

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA



TESIS

**CONTROL DE TEMPERATURA Y AGITACIÓN EN UN REACTOR
DISCONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR
DE ACEITE VEGETAL RESIDUAL MEDIANTE EL PROCESO DE
TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA**

PRESENTADO POR:

Br. FABIAN SVEN ROLDAN DELGADO

Br. NICOLE VALERIA REVOLLEDO
RECHARTE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO PETROQUÍMICO**

ASESOR:

Mgt. WILBER EULOGIO PINARES
GAMARRA

COASESOR:

Mgt. FRANKLIN ANDREE SALAS
CAMACHO

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Wilber Eulogio Píñeres Gamarrá, quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: Control de temperatura y agitación en un reactor discontinuo para la producción de Bioetanol a partir de aceite vegetal residual mediante el proceso de transesterificación catalítica.

Presentado por: Nicole Valeria Dovolledo Pachante DNI N° 73895224;
presentado por: Fabian Sven Roldán Delgado DNI N° 71075867
Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Petroquímico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 1 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 2 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	X
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 07 de Agosto de 2026

Firma

Post firma Wilber E. Píñeres Gamarrá

Nro. de DNI 23879839

ORCID del Asesor 0000-0002-6008-1522

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:612213739

CONTROL DE TEMPERATURA Y AGITACIÓN EN UN REACTOR DISCONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PAR...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:612213739

Fecha de entrega

3 ago 2026, 7:11 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

3 ago 2026, 7:14 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

CONTROL DE TEMPERATURA Y AGITACIÓN EN UN REACTOR DISCONTINUO PARA LA PRODUCCIÓ....pdf

Tamaño del archivo

4.9 MB

182 páginas

40.866 palabras

238.695 caracteres

2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 25 palabras)

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniero de Procesos:

En cumplimiento con lo establecido en el Reglamento de Grados y Títulos vigente de nuestra Facultad, tengo el honor de presentar la tesis intitulada: **“CONTROL DE TEMPERATURA Y AGITACIÓN EN UN REACTOR DISCONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE VEGETAL RESIDUAL MEDIANTE EL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA”**, con la finalidad de optar al título profesional de Ingeniero Petroquímico.

DEDICATORIA

A mi familia, por ser mi mayor fortaleza

Nicole Valeria Revolledo Recharte

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional en cada paso, y a mis mascotas, por su fiel compañía que hizo más llevadero este camino.

Con gratitud, les dedico este trabajo.

Fabian Sven Roldan Delgado

AGRADECIMIENTO

A las mujeres de mi vida, por ser mi mayor
inspiración y enseñarme que no hay límites

Nicole Valeria Revolledo Recharte

A Dios, por guiar cada paso y darme la
fortaleza para alcanzar este logro.

A todas las personas que estuvieron y
están en mi camino, gracias por su apoyo,
enseñanza y compañía; y también a
quienes ya no están, pero dejaron una
huella imborrable en mi vida.

Fabian Sven Roldan Delgado

ÍNDICE

Resumen	xii
CAPITULO I: Generalidades.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del Problema	3
1.2.1 Descripción del Problema	3
1.3 Formulación del Problema	4
1.3.1 Problema General.....	4
1.3.2 Problemas Específicos	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo General.....	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
1.5 Justificación e importancia.....	5
1.5.1 Justificación Técnica – Tecnológica	5
1.5.2 Justificación Social y Ambiental	6
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Antecedentes	8
2.2 Bases Teóricas.....	10
2.2.1 Aceite vegetal usado o residual.....	10
2.2.2 Biocombustible.....	11
2.2.3 Biodiésel.....	12
2.2.3.1 Propiedades del Biodiesel	13
2.2.4 Normativa del Biodiésel	16
2.2.4.1 Norma ASTM D6751-09 para el Biodiésel	16
2.2.4.2 Norma Técnica Peruana para el Biodiésel	18
2.2.4.3 Norma Europea para Biodiésel EN 14214.....	19
2.2.5 Transesterificación	21
2.2.6 Mecanismo de reacción	24
2.2.7 Cinética de la reacción de transesterificación	25
2.2.8 Parámetros del proceso de Transesterificación	26
2.2.8.1 Calidad de la materia prima	26
2.2.8.2 Temperatura, tiempo de reacción y agitación.	27
2.2.8.3 Relación molar aceite:metanol.....	28
2.2.8.4 Tipo y concentración del catalizador	29
2.2.9 Control del proceso.....	34
2.2.9.1. Variables del proceso	34
2.2.9.2 Función de transferencia	41
2.2.9.3 Controladores PI y PID	42
2.2.9.4 Controlador por Modelo Interno (IMC).....	42
2.2.9.5 Interfaz HMI y Labview	44
2.2.9.5 Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID)	44
2.2.10 Proceso de purificación	45

2.2.11 Productos de la Transesterificación	46
2.3 Marco Conceptual	47
2.3.1. Biocombustible.....	47
2.3.2. Biodiésel.....	47
2.3.3 Transesterificación	47
2.3.4 Reactor Batch.....	47
2.3.5 Pruebas Experimentales.....	48
2.3.6 Análisis de los productos	48
2.3.6.4 Densidad	49
2.3.6.5 Viscosidad Cinemática.....	49
2.3.6.6 Punto de Inflamación	49
2.3.6.7 Normas de Calidad del Biodiesel.....	49
2.3.7 Saponificación de ácidos	50
2.3.13 Sensores de Temperatura	50
2.3.8 Triglicéridos	51
2.3.9 Diglicérido	51
2.3.10 Monoglicérido	51
2.3.11 Glicerina	51
2.3.12 Automatización	52
2.3.14 Microcontrolador.....	52
2.3.15 Control PID	53
2.4 Enfoque, Tipo y Alcance de la Investigación	53
2.5 Hipótesis	54
2.5.1 Hipótesis General.....	54
2.5.2 Hipótesis Específicas.....	54
<i>CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS.....</i>	<i>55</i>
3.1 Población y Muestra.....	55
3.2 Materiales, Reactivos y Equipos	55
3.3 Ámbito Espacial y Temporal.....	59
3.3.1 Ámbito Espacial.....	59
3.3.2 Ámbito Temporal	59
3.4 Diseño de la Investigación	59
3.5 Variables y Operacionalización de Variables.....	61
3.6 Métodos	62
3.6.1 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del aceite vegetal residual y Biodiésel.....	62
3.6.1.1 Procedimientos.....	62
3.6.1.2 Técnicas e instrumentos para la colecta de datos e instrumentos de medición	64
3.6.1.3 Método de Análisis de datos	67
3.6.2 Evaluación y selección de catalizadores.....	68
3.6.2.1 Procedimientos.....	68
3.6.2.2 Técnicas e instrumentos para la colecta de datos e instrumentos de medición	69

3.6.2.3 Método de Análisis de datos	70
3.6.3 Análisis del efecto de las variables operativas sobre la producción de biodiésel	71
3.6.3.1 Procedimientos.....	71
3.6.3.2 Técnicas e instrumentos para la colecta de datos e instrumentos de medición	71
3.6.3.3 Método de Análisis de datos	73
3.6.4 Evaluación del desempeño de los controladores de temperatura y agitación..	76
3.6.4.1 Procedimientos.....	76
3.6.4.2 Técnicas e instrumentos para la colecta de datos e instrumentos de medición	79
3.6.4.3 Método de Análisis de datos	85
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	88
4.1 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del aceite.....	88
i. Pretratamiento de la Muestra de aceite vegetal residual.....	88
ii. Caracterización de la Muestra de aceite vegetal residual.....	89
4.2 Evaluación del efecto del tipo de catalizador en el rendimiento	89
i. Selección de catalizador	89
ii. Relación estequiométrica	91
iii. Reacción de Transesterificación	93
4.3 Análisis del efecto de las variables operativas sobre la producción de biodiésel....	94
i. Diseño Factorial ANOVA	94
4.4 Diseño e implementación del sistema de control	101
4.4.1 Modelado dinámico del proceso térmico del reactor batch	101
4.4.1.1 Prueba Experimental de Calentamiento	101
4.4.1.2 Determinación de parámetros dinámicos del proceso	103
4.4.1.3 Análisis del comportamiento dinámico del proceso	103
4.4.2 Sintonización del controlador PI mediante el método Internal Model Control (IMC)	104
4.4.2.1 Modelo matemático - IPDT	105
4.4.2.2 Formulación Analítica de Sintonización.....	108
4.4.3 Implementación del sistema de control en LabVIEW	110
4.4.4 Exportación y análisis de datos registrados en LabVIEW	112
4.4.5 Aplicación del sistema de control de temperatura y velocidad de agitación..	114
4.5 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del Biodiésel y rendimiento del producto	116
4.5.1 Lavado de Biodiesel.....	117
4.5.2 Secado de Biodiesel.....	119
4.5.3 Caracterización de las Propiedades Fisicoquímicas del Biodiesel	119
4.5.3.1 Punto de inflamación	119
4.5.3.2 Densidad	124
4.5.3.3 Viscosidad cinemática	128
4.5.4 Porcentaje de rendimiento.....	131
4.5.4.1 Balance de materia para la relación molar 1:4.....	133
4.5.4.2 Balance de materia para la relación molar 1:6.5.....	134
4.5.4.3 Balance de materia para la relación molar 1:9.....	135

4.5.4.4 Análisis comparativo de los balances de materia	136
CONCLUSIONES.....	142
RECOMENDACIONES.....	145
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</i>	<i>147</i>
ANEXOS.....	154
APÉNDICE.....	162

