambientales y económicos del biodiesel. La técnica para recuperar aceites residuales de procesos culinarios, especialmente de fritura, de establecimientos como restaurantes de comida rápida, permite obtener cantidades significativas para convertirlas en biodiésel, recuperando así este componente contaminante de los efluentes y reduciendo el impacto ambiental. La recolección de aceites vegetales usados contribuye a disminuir el impacto ambiental al aprovechar estos aceites como insumos para obtener biodiesel.

Desde la perspectiva técnica, la transesterificación es clave para obtener como productos finales biodiésel y glicerina. En términos económicos, se propone una economía circular reutilizando el aceite residual de fritura través de alianzas con restaurantes y

hoteles, transformando prácticas de desecho en iniciativas empresariales. Se contempla la posibilidad de incentivar a las empresas mediante la reducción de impuestos, aprovechando la ley N°30309 que estimula la investigación del sector industrial. Además, se busca caracterizar la mezcla de aceites residuales, comparar parámetros experimentales con normas internacionales y nacionales, encontrar condiciones óptimas, y recolectar aceites de restaurantes en Surco y Villa María del Triunfo. Los antecedentes destacan la importancia del catalizador en la transesterificación y diferentes estudios que han evaluado condiciones determinadas. Las variables dependientes estudiadas incluyen la temperatura de 60 a 70°C y la concentración del catalizador NaOH de 0.1 al 1%, con variables independientes como la agitación con una velocidad de 400 RPM y la duración de 90 minutos de la transesterificación. El análisis estadístico desarrollando en Minitab con un diseño experimental de tipo factorial muestras los distintos rendimientos alcanzando condiciones óptimas a 60°C y 1% de NaOH. Además, la planta diseñada puede producir 30,483.5 litros al mes, cumpliendo con la meta anual de 36,580 litros.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

La administración inapropiada de aceites vegetales residuales de fritura, que se descartan inadecuadamente resulta en la contaminación del agua y el suelo, constituyendo una gran contaminación ambiental. Además, representa una pérdida significativa de recursos, tanto materiales como energéticos. Por lo cual estos recursos como materia prima es fundamental para no solo estar alineados con la economía circular sino con la sostenibilidad y escasez de recursos que el mundo enfrenta en estos días; siendo provechoso la producción de biodiésel.

Se han desarrollado varias técnicas, incluyendo la mezcla directa, la pirólisis, la microemulsión y la transesterificación. Este último implica la conversión de triglicéridos en ésteres metílicos o etílicos y glicerol, que es un subproducto valioso en varias industrias como la farmacéutica, alimentaria y cosmética.

En este proceso, una fuente de triglicéridos, como aceite o grasa, reacciona con metanol o etanol en presencia de un catalizador. De estas técnicas de transformación, la transesterificación es la más rentable debido a su alta eficiencia de conversión y producción de baja inversión, y el biodiésel producido tiene propiedades comparables a las del gasóleo (Vilas Bôas & Mendes, 2022).

Existen amplias oportunidades de investigación en el área de la reducción del coste de producción de biodiésel sin afectar a la calidad del combustible. Por lo que se presenta el presente estudio de las condiciones para producir biodiésel obtenido a partir de aceites vegetales residuales de procesos culinarios principalmente de fritura de restaurantes de comida rápida para obtener un rendimiento óptimo de conversión a biodiesel.

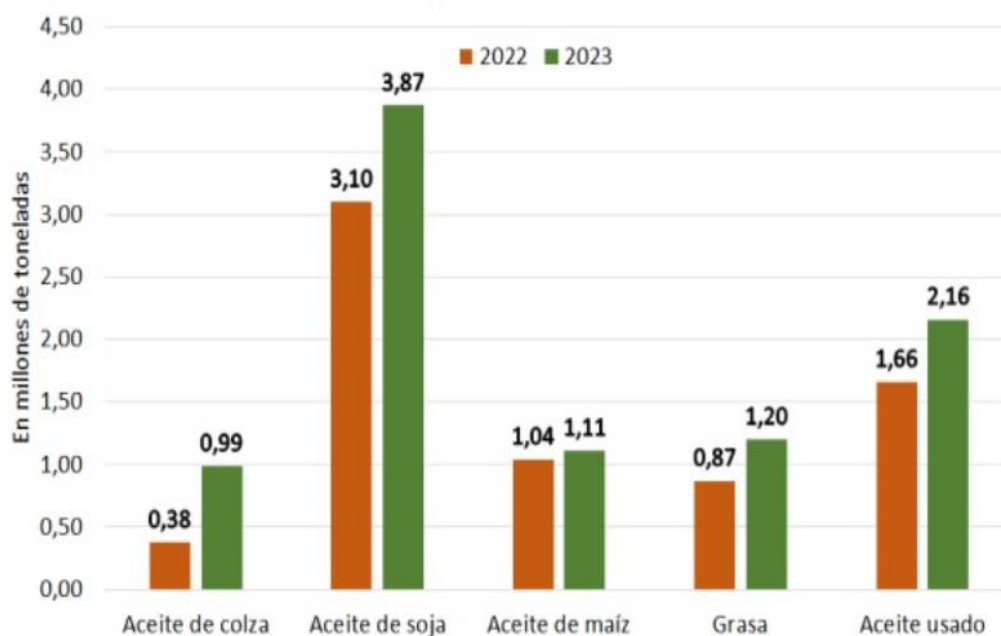
Se espera que el uso del biodiésel en Europa aumente hasta un máximo del 5,75%, ya que presenta propiedades de baja concentración y es seguro para su manipulación,

transporte y almacenamiento debido a su biodegradabilidad y alto punto de inflamación (Vilas Bôas & Mendes, 2022).

Se puede utilizar solo o en combinación con gasóleo de petróleo, siendo la mezcla más común la de 20% de biodiésel con 80% de gasóleo de petróleo, conocida como B20. Mientras que según la Agencia de Información Energética (EIA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos indica un gran crecimiento de producción de biodiésel a partir de aceites usados en un 30,12%, de 1.66 a 2,16 millones de toneladas en 2022 y 2023, respectivamente, como se muestra en la siguiente figura 1.

Figura 1

Comparación de insumos para producir biodiésel en USA



Nota: Adaptado de (Ferrari & Calzada, 2023).

Así mismo sucede en Perú, según (Vera et al., 2021) en el balance de Energía presentado por el Ministerio de Energía y Minas indica que se importó 1,5% de biodiésel durante el 2021, siendo un total de 4431,4 TJ, mientras que se exportó un 0%; creando un déficit; por lo cual el gobierno continúa promoviendo mediante la ley 28054 la producción de biocombustibles.

1.1.1 Justificación ambiental

Se busca obtener una fuente de energía alternativa para disminuir y en un futuro reemplazar la utilización del petróleo que es una fuente no renovable y muy contaminante y perjudicial para el medio ambiente; para ello se realiza la recolección de aceites vegetales usados en los procesos culinarios los cuales mayormente son vertidos al desagüe contaminando lagunas, ríos, mares, entre otros; con este proyecto se aprovechan estos aceites como insumos y fuente de obtención de biodiesel disminuyendo el impacto ambiental.

Según (Ministerio del Ambiente, 2022) en el Decreto Legislativo 1278 de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, detalla una descripción de las actividades realizadas en las plantas de valorización de residuos sólidos, entre estas actividades, se destaca la recuperación de aceites usados, junto con otras operaciones.

Estas instalaciones se definen como aquellas que llevan a cabo transformaciones químicas o biológicas en los componentes de los residuos sólidos, con el propósito de obtener insumos o recursos utilizados en actividades productivas, extractivas o de servicios.

1.1.2 Justificación técnica

Para mejorar el rendimiento del proceso y debido a la naturaleza del aceite, se sigue el método de transesterificación, obteniéndose como productos finales biodiesel, glicerina y agua; a pesar de que el interés es en el biodiesel, se puede plantear para futuras investigaciones el buen aprovechamiento de los subproductos, con el fin de obtener una variedad de productos aplicables en diversas industrias como la cosmética, farmacéutica, lubricantes, aditivos alimentarios, fluidos hidráulicos, surfactantes o emulsionantes. Durante los procesos de hidrólisis, se generan ácidos grasos y, como subproducto, se obtiene glicerina. Con el objetivo de garantizar la rentabilidad económica del proceso global, se plantea el aprovechamiento para la obtención de los productos como glicerina.

1.1.3 Justificación económica

El aceite residual generado en procesos culinarios, comúnmente desechado como desperdicio sin valor económico, se propone ser utilizado como materia prima a través de alianzas con comida rápida de restaurantes y hoteles. El objetivo es transformar estas prácticas en iniciativas empresariales que abracen el concepto de economía circular.

Además, se contempla la posibilidad de incentivar a las empresas mediante la reducción de un porcentaje de sus impuestos, con el propósito de aumentar la cantidad de aceites disponibles como materia prima. Este enfoque busca aprovechar la ley N°30309, que busca estimular la participación del sector privado en proyectos de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación (I+D+i), a través de beneficios fiscales aplicados al Impuesto a la Renta (Congreso de la República, 2015).

1.2 Descripción del problema de investigación

Actualmente, existe una gran inquietud por fuentes renovables de energía, ya que los combustibles fósiles son recursos cada vez más escasos, resaltó la vulnerabilidad derivada de la dependencia del petróleo y los efectos inflacionistas en los precios; por lo cual son necesarias nuevas alternativas de obtención de combustibles como una opción menos perjudicial para el planeta. La energía cumple un rol fundamental en diversas actividades, desde la calefacción hasta el transporte, siendo primordial para el auge de una nación.

La producción del biodiesel es una alternativa que se ha estado evaluando en diferentes países, actualmente se discute de biocombustibles de diferentes generaciones, los de primera generación son aquellos que a partir de cultivos comestibles siendo el bioetanol y el biodiesel los más importantes de este grupo; los de segunda generación son aquellos que parten de desechos agrícolas y forestales, residuos industriales y municipales; los de últimas generaciones son a partir de algas y de productos genéticamente modificados.

La presente investigación se enfoca en las condiciones adecuadas para producir biodiésel a partir de aceites residuales de fritura, abordando tanto la problemática de contaminación como la utilización de materias primas desechadas. Debido tiene en cuenta que por cada litro de aceite se contamina cerca de 900 litros de agua; sin embargo, a pesar del esfuerzo de Sedapal por incentivar el reciclaje del aceite usado, las estadísticas indican que alrededor del 80 % termina vertiéndose al desagüe, afectando así a los ríos y al mar. Cabe destacar que en Perú se cuenta con empresas como “Eco Green”, “Reciclando aceite”, así como proyectos que incentivan al reciclaje de este aceite residual con la finalidad de reducir la contaminación de los drenajes.

Se aspira a diseñar un proceso de producción a nivel de planta piloto, aprovechando los beneficios ambientales y económicos del biodiesel. Este enfoque resalta la importancia de los avances tecnológicos para caracterizar dispositivos generadores de combustibles no fósiles, procesar estos combustibles y supervisar los equipos que los utilizan.

1.3 Objetivos del estudio

1.1.1. *Objetivo general*

- Evaluar la obtención de biodiésel de etanol aprovechando los aceites vegetales residuales de fritura mediante la reacción de transesterificación mediante ataque con soda cáustica.

1.1.2. *Objetivos específicos*

- Determinar el índice de acidez de la muestra de aceites vegetal residual de fritura.
- Comparar parámetros como el índice de acidez y la densidad relacionados a la calidad del biodiesel con las normas nacionales e internacionales.
- Evaluar las condiciones óptimas de operación como la temperatura y la concentración de hidróxido de sodio disuelto en etanol.

- Realizar la evaluación técnica y económica de la proyección de escalamiento de una planta de biodiésel según las necesidades del mercado peruano.

1.4 Antecedentes investigativos

Según (Vilas Bôas & Mendes, 2022) en su investigación “A review of biodiesel production from non-edible raw materials using the transesterification process with a focus on influence of feedstock composition and free fatty acids”, se argumentó que la elección de un catalizador usado en la reacción de transesterificación es crítico en la obtención de biodiésel, en referencia a las diferentes concentraciones de catalizadores en condiciones utilizadas con una relación molar de 1:6 de metanol/aceite, temperatura de reacción de 60°C, los experimentos se realizaron en diferentes concentraciones de NaOH de 0,25 a 1% en peso en la transesterificación de aceite de canola en un reactor de columna pequeña.

Los resultados mostraron que el uso de mayores concentraciones del catalizador obtuvo una mayor conversión de triglicéridos. Sin embargo, en reacciones con concentraciones superiores al 0,75 %, hubo diferencias insignificantes en la conversión.

Entonces, el catalizador básico homogéneo en la producción de biodiésel tiene mayor popularidad por las siguientes distintivas razones: una baja temperatura de reacción para sintetizar biodiésel a 1 atm, una alta conversión de biodiésel; disponible y económico. Finalmente, se compara con otros catalizadores en la tabla 1.

Tabla 1*Evaluación de catalizadores en la producción de biodiésel*

Tipo	Ejemplo	Ventajas	Desventajas
Alcalino homogéneo	NaOH, KOH	Alta actividad catalítica, bajo costo, cinética favorable, moderado Método preferido para materia prima de bajo grado	Bajo requerimiento de FFA, anhidro condiciones, saponificación, formación de emulsión, más aguas residuales de purificación, desechable Peligroso para el medio ambiente en comparación con catalizadores heterogéneos Naturaleza higroscópica
Heterogéneo	CaO, CaTiO ₃ , CaZrO ₃ , CaO-CeO ₂ , CaMnO ₃ , ZnO/I ₂ , ZrO ₂ /SO ₄ ²⁻ , TiO ₂ /SO ₄ ²⁻	No corrosivo, ambientalmente benigno, reciclable, menos problemas de desecho, fácil separación, más alta selectividad, catalizador de larga vida. Cataliza la esterificación y transesterificación simultáneamente, reciclable, ecológico	Bajo requerimiento de FFA, anhidro condiciones, más aguas residuales de purificación, alta relación molar de requerimiento de alcohol a aceite, alta temperatura y presión de reacción, limitaciones de difusión, alto costo Concentraciones bajas en sitios ácidos, baja microporosidad, alto costo
Ácido homogéneo	Ácido sulfúrico concentrado	Catalizar la esterificación y transesterificación simultáneamente, evitar la formación de jabón	Corrosión de equipos, más residuos de neutralización, difícil de reciclar, mayor temperatura de reacción, largo tiempos de reacción, actividad catalítica débil
Reacción no catalizada	Alcohol supercrítico	Reacción súper rápida, alto rendimiento, puede convertir FFA, sin catalizador, fácil purificación del producto, sin residuos	Alta temperatura y presión, alto costo de reactor, alta relación molar de alcohol a aceite

Nota: Ventajas y desventajas de catalizadores del tipo alcalino homogéneo, heterogéneo, ácido homogéneo y reacción no catalizada. Adaptado de (Vilas Bôas & Mendes, 2022).

Según (Palma & Sosa, 2019) en su investigación “Influencia de la transesterificación en la obtención del biodiésel elaborado a partir de aceite residual”, se realizó pruebas llevadas a distintas temperaturas, incluyendo 40, 50 y 60°C, con variaciones en la duración de la reacción, abarcando periodos de 90, 120 y 180 minutos. Los resultados señalaron que las condiciones más favorables para la transesterificación se lograron a 50°C en un lapso de 90 minutos, utilizando una proporción de etanol/aceite molar de 7:1 con un 0.15% de NaOH en peso del aceite. La velocidad de agitación constante durante las pruebas fue de 400 RPM. El rendimiento óptimo alcanzó un 93.44%, mientras que el rendimiento más bajo fue del 80.99%, registrado a una temperatura de

60°C con una duración de agitación de 90 minutos. En la siguiente tabla 2, se aprecia lo explicado y en la figura 2 se muestra el valor óptimo de biodiésel a diferentes temperaturas.

Tabla 2

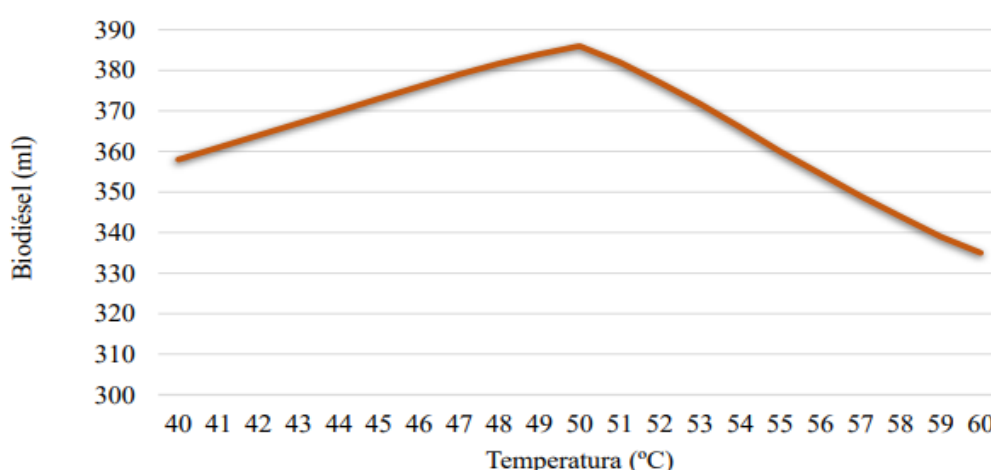
Pruebas experimentales con etanol/aceite de 7:1

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Biodiésel (mL)	Biodiésel seco (mL)	Rendimiento (%)
50	90	438	386	93.44
60	90	400	335	80.99

Nota: Adaptado de (Palma & Sosa, 2020).

Figura 2

Valor óptimo de biodiésel a diferentes temperaturas

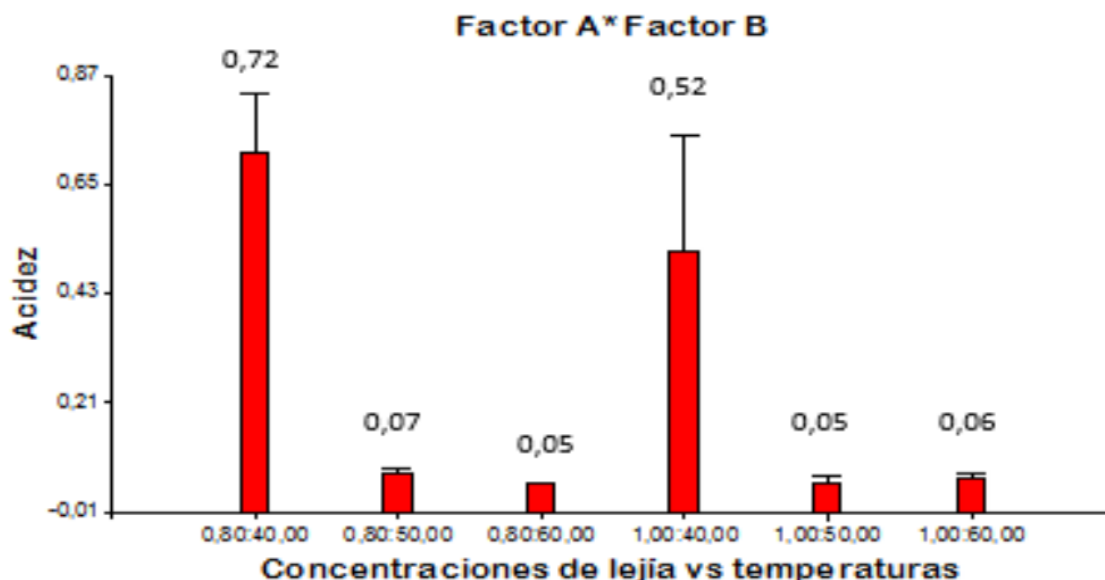


Nota: El rendimiento óptimo de biodiésel se dio a 50°C durante 90 minutos. Adaptado de (Palma & Sosa, 2020).

Según (Santana, 2019) en su investigación “Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado en frituras de alimentos utilizando diferentes concentraciones de lejía” propone en la obtención de biodiésel a partir de aceite de fritura utilizando diferentes concentraciones de soda cáustica y temperaturas, que la interacción de ambos factores afecta el rendimiento del biodiésel, además de la influencia del alcohol metanol, para lo cual empleó un diseño experimental de bloques completamente al azar con arreglo factorial AxB y tres repeticiones, donde el factor A es la concentración de lejía, mientras que el factor B es la temperatura; lo que permitió determinar diferencias en cuanto al rendimiento del biodiésel, para lo cual se aplicó la prueba de significación Tukey ($p < 0.05$). Del mismo modo, para fijar efectos de los niveles de tratamiento, utilizó el software STATGRAPHICS como se muestra en la figura 3.

Figura 3

Representación de las medias de concentración de lejía vs temperaturas



Nota: Extraído de (Santana, 2019)

Así, (Santana, 2019) recomienda utilizar un sistema de calentamiento y agitación para acelerar la homogenización de la lejía y alcohol, asimismo, tomar la acidez inicial del aceite para la obtención del biodiésel para evitar la formación de jabones, este valor se encuentra en el rango de 0.67 y 3.64 (una baja acidez garantiza un alto grado de transesterificación), cuyos resultados óptimos obtenidos indican que la concentración de lejía fue 0.8% a una temperatura de 40°C, con un rendimiento mayor al 49% en el producto final; sin embargo, en el rango de temperaturas de 50 a 60°C se obtuvieron mejores resultados en densidad y punto de ebullición. Se observa diferencias significativas del factor y factor B con respecto a las concentraciones de la lejía y temperaturas en el análisis de acidez donde el valor más alto es de 0.80 % de lejía a 40°C. La materia prima para la obtención del biodiésel fue 1000 mL, hidróxido de sodio con una cantidad de 10 g, 0.2 L de alcohol, 1000 mL de H₂O y ácido acético 2 mL, este autor recomienda que ayuda a regular la acidez del aceite que se utiliza.

Según (Bulla, 2014) en su tesis “Diseño del proceso de producción de biodiésel a partir de aceites de fritura” utiliza los aceites de soja usados de fritura para establecer un diseño del proceso de producción de biodiésel, presentando el principal problema el

contenido de ácidos grasos libres. Llevó a cabo un proceso de producción en dos etapas debido al alto contenido de acidez de 7,65 mg de KOH/g con una esterificación con catálisis homogénea ácida, y una segunda etapa con una transesterificación con catálisis homogénea básica con las siguientes variables de estudio como la relación molar de aceite:alcohol de 1:7; % en peso de catalizador igual a 0,7; temperatura de reacción a 60°C, y agente de lavado a 40°C con un rendimiento de 88,47%; consolidando que el biodiésel obtenido a partir de etanol con éster etílico de ácido graso permite un mayor tiempo de almacenamiento de biodiésel gracias a presentar menor enturbiamiento. Además, recomienda utilizar un tiempo apropiado de transesterificación mayor a 60 minutos para eliminar la disociación de los triglicéridos durante la reacción.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

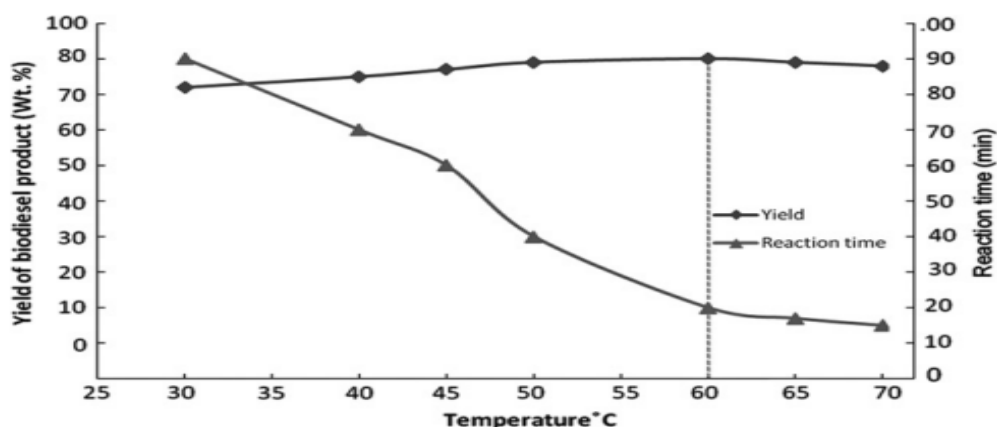
2.1.1 Parámetros en la obtención de biodiésel

La eficacia de la transesterificación está vinculada a diversos factores, entre los cuales se incluyen la temperatura y duración de la reacción, la cantidad de catalizador utilizado y la relación entre alcohol y aceite (Yaakob et al., 2013). Además, es importante la consideración de la velocidad de agitación de la reacción (Alenezi et al., 2013).

2.1.1.1 Temperatura. Aunque la transesterificación se puede realizar a temperatura del aire ambiente, el proceso se ve fuertemente influenciado por la temperatura de reacción. Según (Cvengroš & Cvengrošová, 2004), la temperatura ideal de reacción suele ser cercana al punto de ebullición del alcohol. Sin embargo, la reacción se puede llevar a cabo a diferentes temperaturas, considerando las propiedades fisicoquímicas del aceite utilizado. Varios estudios han informado que un rango de temperatura de 50 a 70°C sería la mejor opción para obtener el rendimiento más alto de biodiésel (Meng et al., 2008). En la figura 4 se muestra el impacto que tiene la temperatura en la transesterificación de aceites residuales de fritura.

Figura 4

Impacto de la temperatura en la transesterificación

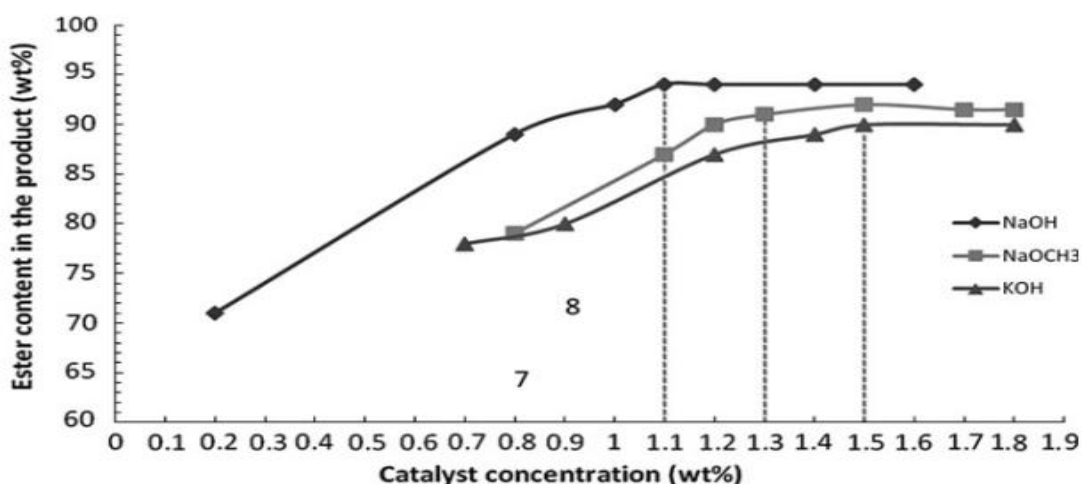


Nota: Obtenido de (Banerjee & Chakraborty, 2009).

2.1.1.2 Catalizador. La dosificación de catalizador utilizado en el proceso de transesterificación también depende del aceite empleado y del catalizador específico. Por lo tanto, la carga óptima de catalizadores alcalinos, como el NaOH, para la transesterificación del aceite de fritura usado es aproximadamente del 1.0% en peso (Meng et al., 2008). En cambio, para catalizadores ácidos, la carga puede llegar hasta el 4%. La figura 5 muestra el efecto de tres diferentes catalizadores básicos en el rendimiento de biodiésel (Banerjee & Chakraborty, 2009).

Figura 5

Efecto de catalizadores básicos en la transesterificación

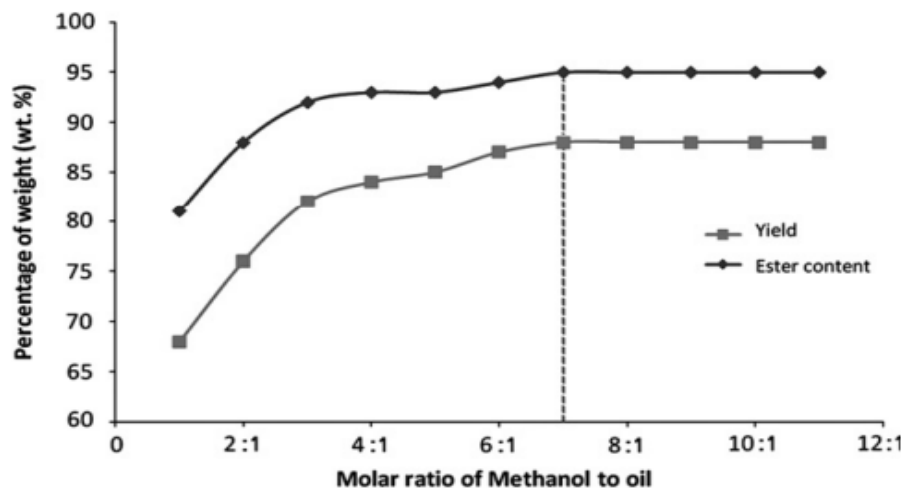


Nota: Obtenido de (Banerjee & Chakraborty, 2009).

2.1.1.3 Relación alcohol-aceite. Las reacciones de transesterificación exhiben reversibilidad, requiriendo, por ende, un exceso de alcohol para favorecer la dirección hacia adelante (Banerjee & Chakraborty, 2009). Como se muestra en la figura 6. La proporción alcohol/aceite emerge como uno de los factores más influyentes que inciden en el rendimiento final del biodiésel. (Meng et al., 2008) indican que, en presencia de un catalizador de hidróxido sódico, la relación óptima entre metanol y WCO es de alrededor de 5:1. Contrariamente, según (Banerjee & Chakraborty, 2009) un exceso de alcohol maximiza la velocidad de reacción.

Figura 6

Influencia de la proporción alcohol-aceite en la transesterificación



Nota: Obtenido de (Banerjee & Chakraborty, 2009).

2.1.1.4 Velocidad de agitación. Es otro elemento crucial, ya que el aceite es incapaz de formar con el alcohol una fase homogénea en ninguna proporción, evidenciando una solubilidad extremadamente limitada. Consecuentemente, durante la agitación, se genera el alcohol se dispersa en el aceite, originando amplias superficies de contacto entre ambos. Este fenómeno facilita la ejecución de la transesterificación mediante una efectiva transferencia de masa. En el contexto de la reacción, la interrupción de la agitación da lugar a la formación de dos fases: el glicerol y el biodiésel el cual se encuentra superiormente. Según estudios previos, los niveles de velocidad de agitación para este proceso oscilan entre 150 RPM y 1200 RPM (Ranganathan et al., 2008).

2.1.1.5 Calidad del biodiésel. Las características del biodiesel están condicionadas por el tipo de aceite y la tecnología empleada en su fabricación. Por ende, se ha encontrado necesario estandarizar el rango de propiedades que permite la utilización del biodiesel como combustible. Dos estándares internacionales ampliamente aceptados son el Estándar Europeo de Especificaciones para Biodiesel (EN14214) y el Estándar Americano de Especificaciones para Mezclas de Biodiesel B100 (ASTM 6751).

Según (Borges & Díaz, 2012) se establece las condiciones de medición para los Ésteres Metílicos de Ácidos Grasos (FAME), destinados a ser utilizados como combustible en motores diésel. La tabla 3 presenta propiedades fisicoquímicas del biodiésel B100 (biodiésel en su estado puro, sin mezcla alguna) según estándares de calidad establecido por la Norma Técnica Peruana 321.1251:2019 (Ministerio de Energía y Minas, 2022a). Al evaluar la calidad del biodiesel es importante tomar en cuenta que la presencia de impurezas puede afectar su aplicación industrial. La tabla 4 proporciona dos estándares mencionados, que son referencia con el fin de analizar la calidad del biodiésel generado.

Tabla 3

Propiedades fisicoquímicas del biodiésel

Propiedad	Unidad	Especificación NTP 321.125:2019		Biodiésel de aceites residuales
		Mínimo	Máximo	
Color	-	Reportar	-	Amarillo brillante
Punto de inflamación	°C	130	-	182,4
Azufre	% masa (ppm)	-	Sin presencia	0,018
Gravedad API (15.5 °C)	kg/cm ³	Reportar	-	29,5
Número cetano	-	47	-	47,5
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	1,9	-	5,04
Agua y sedimentos	% volumen	6	6	0,00015
Cenizas sulfatadas	% masa	-	0,05	0,016
Poder calorífico	kcal/kg	-	0,02	9720
Densidad a 20°C	g/cm ³	Reportar	-	0,872

Nota: Adaptado según NTP 321.1251:2019 de (Ministerio de Energía y Minas, 2022a).

Según las propiedades de la especificación de la norma técnica peruana 321.125:2019 el biodiésel obtenido a partir de aceites residuales cumple con la calidad que exige el mercado nacional, siendo prometedor para poder producir a partir de aceites vegetales residuales de fritura como es de interés en la presente investigación.

Tabla 4*Normas técnicas de calidad para el biodiésel (B100)*

Propiedad	EN 14214	ASTM D6751	Unidades
Punto de inflamación	120 mín.	93 mín.	°C
Viscosidad cinemática	3.5 - 5.0	1.9 - 6.0	mm ² /s (40°C)
Densidad	860-900	860-900	kg/m ³ (15°C)
Número de acidez	0.50 máx.	0.50 máx.	Mg OH/g

Nota: Adaptado de (Instituto Nacional de Innovación Agraria, 2019).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Biodiésel

El biodiésel es un éster monoalquílico de ácidos grasos producidos a partir de aceites vegetales o grasas animales (Chattopadhyay et al., 2011). La reacción puede dar lugar a la producción de éster metílico de ácidos grasos (FAME). Los aceites vegetales albergan hidrocarburos saturados, conocidos como triglicéridos. Existen varios métodos de modificación, incluyendo dilución, pirólisis, transesterificación y microemulsificación. No obstante, la transesterificación se destaca como el más eficiente para producir biodiésel de alta calidad. Todas las fuentes de ácidos grasos, como las grasas animales o los lípidos vegetales son aptas para la elaboración de biodiésel. No obstante, el empleo de estas fuentes ha suscitado ciertas inquietudes, ya que algunas de ellas son materiales esenciales en la cadena alimentaria (Talebian-Kiakalaieh et al., 2013). Por consiguiente, la mayoría de los investigadores han dirigido su atención hacia aceites no aptos para el consumo directo o aceites de cocina previamente utilizados de biodiésel.

Según (Talebian-Kiakalaieh et al., 2013) los costos de producción representan la barrera más significativa para la industrialización y comercialización del biodiésel. Así, el empleo de aceites comestibles reciclados podría disminuir los costos de producción del biodiésel en un rango del 60-90% (Canakci & Gerpen, s/f). En la exploración de la producción de biodiésel con propiedades mejoradas y a un costo reducido, se implementan

métodos innovadores destinados a disminuir el lapso que dura la reacción, la temperatura de reacción, el contenido y grado de alcohol, y el catalizador.