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2 Puntos de Ebullición de los Compuestos en la Reacción	14
Tabla 3 Norma ASTM D6751-09	17
Tabla 4 Especificaciones del Biodiésel B100 de acuerdo a la Norma Técnica Peruana 321.125	18
Tabla 5 Norma Europea para Biodiésel en 14214 – 2008	20
Tabla 6 Resultados de caracterización fisicoquímica de aceite vegetal residual según bibliografía.....	27
Tabla 7 Productos obtenidos a partir del proceso de Transesterificación.....	46
Tabla 8 Combinación de variables para las pruebas experimentales para la obtención de Biodiésel	74
Tabla 9 Datos obtenidos para el cálculo del porcentaje de impurezas presentes en el aceite vegetal residual posterior al proceso de filtración	88
Tabla 10 Propiedades de la caracterización de aceite residual de cocina	89
Tabla 11 Porcentaje de rendimiento de los catalizadores evaluados	89
Tabla 12 Estequiometría aplicada para la transesterificación de Biodiésel	91
Tabla 13 Relación molar de aceite y metanol	91
Tabla 14 Resultado promedio de la cantidad de Biodiésel obtenido	93
Tabla 15 Peso promedio y rendimiento de conversión	94
Tabla 16 Resultados del análisis de varianza (ANOVA).....	95
Tabla 17 Tabla ANOVA aplicando el modelo corregido	97
Tabla 18 Estructura de datos exportados desde LabVIEW para el análisis del control de temperatura	113
Tabla 19 <i>Correspondencia teórica entre la señal adquirida por el Arduino y la velocidad de agitación</i>	115
Tabla 20 Peso de las muestras antes y después del proceso de secado a 60°C promedio de pesos y desviación estándar	119
Tabla 21 Resultados del punto de inflamación de la Primera y Segunda prueba experimental de las 9 muestras de Biodiésel obtenidas	120
Tabla 22 Resultados de densidad de la Primera y Segunda prueba experimental de las 9 muestras de Biodiésel obtenidas	125
Tabla 23 Resultados de Viscosidad (mm^2/s) de la Primera y Segunda prueba experimental de las 9 muestras de Biodiésel obtenidas.....	128
Tabla 24 Porcentaje de rendimiento de las pruebas experimentales realizadas.....	132
Tabla 25 Tabla resumen del balance de masa	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Reacción Principal de Transesterificación	22
Figura 2 Reacciones Laterales	23
Figura 3 Etapas reversibles de la reacción de transesterificación.....	24
Figura 4 Reactor batch previo acondicionamiento para el proceso de transesterificación catalítica	58
Figura 5 Reactor batch con estructura metálica, tuberías y válvulas para iniciar con la operación.....	58
Figura 6 Filtrado de aceite vegetal residual	63
Figura 7 Recolección de aceite vegetal residual	63
Figura 8 Equipo para determinación del Punto de inflamación en copa cerrada	66
Figura 9 Equipo para la Determinación de la Viscosidad Dinámica y la Densidad de Líquidos	67
Figura 10 Diseño Factorial 2^3 con un punto medio	74
Figura 11 Diagrama P&ID del sistema implementado	76
Figura 12 Comportamiento del sistema aplicando los tipos de controladores	81
Figura 13 Flujoograma de Operación del Proceso.....	85
Figura 14 Ecuaciones de los modelos M y N empleadas para la sintonización del controlador PI	86
Figura 15 Biodiésel obtenido con los catalizadores, de izquierda a derecha: Hidróxido de Sodio (NaOH), hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e Hidróxido de Potasio (KOH) para la prueba	90
Figura 16 Interacción entre la temperatura, relación molar y velocidad de agitación sobre el rendimiento	96
Figura 17 Gráfico de Dispersión: Temperatura vs. Relación molar	97
Figura 18 Curva experimental de calentamiento del reactor batch registrada mediante LabVIEW	102
Figura 19 Curva de reacción experimental y ajuste lineal del modelo IPDT para el lazo de temperatura del reactor batch.....	106
Figura 20 Programación del interfaz HMI en LabView	110
Figura 21 Interfaz HMI del reactor batch durante la operación automática del controlador PI de temperatura.....	111
Figura 22 Interfaz HMI del reactor batch con temperatura estabilizado al aplicar control de lazo cerrado	112
Figura 23 Resultados de la separación de fases correspondientes a las pruebas experimentales 1 al 4 de la réplica 1	117
Figura 24 Resultados de la separación de fases correspondientes a las pruebas experimentales 1 al 4 de la réplica 2	117
Figura 25 Lavado de Biodiésel correspondientes a los experimentos C1, C2, C3 y C4	118
Figura 26 Lavado de Biodiésel correspondiente a la prueba 3 de la replica 1 (C3)	118
Figura 27 Determinación del punto de inflamación de las muestras utilizando el equipo PetroTest	120
Figura 28 Resultados del punto de inflamación por muestra: Replica 1, Replica 2 y promedio	122
Figura 29 Representación 3D del punto de inflamación generado en MATLAB según parámetros experimentales.....	123
Figura 30 Diagrama de Dispersión 3D sobre resultados del punto de inflamación	123
Figura 31 Promedio de la densidad obtenida en pruebas experimentales	125
Figura 32 Representación 3D de la densidad generado en MATLAB según parámetros experimentales	127

Figura 33 Diagrama de Dispersión 3D sobre resultados de densidad	127
Figura 34 Resultados de viscosidad cinemática por muestra: Réplica 1, Réplica 2 y promedio	129
Figura 35 Representación 3D de la viscosidad generado en MATLAB según parámetros experimentales	130
Figura 36 Diagrama de Dispersión 3D sobre resultados de viscosidad.....	130
Figura 37 Resultados de rendimiento por muestra: Réplica 1, Réplica 2 y promedio	138
Figura 38 Representación 3D de rendimiento generado en MATLAB según parámetros experimentales	139
Figura 39 Diagrama de Dispersión 3D sobre resultados del rendimiento	140

Resumen

El aceite vegetal residual puede ser valorizado como materia prima para la producción de biodiésel mediante transesterificación. El objetivo fue implementar un sistema de control automático de temperatura y agitación en un reactor batch para mejorar la estabilidad del proceso y la calidad del biodiésel. Se diseñó e implementó un sistema de control PI basado en un modelo IPDT, integrado a una interfaz HMI en LabVIEW. Se evaluaron nueve condiciones operativas, analizando el rendimiento y las propiedades fisicoquímicas del biodiésel. Los rendimientos variaron entre 86,38 % y 96,24 %, seleccionándose la prueba C3, con 93,64 %, como la única que cumplió los estándares de calidad. La densidad estuvo entre 871 y 895 kg/m³, mientras que la viscosidad varió de 5,23 a 13,86 mm²/s. El sistema permitió estabilizar la temperatura en 55 °C y mejorar la reproducibilidad del proceso. Se concluye que el control automatizado favorece la estabilidad del proceso y la regulación de variables operativas.

Palabras clave: Biodiésel, Aceite vegetal residual, Control automático, Reactor batch.

Abstract

Waste vegetable oil can be valorized as a raw material for biodiesel production through catalytic transesterification. This study aimed to implement an automatic temperature and agitation control system in a batch reactor to improve process stability and biodiesel quality. A PI control system based on an Integrating Process with Dead Time (IPDT) model was designed and implemented and integrated into a LabVIEW HMI to regulate temperature and agitation speed. Nine operating conditions were evaluated based on biodiesel yield and physicochemical properties. Yields ranged from 86.38% to 96.24%, with experimental test C3 achieving 93.64% and being the only condition that met the established quality standards. Density ranged from 871 to 895 kg/m³, while viscosity varied between 5.23 and 13.86 mm²/s. The control system stabilized the temperature at 55 °C without overshoot and improved process reproducibility. It is concluded that automated control improves process stability and regulation of operating variables.

Keywords: Biodiesel, Waste vegetable oil, Automatic control, Batch reactor.

CAPITULO I: Generalidades

1.1 Introducción

En un contexto global caracterizado por el incremento de la demanda energética y la necesidad de mitigar los efectos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles, el desarrollo de alternativas sostenibles se convirtió en una prioridad. En este escenario, el biodiésel destacó como una opción viable debido a su carácter renovable y a su capacidad de reducir emisiones contaminantes en comparación con los combustibles convencionales (Demirbas, 2009; Atadashi et al., 2010). Asimismo, su producción contribuyó a la valorización de residuos, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía circular (EPA, 2021).

Entre las diferentes rutas de producción, la transesterificación catalítica de aceites vegetales residuales se posicionó como una de las más utilizadas debido a su eficiencia y viabilidad económica (Fukuda et al., 2001; Meher et al., 2006). Este proceso consistió en la conversión de triglicéridos en ésteres metílicos de ácidos grasos mediante su reacción con un alcohol de cadena corta, generalmente metanol, en presencia de un catalizador (Van Gerpen, 2005). Sin embargo, su desempeño dependió de una compleja interacción entre variables operativas como la relación molar alcohol/aceite, la temperatura, la concentración de catalizador, la agitación y el tiempo de reacción, así como de fenómenos de transferencia de masa debido a la naturaleza bifásica del sistema (Darnoko & Cheryan, 2000; Marchetti et al., 2005).

El uso de catalizadores básicos homogéneos, como el hidróxido de sodio (NaOH) y el hidróxido de potasio (KOH), permitió alcanzar altas conversiones en tiempos relativamente cortos (Encinar et al., 2007). No obstante, cuando se emplearon aceites residuales con alto contenido de ácidos grasos libres y humedad, se favorecieron reacciones secundarias de saponificación que afectaron negativamente el rendimiento y la calidad del biodiésel (Leung et al., 2010; Canakci & Van Gerpen, 2001). En este contexto, el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2)

se presentó como una alternativa potencial, cuya evaluación resultó necesaria para determinar su viabilidad en condiciones específicas de operación.

Más allá de la reacción química, la eficiencia del proceso dependió críticamente del control de variables operativas. En sistemas discontinuos (batch), la adecuada regulación de la temperatura y la velocidad de agitación fue fundamental para garantizar la dispersión de las fases y mejorar la transferencia de masa, factores determinantes en la cinética global del proceso (Grau, 1999; Meher et al., 2006). En este sentido, la implementación de sistemas de control automático permitió optimizar la operación y mejorar la estabilidad del proceso (Seborg et al., 2011; Åström & Hägglund, 2006).

En ese sentido, la presente investigación tuvo como objetivo controlar las condiciones operativas del proceso de transesterificación catalítica a partir de aceite vegetal residual, con el fin de obtener un biodiésel que cumpliera con los estándares de calidad establecidos en normas como la ASTM D6751 y la NTP 321.125 (INACAL, 2021). Asimismo, se propuso la implementación de un sistema de control automático en el entorno LabVIEW, orientado a regular variables críticas como la temperatura y la velocidad de agitación mediante controladores PI, mejorando la reproducibilidad del proceso.

Finalmente, este trabajo planteó una alternativa tecnológica sostenible para la ciudad del Cusco, orientada al aprovechamiento de un residuo local subutilizado, como es el aceite vegetal residual, transformándolo en un recurso energético con valor agregado. De esta manera, se buscó contribuir al desarrollo de soluciones energéticas descentralizadas, adaptadas a condiciones geográficas y operativas particulares.

1.2 Planteamiento del Problema

1.2.1 Descripción del Problema

En el Perú se gestionan decenas de miles de toneladas de aceite residual de cocina al año, evidenciando la magnitud de este residuo a nivel nacional. En este contexto, el Ministerio del Ambiente autorizó en 2026 la exportación de aproximadamente 45 000 toneladas de aceite usado de cocina para su valorización, lo que refleja la existencia de una cadena formal de aprovechamiento de este residuo. Asimismo, los aceites lubricantes usados son considerados residuos peligrosos debido a su alto potencial contaminante, por lo que requieren un manejo especializado en todas sus etapas de gestión. A nivel local, en la región Cusco se han desarrollado iniciativas de valorización como la planta de biodiésel en Machu Picchu Pueblo, la cual transforma aceite vegetal residual en biocombustible, contribuyendo a la reducción de impactos ambientales en la cuenca del río Vilcanota.

A medida que la demanda de biodiésel como combustible renovable sigue creciendo, se requiere perfeccionar la eficiencia y la calidad de su producción (Martín, 2017). El proceso de transesterificación catalítica es una etapa clave en la purificación del biodiésel obtenido mediante la transesterificación de aceite vegetal residual. Sin embargo, este proceso presenta desafíos que limitan su rendimiento y confiabilidad, como la necesidad de definir con precisión los parámetros óptimos del proceso, por ejemplo, la relación molar de los reactivos, la temperatura y la velocidad de agitación y controlarlos en tiempo real. Además, la presencia de impurezas, subproductos no deseados y altos niveles de ácidos grasos libres en el aceite residual también representan un reto técnico que requiere un manejo adecuado de los reactivos antes del proceso de transesterificación catalítica (Tacias Pascacio et al., 2016).

A esto se suma la necesidad de un control sobre estas variables que puede comprometer tanto el rendimiento del biodiésel como su compatibilidad con los estándares establecidos. En este sentido, Marengo y Pereyra (2019) señalan que la ausencia de mecanismos automatizados

de control y optimización en los sistemas de producción de biodiésel no solo genera ineficiencias y errores, sino que también incrementa significativamente el consumo de tiempo y recursos operativos. Esta situación limita la escalabilidad del proceso y reduce su competitividad frente a los combustibles convencionales.

Frente a este escenario, la presente investigación se orientó al diseño e implementación de un sistema de control en el proceso de transesterificación catalítica de aceite vegetal residual, con el objetivo de mejorar la eficiencia, seguridad y calidad del biodiésel obtenido. Se buscó también lograr una mayor consistencia en los resultados y facilitar la replicabilidad del proceso en contextos reales de producción descentralizada.

1.3 Formulación del Problema

1.3.1 Problema General

¿El control de temperatura y agitación en un reactor mejora el rendimiento de la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal residual mediante el proceso de transesterificación catalítica?

1.3.2 Problemas Específicos

¿Cuáles son las características fisicoquímicas del aceite vegetal residual y del biodiésel obtenido mediante transesterificación catalítica?

¿Cuál es la influencia del tipo de catalizador (NaOH , KOH y Ca(OH)_2) en el rendimiento del proceso de transesterificación con variables operativas constantes?

¿Cómo influyen las variables operativas, como la temperatura, velocidad de agitación y la relación molar de reactantes, en la producción de biodiésel?

¿De qué manera se puede implementar un sistema de control de temperatura y velocidad de agitación en un reactor para la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal residual mediante transesterificación catalítica?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Controlar la temperatura y agitación en un reactor discontinuo para el proceso de obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal residual mediante el proceso de transesterificación catalítica.

1.4.2 Objetivos Específicos

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del aceite vegetal residual y biodiésel obtenido.

Evaluar la influencia de diferentes catalizadores (NaOH, KOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$) en el rendimiento del proceso, considerando criterios de conversión y viabilidad operativa.

Analizar el efecto de las variables operativas, como la temperatura, la velocidad de agitación y la relación molar metanol:aceite, sobre la producción de biodiésel.

Implementar un sistema de control de temperatura y velocidad de agitación en un reactor para la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal residual mediante transesterificación catalítica.

1.5 Justificación e importancia

1.5.1 Justificación Técnica – Tecnológica

La producción de biodiésel fomenta el desarrollo de tecnologías y procesos relacionados (Krosuri, A., Khan, M. 2022). En el caso de la ciudad del Cusco, se ha identificado una ausencia total de iniciativas tecnológicas orientadas a la producción de biodiésel, lo cual evidenció una brecha en la aplicación práctica de este tipo de procesos a nivel local. Esta situación resaltó la necesidad de investigaciones orientadas al diseño de esquemas de producción que sean replicables, escalables y adaptados a las condiciones reales de la región. Esta situación demostró la necesidad de investigaciones que evalúen técnicamente las

condiciones operativas más eficientes y adaptadas al contexto local, bajo criterios de control automatizado y estabilidad del proceso.

El trabajo de Marchetti (2007) destaca que el biodiésel obtenido a partir de aceites residuales, cuando es correctamente procesado, cumple con estándares de calidad que garantizan su funcionamiento eficiente en motores diésel, sin afectar su rendimiento. Esto reforzó la viabilidad técnica del presente estudio, el cual incluye además el diseño e implementación de un sistema de control automatizado que permita regular parámetros operativos clave, asegurando condiciones estables y reproducibles en el proceso.

Así, esta investigación no solo aportó al conocimiento técnico-científico en el área de biocombustibles, sino que también estableció una base tecnológica que puede ser utilizada para la futura implementación de sistemas productivos automatizados en contextos urbanos que aún no exploran este tipo de alternativas energéticas.

1.5.2 Justificación Social y Ambiental

ta mejorar la eficiencia operativa y obtener un producto que cumpla con los estándares técnicos de calidad establecidos. Según Sovacool (2019), la optimización de procesos para la producción de biocombustibles contribuye a diversificar la matriz energética, reducir la dependencia de combustibles fósiles y fortalecer la seguridad energética a largo plazo. Asimismo, favorece el desarrollo de sistemas energéticos más sostenibles y resilientes frente a las fluctuaciones del mercado energético convencional.

En el contexto regional, el departamento del Cusco registra una población total de 1 379 003 habitantes, de los cuales 681 485 son hombres y 697 518 mujeres, según los resultados del Censo Nacional 2025, que se observa en el Anexo 3. Estas características demográficas reflejan una demanda creciente de bienes y servicios, incluyendo actividades

relacionadas con la preparación y comercialización de alimentos, las cuales generan cantidades significativas de aceite vegetal residual.

La disposición inadecuada de estos residuos constituye un problema ambiental, debido a que frecuentemente son vertidos en sistemas de alcantarillado o eliminados junto con residuos sólidos municipales, ocasionando contaminación de cuerpos de agua, afectación de los sistemas de tratamiento y deterioro de los ecosistemas. Adicionalmente, la existencia de mecanismos informales de recolección y comercialización de aceite usado dificulta el control de su destino final y su adecuado aprovechamiento. Frente a esta problemática, la presente investigación propone la valorización de los aceites vegetales residuales mediante su transformación en biodiésel, convirtiendo un residuo potencialmente contaminante en un recurso energético aprovechable.

Esta alternativa contribuye a la reducción de impactos ambientales, promueve el uso eficiente de recursos y fomenta principios de economía circular y sostenibilidad. Por tanto, el proyecto no solo aporta al desarrollo tecnológico en el ámbito de los biocombustibles, sino que también responde a una necesidad social y ambiental concreta, promoviendo prácticas responsables de gestión de residuos y el uso de fuentes de energía más limpias y sostenibles para la región Cusco.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Rodríguez Bustamante et al. (2022), en el estudio “Rendimiento de producción de biodiésel por transesterificación a partir de aceite de soja usado”, tuvieron como objetivo evaluar la influencia de variables operativas en el rendimiento del biodiésel obtenido. La metodología se basó en un diseño experimental factorial 2^2 con puntos centrales, considerando como factores la relación molar etanol:aceite y la concentración de catalizador de óxido de calcio. Los resultados evidenciaron que el incremento de la relación molar y la concentración del catalizador favorecieron el rendimiento, alcanzando un valor máximo de 60.9%. Los autores concluyen que la optimización de las condiciones de reacción es un factor determinante para maximizar la eficiencia del proceso de transesterificación.

Massa et al. (2021), en el estudio “Passion fruit seed oil: extraction and subsequent transesterification reaction”, tuvieron como objetivo evaluar la producción de biodiésel a partir de aceite de semilla de maracuyá mediante un proceso de transesterificación con catálisis enzimática. La metodología consideró la variación de parámetros como la temperatura, el tiempo de reacción y la relación solvente:semilla durante la etapa de extracción. Los resultados mostraron rendimientos relativamente bajos, entre 12.32% y 21.76%. Los autores concluyen que el alto contenido de ácidos grasos libres en este tipo de aceite afecta negativamente el rendimiento del proceso, favoreciendo la formación de subproductos.

Golmakani et al. (2021), en la investigación “Producción de biodiésel mejorada por esterificación y transesterificación asistida por ultrasonido”, tuvieron como objetivo mejorar la eficiencia del proceso de producción de biodiésel a partir de aceites con alto contenido de ácidos grasos libres. La metodología incluyó un pretratamiento de esterificación seguido de transesterificación asistida por ultrasonido, evaluando variables como la potencia, la relación molar y la concentración de catalizador. Los resultados evidenciaron un incremento

significativo del rendimiento, alcanzando hasta 92.69%, además de una reducción en el tiempo de reacción. Los autores concluyeron que la aplicación de ultrasonido mejora la transferencia de masa y la eficiencia global del proceso.