2.2.2 Aceite vegetal residual de fritura

Es un triglicérido en estado líquido a temperatura ambiente se erige como el principal insumo por su costo accesible tanto como por su elevada disponibilidad. Este residuo consiste principalmente en triglicéridos (TG) o glicéridos que pueden contener tanto grasa animal como aceite vegetal. Según (Font et al., 2015) categorizaron el residuo de aceite de cocina en grasa amarilla y marrón, obtenida a partir de aceites como el de palma, canola, maíz, girasol y otros utilizados en la preparación de alimentos sosteniendo que la clasificación del residuo de aceite de cocina también puede basarse en su origen, recolectado en lugares como restaurantes, cafeterías y hogares. Sin embargo, la viabilidad del proceso depende significativamente de la calidad del aceite, siendo crucial pretratar para garantizar la rentabilidad del proceso.

2.2.2.1 Composición química. (Talebian-Kiakalaieh et al., 2013) sostienen que las propiedades de los aceites residuales de fritura dependen de la elaboración del aceite fresco, en promedio se tienen las siguientes propiedades: viscosidad a 40°C es 44.7 cSt, la densidad es 0.90 g/cm³ y un índice de acidez es 2.5 mg KOH/g. En este estudio, se utiliza el aceite “Friol”, el cual es un aceite de alto rendimiento ideal para frituras prolongadas, compuesto de aceites vegetales como girasol, oleína de palma y soya; además, de TBHQ que es un antioxidante, y un antiespumante (Axioma Group S. A., 2019).

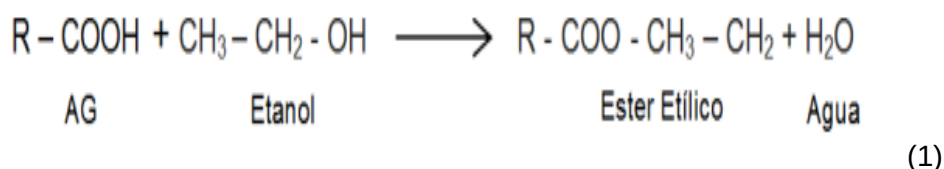
2.2.3 Reacción de esterificación

La esterificación, parte integral del proceso de obtención, se incorpora con el fin de utilizar ácidos grasos libres y favorecer a los ésteres etílicos. Este enfoque implica la mezcla de un alcohol, ácido sulfúrico y aceite, donde el alcohol generalmente actúa como reactivo en exceso y desplazar el equilibrio hacia el producto. En este procedimiento, el ácido sulfúrico (H₂SO₄) se emplea como catalizador y agente absorbente de agua que se

genera durante la reacción; en algunas instancias, este ácido puede ser sustituido por ácido fosfórico (H_3PO_4) (Bulla, 2014). Se muestra dicha reacción en la ecuación (1) en la figura 7 de reacción es esterificación.

Figura 7

Reacción de esterificación



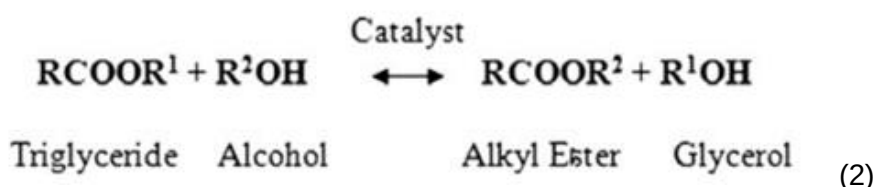
Nota: Obtenido de (Bulla, 2014). Se pueden presentar algunos inconvenientes como la esterificación del ácido sulfúrico o formación de éter, también puede ocurrir una decarboxilación del AG (ácido graso).

2.2.4 Reacción de transesterificación

La transesterificación de aceites residuales vegetales de fritura con alcohol representa la estrategia más eficaz para obtener biodiésel. Se distinguen dos modalidades de concretar esta reacción, con y sin catalizador. La eficiencia y velocidad se optimizan mediante la aplicación de diversos tipos de catalizadores. Es esencial considerar que la reacción de transesterificación es reversible, y el exceso de alcohol desplaza el equilibrio hacia la formación del producto biodiésel (Ma & Hanna, 1999). La ecuación general de la transesterificación se presenta en la ecuación (2) mostrado en la figura 8.

Figura 8

Reacción de transesterificación



Nota: Obtenido de (Talebian-Kiakalaieh et al., 2013) Se dispone de diversos alcoholes, como metanol, etanol, propanol y butanol, para llevar a cabo esta reacción, siendo el etanol preferido por los lineamientos medioambientales del presente estudio, además, de sus propiedades fisicoquímicas.

Usualmente, la transesterificación implica factores críticos que ejercen una influencia significativa en la conversión y rendimiento resultantes. Entre las variables más relevantes se encuentran: la temperatura de reacción, el contenido de ácidos grasos libres

en el aceite, el contenido de agua en el aceite, el tipo de catalizador, la cantidad de catalizador, el tiempo de reacción, la relación molar alcohol/aceite, el tipo o flujo químico del alcohol, la utilización de cosolventes y la intensidad de mezcla (Talebian-Kiakalaieh et al., 2013).

2.2.5. Catalizadores

Según (Mandari & Devarai, 2022) los aceites derivados triglicéridos y el alcohol son inmiscibles, formando una mezcla de reacción monofásica. Esta condición resulta en una superficie limitada para la transesterificación, lo que ralentiza la velocidad de reacción. La inclusión de un catalizador incrementa la superficie de contacto entre los reactivos, mejorando así la velocidad de reacción. Los catalizadores químicos incluyen catalizadores homogéneos y heterogéneos. Los homogéneos abarcan catalizadores alcalinos o ácidos, mientras que los heterogéneos involucran ácidos sólidos, bases, bifuncionales ácido-base, basados en residuos de biomasa y nanocatalizadores. A pesar de que los catalizadores químicos homogéneos pueden lograr mayores conversiones en la reacción, recuperar el catalizador y purificar el producto final presenta desafíos debido a la formación de jabón. En la actualidad, los catalizadores enzimáticos son más atractivos debido a su especificidad de sustrato, previniendo la formación de jabón y facilitando la purificación del producto. La elección del catalizador se basa en el tipo de aceite como también en la cantidad presente de ácidos grasos libres (FFA) en el aceite, las condiciones operativas, la actividad del catalizador requerida, así como consideraciones de costo y disponibilidad.

2.2.5.1 Catalizador alcalino homogéneo. Los catalizadores alcalinos homogéneos son altamente eficaces y se emplean de manera común. Como NaOH y KOH, y los alcóxidos, como CH_3ONa , CH_3OK y NaOC_2H_5 , figuran como los catalizadores industriales más prevalentes debido a su capacidad para inducir una reacción rápida bajo condiciones moderadas. En situaciones donde se utilizan aceites vírgenes ultrapuros, cuyos niveles de ácidos grasos libres y valores de acidez son inferiores al 0,5% y 1 mg KOH/g, respectivamente, los catalizadores alcalinos homogéneos ofrecen un rendimiento

y pureza superiores. No obstante, cuando se trata de aceites con mayores contenidos de FFA, se corre el riesgo de generar jabón, lo que conlleva a una disminución del rendimiento y complicaciones en la separación del producto (Mandari & Devarai, 2022). Los catalizadores basados en sodio se destacan como superiores a los catalizadores KOH cuando el disolvente utilizado es metanol, gracias a su rápida solubilidad en metanol y a sus mayores rendimientos.

Sin embargo, este método presenta limitaciones en la flexibilidad de la materia prima debido a posibles reacciones secundarias indeseadas, como la formación de jabón, que ocurre si el contenido de FFA y agua supera el 0,5% y el 0,06% en peso, respectivamente. En condiciones de elevado contenido de agua en el aceite de partida, especialmente a temperaturas elevadas, se desencadena una reacción de hidrólisis en la que los triglicéridos se transforman en diglicéridos y generan ácidos grasos libres (Mandari & Devarai, 2022).

2.2.6 Alcoholes

(Yaakob et al., 2013) sostienen que el alcohol desempeña un papel fundamental como uno de los reactantes principales en las reacciones de transesterificación. Aunque tanto el metanol como el etanol se emplean de manera extensa en estas reacciones, informes previos han abogado por la utilización del metanol en la producción de biodiésel, destacando su amplia disponibilidad y bajo costo, así como su alta reactividad en comparación con el etanol, lo que minimiza el tiempo de reacción.

Sin embargo, es relevante mencionar que el metanol es un alcohol derivado del petróleo, y en este contexto, el etanol presenta la ventaja de ser obtenido a partir de fuentes agrícolas renovables. Además, el etanol exhibe una mayor solubilidad en aceite en comparación con el metanol, un aspecto significativo es que el biodiésel producido con etanol (éster etílico de ácidos grasos, FAEE) presenta fluidez y turbidez más bajas a comparación del metanol (éster metílico de ácidos grasos, FAME), potenciando la

capacidad de almacenamiento, en la tabla 5 se muestra la comparación entre las propiedades de FAME y FAEE.

Tabla 5

Comparación entre las propiedades FAME y FAEE

Propiedad de combustible	Unidades	FAME	FAEE
Densidad (15°C)	kg/m ³	887	878
Viscosidad cinemática (40°C)	cSt	5.16	4.92
Poder calorífico bruto	MJ/kg	39.26	39.48
Poder calorífico neto	MJ/kg	36.59	36.81
Índice de acidez	mgKOH/g	0.55	0.27

Nota: Adaptado de (Yaakob et al., 2013).

2.7 Marco legal

2.7.1 Ley de promoción del mercado de biocombustibles

El (Ministerio de Energía y Minas, 2022a) argumenta la normativa N° 28054 proporciona la estructura general para fomentar el sector de biocombustibles, fundamentada en principios de competencia abierta y acceso libre a la actividad económica. Su propósito es diversificar el mercado de combustibles, impulsar el progreso en los sectores agropecuario y agroindustrial, crear oportunidades de empleo y reducir el impacto ambiental negativo.

Estas disposiciones fueron establecidas mediante el Decreto Supremo N° 021-2007-EM.

2.7.2 Reglamento de Comercialización de Biocombustibles

De acuerdo con el artículo 5, se establece que las características técnicas de los biocombustibles se definen conforme a las Normas Técnicas Peruanas correspondientes, se muestran en la tabla 4 y 5, cuyas responsabilidades competen al Instituto Nacional de la Calidad (INACAL) mediante la Primera Disposición Complementaria Final de la Ley N° 30224, específicamente en lo relacionado con la normalización (Ministerio de Energía y Minas, 2022a).

Se exime la obligación de comercializar Diésel, definido según (Vera et al., 2021) como el combustible normalizado para ser utilizado en motores de combustión interna, siendo el diésel B2 la mezcla que contiene diésel al 98% y biodiésel B100 (biodiésel puro) al 2 %, siendo obligatorio desde enero del 2009; mientras que el diésel B5 es la mezcla de diésel al 95% y biodiésel B100 al 5%., siendo obligatorio desde enero del 2011.

Además, se considera la necesidad de evitar desabastecimiento de Diésel B5 en el territorio nacional al establecer medidas transitorias para garantizar el abastecimiento de hidrocarburos; según la evolución de la situación, con el objetivo de asegurar la disponibilidad de combustibles líquidos y Biodiesel B100 (Ministerio de Energía y Minas, 2022b).

Cabe destacar que, en el 2021, de acuerdo con (Vera et al., 2021) con respecto al biodiésel B100 el 46,2% fue importado, y el resto nacional, siendo el 41,4% de las importaciones provinieron de España, asimismo, de Indonesia, Estados y Malasia.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Universo de estudio

Para la obtención del biodiésel a partir del aceite vegetal residual de fritura se tomaron muestras en Lima, específicamente en Santiago de Surco y Villa María del Triunfo, conocidos por ser distritos donde se consume grandes cantidades de aceites. Estas muestras luego fueron trasladadas a las instalaciones del laboratorio de investigación de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la prestigiosa Universidad Nacional de Ingeniería ubicado en Rímac con dirección legal en Av. Túpac Amaru 210, Rímac 15333; en el anexo 3 se muestra la aceptación de la utilización de dicha instalación y en el anexo 6 se muestra dichas instalaciones. Además, en la figura 9 se muestra el plano de los distritos de zonas de muestreo de la materia prima.

Figura 9

Ubicación de las zonas de muestreo



Nota: Obtenido de (Google Maps, 2023).

3.2 Tipo y nivel investigación

Según (Hernández et al., 2014) las etapas conceptuales de la investigación como el planteamiento del problema, el desarrollo de la sección teórica y la hipótesis con las fases operativas se conectan en el diseño de investigación específico que cumpla con los objetivos de estudio.

La investigación tiene un alcance correlacional debido a que se estudian la relación que existe entre variables en un contexto específico, y también explicativo ya que se enfoca en explicar en qué condiciones ocurre la transesterificación (fenómeno) y por qué se relacionan dos o más variables, específicamente, la temperatura de reacción y la concentración de catalizador.

3.2.1 Nivel experimental

Según el propósito de la presente investigación, en el cual se administran tratamiento y se realizan experimentos debido a la manipulación de variables independientes; medición de variables dependientes; además, del control y validez. Por lo mencionado y desde un enfoque cuantitativo, se aplica un diseño experimental relacionados con lineamientos de la investigación, considerando la mejor estrategia para confirmar lo que se requiere en la investigación. Por consiguiente, los resultados tienen mayores posibilidades de aportar conocimientos.

Los diseños experimentales establecen el posible efecto de una causa que se manipula, por lo cual se define como experimento a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes, en un contexto controlado por el investigador, se muestra un esquema de experimento y variables en la figura 10.

Figura 10

Esquema de experimento y variables



Nota: Adaptado de (Hernández et al., 2014).

Los experimentos en esta investigación son denominados puros debido a que cumplen con la manipulación de la variable independiente y la equivalente de estos, pudiéndose realizar en condiciones de mayor control (Hernández et al., 2014).

En la investigación experimental, el diseño factorial es muy utilizado ya que se analiza el efecto que tiene manipular dos variables independientes experimentalmente sobre las variables dependientes, y se incluye cuatro niveles en cada una de las variables; luego todos los niveles de cada variable independiente son tomados en combinación con todos los niveles de las otras variables independientes (Babbie, 2014). Es necesario precisar la definición operacional experimental, entendiéndose, lo que significa la variable en el experimento, y, la no solo determinación de un efecto de los niveles por la presencia del tratamiento, sino los diferentes efectos producidos a partir de distintos niveles de la variable independiente.

Además, la investigación científica se debe al análisis de datos cuantitativos gracias a las representaciones de los modelos estadísticos y los resultados numéricos interpretados en determinado contexto. En el proceso de investigación cuantitativa se decide el software Minitab para el análisis de datos, para evaluar la confiabilidad y validez, así como, el análisis e interpretación mediante pruebas estadísticas inferenciales.

3.3 Período de análisis

La recolección del aceite residual se dio al final de dos meses en dos establecimientos gastronómicos: uno situado en el Club Petroperú en el distrito de

Surco y otro en una pollería en Villa María del Triunfo, el cual trabajaron con la misma materia prima.

Luego, se sometió la muestra a una filtración con el objetivo de facilitar su procesamiento, dado el considerable contenido de impurezas y sólidos suspendidos durante 4 semanas. Se procedió a analizar las propiedades fisicoquímicas como el índice de acidez y la densidad del aceite residual, durante un periodo de seis semanas. Posteriormente, la experimentación para obtener biodiésel se dio en los meses especificados según el cronograma del anexo 2.

3.4 Materiales y reactivos utilizados

Los materiales y equipos utilizados se enuncian de manera ordenada en la tabla 6. Por otro lado, se menciona los reactivos utilizados a continuación:

- Indicador fenolftaleína
- Alcohol etílico a 96° de pureza
- Hidróxido de sodio (NaOH) a 0.1%
- Hidróxido de sodio (NaOH) a 1% de concentración
- Agua destilada a 60°C.

Tabla 6

Equipos utilizados

Equipos	
Balón de 3 bocas	Balanza electrónica
Condensador con manguera	Cocina eléctrica
Fiola de 100 mL (para NaOH)	2 Erlenmeyer 250 mL Y 2 de 50 mL
2 vasos de precipitado de 30 mL, 5 de 250 mL	Embudo de 15 cm de diámetro
2 recipientes de plástico de 500 mL	Termómetro digital de 0 a 100 °C
2 peras decantadoras de 500 mL	Magneto para agitación (2) de 2.8 cm
2 buretas de 50 mL	Condensador
Fiola de vidrio de 100 mL	Filtrador al vacío
1 espátula de metal para pesar los residuos	Bomba de vacío
Papel filtro	Picnómetro
Tres lunas de reloj	Termómetro de Hg de 150°C
Tapones de plástico o jebe	Propipeta

3.5 Método de muestreo

Se procede a tomar muestras con el propósito de realizar análisis cualitativos, y, primordialmente cuantitativos del aceite vegetal residual de fritura de establecimientos de comida rápida tanto en Santiago de Surco como en Villa María del Triunfo.

Estas muestras se tomaron en galoneras de 4 L de color oscuro con el fin de estandarizar la cantidad de recolección, esta galonera es un envase industrial compuesto de polipropileno de alta densidad con pigmentación verdosa, con una tapa con la función de conservar la hermeticidad del aceite residual de fritura.

Las tomas de muestras fueron in situ proporcionadas en colaboración con el personal encargado del restaurante, después de utilizar el aceite por el tiempo que considerados oportuno según las exigencias de calidad de los restaurantes. Luego, se trasladó las muestras de aceite vegetal residual de fritura a la Universidad Nacional de Ingeniería.

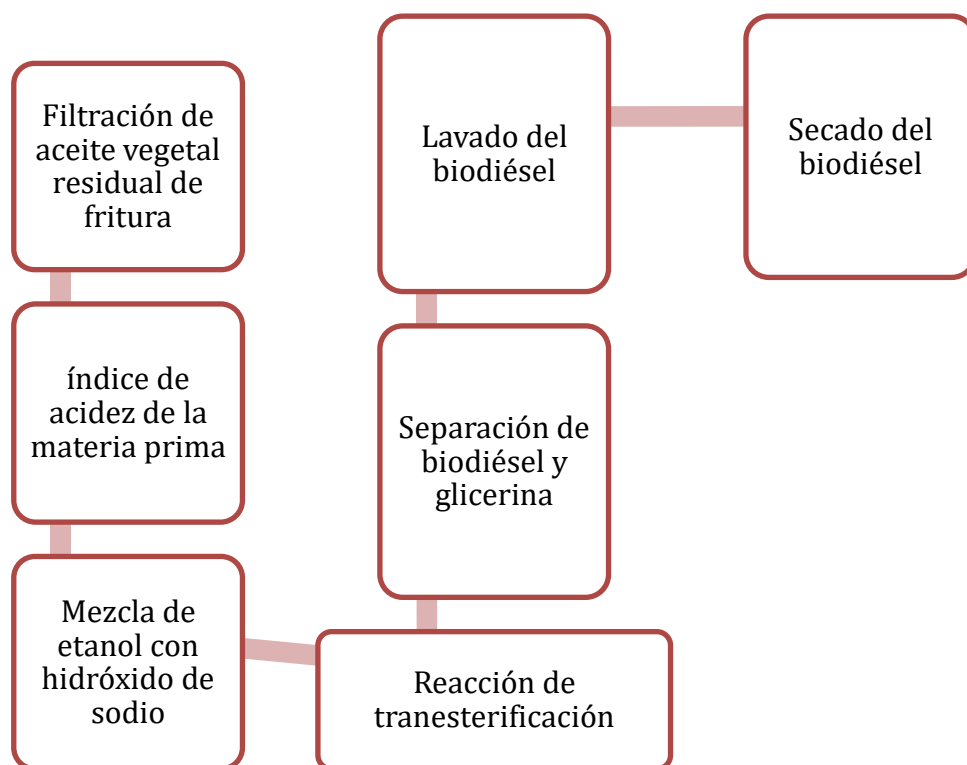
3.6 Trabajo experimental

Los procesos involucrados en este experimento abarcan lo siguiente: primero se realizó la filtración de aceite vegetal residual de fritura, luego se realizó la valoración, se realizó la mezcla de etanol con hidróxido de sodio, se dio la reacción de transesterificación, posteriormente, se efectuó la separación de biodiésel y glicerina y finalmente, el lavado del biodiésel obtenido. Adicionalmente, se secó el biodiésel.

Se muestra en la figura 11 el diagrama del proceso de producción a escala laboratorio de biodiésel que consta desde la filtración del aceite vegetal residual de fritura hasta el secado del biodiésel.

Figura 11

Proceso de producción a escala laboratorio de biodiésel



La muestra de aceite vegetal residual de fritura es obtenida procesos culinarios en comidas como arroz frito, fideos, entre otros; la cual presenta impurezas a pesar de que la sustancia presenta una textura y color uniforme debido a que los puntos de recolección han sido de restaurantes de consumo masivo que establecen el número máximo de veces que este aceite es reutilizado cumpliendo con estándares de calidad. El color del aceite vegetal residual de fritura es negro tenue, un olor penetrante y se observa una cantidad escasa de sólidos, generalmente, arroz.

Sin embargo, utilizar un aceite vegetal residual de fritura de gran calidad es fundamental para producir biodiésel con un buen rendimiento, se sometió filtración a vacío como se muestra en la figura 12. Antes de ser empleado en el experimento destinado a la producción de biodiésel. Para lo cual se realizan pruebas que definirán principalmente dos características fisicoquímicas fundamentales como la densidad y el índice de acidez.

Figura 12

Filtración al vacío del aceite residual de fritura



La densidad del aceite residual vegetal de fritura varía de acuerdo con el proveedor y la materia prima del aceite que utilizó para elaborar el aceite, en este caso es el aceite “Friol” compuesto de aceites vegetales como girasol, oleína de palma y soya (Axioma Group S. A., 2019).

En la tabla 7 se muestra las propiedades de los aceites vegetales que componen la materia prima de estudio, se menciona un estudio realizado por (Talebian-Kiakalaieh et al., 2013) en donde se tiene las propiedades de girasol, oleína de palma y soya, según las especificaciones técnicas del aceite de la marca de aceite utilizada.

Tabla 7*Propiedades de los aceites vegetales de la materia prima*

Aceite	Girasol	Oleína de palma	Soya
Composición ácido graso (wt%)	C16:0, C18:0, C18:1, C18:2	C16:0, C18:0, C18:1, C18:2	C16:0, C18:1, C18:2
Viscosidad (40°C)	32.6	39.6	32.9
Densidad (g/cm ³)	0.92	0.92	0.92
Índice de acidez	-	0.1	0.2
Valor de Heating (MJ/kg)	39.6	-	39.6

Nota: Adaptado de (Talebian-Kiakalaie et al., 2013).

La temperatura afecta a la densidad que es definido como la relación entre el peso y volumen, por lo cual se trabaja a las condiciones de laboratorio con una temperatura de 23°C ambiente. La densidad promedio fue de 0.9298 g/mL. Así también, el índice de acidez definido como el número de mg de NaOH necesario para neutralizar a los ácidos grasos libres de 1 g de aceite vegetal residual de fritura. Se determinó con la valoración del aceite en etanol con una solución estándar de NaOH, se mostró un valor inferior al 2% entonces el grado de hidrólisis que se libera a los ácidos grasos del enlace éster con el glicérido es bajo.

Este índice de acidez luego de distintas mediciones tuvo un valor promedio de 0.61% por lo cual no fue necesario realizar una esterificación previa a la transesterificación, debido a que no hay una cantidad significativa de ácidos grasos que reaccionen con el catalizador homogéneo básico, NaOH, y se dé la formación de la saponificación, y, por tanto, el rendimiento de la producción de biodiésel disminuya.

3.6.1 Evaluación de materia prima

Luego de determinar las características fisicoquímicas de densidad e índice de acidez del aceite vegetal residual de fritura antes su empleo en el proceso. Como se explicó la valoración se determinó el índice de acidez; además, el porcentaje de ácidos grasos libres encontrados en el aceite, y la determinación de la concentración necesaria de catalizador NaOH para la etapa de transesterificación, para lo cual se utilizó el indicador fenolftaleína, hidróxido de sodio, alcohol etílico a 96°.

De acuerdo con lo experimentado, porcentaje de ácidos grasos libres es inferior (FFA) al 2%, y el experimento puede proceder directamente a la fase de transesterificación sin requerir esterificación adicional (Suzihaque et al., 2022).

En caso de que el porcentaje de ácidos grasos libres exceda el 2%, es necesario realizar la esterificación, para reducir el contenido de FFA y prevenir la formación de jabón durante la transesterificación. La titulación se llevó a cabo mediante la mezcla de 10 ml de alcohol etílico y 1 gota de fenolftaleína como disolvente e indicador, respectivamente, con 1 g de muestra de aceite, dada la figura 13. Al inicio era incoloro y luego cambió poco a poco por el exceso de NaOH.

Figura 13

Determinación de índice de acidez del aceite vegetal residual de fritura



Nota: Antes y después de realizar la valoración del aceite vegetal residual de fritura

Se tituló utilizando una solución de NaOH. Simultáneamente, se determinó la cantidad de NaOH necesaria según el volumen (ml) de NaOH utilizado para valorar 1 ml de aceite, sumado a la cantidad básica de NaOH requerida de 3.5 g.

Los valores de índice de acidez se calculan según la ecuación 3 y porcentaje de FFA se calcula mediante la ecuación 4.

$$\text{Índice de acidez} \left(\frac{mgNaOH}{g} \right) = \frac{MW_{NaOH} \times C_{NaOH} \times V_{NaOH}}{m_{aceite}} \quad (3)$$

$$FFA(\%) \approx \frac{\text{Índice de acidez}}{2} \quad (4)$$

En relación con la valoración de la muestra de aceite mediante NaOH, se determinó que el valor medio de valoración, basado en cinco muestras se determinó la masa de 0,35 g de NaOH por cada 0.1 L de muestra de aceite vegetal residual de fritura. Por lo expuesto, para utilizar 0.1 L de aceite en el proceso de transesterificación, se requerirían 0,05 g de NaOH, más los 0,35 g mencionados, dando un total de 0,4 g y 4 g de la cantidad básica de NaOH óptima como catalizador a 0.1% y 1% de concentración, respectivamente.

3.6.2 Transesterificación

3.6.2.1 Condiciones de las variables en la transesterificación. El catalizador básico como el hidróxido de sodio es eficaz para la conversión en estas condiciones tales como la velocidad de la reacción de etanolisis y el rendimiento de ésteres etílicos de ácidos grasos (FAEE) dependen de varios factores, incluyendo la relación molar inicial de etanol:aceite, el tipo y cantidad de catalizador, la temperatura de reacción y la intensidad de agitación. A pesar de las investigaciones, no hay consenso sobre cómo ciertos factores afectan la velocidad de reacción de etanolisis y el rendimiento del éster (Stamenković et al., 2011). Es esencial optimizar la relación molar inicial etanol:aceite, que depende de la temperatura de reacción, el tipo de aceite utilizado y el tipo y cantidad de catalizador, para la etanolisis a temperaturas más bajas, se recomienda una relación molar de etanol:aceite más baja.

El tipo de catalizador utilizado depende del contenido de FFA y agua en la mezcla de reacción. Los FFA y el agua pueden causar la reacción de saponificación y la formación de jabón, reduciendo así la cantidad de catalizador base en la mezcla de reacción y el rendimiento del éster. Aunque generalmente el rendimiento de FAEE aumenta con la cantidad de catalizador hasta ciertos valores, cantidades más altas de catalizador base

pueden favorecer la reacción de saponificación, disminuyendo el rendimiento de FAEE y dificultando la separación de fases. Por lo tanto, la cantidad óptima de catalizador es un equilibrio entre estos efectos opuestos y depende del tipo de aceite y del tipo de catalizador base.

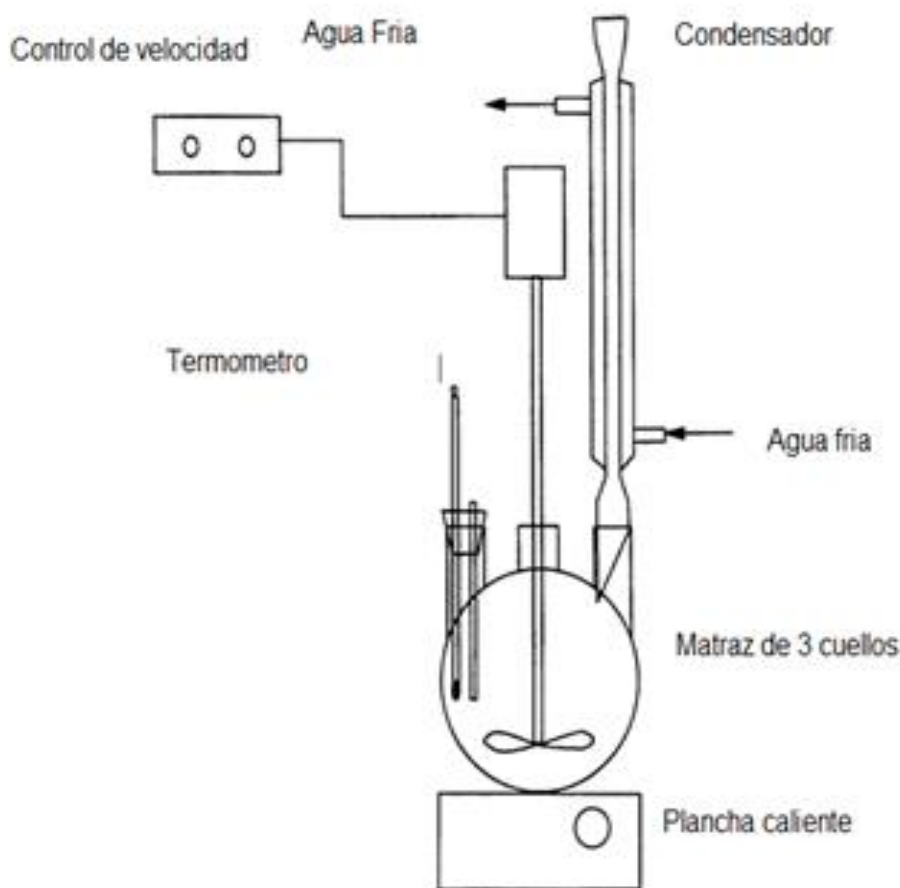
Según (Stamenković et al., 2011) la temperatura de reacción no tiene un impacto significativo en el rendimiento de FAEE, se ha observado que la velocidad de reacción aumenta con la temperatura durante los primeros 20 a 30 minutos de reacción. Las temperaturas de reacción más altas no son preferibles debido a la formación de jabones que pueden reducir el rendimiento de FAEE. Existen opiniones divergentes entre los investigadores sobre la temperatura óptima para una reacción homogénea catalizada por bases. Algunos favorecen temperaturas más bajas, mientras que otros sugieren un rango de temperatura entre 60 y 80°C.

La solubilidad del etanol en aceites vegetales es mayor que la del metanol, y a 25°C, varía entre el 13,16% y el 16,41%, dependiendo del tipo de aceite vegetal (Stamenković et al., 2011). La intensidad de la agitación es crucial ya que facilita la formación de una emulsión estable de pequeñas gotas y aumenta la transferencia de masa de triglicéridos desde la fase oleosa hacia el área interfacial.

La etanolisis del aceite vegetal se llevó a cabo con una intensidad de agitación en el rango de 200 a 600 rpm, utilizando un agitador mecánico o magnético. Sin embargo, (Stamenković et al., 2011) sostiene que una velocidad de agitación alta, considerándose mayor a 500 rpm, era perjudicial para la eficiencia de la reacción. Se muestra un montaje del matraz de tres cuellos referencial para realizar la reacción de transesterificación en la figura 14.

Figura 14

Montaje de la reacción de transesterificación



Nota: Obtenido de (María et al., 2011).

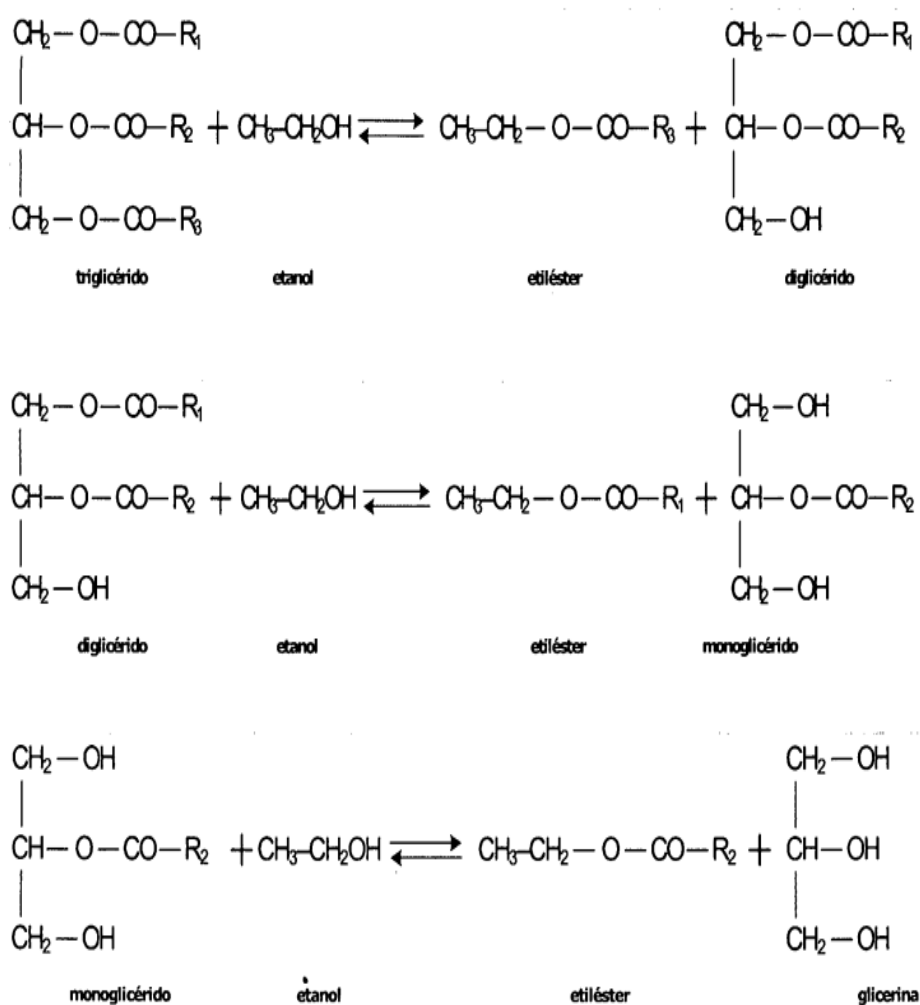
Según (Bulla, 2014) el valor óptimo la relación etanol:aceite se encuentra en el rango de 7:1 a 12:1 dependiendo de la materia prima; en la presente investigación luego de realizar preexperimentos la mejor relación es 10:1 con respecto a la cantidad de aceite vegetal residual de fritura requerida. Como se argumenta, ocurre directamente sin necesidad de realizar una esterificación, dado el contenido de ácidos grasos libres es inferior al 2%. Por lo tanto, en la transesterificación se utiliza etanol para la producción de biodiésel, siendo este de procedencia renovable y presentando una menor toxicidad que el metanol (Santiago, 2008); controlando principalmente la temperatura de reacción, la velocidad de agitación, y la concentración del catalizador. El experimento se desarrolló según el diseño experimental factorial, en un tiempo de reacción de 90 minutos con una

velocidad de agitación constante de 400 RPM a 60 °C y 70°C, con concentraciones de catalizador NaOH de 0.1% y 1%.