Rivas Méndez y Matamorros Huayra (2020), en la investigación “Obtención de biodiésel a partir de aceite de fritura usado en establecimientos de comida rápida en Iquitos”, tuvieron como objetivo optimizar el proceso de transesterificación alcalina utilizando hidróxido de sodio como catalizador. La metodología incluyó la evaluación de variables como la relación molar aceite:metanol, el tiempo de reacción y la concentración de catalizador. Los resultados mostraron un rendimiento máximo de 90.17%, así como propiedades fisicoquímicas del biodiésel dentro de rangos aceptables. Los autores concluyen que el control adecuado de las variables operativas permite obtener altos rendimientos y un producto con características apropiadas para su uso como biocombustible.

Blanco y Toledano (2019), en la investigación “Transesterificación del aceite de palma utilizando arcillas impregnadas con NaOH y KOH como catalizadores”, tuvieron como objetivo evaluar la eficiencia de catalizadores heterogéneos soportados. La metodología incluyó la preparación de arcillas impregnadas mediante el método de humedad incipiente y su evaluación en reacciones de transesterificación bajo condiciones controladas de temperatura y agitación. Los resultados indicaron que el uso de catalizadores soportados permitió obtener biodiésel, mientras que el uso de sales sólidas generó reacciones de saponificación. Los autores concluyen que el uso de catalizadores heterogéneos soportados mejora la eficiencia del proceso y reduce la formación de subproductos indeseados.

Ñustez et al. (2019), en el estudio “Evaluación de la dolomita como catalizador en la reacción de transesterificación utilizando aceite de palma”, tuvieron como objetivo analizar la viabilidad de la dolomita como catalizador heterogéneo. La metodología se desarrolló en un

reactor batch, evaluando la influencia de la relación molar y la concentración de catalizador bajo condiciones controladas de operación. Los resultados mostraron una conversión máxima de 82.67%. Los autores concluyeron que la dolomita presentó potencial como catalizador alternativo en la producción de biodiésel.

Quispe y Ccala (2014), en el estudio “Obtención de biodiésel a partir de la semilla de nabo silvestre (*Brassica rapa*)”, tuvieron como objetivo producir biodiésel a partir del aceite extraído de dicha materia prima. La metodología consistió en la extracción del aceite y su posterior procesamiento mediante transesterificación bajo condiciones controladas de temperatura, agitación y relación molar alcohol:aceite. Los resultados reportaron un rendimiento de 94.51%, cumpliendo con los estándares establecidos en normas técnicas peruanas. Los autores concluyeron que la semilla de *Brassica rapa* constituye una fuente viable para la producción de biodiésel con propiedades adecuadas.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Aceite vegetal usado o residual

El aceite vegetal usado se define como aquel aceite de origen vegetal (extraído de semillas, frutos o cereales) que ha sido empleado previamente en procesos de cocción o fritura de alimentos. Según Banerjee y Chakraborty (2009), los aceites de cocina usados presentan un comportamiento altamente variable en función del tipo de alimento cocinado, la duración del uso, y la temperatura alcanzada durante la fritura. Esta variabilidad influye directamente en la eficiencia del proceso de transesterificación para la obtención de biodiésel, ya que un elevado índice de acidez puede generar reacciones secundarias como la saponificación, reduciendo el rendimiento del producto final. Además, la presencia de agua promueve la hidrólisis de los triglicéridos, afectando la conversión y generando subproductos no deseados.

Según el INACAL (2021), una vez utilizados, estos aceites pierden las condiciones adecuadas para su uso alimentario al acumular impurezas físicas, compuestos de degradación y elementos contaminantes potencialmente tóxicos, tales como arsénico, plomo, cadmio, cromo y bifenilos policlorados (PCB). Por esta razón, el aceite vegetal usado es considerado un residuo peligroso, cuya gestión inadecuada puede generar impactos ambientales significativos, especialmente cuando es vertido en sistemas de alcantarillado o mezclado con residuos sólidos urbanos.

2.2.2 Biocombustible

Se denomina biocombustible a todo combustible derivado de biomasa, es decir, de materia orgánica renovable de origen vegetal o animal que ha sido generada recientemente a través de procesos biológicos. La biomasa puede incluir cultivos energéticos, residuos agrícolas, aceites vegetales usados, grasas animales y desechos orgánicos.

En términos generales, los biocombustibles comprenden una amplia gama de compuestos como alcoholes (por ejemplo, bioetanol), ésteres (como el biodiésel), éteres, biogás y otros productos obtenidos mediante transformación física, química o biotecnológica de la biomasa. Tal como lo definen Salinas y Gasca (2009), los biocombustibles son sustancias producidas a partir de materia orgánica natural (ya sea directamente de plantas o de sus desechos) que pueden sustituir parcial o totalmente a los combustibles fósiles, especialmente en el transporte o en la generación de energía.

Su principal característica es que provienen de fuentes renovables y, al ser utilizados, emiten una menor cantidad neta de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera en comparación con los combustibles fósiles, dado que el carbono liberado proviene del ciclo natural del carbono, capturado previamente por las plantas.

2.2.3 Biodiésel

El biodiésel es un biocombustible renovable que ha cobrado gran relevancia a nivel mundial como alternativa sustentable frente a los combustibles fósiles. De acuerdo con la American Society for Testing and Materials (ASTM), el biodiésel se define como: “Ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables, tales como aceites vegetales o grasas animales, que pueden emplearse en motores de ignición por compresión (motores diésel) o en calderas de calefacción.”

Este tipo de biocombustible se obtiene comúnmente a través de un proceso químico denominado transesterificación, en el cual los triglicéridos presentes en los aceites vegetales o grasas animales reaccionan con un alcohol (generalmente metanol o etanol) en presencia de un catalizador, dando como resultado glicerina y ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés), los cuales constituyen el biodiésel.



Entre las principales ventajas del biodiésel destacan su carácter biodegradable, su baja toxicidad y su capacidad para reducir las emisiones de gases contaminantes, en especial dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados y partículas. Estas propiedades lo convierten en un combustible más limpio y respetuoso con el medio ambiente en comparación con el diésel convencional derivado del petróleo.

En cuanto a la materia prima, el biodiésel puede ser producido a partir de fuentes renovables y no comestibles, como aceites residuales de cocina, lo que no solo reduce el costo de producción, sino que también promueve la valorización de residuos, mitigando su impacto ambiental cuando son desechados de forma inadecuada.

2.2.3.1 Propiedades del Biodiesel

El biodiésel es un biocombustible renovable obtenido a partir de aceites vegetales o grasas animales mediante el proceso de transesterificación. Este proceso genera ésteres monoalquílicos de ácidos grasos, conocidos por su aplicabilidad como combustibles alternativos en motores de ignición por compresión. Las propiedades del biodiésel están directamente influenciadas por el tipo de materia prima utilizada, el método de producción y las condiciones operativas del proceso. Además, presenta un mayor punto de inflamación, lo cual mejora su seguridad en el manejo y almacenamiento.

Su uso contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos, como el CO, SO_x y material particulado. Estas ventajas lo posicionan como un componente clave en estrategias de transición energética sostenible.

En términos técnicos, el biodiésel debe cumplir con una serie de parámetros definidos en normas internacionales como la ASTM D6751 y NTP 321.125 en el contexto peruano. Entre las propiedades fisicoquímicas más relevantes que se deben controlar se encuentran la viscosidad cinemática, la densidad, el punto de inflamación, el contenido de glicerina, el índice de acidez, y el contenido de agua y sedimentos. Dado que estas propiedades pueden variar significativamente según el tipo de aceite usado y las condiciones del proceso, su caracterización es fundamental para garantizar un producto final de calidad que sea compatible con los estándares técnicos y ambientales exigidos. A continuación, se detallan individualmente las propiedades del biodiésel en las que se enfoca este estudio.

- **Punto de Inflamación**

El punto de inflamación es la temperatura mínima a la que los vapores del biodiésel se inflaman al entrar en contacto con una fuente de ignición bajo condiciones de ensayo controladas. Este parámetro resulta fundamental en términos de seguridad, ya que permite

evaluar el riesgo de inflamabilidad durante el almacenamiento, manipulación y transporte del biocombustible.

Según las especificaciones técnicas establecidas por las normas ASTM D6751, EN 14214 y la Norma Técnica Peruana (NTP) 321.125:2015, el biodiésel debe presentar un punto de inflamación no menor a 120 °C. Este valor asegura que el combustible mantenga una adecuada estabilidad térmica y minimiza la posibilidad de incendios accidentales, representando una ventaja frente al diésel fósil, cuyo punto de inflamación es típicamente inferior.

De acuerdo con Castillo Fernández (2018), el cumplimiento de este parámetro es indicativo de una correcta eliminación de residuos de metanol tras el proceso de purificación, ya que su presencia puede reducir significativamente el punto de inflamación del producto final.

El punto de inflamación del biodiésel exhibe una temperatura considerablemente superior en comparación con el diésel convencional, otorgándole así propiedades más seguras. Además, sirve como un indicador de la presencia de metanol, ya que a medida que el porcentaje de metanol aumenta en el biodiésel, el punto de inflamación disminuye de manera significativa (Castillo, 2018). En la Tabla 1 se observan los puntos de ebullición de los compuestos involucrados en la reacción de transesterificación catalítica que se deben tomar en consideración:

Tabla 1
Puntos de Ebullición de los Compuestos en la Reacción

Componente	Temperatura de Ebullición (°C)
Biodiésel	>140
Glicerol	290
Metanol	64.7
Agua	87 – 88

Fuente: Handbook of Chemistry and Physics 2007

- **Viscosidad**

La viscosidad es una propiedad física que describe la resistencia de un fluido a fluir, y está estrechamente relacionada con la densidad y la temperatura del producto. En el caso del biodiésel, una viscosidad adecuada es esencial para asegurar una correcta atomización durante el proceso de inyección y evitar obstrucciones en los sistemas de alimentación del combustible.

La medición de la viscosidad del biodiésel se realiza conforme al método ASTM D7042, que determina la viscosidad cinemática a una temperatura estándar, usualmente a 40 °C. Este parámetro debe mantenerse dentro de un rango específico para garantizar el buen desempeño del biodiésel como combustible.

De acuerdo con la Norma Técnica Peruana (NTP) 321.125:2015, el rango permitido de viscosidad cinemática para el biodiésel está entre 1.9 mm²/s y 6.0 mm²/s. Valores fuera de este rango pueden generar diversos problemas: una viscosidad demasiado baja puede provocar fugas y una lubricación deficiente, mientras que una viscosidad elevada puede causar dificultades en la inyección, combustión incompleta, pérdida de potencia y formación de depósitos (Benjumea, 2007).

La correcta determinación de la viscosidad, junto con otros parámetros fisicoquímicos, es fundamental para la caracterización del biodiésel y para asegurar que el producto final cumpla con las especificaciones normativas establecidas a nivel nacional e internacional.

- **Densidad**

La densidad es una propiedad fisicoquímica fundamental del biodiésel, definida como la masa por unidad de volumen. Su determinación es esencial para evaluar la calidad del biocombustible, ya que influye en aspectos como el almacenamiento, la manipulación y la dosificación del producto.

Este parámetro se evalúa mediante el método estándar ASTM D7042, el cual permite medir la densidad, la densidad relativa (también conocida como gravedad específica) y la gravedad API, utilizando un hidrómetro en condiciones controladas de temperatura. En este procedimiento, la densidad del fluido se mide generalmente a 15 °C, lo que permite estandarizar los resultados y compararlos con valores de referencia.

De acuerdo con la norma europea EN 14214:2008, el rango aceptable de densidad para el biodiésel a 15 °C se encuentra entre 860 y 900 kg/m³. Este intervalo asegura que el producto tenga una composición adecuada, reflejando un equilibrio correcto entre los componentes derivados del aceite y los subproductos de la reacción de transesterificación.

La medición precisa de la densidad permite, además, identificar posibles contaminaciones o ineficiencias en el proceso de producción, como presencia de glicerina, agua, alcohol residual o ácidos grasos no convertidos, lo cual la convierte en un parámetro clave dentro del control de calidad del biodiésel

2.2.4 Normativa del Biodiésel

2.2.4.1 Norma ASTM D6751-09 para el Biodiésel

La calidad del biodiésel obtenido mediante transesterificación catalítica puede verse afectada por diversos factores, como la presencia de impurezas, condiciones inadecuadas de almacenamiento, o la exposición a agentes externos durante el manejo de los reactivos y la materia prima. Estas alteraciones influyen directamente en las propiedades fisicoquímicas del producto final, comprometiendo su estabilidad, seguridad y rendimiento.

Con el fin de establecer criterios técnicos uniformes que garanticen la calidad del biodiésel, la American Society for Testing and Materials (ASTM) ha desarrollado la norma ASTM D6751-09, la cual especifica los rangos aceptables para una serie de propiedades

críticas del biodiésel. Esta norma constituye una referencia clave tanto para la evaluación de laboratorio como para la producción industrial del biocombustible.

En el contexto de la presente investigación, se han tomado como parámetros de análisis las propiedades de densidad, viscosidad cinemática y dinámica, y punto de inflamación, cuyos límites permitidos conforme a la norma mencionada se detallan en la Tabla . Estas propiedades son fundamentales para determinar la conformidad del biodiésel obtenido con los estándares internacionales de calidad.

Tabla 2
Norma ASTM D6751-09

Propiedad	Limite		Unidad	Método de Prueba
	Min.	Máx.		
Punto de inflamación	93	-	°C	D 93
Control de alcohol Debe cumplir con una de las siguientes:				
1. Contenido de metanol	130	0.2	% masa, °C	En 14110D93
2. Punto de inflamación				
Agua y Sedimento	-	0.05	mg KOH / g	D2709
Número ácido	-	0.5	% masa	D664
Ceniza sulfatada	-	0.02	-	D874
Corrosión lámina de cobre	-	No. 3	% masa	D130
Residuo de carbono	-	0.05		D4530
Viscosidad cinemática	1.9	6	mm ² /s	D445
Número de Cetano	47		-	D613
Punto de turbidez	-	Reporte	°C	D2500
Filtrabilidad de impregnado en frío	-	360	segundos	Anexo A1
Estabilidad de oxidación	3	0.02	horas	en 14112
Glicerina libre	-	0.24	% masa	D6584
Glicerina total	-	5	% masa	D6584
Sodio y potasio, combinados	-	5	ppm (µg/g)	en 14538
Calcio y magnesio, combinados	-	0.0015	ppm (µg/g)	en 14538
Azufre	-	0.05	% masa (ppm)	D5453
Contenido de fósforo	-	0.001	% masa	D4951
Temperatura de destilación Atmosférica equivalente, 90% recuperado	-	360	° C	D1160

Nota: Reproducida de Calidad del Combustible Biodiésel y la norma ASTM para el biodiésel D6751

2.2.4.2 Norma Técnica Peruana para el Biodiésel

La relevancia de estas propiedades puede variar cuando el biodiésel se utiliza como combustible o en mezclas para otras aplicaciones. En el país se aplica la Norma técnica peruana (NTP) 321.125 que se observa en la Tabla 3; con el objetivo de regular la calidad del biodiésel producido permitiendo un producto final adecuado, la cual también se tomó como base para cumplir con las especificaciones requeridas.

Tabla 3

Especificaciones del Biodiésel B100 de acuerdo a la Norma Técnica Peruana 321.125

Propiedad	Método de Ensayo (a)	Biodiésel B100	Unidades
Contenido de calcio y magnesio combinado	EN 14538	5 máx	ppm (mg/g)
Punto de Inflamación (Copa cerrada).	ASTM D93	93 mín.	° C
Control de Alcohol (uno de los siguientes debe ser cumplido)			
1. Contenido de Metanol.	EN 14110 ASTM	0.2 máx	% volumen
2. Punto de Inflamación.	ASTM D 93	130.0 mín	° C
Agua y Sedimento.	ASTM D 2709	0.050 máx %	volumen
Viscosidad Cinemática a 40 °C.	ASTM D445	1.9 – 6.0	mm ² /s
Ceniza Sulfatada.	ASTM D 874	0.020 máx	% masa
Azufre.	ASTM D5453	0.0015 máx	% masa (ppm)
Corrosión a la lámina de cobre.	ASTM D 130	Nº 3	-
Número de Cetano.	ASTM D 613	47 mín.	-
Punto nube.	ASTM D 2500	Reportar	°C
Residuo de carbón.	ASTM D 4530	0.050 máx	% masa
Número de acidez.	ASTM D 664	0.50 máx	

Propiedad	Método de Ensayo (a)	Biodiésel B100	Unidades
			Mg KOH / g
Glicerina libre .	ASTM D 6584	0.020 max.	% masa
Glicerina total.	ASTM D 6584	0.240 máx	% masa
Contenido de fósforo.	ASTM D 4951	0.001 máx	% masa
Temperatura de destilación.			
Temperatura del 90% de recuperado equivalente a presión atmosférica.	ASTM D 1160	360 máx	°C
Contenido de sodio y potasio, combinado.	EN 14538	5 máx.	ppm (µg / g)
Estabilidad a la oxidación.	EN 14112	3 min.	horas

Nota: Reproducido de la *NTP 321.125.2008*. P.13.

2.2.4.3 Norma Europea para Biodiésel EN 14214

La norma EN 14214 es el principal estándar europeo que establece los requisitos de calidad para el biodiésel destinado a ser utilizado como combustible en motores de ignición por compresión. Esta normativa define especificaciones fisicoquímicas que deben cumplir los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), con el fin de garantizar la seguridad, eficiencia y compatibilidad del biodiésel con los sistemas existentes de distribución y uso.

Entre los parámetros regulados por la norma se incluyen propiedades como la densidad, la viscosidad cinemática, el punto de inflamación, el contenido de ésteres, el índice de acidez, el contenido de azufre, entre otros. Estos límites están diseñados para asegurar que el biodiésel posea una calidad uniforme, minimice el impacto ambiental y pueda ser mezclado o sustituido por diésel convencional sin comprometer el funcionamiento de los equipos.

Aunque la presente investigación se basó principalmente en la norma ASTM D6751 para la validación de resultados, se hace referencia a la norma EN 14214 como complemento técnico y comparativo, la cual se observa en la Tabla 4, especialmente en lo que respecta a los rangos admisibles de propiedades relevantes del biodiésel. Esta comparación resulta útil para evaluar la conformidad del producto con estándares internacionales ampliamente reconocidos.

Tabla 4
Norma Europea para Biodiésel en 14214 – 2008

Propiedad	Límite		Unidad	Método de prueba
	Mín.	Máx.		
Contenido de éster	96.5			EN 14103
Punto de inflamación	101		°C	EN ISO 2719 EN ISO 3679
Contenido de metanol		0.2	% (m/m)	EN 14110
Contenido de agua		500	mg/kg	EN ISO 12937
Valor ácido		0.5	mg KOH / g	EN 14104
Ceniza sulfatada		0.02	% (m/m)	ISO 3987
Corrosión lámina de cobre	No. 1			EN ISO 2160
Residuo de carbono (10% residuo dist.)		0.3	% (m/m)	EN ISO 10370
Contaminación total		24	mg/kg	EN 12662
Densidad a 15°C	860	900	kg/m ³	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidad cinemática	3.5	5	mm ² /s	EN ISO 3104
Número de cetano	51			EN ISO 5165
Estabilidad de oxidación, 110°C	6		horas	EN 14112
Glicerina libre		0.02	% (m/m)	EN 14105 EN 14106
Glicerina total		0.24	% (m/m)	EN 14105
Contenido de monoglicéridos		0.8	% (m/m)	EN 14105
Contenido de diglicéridos		0.2	% (m/m)	EN 14105
Contenido de triglicéridos		0.2	% (m/m)	EN 14105
Índice de yodo		120	g yodo / 100 g	EN 14111
Contenido de ácido linolénico		12	% (m/m)	EN 14103
Contenido de fame con ≥ 4 enlaces dobles		1	% (m/m)	
Metales Grupo I (Na + K)		5	mg/g	EN 14108 EN 14109 EN 14538
Metales Grupo II (Ca + Mg)		5	mg/g	EN 14538
Azufre		10	mg/kg	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Contenido de fósforo		4	mg/kg	EN 14107