La cantidad predeterminada de catalizador hidróxido sódico (NaOH) obtenida a partir de la valoración se disuelve en la cantidad requerida de etanol en un recipiente, y la mezcla se agita alrededor de 15 minutos hasta que las partículas de NaOH no sean visibles, y se inicia la reacción. La cantidad de etanol se basa en la relación etanol/aceite, que es de 10:1 (Kombe et al., 2011). El mecanismo de reacción se muestra en la figura 15.

Figura 15

Mecanismo de reacción de triglicérido con etanol



Nota: Obtenido de (Santiago, 2008).

La mezcla resultante de catalizador NaOH y etanol forma una solución de etóxido, la cual se agrega al aceite vegetal residual de fritura filtrado. La reacción se lleva a cabo durante 90 minutos, se muestra el esquema de transesterificación en la figura 16.

Es importante monitorear que la temperatura de la reacción, de tal manera se verifica que sea constante durante todo el tiempo determinado de la transesterificación, por lo cual se utiliza un termómetro digital registrándose valores de temperatura de $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ y $70 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Figura 16

Esquema de transesterificación del aceite vegetal residual de fritura



En la tabla 8 se muestra el estado de arte de las condiciones óptimas de diferentes materias primas relacionadas a la que componen el aceite vegetal residual de fritura en la transesterificación.

Tabla 8*Condiciones óptimas de aceites vegetales para la transesterificación*

	Velocidad de agitación (RPM)	Relación molar etanol:aceite	Catalizador (wt%)	Temperatura (°C)	Rendimiento (%)/ Tiempo (min)
Soya	450	10:1	0.6 % NaOCH ₂ CH ₃	65	97/30
Girasol	600	12:1	0.75 % NaOH	50	98.5/60
Palma	250	12:1	1% NaOH	60	96/120

Nota: Adaptado de (Stamenković et al., 2011).

Se presenta en la tabla 9 las características del etil ésteres de ácidos grasos producido de los aceites vegetales que componen la materia prima de la investigación como referencia de la soya y girasol.

Tabla 9*Características de FAEE producido de distintos aceites vegetales*

	Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	Índice de acidez (mg KOH/g)	Número de cetano
Soya	4.60	0.08	-
Girasol	13.87	0.1	43.8

Nota: Adaptado de (Stamenković et al., 2011).

3.6.3 Separación

Después de transcurrir varios minutos, se pueden discernir gradualmente dos estratos distintos en el embudo de decantación. Estas capas resultantes consisten en glicerol, el subproducto acumulado en la parte inferior de la pera de decantación de 500 mL, y biodiésel.

Debido a la densidad del biodiésel que es inferior al glicerol, se depositó en la capa superior de la solución. La decantación de la mezcla se separa en dos fases: éster y glicerina al cabo de unas horas. La solución se dejó reposar durante 24 horas para facilitar un proceso de separación completa de las dos fases líquidas, posteriormente se separó el glicerol.

En la etapa de separación, el producto resultante de la transesterificación se transfiere a una pera de decantación y se deja reposar a temperatura ambiente durante para permitir la decantación de la glicerina (capa inferior) y el producto de interés, biodiésel (capa superior) debido a que son líquidos inmiscibles y se visualiza debido a que el biodiésel es menos denso que la glicerina.

La figura 17 muestra la pera de decantación con las fases mencionadas. Las dos fracciones se recogen en matraces Erlenmeyer separados.

Figura 17

Decantación de biodiésel



3.6.4 Lavado

La técnica de lavado resultó fundamental para eliminar impurezas y residuos en el biodiésel, logrando así obtener un producto transparente y considerablemente puro.

Se agregó el biodiésel a un vaso de precipitado, y se calentó en baño María alrededor de 60°C, y se agregó agua destilada aproximadamente el 20% del volumen total (Flor Césare et al., s/f). Luego de añadir una cantidad uniforme de agua al biodiésel, se transfirió ambas al embudo separador y se permitió que reposaran durante 24 horas, el agua se acumuló en el fondo del embudo, mientras que el biodiésel ocupó la capa superior, por lo cual, durante el primer lavado, el agua utilizada para limpiar el biodiésel presentaba

turbidez, indicando que las impurezas del biodiésel se extrajeron y eliminaron eficazmente mediante el agua.

Se procedió a lavarlo una segunda y tercera vez; ya que según (Bulla, 2014) se efectúa un lavado adicional con agua destilada en intervalos de 2 h entre lavados para dejar separar las fases y después extraer el agente de lavado, obteniendo así el biodiésel producido a partir de aceites vegetales residuales de fritura. Por lo cual el proceso de lavados con agua caliente no produjo un incremento en el índice de acidez y fue eficiente en la remoción de impurezas de biodiésel, ya que se trabajó a una temperatura adecuada según (Flor Césare et al., s/f), y no se dió la hidrólisis de los ésteres, sin aumentar los ácidos libres, y el porcentaje de glicerol disminuya, esto se comprueba con el buen rendimiento de biodiésel obtenido.

3.6.5 Secado

El secado del biodiésel se da en un sistema abierto, es decir en un recipiente a 110°C hasta no observar más vapor del combustible, el cual debe ser color ámbar. Este proceso ayuda a remover el remanente de alcohol, luego se llevó a temperatura ambiente según (María et al., 2011) para obtener el máximo rendimiento; finalmente, el biodiésel finalmente es almacenado en recipientes de vidrio como se muestra en la figura 18.

Figura 18

Obtención final de biodiésel



3.7 Análisis factorial de las variables de operación

El uso de un diseño factorial tiene como objetivo examinar la influencia de varios factores en una o varias respuestas, especialmente cuando hay un interés conjunto en todos los factores. Un aspecto crucial en muchos diseños factoriales es la identificación de una combinación óptima de niveles de los factores que mejore el rendimiento del proceso.

Estos factores pueden clasificarse como cualitativos o cuantitativos. En el entendimiento de cuanto un factor influye en la variable de respuesta, es esencial seleccionar un número de niveles igual a 2 para cada uno de ellos. En el diseño factorial completo, se realizan de manera aleatoria todas las combinaciones posibles que pueden formarse con los niveles de los factores bajo investigación (Gutiérrez & De la Vara, 2012).

3.7.1 Diseño factorial

Se aplica un diseño con los factores A y B, donde Factor A (Concentración de NaOH), Factor B (Temperaturas); el factor A cuenta con dos niveles y el factor B cuenta con dos niveles dando como resultados cuatro tratamientos a los cuales se les realizará 3 repeticiones, con un total de doce unidades experimentales como se muestra en la tabla 10. Mientras que en la tabla 11 se muestra las formulaciones del estudio presente.

Por otro lado, las variables independientes intervinientes que fueron controladas a valores constantes son las siguientes:

Velocidad de agitación a 400 RPM, lapso en la que se da la reacción de la transesterificación de 90 minutos y tiempo de decantación de 24 horas. La variable de salida es el rendimiento de la producción de biodiésel. Además, en el anexo 4 se adjunta la captura de pantalla del trabajo realizado en el software estadístico Minitab 2021.

Tabla 10*Factores que intervienen en la obtención de biodiésel*

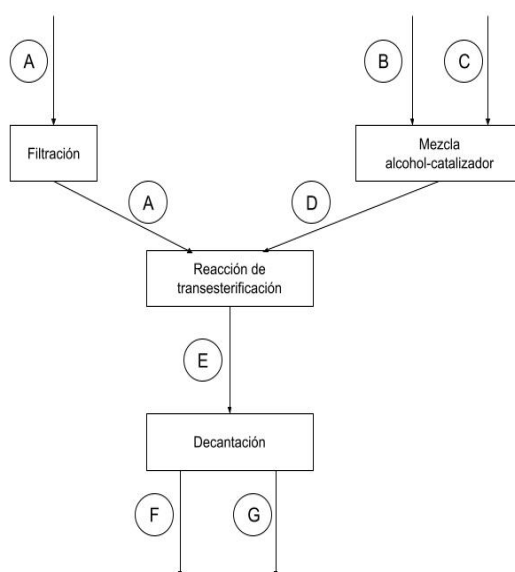
Factores	Simbología	Descripción del proceso
A: Concentración de NaOH	a0	0.1%
	a1	1%
B: Temperaturas	b0	60 °C
	b1	70 °C

Tabla 11*Formulaciones de los factores de estudio*

No	Simbología	Descripción
1	a0b0	0.1% + 60 °C
2	a0b1	0.1% + 70 °C
3	a1b0	1% + 60 °C
4	a1b1	1% + 70 °C

3.8 Balance de materia

Según la siguiente figura 19 se muestra un diagrama de los flujos másicos para el balance de materia de la producción de biodiésel.

Figura 19*Diagrama de corrientes con flujo másico*

Nota: Las convenciones son las siguientes: A: Aceite residual de fritura; B: Etanol; C: Hidróxido de sodio; D: Etanol e hidróxido de sodio; E: Mezcla biodiésel y glicerol; F: Biodiésel; G: Glicerol

3.8. Proyección de escalamiento a nivel industrial

Debido a que los flujos másicos, son considerados del tamaño de una planta piloto o de una planta semindustrial por las dimensiones del equipo y se cumple con los requerimientos que el mercado nacional demanda, la siguiente tabla 12 muestra los flujos másicos según las convenciones de la simbología del balance de materia.

Tabla 12

Flujos másicos en la proyección de obtención de biodiésel

Simbología y convención	Flujo másico (kg/año)
A: Aceite residual de fritura	36580
B: Etanol	3660
C: Hidróxido de sodio	135
D: Solución de etanol e hidróxido de sodio	3795
E: Mezcla de biodiésel y glicerol	40375
F: Biodiésel	32555
G: Glicerol	7820

Nota: Se han utilizado las unidades de gal/año para realizar los cálculos de mejor manera.

3.9 Evaluación técnica - económica para la producción de biodiésel

El Biodiesel B100 se adquirieron $1\,811,0 \times 10^3$ barriles en 2021, con un 46,2% importado y el resto de origen nacional. Además, se compró Etanol como alcohol carburante para mezcla, alcanzando $1\,176,3 \times 10^3$ barriles, de los cuales el 96,7% fue importado y el restante de producción nacional. Es relevante destacar que el 41,4% de las importaciones de Biodiesel B100 provino de España, y también se importó de Indonesia, Estados Unidos y Malasia. En el caso del Etanol, casi el 100% fue importado de Estados Unidos de América (Vera et al., 2021). Se muestra la evolución de compra de biocombustibles para mezcla en plantas y refinerías en la siguiente tabla 13.

Tabla 13*Compra de biocombustible (103 bls)*

Biocombustible	Procedencia	2018	2019	2020	2021
Biodiesel 100	Nacional	541,2	610,0	531,0	974,5
	Importado	1427,4	1142,6	790,9	836,5
Subtotal		1968,6	1752,5	1321,9	1811,0
Etanol	Nacional		80,0		38,6
	Importado	1050,2	1199,5	957,0	1137,8
Subtotal		1050,2	1279,5	957,0	1176,3

Nota: Adaptado del Balance Nacional de Energía (Vera et al., 2021). Con respecto al 2021 la compañía Heaven Petroleum Operators produjo 974500 bls, y con respecto al etanol la compañía Sucroalcolera del Chira produjo 38600 bls.

Con respecto a la matriz del balance nacional. Se muestra la siguiente tabla

14 con el Balance Energético Nacional (Vera et al., 2021).

Tabla 14*Balance energético nacional 2021 (103 bbl)*

Planeamiento energético		Etanol	Biodiésel
Oferta	Importación	11737,8	836,5
	Variación de inventarios	102,2	286,3
	Oferta total	1240,0	1122,8
	Transferencias	(1278,6)	(2097,3)
	Oferta interna bruta	(38,6)	(974,5)
Transformación	Total transformación	(38,6)	(974,5)
	Refinerías	(38,6)	(974,5)

Nota: Adaptado de la matriz y flujo de energía de (Vera et al., 2021).

A pesar del balance energético cuya data pertenece al Ministerio de Energía y Minas, es crucial centrarnos en Lima, por ejemplo, la compañía Reborn pretende producir y entregar 10 mil galones de biodiésel al mes (El Comercio, 2023) con el propósito de abastecer a la capital peruana. Entonces, se va a trabajar con un objetivo de producción de 10000 gal/mes para cual se evaluará los principales criterios de inversión.

3.8.2. Costo de equipos

Se definen las condiciones en torno al reactor, que es el componente central del proceso. Se llevará a cabo un proceso utilizando un reactor como se anuncia en el anexo 1, equipado con un reactor, se emplean equipos adicionales, como un tanque con agitación

y una termocupla, un tanque para la alimentación del aceite usado de fritura con un adecuado filtrador. También se va a contar con una zona de almacenamiento compuesta por dos tanques de depósito y un decantador.

A pesar de que inicialmente se planteó la condición de lavado con agua en el proceso de laboratorio, debido a consideraciones de costos y la realización de pruebas del biocombustible en un equipo menos exigente en términos de calidad de biodiesel según las normas mencionadas en la presente investigación, se ha decidido diseñar la planta sin un sistema de lavado. Para facilitar la selección, la planta se ha subdividido en tres sistemas principales que se muestran en la tabla 15.

3.8.2.1 Sistema de materias primas. Este sistema abarca la manipulación, almacenamiento y filtrado de aceite vegetal residual de fritura, así como la mezcla de catalizador y el alcohol.

3.8.2.2 Sistema de reacción. Involucra la reacción de transesterificación con catalizador básico con etanol. El reactor seleccionado es construido de acero inoxidable AISI 304, de 200 L, con chaqueta de acero al carbono, provisto de resistencia eléctrica y motorreductor 400 RPM, para agitación.

3.8.2.3 Sistema de separación. Consiste en la separación del etanol de la fase que se ha esterificado, así como la decantación del biodiésel y el glicerol. Se utiliza un decantador cilíndrico y tanques de almacenamiento.

Tabla 15**Costos de equipos**

Equipos	Cantidad	Costo Base \$	Indice Base	Indice actual	Costo Actual \$
Tanque de mezclado	1	19,397	576.1	816	27,474.32
Sistema de reacción	1	28,110	576.1	816	39,815.59
Tanques	3	11,701	576.1	816	49,720.62
Decantador	1	14,702	576.1	816	20,824.22
Total					137,834.75

Nota: Costo base obtenido de (Peters, 2023), índice base e índice actual (3) obtenido de (Chemengonline, 2023).

3.8.3 Capital fijo

El capital fijo no varía durante lo planificado, es la adición del costo directo (activo fijo) con el costo indirecto (activo intangible) que se muestra en la tabla 16.

Tabla 16**Capital fijo**

Activo Fijo	% Asumido	Costo \$	% Real
Costo del equipo	30%	137,834.75	33%
Costo de instalación de los equipos	6%	27,566.95	7%
Control e instrumentación	3%	13,783.48	3%
Tuberías y accesorios	3%	13,783.48	3%
Material y equipo eléctrico	2%	9,188.99	2%
Edificios y estructuras	3%	13,783.48	3%
Delimitaciones	2%	9,188.99	2%
Servicios y facilidades	10%	45,944.92	11%
Terreno	2%	9,188.99	2%
Activo Intangible	% Asumido	Costo \$	% Real
Ingeniería y supervisión	5%	22,972	6%
Gastos de construcción	10%	45,945	11%
Utilidad del contratista	4%	18,378	4%
Contingencias	10%	45,945	11%
Total capital fijo	90%	413,504.30	100%

Nota: La relación de porcentajes son obtenidos del (Peters et al., 2003) y en base a la actualización de (Chemengonline, 2023).

3.8.3.1. Depreciación. Constituye un proceso contable que busca reconocer la degradación o pérdida de valor de un activo fijo a lo largo del tiempo. Tiene como propósito representar de manera más precisa el costo real de los activos a medida que se desgastan. Se muestra la tabla 17 con la depreciación.

Tabla 17*Depreciación*

	Costo \$	Vida Útil	Depreciación	Valor de rescate \$	
				5 años	10 años
Activo fijo	271,075.04	20	13,553.76	203,306.24	135,537.44

Nota: No se considera al terreno dentro del activo fijo, ya que no se deprecia con el tiempo.

3.8.3.2 Amortización. Se define como el proceso sistemático de eliminar del registro contable el costo de un Activo Fijo Intangible, debido a su disminución de valor a medida que la utilidad aportada se reduce o que la pérdida se debe al transcurso del tiempo. En el contexto de la valoración de activos fijos amortizables, estos suelen registrarse inicialmente a su costo total, que incluye todas las erogaciones realizadas para obtener los beneficios asociados mostrados en la tabla 18.

Tabla 18*Amortización*

	Costo \$	Amortización \$	
		5 años	10 años
Activo intangible	133,240.27	26,648.06	13,324.03

3.8.4 Costo de materia prima

Esencialmente se dan debido al etanol al 96% y al hidróxido de sodio, ya que el aceite residual de fritura se obtiene a través de reciclaje, además, en el presente estudio se llegó a un acuerdo con los proveedores de dicho aceite. Se muestra en la tabla 19.

Tabla 19*Costo de materia prima*

Costo de materia prima	\$/kg	kg/año	\$/año
Etanol al 96%(C ₂ H ₆ O)	1.11	3,660	4,062.60
Hidróxido de sodio (NaOH)	9.00	135.000	1,215.00
Total costo de materia prima			5,277.60

En la tabla 20 se muestra las ventas de biodiésel calculando el precio en el mercado de 11.50 \$/kg y por el flujo másico que exige el mercado nacional, además, se calcula las ventas ganadas por la glicerina para aprovechar el subproducto (Vera et al., 2021).

Tabla 20*Ventas de biodiésel*

Ventas	\$/kg	kg/año	\$/año
Biodiésel	11.50	32,555	374,382.50
Glicerina	1.25	7,820	9,775.00
Total			384,157.50

Nota: A pesar de que nuestro producto objetivo es el biodiésel, el subproducto llamado glicerina se vende al mercado para obtener ganancias.