Nota: Reproducido de la Norma Europea para Biodiésel en 14214 – 2008

2.2.5 Transesterificación

De acuerdo con Lin L. (2011), la producción de biodiésel puede llevarse a cabo mediante diferentes rutas tecnológicas, las cuales han sido estudiadas en función de su viabilidad técnica y eficiencia de conversión. Entre las principales alternativas se consideran cuatro procesos:

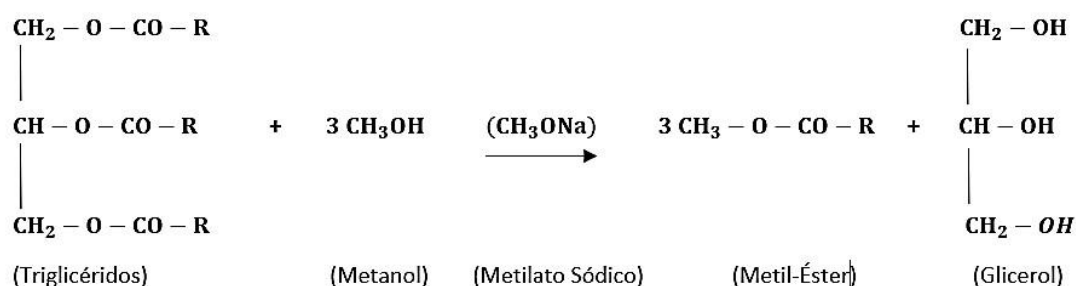
- El uso directo y mezcla, que consiste en la incorporación de aceite vegetal con diésel en distintas proporciones para su utilización como combustible.
- La preparación de micro emulsiones, en la cual al aceite vegetal se le adicionan alcoholes como metanol, etanol o 1-butanol, mejorando sus propiedades de combustión.
- La pirólisis o descomposición térmica del aceite en presencia de altas temperaturas, con o sin catalizadores, generando compuestos más ligeros.
- La reacción de transesterificación, considerada el método más utilizado a nivel industrial debido a su mayor eficiencia en la conversión de triglicéridos en ésteres (biodiésel) y glicerol.

Entre estos procesos, la transesterificación se ha consolidado como la ruta más eficiente y ampliamente aplicada, debido a que permite obtener un combustible con propiedades similares al diésel convencional, cumpliendo con estándares de calidad y rendimiento.

La transesterificación es el proceso químico principal mediante el cual se produce biodiésel a partir de aceites vegetales o grasas animales. Este proceso consiste en la reacción de los triglicéridos, que son los componentes mayoritarios de los aceites y grasas, con un alcohol de cadena corta, generalmente metanol, en presencia de un catalizador, para producir ésteres monoalquílicos de ácidos grasos (el biodiésel propiamente dicho) y glicerina como subproducto.

Desde el punto de vista químico, los triglicéridos están compuestos por una molécula de glicerol unida a tres cadenas de ácidos grasos. Durante la reacción de transesterificación, estas cadenas son liberadas y transformadas en ésteres metílicos, mientras que el glicerol se separa como un subproducto denso e inmiscible. Esta reacción puede representarse como una reacción reversible, por lo que requiere de condiciones cuidadosamente controladas para favorecer la conversión completa hacia biodiésel. La reacción global se ilustra en la Figura 1.

Figura 1
Reacción Principal de Transesterificación



El proceso puede llevarse a cabo utilizando diversos catalizadores, siendo los catalizadores homogéneos básicos —como el hidróxido de sodio (NaOH) o el hidróxido de potasio (KOH)— los más utilizados en aplicaciones industriales y experimentales debido a su alta eficiencia, bajo costo y disponibilidad. No obstante, la presencia de ácidos grasos libres y agua en el aceite puede interferir con el proceso al promover reacciones secundarias no deseadas, como la saponificación, que conlleva la formación de jabones, consumo del catalizador y dificultades en la separación de fases.

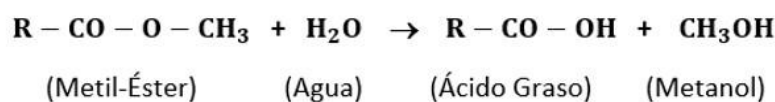
En condiciones favorables, la reacción de transesterificación catalítica se realiza a temperaturas moderadas (50–60 °C), con una velocidad de agitación constante, y puede alcanzar conversiones mayores al 90 %. Sin embargo, diversos factores operativos influyen directamente en la eficiencia del proceso, entre ellos la calidad del aceite, la concentración y

tipo de catalizador, el tiempo de reacción, la relación molar metanol:aceite, la temperatura y la intensidad de la agitación.

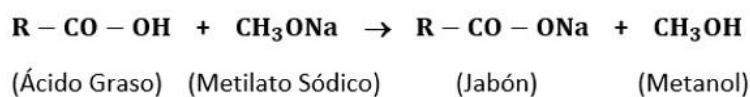
Además de la reacción principal, se deben considerar las reacciones secundarias que pueden ocurrir simultáneamente en el sistema. Una de las más comunes es la hidrólisis de los triglicéridos o de los ésteres metílicos, dando lugar a la formación de ácidos grasos libres, los cuales pueden reaccionar con el catalizador básico formando jabones. Esta saponificación afecta negativamente la eficiencia del proceso, disminuye la pureza del biodiésel y complica la separación de fases. Tales reacciones indeseadas se representan en la Figura 2, donde se muestran los principales mecanismos secundarios que impactan el rendimiento del proceso de transesterificación (Chakrabarty, 2012; Marchetti, 2007).

Figura 2
Reacciones Laterales

Hidrólisis de Metil-Éster



Saponificación



Por tanto, el control adecuado de las condiciones del proceso y la selección de los catalizadores más apropiados son aspectos fundamentales para lograr una producción de biodiésel eficiente, económica y técnicamente conforme con las normas de calidad, como la ASTM D6751.

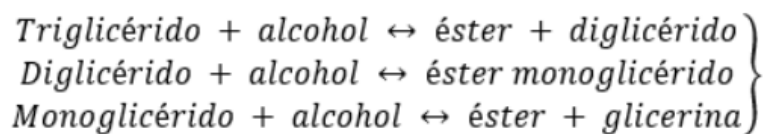
2.2.6 Mecanismo de reacción

La transesterificación es una reacción química fundamental para la producción de biodiésel, en la cual los aceites orgánicos (principalmente triglicéridos presentes en aceites vegetales o grasas animales) reaccionan con un alcohol de bajo peso molecular, como el metanol o etanol, en presencia de un catalizador homogéneo (básico o ácido). Esta reacción da lugar a la formación de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos (comúnmente conocidos como biodiésel) y glicerol como subproducto (Castro et al., 2007).

El mecanismo de reacción no ocurre en una sola etapa, sino a través de tres reacciones reversibles consecutivas, tal como se indica en la Figura 3:

Figura 3

Etapas reversibles de la reacción de transesterificación



Esta interacción genera una estructura intermedia conocida como intermedio tetraédrico, que se llama así porque el carbono involucrado queda temporalmente unido a cuatro átomos o grupos, adoptando una forma similar a una pirámide con base triangular, como un tetraedro.

Este intermedio es inestable y de corta duración: puede regresar a los compuestos originales o continuar la reacción para formar una molécula de biodiésel (éster) y un diglicérido. Luego, este proceso se repite dos veces más hasta llegar al monoglicérido y, finalmente, al glicerol como subproducto.

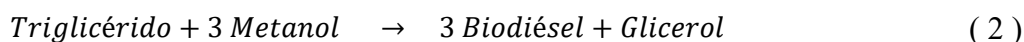
Como las reacciones son reversibles, es necesario aplicar ciertas condiciones (como usar más alcohol del necesario, controlar la temperatura y asegurar una buena mezcla) para

asegurar que la reacción avance hacia la formación de biodiésel y no se quede a la mitad del proceso.

2.2.7 Cinética de la reacción de transesterificación

La cinética de reacción estudia la velocidad a la que ocurre una reacción y los factores que la afectan. En el contexto de la producción de biodiésel por transesterificación catalítica se comprende que la cinética es fundamental para mejorar el proceso, maximizar el rendimiento y garantizar la calidad del producto final.

La transesterificación de triglicéridos con un alcohol (generalmente metanol) en presencia de un catalizador básico puede representarse mediante la siguiente reacción. La velocidad del proceso depende de factores como la concentración de los reactivos, la temperatura, el tipo y la cantidad de catalizador empleado, así como de la eficiencia de la agitación. A partir de esta reacción se establece también la relación estequiométrica utilizada.



Como ya se explicó la reacción de transesterificación ocurre en tres etapas reversibles entonces el análisis cinético se centra en la primera etapa, ya que, bajo condiciones de exceso de metanol, catalizador homogéneo y agitación controlada, esta suele ser la más lenta y la que determina el ritmo de todo el proceso. Por ello, aunque el mecanismo completo incluye varias etapas, la eficiencia global y el rendimiento del biodiésel dependen principalmente de la rapidez con la que el triglicérido se transforma en diglicérido y éster metílico. Las etapas posteriores (de diglicérido a monoglicérido y luego a glicerol) son mucho más rápidas y no limitan la producción, siempre que la primera etapa se realice de manera eficiente (Canakci & Van Gerpen, 2001; Meher et al., 2006).

2.2.7.1 Ecuación de velocidad y orden de reacción

La velocidad de reacción en la transesterificación puede expresarse mediante la ecuación de velocidad obtenida a partir del estudio cinético, la cual se denomina ecuación de velocidad de reacción para sistemas homogéneos:

$$v = k[\text{Triglicérido}]^m[\text{Metanol}]^n \quad (3)$$

Donde:

- v : velocidad de reacción (mol/L·s)
- k : constante de velocidad
- [Triglicérido] y [Metanol]: concentraciones de los reactivos
- m y n : órdenes de reacción respecto a cada reactivo

En sistemas no autorregulables, la reacción suele comportarse como modelo de proceso integrador con Tiempo Muerto (IPDT)

2.2.8 Parámetros del proceso de Transesterificación

2.2.8.1 Calidad de la materia prima

Para garantizar la obtención de un biodiésel de alta calidad, es fundamental utilizar un aceite vegetal residual que haya sido debidamente pretratado. Esto implica que el aceite debe estar limpio y libre de impurezas sólidas visibles o en suspensión, a través de un proceso de filtrado adecuado. Asimismo, es esencial que presente un bajo contenido de ácidos grasos libres, especialmente cuando se emplean catalizadores homogéneos básicos. Un contenido elevado de ácidos grasos libres puede interferir negativamente en la eficiencia de la reacción de transesterificación, promoviendo la formación de jabones (saponificación) y dificultando la separación de fases en el producto final.