3.8.5 Costo de producción

El costo de materias primas y materiales está asociado al volumen utilizado en el proceso productivo, excluyendo las adquisiciones destinadas a inventarios, las cuales se consideran parte del capital de trabajo. Es la suma del costo primario y los gastos de fabricación. En la tabla 21 se muestra el costo de producción.

Tabla 21*Costos de producción*

Costos directos	% Asumido	Costo \$	% Real
Materia prima	10%	5,277.60	4%
Mano de obra directa	20%	10,555.20	9%
Supervisión directa	25%	2,638.80	2%
Utilidades	20%	10,555.20	9%
Mantenimiento y reparaciones	10%	41,350.43	34%
Servicios	20%	8,270.09	7%
Laboratorio	18%	1,899.94	2%
Patentes	0%	0.00	0%
Cargos Fijos	% Asumido	Costo \$	% Real
Depreciación	4%	16,172.62	13%
Impuestos	3%	12,405.13	10%
Seguros	0.5%	2,067.53	2%
Costos de superintendencia	% Asumido	Costo \$	% Real
	2%	1,055.52	1%
Total costos de producción		112,248.06	93%

Nota: Los porcentajes son relacionadas obtenidas del (Peters et al., 2003).

El capital de trabajo o capital circulante experimenta variaciones en su valor durante la fase operativa del proyecto, es la adición del activo corriente o circulante con el pasivo corriente o circulante que se muestra en la tabla 22.

Tabla 22*Capital de trabajo*

Gastos administrativos	% Asumido	Costo \$	% Real
	7%	3,818.12	3%
Gastos de ventas y distribución	% Asumido	Costo \$	% Real
	3%	1,583.28	1%
Investigación y desarrollo	% Asumido	Costo \$	% Real
	2%	1,055.52	1%
Gastos financieros	% Asumido	Costo \$	% Real
	5%	2,638.80	2%
Total costos generales		9,095.72	7%
Total costos de producto		121,343.78	
Capital de trabajo	10%	12,134.38	

Nota: Los porcentajes son relacionadas obtenidas del (Peters et al., 2003).

3.8.6 Financiamiento

Financiar implica proporcionar dinero y crédito a una entidad, ya sea una empresa u organización, siendo esencial para llevar a cabo proyectos y actividades, incluido el desarrollo de negocios. Este proceso abarca la gestión de tesorería, la administración de cobros y pagos, el flujo de dinero y las relaciones con entidades bancarias, junto con las provisiones de fondos.

Las principales formas de obtener financiamiento son préstamos o créditos. Internamente, la financiación se obtiene a través de recursos generados por la propia entidad, como beneficios reinvertidos, reservas y amortizaciones.

El financiamiento externo proviene de inversores sin vínculos directos con la entidad, como financiamiento bancario, emisión de obligaciones y ampliaciones de capital. Se clasifica en financiamientos a un plazo inmediato tales los créditos con el banco, y a largo plazo, que incluyen hipotecas, emisión de acciones, bonos y acuerdos de arrendamiento. Estas modalidades son esenciales para respaldar el desarrollo y la continuidad de las operaciones. Se muestra la tabla 23 con un financiamiento a 5 años y la tabla 24 con un financiamiento a 10 años que van a servir en la evaluación de los criterios de inversión financiero.

Tabla 23*Financiamiento a 5 años*

Año	0	1	2	3	4	5
Deuda	212,820.00	184,777.70	150,846.52	109,789.80	60,111.15	0.00
Amortización		-28,042.30	-33,931.18	-41,056.73	-49,678.64	-60,111.15
Interes		-44,692.20	-38,803.32	-31,677.77	-23,055.86	-12,623.34
Pago		-72,734.50	-72,734.50	-72,734.50	-72,734.50	-72,734.50

Nota: La tasa de inversión es 21.00 % y la inversión es 50.00%.

Tabla 24*Financiamiento a 10 años*

Año	Deuda	Amortización	Interes	Pago
0	212,820.00			
1	205,016.91	-7803.090423	-44692.2	-52495.29042
2	195,575.17	-9441.739411	-43053.55101	-52495.29042
3	184150.6655	-11424.50469	-41070.78573	-52495.29042
4	170327.0148	-13823.65067	-38671.63975	-52495.29042
5	15360039.75%	-16726.61731	-35768.67311	-52495.29042
6	133361.1905	-20239.20695	-3225608.35%	-5249529.04%
7	108871.7501	-2448944.04%	-28005.85001	-52495.29042
8	79239.52724	-29632.22289	-22863.06753	-52495.29042
9	43384.53754	-35854.9897	-16640.30072	-52495.29042
10	0	-43384.53754	-9110.752883	-52495.29042

Nota: La tasa de inversión es 21.00 % y la inversión es 50.00%.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Masa de biodiésel

De acuerdo con la tabla 25, se tiene las masas de biodiésel obtenidas en base a los tratamientos:

Tratamiento 1 (T1), tratamiento 2 (T2), tratamiento 3 (T3) y tratamiento 4 (T4) realizado por triplicado teniendo 12 corridas experimentales, trabajando a diferentes temperaturas de 60 °C y 70 °C y concentración de NaOH 0.1% y 1%. La figura 20 muestra la temperatura y velocidad de agitación registradas a continuación.

Figura 20

Temperatura y velocidad de agitación registradas



Nota: La temperatura es una variable dependiente mientras que la velocidad de agitación es constante.

Tabla 25*Resultados de tratamiento de datos*

Tratamientos	Réplicas	Temperatura (°C)	Concentración de NaOH (%)	Masa de biodiésel (g)
T1	1	60	0.1	58.2
T1	2	60	0.1	57.1
T1	3	60	0.1	57.6
T2	1	60	1	92.2
T2	2	60	1	90.4
T2	3	60	1	91.3
T3	1	70	0.1	47.9
T3	2	70	0.1	49.8
T3	3	70	0.1	50.3
T4	1	70	1	75.2
T4	2	70	1	77.8
T4	3	70	1	78.3

Nota: La masa de biodiésel es un indicador del rendimiento de nuestro proceso debido a que se alimentó un 105 g de aceite residual de fritura. Donde T significa tratamiento.

4.2 Densidad del biodiésel

La determinación de la densidad se llevó a temperatura ambiente mediante el uso de un picnómetro a 23°C como se aprecia en la figura 21; además, de los resultados de la tabla 26.

Figura 21*Determinación de la densidad*

Tabla 26*Densidades del biodiésel producido*

Muestras	Tratamientos	Réplicas	Densidad (g/mL)
1	T1	1	0.885
2	T1	2	0.873
3	T1	3	0.880
4	T2	1	0.892
5	T2	2	0.890
6	T2	3	0.889
7	T3	1	0.865
8	T3	2	0.843
9	T3	3	0.835
10	T4	1	0.842
11	T4	2	0.840
12	T4	3	0.841

4.3 Índice de acidez del biodiésel

En la tabla 27 se muestra el índice de acidez de biodiésel producido de las 12 muestras analizadas.

Tabla 27*Índice de acidez del biodiésel producido*

Muestras	Tratamientos	Réplicas	Índice de acidez (mg NaOH/g)
1	T1	1	0.498
2	T1	2	0.505
3	T1	3	0.499
4	T2	1	0.414
5	T2	2	0.415
6	T2	3	0.410
7	T3	1	0.624
8	T3	2	0.525
9	T3	3	0.615
10	T4	1	0.620
11	T4	2	0.618
12	T4	3	0.598

Como se indican los resultados de índice de acidez en mg de NaOH/g de biodiésel obtenido, es según los tratamientos T1, T2, T3 y T4 cada uno determinado por triplicado se encuentra en un rango de 0.410 y 0.624. Lo que indica que el índice de acidez es bajo, a pesar de realizarse tres lavados consecutivos con agua caliente.

4.4 Análisis fisicoquímico

4.4.1 Índice de acidez

En la fase inicial, se registró un valor ácido promedio de 1,50 mg NaOH/g para el aceite residual de fritura, según se determinó en la valoración previa. Tras haber pasado por el proceso de transesterificación y el subsiguiente lavado, que constituye una etapa de purificación, se observa una disminución en el valor ácido de cada muestra del producto resultante. Según las normas ASTM D 6751 y EN 14214, que establece un máximo de 0,50 mgKOH/g. La considerable inquietud respecto al índice de acidez presente en el biodiésel radica en la posibilidad de que los ácidos grasos puedan inducir corrosión y generar depósitos en los inyectores de combustible al catalizar la polimerización en los recorridos de combustible reciclado en caliente.

4.4.2 Densidad

La densidad representa uno de los parámetros cruciales que requiere una evaluación exhaustiva, ya que es significativo en la determinación de la calidad del combustible. La disparidad en las densidades observadas entre las muestras podría atribuirse a la presencia residual de impurezas y contaminantes en el biodiésel, fenómeno más pronunciado en las muestras. La densidad del biodiésel se mantuvo dentro del rango especificado como estándar, según ASTM D6751 y EN 14214, que oscila entre 0,82 y 0,90 g/cm³. Es importante destacar que el biodiésel con densidad elevada impacta significativamente en el rendimiento de componentes como bombas de combustible, filtros de combustible, entre otras.

4.4 Análisis estadístico

Se muestra la tabla 28 con el análisis estadístico de los distintos tratamientos realizados a las 12 muestras. Se muestra que después del tratamiento a diferentes temperaturas de 60 °C y 70 °C y concentración de NaOH 0.1% y 1%, se llegó a una máxima masa en promedio de biodiesel de 91.3 g con el tratamiento T2 y una mínima masa en

promedio de biodiesel de 49.3 g con el tratamiento T3. Y en la figura 22 se muestra la gráfica de caja de masa de biodiésel expresado en gramos.

Tabla 28

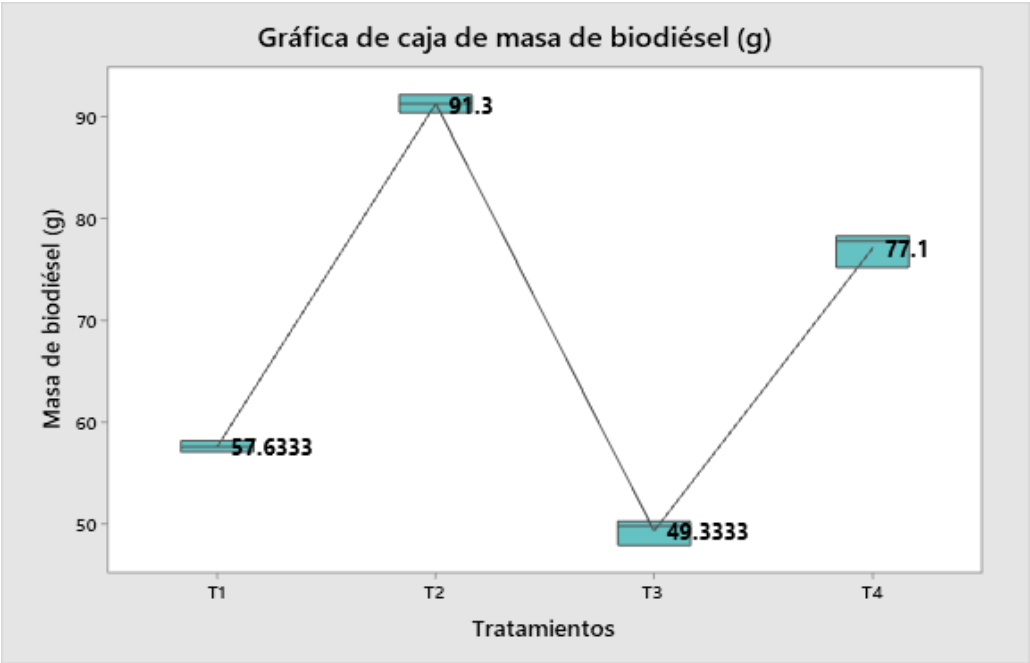
Análisis estadístico de los tratamientos

Tratamientos	N	Media	Error estándar del promedio	Desviación Estándar	Varianza	Coefficiente Variación	Mínimo	Mediana	Máximo
T1	3	57.633	0.318	0.551	0.303	0.96	57.10	57.60	58.20
T2	3	91.300	0.520	0.900	0.810	0.99	90.40	91.30	92.20
T3	3	49.333	0.731	1.266	1.603	2.57	47.90	49.80	50.30
T4	3	77.100	0.961	1.664	2.770	2.16	75.20	77.80	78.30

Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 21.

Figura 22

Gráfica de caja de masa de biodiésel (g)



Nota: Obtenido del Minitab Statistical Software 21. La gráfica de caja analiza y contrasta la forma, la medida de tendencia central y la dispersión de las distribuciones de las muestras, así como para identificar posibles valores atípicos (Minitab, 2023).

4.4.1 Prueba de hipótesis

4.4.1.1 Normalidad de residuales. Para realizar una prueba estadística paramétrica, es esencial evaluar residuos y su normalidad mediante Anderson-Darling (AD), que se basa en las siguientes hipótesis estadísticas:

H_0 : Residuos presentan una distribución normal.

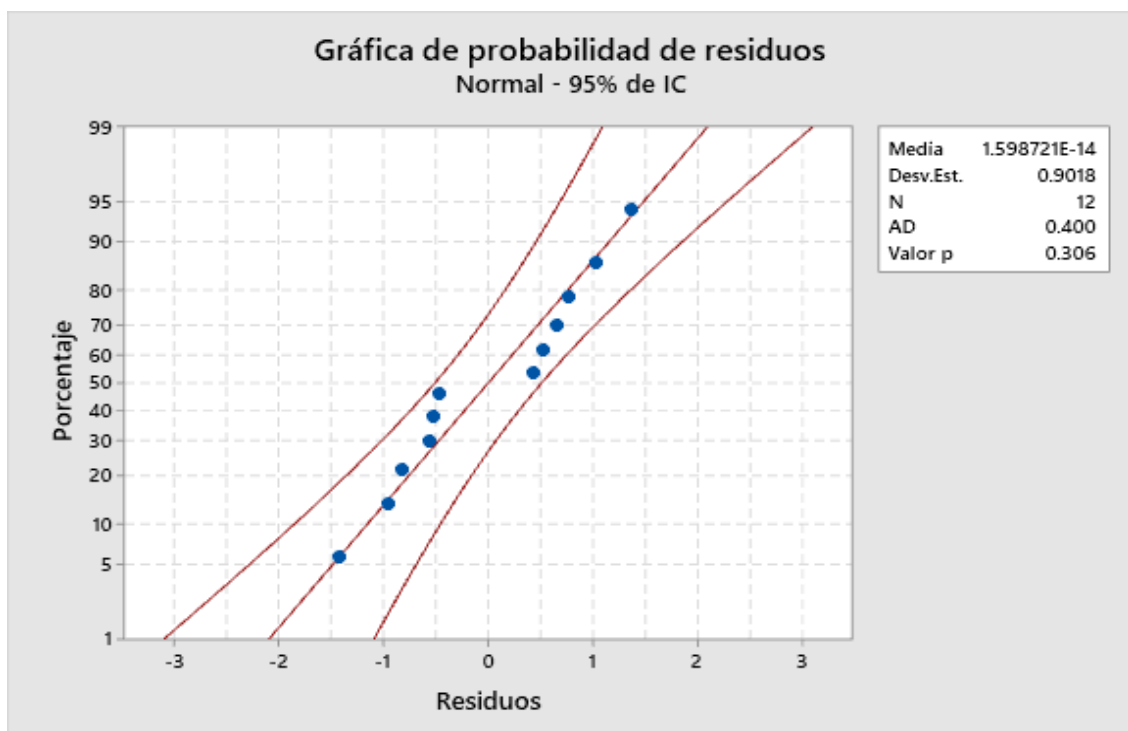
H_1 : Residuos no presentan una distribución normal.

Nivel de significancia (α) = 0.05

Se establece un nivel de significancia (α) de 0.05. Si $p < \alpha$, se rechaza H_0 , de lo contrario no se rechaza H_0 . Se muestra a continuación la figura 23, que dentro del 95% de confianza, se tiene un coeficiente de correlación (AD) de 0.400. El valor p es 0.306 ($p > 0.05$). Por lo tanto, se concluye que los datos siguen una distribución normal (Minitab, 2023).

Figura 23

Probabilidad de residuos contra los valores ajustados



Nota: Esta gráfica es obtenida de (Minitab, 2023).

4.4.4.2 Prueba de hipótesis estadística. Como los datos son normales utilizamos una prueba estadística paramétrica, se utiliza un análisis de varianza (ANOVA).

La hipótesis nula postula que todas las medias de la población son idénticas, mientras que la hipótesis alternativa plantea que al menos una de ellas difiere (Minitab, 2023). Al 95% de confianza, se presenta el análisis de varianza en la tabla 29, dando un valor de p de la temperatura y concentración de NaOH menor que 0.05, por lo cual se rechaza la hipótesis nula, lo que indica su influencia sustancial en la masa de biodiésel.