La calidad del aceite puede ser evaluada mediante una serie de parámetros fisicoquímicos clave, entre los que destacan: el índice de acidez, que mide la cantidad de ácidos grasos libres presentes; el índice de peróxidos, que indica el grado de oxidación del aceite; el contenido de agua, que puede interferir en la acción del catalizador; y la presencia de

insolubles, que afectan directamente la eficiencia del proceso y la calidad del biodiésel obtenido (Tacias, Rosales & Torrestiana, 2016). Asimismo, la caracterización inicial del aceite vegetal residual mediante propiedades fisicoquímicas como densidad, viscosidad, índice de acidez y contenido de ácidos grasos libres constituye una etapa fundamental antes del proceso de transesterificación. Abdelhady et al. (2019) evaluaron estas propiedades en aceite de cocina usado, reportando valores de densidad, viscosidad e índice de acidez como parámetros determinantes para establecer la aptitud de la materia prima en la producción de biodiésel mediante catálisis básica. Estos autores resaltan que una adecuada caracterización permite seleccionar las condiciones de reacción y prevenir problemas asociados a la formación de jabón durante el proceso, los valores figuran en Tabla 5 a continuación:

Tabla 5
Resultados de caracterización fisicoquímica de aceite vegetal residual según bibliografía

Parámetro	Valores según bibliografía (Abdelhady et al.)
Densidad (g/cm³)	0.920
Viscosidad (mm²/s)	63.38
Índice de acidez (mg KOH/g)	3.08

2.2.8.2 Temperatura, tiempo de reacción y agitación.

La eficiencia del proceso de transesterificación depende en gran medida de parámetros operativos como la temperatura, el tiempo de reacción y la velocidad de agitación, los cuales influyen directamente en la cinética y el rendimiento del proceso. Según lo reportado en la literatura, la temperatura de reacción suele establecerse cercana al punto de ebullición del alcohol empleado, especialmente en el caso del metanol, cuyo valor es aproximadamente 64,5 °C a presión atmosférica. En este sentido, se recomienda operar en un rango de 60 a 65 °C, ya que estas condiciones favorecen la miscibilidad entre fases, incrementan la velocidad de reacción y optimizan la conversión de triglicéridos en ésteres (Stanescu et al., 2023).

A medida que la temperatura aumenta, la velocidad de reacción también mejora, lo que contribuye a un mayor rendimiento en menor tiempo. No obstante, más allá de cierto umbral, un aumento adicional de temperatura no produce mejoras significativas y puede incluso favorecer reacciones secundarias no deseadas o provocar la evaporación excesiva del alcohol.

Por otro lado, el tiempo de reacción debe ser suficiente para permitir que la transesterificación se complete, especialmente cuando se utilizan aceites residuales que pueden tener impurezas o una composición variable. Sin embargo, extender el tiempo más allá del necesario no genera una mejora proporcional en el rendimiento, por lo que es importante determinar una duración adecuada mediante experimentación.

La agitación continua cumple un rol fundamental, ya que permite una adecuada dispersión del alcohol y el catalizador en la fase oleosa, favoreciendo una mezcla homogénea y, por tanto, una mejor cinética de reacción. La velocidad de agitación debe ser cuidadosamente controlada dentro del reactor, ya que una agitación insuficiente puede limitar el contacto entre fases, mientras que una excesiva puede generar emulsiones difíciles de separar (Leung, D., Wu, X. & Leung, M. K., 2010).

2.2.8.3 Relación molar aceite:metanol

La relación molar entre el metanol y el aceite constituye uno de los parámetros más importantes en el proceso de transesterificación, debido a que influye directamente sobre la conversión de triglicéridos en ésteres metílicos y, por consiguiente, sobre el rendimiento de biodiésel obtenido. Este parámetro representa la proporción entre la cantidad de alcohol y el aceite vegetal utilizado durante la reacción.

Desde el punto de vista estequiométrico, la reacción de transesterificación requiere tres moles de alcohol por cada mol de triglicérido. Sin embargo, debido a que la reacción es reversible, en aplicaciones prácticas se emplea un exceso de metanol con la finalidad de

desplazar el equilibrio químico hacia la formación de biodiésel y mejorar la conversión del aceite vegetal residual (Fukuda et al., 2001; Gerpen et al., 2004). Diversas investigaciones reportan que relaciones molares metanol:aceite entre 6:1 y 9:1 permiten obtener conversiones elevadas y reducir la presencia de triglicéridos residuales en el producto final (Banerjee & Chakraborty, 2009; Schuchardt et al., 1998). No obstante, el uso excesivo de metanol puede generar dificultades en la separación de la glicerina, incrementar los costos de recuperación del alcohol y afectar la eficiencia global del proceso (Canakci & Van Gerpen, 2001).

La selección de una relación molar adecuada depende de factores como el tipo de aceite, la concentración del catalizador, la temperatura de reacción y las condiciones operativas del reactor. Por ello, este parámetro debe calcularse cuidadosamente para garantizar un equilibrio entre rendimiento, calidad del biodiésel y viabilidad del proceso. Además, diversos estudios señalan que la relación molar interactúa directamente con otras variables operativas, como la agitación y la temperatura, afectando la eficiencia de transferencia de masa y la velocidad global de reacción (Darnoko & Cheryan, 2000; Marchetti et al., 2005).

2.2.8.4 Tipo y concentración del catalizador

El catalizador cumple un papel esencial en el proceso de transesterificación, ya que incrementa la velocidad de la reacción y favorece un mayor rendimiento en la obtención de biodiésel. En ausencia de catalizadores, la reacción requeriría temperaturas superiores a los 250 °C para producirse eficientemente, lo cual resulta inviable a nivel técnico y económico. Por ello, la selección adecuada del tipo y concentración del catalizador es determinante, ya que influye directamente en la eficiencia del proceso, la pureza del producto final y la formación de subproductos no deseados, como los jabones.

Existen tres tipos principales de catalizadores utilizados en la producción de biodiésel: homogéneos, heterogéneos y enzimáticos. Sin embargo, en la presente investigación se utilizó

exclusivamente catalizadores homogéneos básicos, debido a su alta reactividad, bajo costo y amplio uso en aplicaciones a pequeña y mediana escala.

2.2.8.4.1 Catalizadores enzimáticos

Los catalizadores enzimáticos emplean enzimas, principalmente lipasas, para facilitar la reacción de transesterificación en condiciones suaves y altamente selectivas. Un ejemplo ampliamente utilizado en estudios de laboratorio es la *Candida antarctica*, comercialmente conocida como Novozym 435. Estas enzimas pueden actuar tanto en medios acuosos como no acuosos, y han demostrado ser eficaces incluso en sistemas con alta concentración de ácidos grasos libres.

Según Fukuda et al. (2001), las lipasas ya sean intracelulares o extracelulares—presentan ventajas notables frente a los catalizadores tradicionales (ácidos o bases), tales como la eliminación de problemas asociados a la presencia de ácidos grasos libres en el aceite (ya que estos son completamente convertidos en ésteres metílicos sin generar subproductos indeseados como los jabones), una mayor simplicidad en la separación de la glicerina (lo que reduce la complejidad de las etapas de purificación posteriores) y una eficiencia de conversión comparable a la lograda mediante catalizadores homogéneos o heterogéneos.

No obstante, a pesar de estas ventajas, su elevado costo y la necesidad de tiempos de reacción más prolongados limitan su aplicación a nivel industrial o en proyectos de bajo presupuesto, como es el caso de la presente investigación. Por estas razones, este estudio se enfoca en catalizadores homogéneos básicos, más accesibles y compatibles con condiciones experimentales controladas.

2.2.8.4.2 Catalizadores heterogéneos

El uso de catalizadores heterogéneos en la producción de biodiésel ofrece importantes ventajas operativas, principalmente por la facilidad de separación entre las fases reaccionantes

y el catalizador. Esta característica permite simplificar el proceso de purificación, reducir el uso de solventes y minimizar la generación de residuos líquidos, lo que a su vez disminuye los riesgos de corrosión y los costos asociados al tratamiento de efluentes (Kim et al., 2004).

No obstante, esta clase de catalizadores presenta algunas limitaciones técnicas. Entre ellas, destacan los desafíos en el control de la temperatura durante reacciones exotérmicas, las barreras de transferencia de masa entre las fases líquidas y sólidas, y la necesidad de que el catalizador posea alta resistencia mecánica y estabilidad térmica para soportar las condiciones de operación continuada.

Además, la preparación de catalizadores heterogéneos requiere un diseño cuidadoso para asegurar la correcta incorporación y distribución de sus componentes, tales como las especies activas, promotores químicos y promotores físicos. Estos elementos deben cumplir criterios específicos para mantener la actividad catalítica y la selectividad del proceso (Barrera, 2006).

Por estas razones, los catalizadores heterogéneos suelen requerir infraestructura y condiciones experimentales más complejas para su implementación a gran escala. No obstante, en la presente investigación se evaluó el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), como alternativa de menor costo y menor toxicidad frente a los hidróxidos alcalinos convencionales (NaOH , KOH). Sin embargo, la literatura reporta que la actividad. Por ello, se evaluó experimentalmente el desempeño del Ca(OH)_2 frente a los catalizadores alcalinos convencionales en las condiciones específicas del presente estudio.

2.2.8.4.3 Catalizadores homogéneos

Los catalizadores homogéneos, ampliamente utilizados en aplicaciones industriales debido a su bajo costo y facilidad de implementación, se caracterizan por disolverse completamente en la fase líquida de reacción, lo que permite una interacción más directa con

los reactivos. Entre sus principales ventajas destacan la posibilidad de operar bajo condiciones moderadas de temperatura y presión, la elevada velocidad de reacción y un aprovechamiento casi total del catalizador presente en el medio (Aracil, 2003). Estas condiciones favorecen rendimientos altos, que pueden alcanzar hasta un 98%, dependiendo del tipo de aceite empleado y del catalizador utilizado.