- $H_0: \tau_1=\tau_2=\tau_3=\tau_4$, las masas de biodiésel promedio en total son iguales.
- $H_1: \tau \neq 0$, la masa de biodiésel tiene una media diferente por lo menos
- $\alpha= 0.05$ (nivel de significancia)
- Si $p < \alpha$, se rechaza H_0 ; Si $p > \alpha$, no se rechaza H_0

Tabla 29

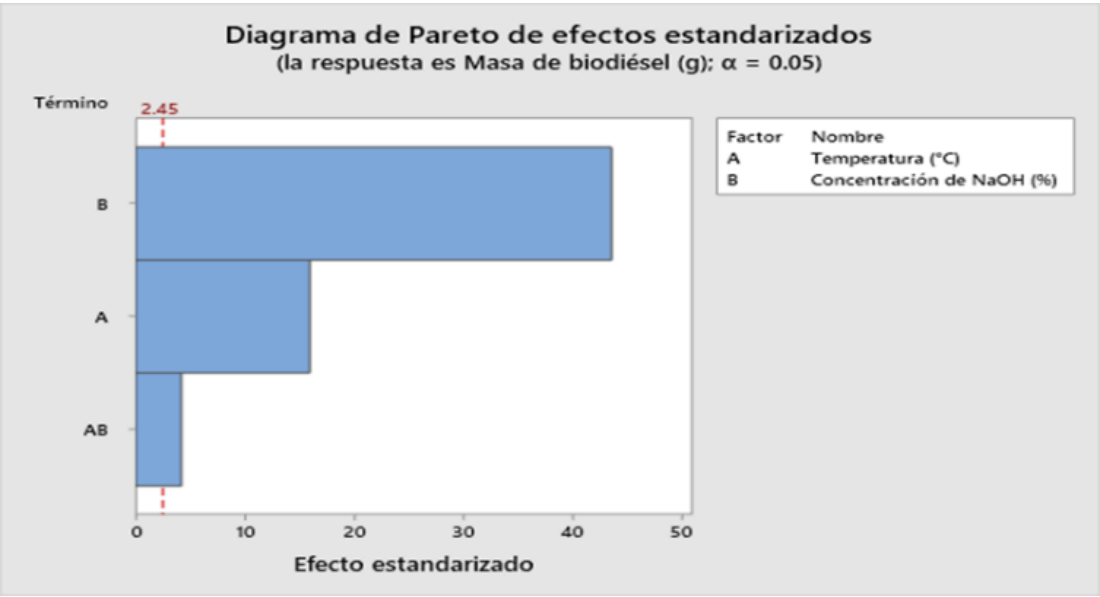
Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajuste	MC Ajuste	Valor F	Valor p
Modelo	5	3238.36	647.67	434.36	0.000
Bloques	2	2.03	1.01	0.68	0.542
Lineal	2	3210.23	1605.11	1076.46	0.000
Temperatura (°C)	1	379.69	379.69	254.63	0.000
Concentración de NaOH (%)	1	2830.54	2830.54	1898.28	0.000
Interacciones de 2 términos	1	26.11	26.11	17.51	0.006
Temperatura (°C) Concentración de NaOH (%)	1	26.11	26.11	17.51	0.006
Error	6	8.95	1.49		
Total	11	3247.31			

Nota: ANOVA obtenido del Minitab Statistical Software 21.

Se visualiza en la figura 24 que la concentración de NaOH (B) tiene un mayor efecto que la temperatura (A) pero en general influyen de manera positiva en la masa de biodiésel.

Figura 24
Diagrama de Pareto



Nota: Se emplea este gráfico para identificar los defectos más frecuentes, las causas predominantes de las variables que afectan el proceso. Obtenido de (Minitab, 2023).

4.4.4.3 Resultados de software estadístico. Se aprecia en la tabla 30 que el R^2 (*ajustado*) alcanza el 99,49%, un valor considerado adecuado para el modelo. Esto indica que los factores de temperatura y concentración de NaOH, es decir ambos en conjunto, ejercen una influencia significativa en la masa de biodiésel.

Tabla 30

Resultados de software estadístico

S	R ²	R ² (ajustado)	R ² (predictivo)
1.22	99.72%	99.49%	98.90%

Nota: Obtenido del software estadístico Minitab 21. Donde: *S*: Desviación estándar R^2 : Porcentaje de variación del modelo, y R^2 (*ajustado*): Comparador de modelos de diferentes predictores

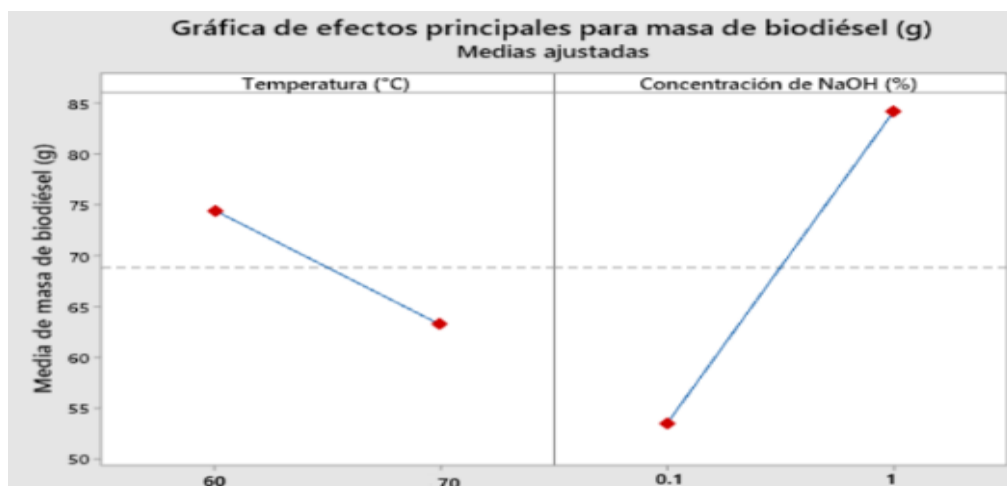
4.4.4.5 Modelo de regresión multivariable. En base a los factores de temperatura y concentración y los niveles analizados (12), se determina un modelo matemático de regresión multivariable en la ecuación 3, la cual nos da la masa de biodiésel que como se mencionó es nuestra variable de salida de interés ya que se relaciona al rendimiento de producción de biodiésel. La representación de temperatura_x, donde “x” puede ser 60 o 70°C; concentración de NaOH_y, donde “y” puede ser 0.1 a 1%; además, la temperatura(°C)*concentración de NaOH_z, donde "z" puede ser 60_0.1 que indica 60°C y 0.1% de concentración de NaOH, 60_1 que indica 60°C y 1% de concentración de NaOH, 70_0.1 que indica 70°C y 0.1% de concentración de NaOH, 70_1 que indica 70°C y 1% de concentración de NaOH.

$$\begin{aligned}
 \text{Masa de biodiésel (g)} = & 68.842 + 5.625 \text{ Temperatura (°C)}_{60} - 5.625 \text{ Temperatura (°C)}_{70} \\
 & - 15.358 \text{ Concentración de NaOH (\%)}_{0.1} + 15.358 \text{ Concentración de NaOH (\%)}_1 \\
 & - 1.475 \text{ Temperatura (°C)*Concentración de NaOH (\%)}_{60_0.1} \\
 & + 1.475 \text{ Temperatura (°C)*Concentración de NaOH (\%)}_{60_1} \\
 & + 1.475 \text{ Temperatura (°C)*Concentración de NaOH (\%)}_{70_0.1} \\
 & - 1.475 \text{ Temperatura (°C)*Concentración de NaOH (\%)}_{70_1}
 \end{aligned} \quad (3)$$

4.4.4.6 Gráficas de efectos principales. En la figura 25, a 60 °C y a 1% de hidróxido de sodio, donde se logra obtener una mayor masa de biodiésel.

Figura 25

Masa de biodiésel media vs temperatura y concentración

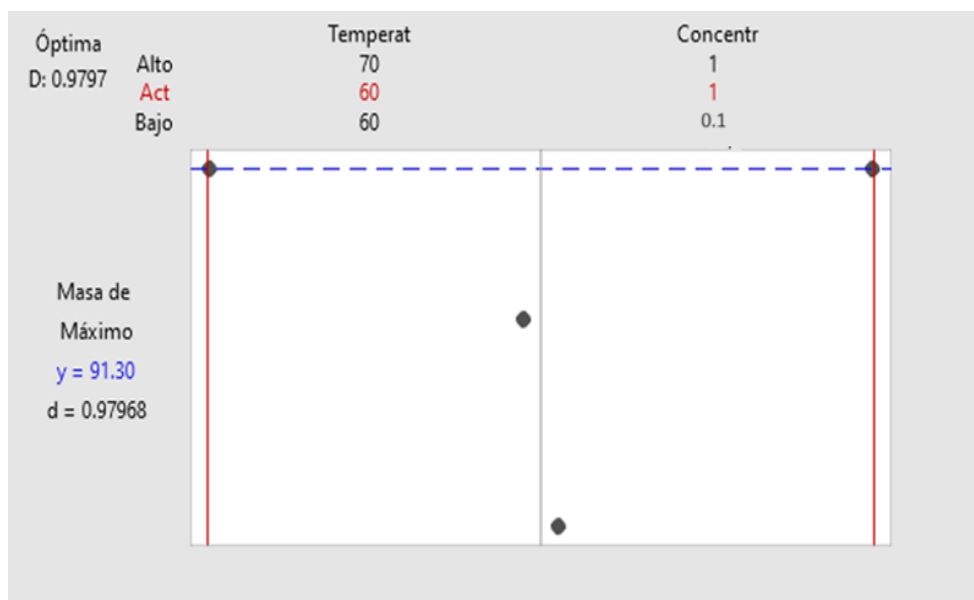


Nota: Obtenido del Minitab Statistical Software 21 (Minitab, 2023).

Se trabaja a 60 °C y a 1% de NaOH se logra obtener 91.30 g de biodiésel, cuyo valor es óptimo a las condiciones trabajadas, como en la figura 26.

Figura 26

Optimización de respuesta para hallar la mayor masa de biodiésel



Nota: Obtenido del Minitab Statistical Software 21.

4.5 Evaluación de inversiones

Se establecen teniendo en cuenta una inversión será considerada rentable cuando genere ingresos superiores a sus costos y exceda los rendimientos de las operaciones actuales. Los principales criterios de evaluación de inversiones son los siguientes:

4.5.1 Evaluación del VAN económico

Se enfoca en la sustentabilidad económica del proyecto, analizando los beneficios y costos en un contexto general, sin tener en cuenta las fuentes particulares de financiamiento. En la tabla 31 se analiza la evaluación del VAN económico y TIR a 5 años considerando los cálculos previamente desarrollados; mientras que el período de 10 años se subdivide en la tabla 32 donde se muestra la evaluación de 0 a 5 años, y en la tabla 33 de 6 a 10 años, donde se da los valores del VAN económico y TIR evaluado a 10 años.

Tabla 31*Evaluación del VAN económico y TIR a 5 años*

Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos		384,157.50	384,157.50	384,157.50	384,157.50	384,157.50
Egresos		80,143.30	80,143.30	80,143.30	80,143.30	80,143.30
Costos de producción		71,047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58
Gastos generales		9,095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72
Depreciación		40,201.82	40,201.82	40,201.82	40,201.82	40,201.82
Interes						
UN (utilidad neta)		184,668.67	184,668.67	184,668.67	184,668.67	184,668.67
Depreciación		40,201.82	40,201.82	40,201.82	40,201.82	40,201.82
Inversión (Inv)	425,638.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Amortización						
Valor de recupero						224,629.61
Flujo de caja operativo (Net profit)	-425,638.68	224,870.49	224,870.49	224,870.49	224,870.49	449,500.10
Valor actual	-425,638.68	195,539.56	170,034.40	147,856.00	128,570.43	223,480.99
VAN	439,842.70					
TIR	49.20%					

Nota: La tasa de impuesto es 30% y la tasa de descuento es 15%.

Tabla 32*Evaluación del VAN económico y TIR a 10 años del año 0 al 5*

Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos		384,157.50	384,157.50	384,157.50	384,157.50	384,157.50
Egresos		80,143.30	80,143.30	80,143.30	80,143.30	80,143.30
Costos de producción		71,047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58
Gastos generales		9,095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72
Depreciación		26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79
Interes						
UN (utilidad neta)		193,995.49	193,995.49	193,995.49	193,995.49	193,995.49
Depreciación		26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79
Inversión (Inv)	425,638.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Amortización						
Valor de recupero						
Flujo de caja operativo (Net profit)	-425,638.68	220,873.28	220,873.28	220,873.28	220,873.28	220,873.28

Nota: La tasa de impuesto es 30% y la tasa de descuento es 15%.

Tabla 33*Evaluación del VAN económico y TIR a 10 años del año 6 al 10*

Año	6	7	8	9	10
Ingresos	384157.5	384,157.50	384,157.50	384,157.50	384,157.50
Egresos	80143.3	80,143.30	80,143.30	80,143.30	80,143.30
Costos de producción	71047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58
Gastos generales	9095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72
Depreciación	26877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79
Interes					
UN (utilidad neta)	193995.49	193,995.49	193,995.49	193,995.49	193,995.49
Depreciación	26877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79
Inversión (Inv)	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Amortización					
Valor de recupero					156,860.81
Flujo de caja operativo (Net profit)	220873.28	220,873.28	220,873.28	220,873.28	377,734.09
Valor actual	95489.61414	83,034.45	72,203.87	62,785.97	93,370.09
VAN	721,646.80				
TIR	51.37%				

Nota: La tasa de impuesto es 30% y la tasa de descuento es 15%.

4.5.2 Evaluación del VAN financiero

Se focaliza en analizar de qué manera la configuración financiera, abarcando los costos de capital con préstamos, incidiendo en la rentabilidad del proyecto. Examina la disponibilidad de fondos y la estrategia para financiar la inversión.

En la tabla 34 se analiza la evaluación del VAN financiero y TIR realizada a 5 años considerado los cálculos previamente realizados.

Mientras que el período de 10 años se subdivide en la tabla 35 donde se muestra la evaluación de 0 a 5 años, y en la tabla 36 de 6 a 10 años, donde se da los valores del VAN financiero y TIR evaluado a 10 años.

Tabla 34*Evaluación del VAN financiero y TIR a 5 años*

Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos		384,157.50	384,157.50	384,157.50	384,157.50	384,157.50
Egresos		80,143.30	80,143.30	80,143.30	80,143.30	80,143.30
Costos de producción		71,047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58
Gastos generales		9,095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72
Depreciación		40,201.82	40,201.82	40,201.82	40,201.82	40,201.82
Interes		44,692.20	38,803.32	31,677.77	23,055.86	12,623.34
UN (utilidad neta)		153,384.13	157,506.35	162,494.23	168,529.57	175,832.33
Depreciación		40,201.82	40,201.82	40,201.82	40,201.82	40,201.82
Inversión (Inv)	212,818.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Amortización		28,042.30	33,931.18	41,056.73	49,678.64	60,111.15
Valor de recupero						224,629.61
Flujo de caja operativo (Net profit)	-212,818.68	165,543.65	163,776.99	161,639.32	159,052.75	380,552.61
Valor actual	-212,818.68	143,951.00	123,838.93	106,280.48	90,938.93	189,201.90
VAN	441,392.56					
TIR	77.09%					

Nota: La tasa de impuesto es 30% y la tasa de descuento es 15%.

Tabla 35*Evaluación del VAN financiero y TIR a 10 años del año 0 al 5*

Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos		384,157.50	384,157.50	384,157.50	384,157.50	384,157.50
Egresos		80,143.30	80,143.30	80,143.30	80,143.30	80,143.30
Costos de producción		71,047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58
Gastos generales		9,095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72
Depreciación		26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79
Interes		44,692.20	43,053.55	41,070.79	38,671.64	35,768.67
UN (utilidad neta)		162,710.95	163,858.01	165,245.94	166,925.34	168,957.42
Depreciación		26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79
Inversión (Inv)	212,818.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Amortización		7,803.09	9,441.74	11,424.50	13,823.65	16,726.62
Valor de recupero						
Flujo de caja operativo (Net profit)	-212,818.68	181,785.65	181,294.06	180,699.23	179,979.48	179,108.59
Valor actual	-212,818.68	158,074.48	137,084.36	118,812.67	102,903.85	89,048.63

Nota: La tasa de impuesto es 30% y la tasa de descuento es 15%.

Tabla 36*Evaluación del VAN financiero y TIR a 10 años del año 6 al 10*

Año	6	7	8	9	10
Ingresos	384157.5	384,157.50	384,157.50	384,157.50	384,157.50
Egresos	80143.3	80,143.30	80,143.30	80,143.30	80,143.30
Costos de producción	71047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58	71,047.58
Gastos generales	9095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72	9,095.72
Depreciación	26877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79
Interes	32256.0835	28,005.85	22,863.07	16,640.30	9,110.75
UN (utilidad neta)	171416.23	174,391.40	177,991.34	182,347.28	187,617.96
Depreciación	26877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79	26,877.79
Inversión (Inv)	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Amortización	20239.2069	24,489.44	29,632.22	35,854.99	43,384.54
Valor de recupero					156,860.81
Flujo de caja operativo (Net profit)	178054.813	176,779.75	175,236.91	173,370.08	327,972.02
Valor actual	76978.00927	66,458.06	57,285.26	49,282.60	81,069.67
VAN	724,178.89				
TIR	85.03%				

Nota: La tasa de impuesto es 30% y la tasa de descuento es 15%.

Conclusiones

- Es factible obtener biodiésel de etanol a partir de aceites vegetales residuales de fritura mediante ataque con soda cáustica.
- El índice de acidez del aceite vegetal residual de fritura utilizado en el proceso de obtención de biodiésel fue 0.61%.
- En la comparación de las normas internacionales y técnicas peruanas, se obtuvo biodiésel a partir de aceites vegetales residuales de fritura en el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ingeniería Química y Textil dentro de los parámetros de índice de acidez y densidad.
- Las condiciones óptimas en la obtención de biodiésel obtenido a nivel laboratorio fue del 89% a 60 °C y 1% de concentración de NaOH, la relación molar etanol y aceite vegetal residual de fritura es 10:1 en 90 minutos reacción con una velocidad de agitación de 400 RPM.
- La proyección de escalamiento de una planta PYME demuestra ser económicamente rentable, con un VAN en la evaluación económica y financiera a 5 años es de 439,842.70 y 441,392.56, respectivamente. Asimismo, a 10 años, el VAN alcanza los valores de 721,646.80 y 724,178.89, respectivamente, mientras la tasa interna de retorno (TIR) se sitúa en un 49.20% y 77.09% en la evaluación a 5 años, y en un 51.37% y 85.03% en la evaluación a 10 años, confirmando la viabilidad financiera del proyecto.

Recomendaciones

- Se debe analizar el aceite vegetal residual de fritura con énfasis en el índice de acidez ya que optimiza la cantidad de catalizador necesario en la transesterificación.
- En la transesterificación, se debe aislar el sistema (balón de tres bocas) con papel aluminio, así como en la pera de decantación para evitar posibles reacciones no deseadas.
- El tiempo mínimo de reposo después de finalizada la transesterificación es de aproximadamente 24 horas, ya que tiempos inferiores muestran un menor rendimiento en la reacción. La planta tiene la capacidad de producir biodiésel en el tanque reactor a una tasa de 127 litros por hora, con un rendimiento del 85%.
- Se utiliza el 70% de la capacidad del reactor para tener una mejor eficiencia del equipo, ya que no solamente se inyecta el flujo másico del aceite residual de fritura y la solución de catalizador y alcohol.
- La planta tiene la capacidad de producir biodiésel en el tanque reactor a una tasa de 127 litros por hora, con un rendimiento del 85%. Esto resulta en una producción efectiva de biodiésel de 107.5 litros por hora.

Referencias Bibliográficas

- Alenezi, R., Santos, R. C. D., Raymahasay, S., & Leeke, G. A. (2013). Improved biodiesel manufacture at low temperature and short reaction time. *Renewable Energy*, 53, 242–248. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2012.11.019>
- Axioma Group S. A. (2019). *Friol*. <https://www.revistalabarra.com/es/noticias/friol-mezclade-aceites-vegetales-para-freir>
- Babbie, E. R. (2014). *The basics of social research*. Wadsworth Pub.
- Banerjee, A., & Chakraborty, R. (2009). Parametric sensitivity in transesterification of waste cooking oil for biodiesel production—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(9), 490–497. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2009.04.003>
- Borges, M. E., & Díaz, L. (2012). Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2839–2849. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.01.071>
- Bulla, E. (2014). *Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura*. Universidad Nacional de Colombia.
- Canakci, M., & Gerpen, J. Van. (s/f). *A Pilot Plant to Produce Biodiesel from High Free Fatty Acid Feedstocks*.
- Chattopadhyay, S., Karemore, A., Das, S., Deysarkar, A., & Sen, R. (2011). Biocatalytic production of biodiesel from cottonseed oil: Standardization of process parameters and comparison of fuel characteristics. *Applied Energy*, 88(4), 1251–1256. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.007>
- Chemengonline. (2023, noviembre). Chemical Engineering. *Essentials for the CPI professional*. www.chemengonline.com
- Congreso de la República. (2015). *Ley N° 30309*.

- Cvengroš, J., & Cvengrošová, Z. (2004). Used frying oils and fats and their utilization in the production of methyl esters of higher fatty acids. *Biomass & Bioenergy*, 27(2), 173–181. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2003.11.006>
- El Comercio. (2023, mayo 1). *Reborn*. <https://elcomercio.pe/economia/dia-1/aceite-biodiesel-con-aceite-de-cocina-reborn-busca-masificar-este-combustible-ecologico-combustibles-noticia/>.
- Ferrari, B., & Calzada, J. (2023, diciembre 1). *Datos de Oil World*. Bolsa de Comercio de Rosario.
- Flor Césare, M., Castillo, L., Beteta, V., Luis Calle, J., & José León, J. (s/f). Evaluación de la Purificación de Biodiésel en la Etapa Final de Producción. *Rev Soc Quím Perú*, 76(1), 2010.
- Font, E., Torres, C., & Valero, A. (2015). Thermoeconomic analysis of biodiesel production from used cooking oils. *Sustainability (Switzerland)*, 7(5), 6321–6335. <https://doi.org/10.3390/su7056321>
- Google Maps. (2023). *Google Maps*. <https://www.google.com/maps>
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (Tercera). McGrawHill. <https://www.facebook.com/pages/Interfase->
- Hernández, R., Fernández, C., & Del Pilar, M. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta). McGraw-Hill.
- Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2019). *Manual de producción de biodiésel a partir del aceite de pinón blanco*. www.inia.gob.pe
- Kombe, G. G., Temu, A. K., Rajabu, H. M., & Mrema, G. D. (2011). *High Free Fatty Acid (FFA) Feedstock Pre-Treatment Method for Biodiesel Production*. 176.
- Ma, F., & Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, 70(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5)

- Mandari, V., & Devarai, S. K. (2022). Biodiesel Production Using Homogeneous, Heterogeneous, and Enzyme Catalysts via Transesterification and Esterification Reactions: a Critical Review. En *Bioenergy Research* (Vol. 15, Número 2, pp. 935–961). Springer. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10333-w>
- María, A., Ospina, C., Velásquez, J. A., & Cuartas, P. A. (2011). *Obtención de biodiesel a partir de aceite de jatropha curcas I por transesterificación etanolica* (Vol. 5, Número 1). <http://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas/article/view/801>
- Meng, X., Chen, G., & Wang, Y. (2008). Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test. *Fuel Processing Technology*, 9(89), 851–857. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2008.02.006>
- Ministerio de Energía y Minas. (2022a). *Resolución Directorial N°231-2022-MINEM/DGH*. <http://pad.minem.gob.pe/BuscaTuDocumento>,
- Ministerio de Energía y Minas. (2022b). *Resolución Ministerial - N° 095-2022*. <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/2047513-1>
- Ministerio del Ambiente. (2022). *Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. www.minam.gob.pe
- Minitab. (2023). *Soporte de Minitab 21*. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>
- Palma, N., & Sosa, R. (2019). *Influencia de la transesterificación en la obtención del biodiésel elaborado a partir de aceite residual*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Peters, M. (2023). *Chemical Data*. <https://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/ce.html>.
- Peters, M., Timmerhaus, K., & West, R. (2003). *Plant Desing and Economics for Chemical Engineers* (Fifth). McGraw-Hill.

- Ranganathan, S. V., Narasimhan, S. L., & Muthukumar, K. (2008). An overview of enzymatic production of biodiesel. *Bioresource Technology*, 99(10), 3975–3981. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2007.04.060>
- Santana, V. (2019). *Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado en frituras de alimentos utilizando diferentes concentraciones de lejía* [Ingeniería Agroindustrial, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. <https://drive.google.com/file/d/1OoUJxLAFm-bBCnlh9EqWHNMkApuRBCuh/view>
- Santiago, M. (2008). *Preparación a escala planta piloto y estudio comparativo de los biodiesel obtenidos a partir de metanol y etanol* [Escuela profesional de Ingeniería Química]. Universidad Nacional del Callao.
- Stamenković, O. S., Veličković, A. V., & Veljković, V. B. (2011). The production of biodiesel from vegetable oils by ethanolysis: Current state and perspectives. En *Fuel* (Vol. 90, Número 11, pp. 3141–3155). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.06.049>
- Suzihaque, M. U. H., Syazwina, N., Alwi, H., Ibrahim, U. K., Abdullah, S., & Haron, N. (2022). A sustainability study of the processing of kitchen waste as a potential source of biofuel: Biodiesel production from waste cooking oil (WCO). *Materials Today: Proceedings*, 63, S484–S489. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.526>
- Talebian-Kiakalaieh, A., Amin, N. A. S., & Mazaheri, H. (2013). A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil. En *Applied Energy* (Vol. 104, pp. 683–710). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.061>
- Vera, O., Luyo, J., & Meza, J. (2021). *Balance Nacional de Energía 2021*. www.minem.gob.pe
- Vilas Bôas, R. N., & Mendes, M. F. (2022). A Review of Biodiesel Production from Non-Edible Raw Materials Using the Transesterification Process with a Focus on Influence of Feedstock Composition and Free Fatty Acids. En *J. Chil. Chem. Soc* (Vol. 67).

Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z., & Sopian, K. (2013). Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 184–193. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.10.016>

Anexos

Anexo 1: Características de planta piloto de la producción de biodiésel	2
Anexo 2: Esquema de planta piloto de la producción de biodiésel	3
Anexo 3: Cronograma del desarrollo de actividades	4
Anexo 4: Carta de aceptación del laboratorio para el desarrollo del proyecto	5
Anexo 5: Análisis estadístico en software Minitab	6
Anexo 6: Instalaciones para la investigación	7

Anexo 1: Características de planta piloto de la producción de biodiésel

Consiste en la construcción de una planta piloto para la producción de biodiésel con las siguientes características:

1. Un tanque de acero inoxidable 304, de 40 L de capacidad, con chaqueta de acero inoxidable AISI 304, provisto de resistencia eléctrica y motorreductor para agitación, 60 RPM, provisto de boca de alimentación, válvula de bola de ¼" para salida de aire y válvula de bola de 1" para descargar por el fondo.

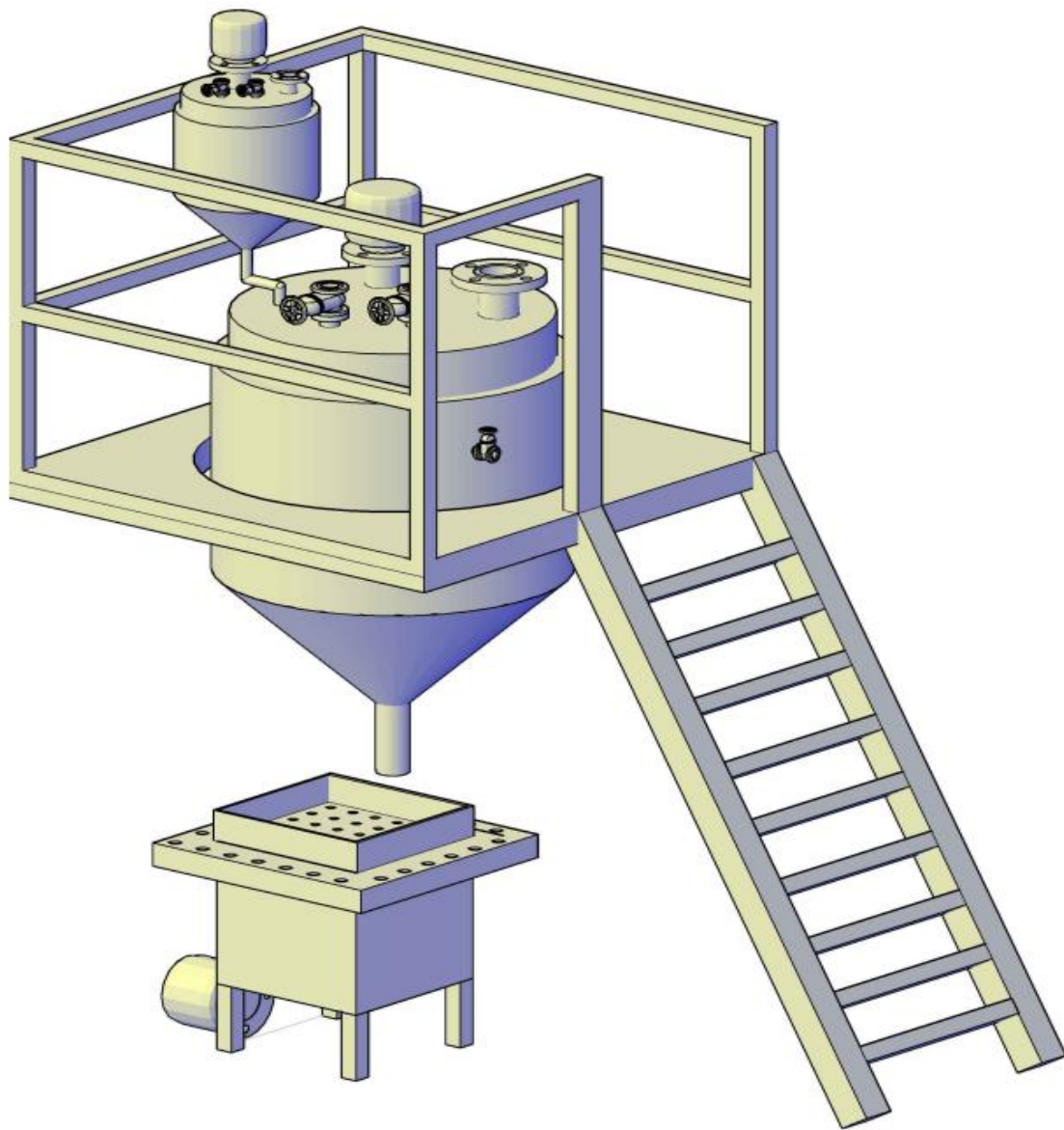
2. Un tanque de acero inoxidable AISI 304, de 200 L, con chaqueta de acero al carbono, provisto de resistencia eléctrica y motorreductor 400 RPM, para agitación, boca de alimentación y válvula de bola de ¼" para salida de aire y válvula de bola de 1 ½" para descarga por el fondo. Cuenta además con una válvula de bola de ¼" para sacar muestras de líquido.

3. Un filtro al vacío de acero inoxidable 304 de 90 L, tipo Buchner, provisto de bomba de vacío.

4. Pequeño tablero eléctrico para cada uno de los motorreductores, bomba de vacío y resistencias eléctricas.

5. Pequeña plataforma para el reactor de 200 L, de 1,1 m x 1,5 m, provista de escalera y barandas. La Plataforma está ubicada a una altura de 2 m del piso. Las tuberías y accesorios son de acero inoxidable 304. El equipo está provisto de un control digital de temperatura, con una termocupla, la cual se puede utilizar para medir la temperatura de cualquiera de los dos tanques, alternando la termocupla en los dos termopozos. También cuenta con dos (02) manómetros y un (01) vacuómetro. Se muestra la siguiente la planta piloto a continuación:

Anexo 2: Esquema de planta piloto de la producción de biodiésel



Se determinó que el costo por la construcción de una planta piloto es de \$ 28110,00

Anexo 3: Cronograma del desarrollo de actividades

Actividad	2022											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Búsqueda de información												
Tema de plan de tesis												
Definir hipótesis												
Marco teórico												
Diseño de experimentos												
Negociación con fuentes de AUF												
Reactivos químicos												
Adquisición de materias primas												
Pruebas de laboratorio												
Definición de parámetros												
Producción de biodiésel a nivel laboratorio												
Análisis de calidad de biodiésel												
Análisis de costos												
Redacción de la tesis												

Actividad	2023											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Análisis de calidad de biodiesel												
Análisis de costos												
Redacción de la tesis												

Nota: Se dividen las actividades realizadas durante el año 2022 y 2023.

Anexo 4: Carta de aceptación del laboratorio para el desarrollo del proyecto

Se presenta la carta de aceptación del laboratorio N° 23 de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química y Textil para la realización de las pruebas experimentales.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Química y Textil
Laboratorio N°23 – Ingeniería Química

Lima, 26 de mayo de 2022

CARTA-LAB N°23-FIQT

Dr. César Osorio Cabrera
Director de Escuela Profesional de Ingeniería Química

Por medio de la presente le expreso las muestras de mi consideración y estima personal, asimismo para comunicarle que las instalaciones del laboratorio N° 23 están óptimas para los trabajos a realizar del titulado Marco Antonio Uriel Martínez Sánchez con código 201612481.

Por lo que cuenta con la aceptación solicitada los días lunes bajo el asesoramiento de la Ing. Magali Vivas Cuellar.

Agradeciendo su atención a la presente, quedo de usted,

Atentamente

Ing. Olga Frida Bullón Camarena
Jefa (e) del Laboratorio N° 23 – 23 “A”

c/c: A los interesados
OFBC/jqc

Av. Túpac Amaru N° 210 Rimac, Lima 25 Perú Central FIQT 4817919, 4811070 Anexo 5607, Fax 4817919
Email: lab23_fiqt@uni.edu.pe

Anexo 5: Análisis estadístico en software Minitab

Se muestra la captura del diseño factorial de múltiples niveles utilizando el software Minitab donde se puede ver el resumen del diseño como factores 2, réplicas 3, corridas base 4. Dando un total de 12 corridas. El número de niveles es 2; 2.

Minitab - Análisis Estadístico Minitab.mpx

File Edit Data Calc Stat Graph View Help Assistant Predictive Analytics Module Additional Tools

Navigator

Diseño factorial de múltiples nive...

Regresión factorial general: Masa ...

Estadísticos descriptivos: Masa de de...

Gráfica de caja de Masa de biodi...

Gráfica de probabilidad de RESI1

Gráficas factoriales para Masa de ...

Optimización de respuesta: Masa ...

Diseño factorial de múltipl...

HOJA DE TRABAJO 1

Diseño factorial de múltiples niveles

Resumen del diseño

Factores: 2 Réplicas: 3

Corridas base: 4 Total de corridas: 12

Bloques base: 1 Total de bloques: 3

Número de niveles: 2; 2

#	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9-T
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Temperatura (°C)	Concentración de NaOH (%)	Masa de biodiésel (g)	RESI1	Tratamientos
1	1	1	1	1	60	1	58.2	1.03333	T1
2	2	2	1	1	60	10	92.2	1.36667	T2
3	3	3	1	1	70	1	47.9	-0.96667	T3
4	4	4	1	1	70	10	75.2	-1.43333	T4
5	5	5	1	2	60	1	57.1	-0.46667	T1
6	6	6	1	2	60	10	90.4	-0.83333	T2
7	7	7	1	2	70	1	49.8	0.53333	T3
8	8	8	1	2	70	10	77.8	0.76667	T4
9	9	9	1	3	60	1	57.6	-0.56667	T1
10	10	10	1	3	60	10	91.3	-0.53333	T2
11	11	11	1	3	70	1	50.3	0.43333	T3
12	12	12	1	3	70	10	78.3	0.66667	T4
13									
14									
15									
16									

Hoja de trabajo 1

6

Anexo 6: Instalaciones para la investigación

Se presenta las instalaciones del centro de investigación en la Facultad de Ingeniería Química y Textil en la Universidad Nacional de Ingeniería para el desarrollo experimental del presente trabajo de investigación.