No obstante, la catálisis homogénea también presenta limitaciones importantes, como la formación de jabones por saponificación en presencia de ácidos grasos libres y agua, lo que dificulta la separación del biodiésel y la glicerina. Adicionalmente, se requiere una etapa posterior de purificación para eliminar restos de catalizador y subproductos, lo cual puede aumentar la complejidad del proceso. En el caso de los catalizadores ácidos, también deben considerarse los efectos corrosivos sobre los materiales del sistema de producción (Aracil, 2003).

A pesar de ello, estudios como el de Antolín et al. (2002), han demostrado que es posible obtener rendimientos superiores al 96% en la transesterificación del aceite de girasol con metanol empleando hidróxido de potasio como catalizador.

- Catalizadores básicos: Dentro de los catalizadores homogéneos, los **básicos** son los más utilizados en la industria del biodiésel por su alta eficiencia y menor agresividad frente a materiales de construcción. Entre los más comunes se encuentran el hidróxido de sodio (NaOH), el hidróxido de potasio (KOH) y el metóxido de sodio (CH₃ONa). El metóxido de sodio es altamente reactivo y permite alcanzar conversiones superiores al 98% en tiempos de reacción tan cortos como 30 minutos. Sin embargo, presenta una importante desventaja: requiere condiciones de absoluta ausencia de humedad, lo cual limita su

aplicabilidad en procesos industriales convencionales y eleva sus costos operativos.

En comparación, el NaOH y el KOH son más económicos, aunque menos activos. Aun así, se ha demostrado que con concentraciones entre 1% y 2% es posible obtener conversiones similares a las logradas con metóxidos (Schuchardt, 1998). Entre ambos, el NaOH es más fuerte, aunque el KOH tiene ventajas prácticas como su mayor facilidad de manejo y su potencial para generar subproductos valiosos, como fertilizantes potásicos, al ser neutralizado con ácido fosfórico (Darnoko et al., 2000).

El uso de catalizadores básicos se traduce en una mayor velocidad de reacción respecto a los catalizadores ácidos, con rendimientos cercanos al 98% en un rango de tiempo entre 60 y 90 minutos, y a temperaturas inferiores a 100 °C (Meher et al., 2004).

Según Fangrui y Milford (1999), estos catalizadores son los más empleados a nivel industrial, debido a la rápida conversión y la menor corrosividad del sistema. Sin embargo, su principal inconveniente es la saponificación, especialmente cuando el aceite presenta altos niveles de ácidos grasos libres y humedad.

De acuerdo con Gerpen (2004), cuando el contenido de ácidos grasos libres es inferior al 5%, es viable emplear un catalizador básico añadiendo una dosis adicional para neutralizar los ácidos grasos libres.

- Catalizadores ácidos: Tales como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido clorhídrico (HCl), son efectivos para procesar aceites con alto contenido de

ácidos grasos libres, ya que permiten evitar la saponificación, problema común con catalizadores básicos. Sin embargo, su uso implica tiempos de reacción más largos, mayores temperaturas operativas y equipos resistentes a la corrosión, lo que incrementa los costos y complica el proceso de purificación (Fukuda et al., 2001; Schuchardt et al., 1998).

En el presente estudio no se utilizaron catalizadores ácidos, ya que el aceite vegetal residual empleado fue previamente filtrado y tratado para reducir su contenido de ácidos grasos libres, permitiendo así el uso eficiente de catalizadores básicos. Además, la investigación se enfocó en una alternativa más económica y operativamente sencilla, orientada a futuras aplicaciones a pequeña escala o en contextos descentralizados, donde los ácidos resultarían poco viables.

2.2.9 Control del proceso

El control de procesos constituye una herramienta fundamental en los sistemas químicos e industriales, ya que permite mantener las variables operativas dentro de condiciones adecuadas para garantizar la estabilidad, seguridad y eficiencia del proceso. En la producción de biodiésel mediante transesterificación, variables como la temperatura y la velocidad de agitación influyen directamente sobre la velocidad de reacción, la conversión de triglicéridos y la calidad del producto final. Por ello, la implementación de sistemas de control automático permite mejorar la reproducibilidad experimental y mejorar el desempeño del reactor batch.

2.2.9.1. Variables del proceso

En el proceso de transesterificación, las principales variables relacionadas con el control automático corresponden a la temperatura y la velocidad de agitación. La temperatura influye directamente sobre la velocidad de reacción y la transferencia de masa entre el alcohol

y el aceite vegetal residual, mientras que la agitación favorece la homogenización de las fases inmiscibles y mejora el contacto entre reactivos.

La variable controlada corresponde a la temperatura del reactor, debido a que la reacción de transesterificación requiere mantenerse dentro de un intervalo térmico adecuado para evitar pérdidas de metanol por evaporación y garantizar una conversión eficiente. Por otro lado, la variable manipulada está asociada a la potencia suministrada al sistema de calentamiento mediante resistencias eléctricas. Asimismo, la velocidad de agitación constituye una variable importante para mantener una mezcla homogénea durante el proceso. Una agitación insuficiente puede limitar la transferencia de masa entre las fases, mientras que velocidades excesivas pueden generar turbulencias innecesarias y afectar la estabilidad operacional del sistema.

Las perturbaciones presentes en el proceso pueden estar asociadas a pérdidas de calor, variaciones en las propiedades del aceite vegetal residual y cambios en la composición de la mezcla reactiva. Por esta razón, el empleo de sistemas de control automático contribuye a mantener condiciones estables durante la reacción.

- ***Control de Temperatura***

El control de temperatura del sistema se realizará mediante un controlador térmico instalado en la parte inferior del reactor, conectado a una resistencia eléctrica. Este dispositivo permitirá regular y mantener la temperatura del proceso dentro del rango óptimo para la reacción de transesterificación. Dado que esta reacción se ve favorecida a temperaturas cercanas al punto de ebullición del metanol (aproximadamente 64.5 °C), se ajustará el sistema para operar en un intervalo que maximice la conversión sin pérdidas significativas por evaporación. El monitoreo continuo de la temperatura es fundamental para garantizar la reproducibilidad y eficiencia del proceso.

En procesos químicos como la transesterificación, la dinámica térmica del reactor puede describirse mediante un modelo integrador con Tiempo Muerto (IPDT), que representa la respuesta del sistema ante cambios en la señal de control considerando el tiempo de retardo entre la acción y la respuesta. Para el diseño y sintonización de controladores en procesos integradores, Chien y Fruehauf (1990) proponen dos enfoques basados en el método de Control por Modelo Interno (IMC), denominados Modelo M y Modelo N:

- **Modelo M:** Considera que el retardo ocurre completamente antes de la dinámica del sistema, generando los parámetros de un controlador Proporcional-Integral (PI).
- **Modelo N:** Distribuye el retardo de forma distinta dentro de la formulación, incorporando adicionalmente un término derivativo (T_d), lo que resulta en un controlador PID.

El enfoque Control por Modelo Interno (Internal Model Control) es una metodología de diseño que utiliza un modelo matemático del proceso para calcular los parámetros óptimos del controlador (PI/PID). El IMC no es un controlador en sí, sino una estrategia que facilita la obtención de controladores robustos y fáciles de sintonizar, especialmente en procesos con retardo y dinámica lenta como los térmicos. En este estudio, el IMC permitió ajustar el controlador PI para mantener la temperatura del reactor dentro del rango óptimo, evitando sobreoscilaciones y asegurando la estabilidad térmica necesaria para una conversión eficiente.

La correcta aplicación de estos modelos y estrategias de control garantiza la estabilidad operativa del reactor, optimizando la conversión de aceite vegetal residual en biodiésel y asegurando el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos por las normas técnicas.

Adicionalmente, el sensor de temperatura empleado para la retroalimentación del lazo de control correspondió a un termopar instalado en el reactor, cuya señal fue acondicionada y digitalizada para su procesamiento en la interfaz LabVIEW.

- ***Control de la velocidad de agitación***

La agitación constituye una variable operativa importante en el proceso de transesterificación, debido a que favorece el contacto entre el aceite vegetal residual y el metanol. Estos reactivos presentan una miscibilidad limitada al inicio de la reacción, por lo que una agitación adecuada mejora su dispersión, incrementa el área de contacto entre las fases y favorece la transferencia de masa.

Un sistema de agitación puede estar constituido por un motor eléctrico acoplado mecánicamente a un eje agitador y por un dispositivo encargado de establecer la referencia de velocidad. Esta referencia puede generarse mediante un potenciómetro, cuya posición angular produce una señal analógica de tensión proporcional al nivel seleccionado.

La señal del potenciómetro puede ser adquirida por un microcontrolador mediante un conversor analógico-digital. De esta forma, la señal analógica es transformada en una lectura digital que puede normalizarse y relacionarse con un nivel nominal de velocidad. Las conexiones entre estos elementos pueden realizarse mediante una protoboard, utilizada únicamente para la interconexión eléctrica de la alimentación, la señal y la referencia de tierra. La marcha y parada del motor pueden ejecutarse mediante una señal digital y un módulo de relés. Debe distinguirse esta función ON/OFF del ajuste de la velocidad, debido a que el relé únicamente conecta o interrumpe la alimentación eléctrica y no regula continuamente la velocidad de rotación.

Cuando el nivel de velocidad se establece mediante una referencia previamente seleccionada y no existe una medición directa de las revoluciones del eje, el sistema opera en

lazo abierto. En este caso, la velocidad establecida corresponde a una condición nominal de operación y no a una variable medida mediante retroalimentación.

Las perturbaciones asociadas a la agitación pueden originarse por variaciones en la viscosidad, densidad, volumen y composición de la mezcla reactiva, así como por cambios en la carga mecánica aplicada al eje. Estas condiciones pueden afectar el esfuerzo requerido por el motor y la homogeneidad de la mezcla durante la transesterificación.

El Arduino Mega dispone de un conversor analógico-digital de 10 bits. Por tanto, el número de niveles digitales disponibles se determina mediante:

$$2^{10} = 1024$$

Debido a que la numeración comienza en cero, el rango de lectura digital se encuentra comprendido entre 0 y 1023:

$$ADC_{max} = 2^{10} - 1 = 1023$$

conversión de la señal de tensión a una lectura digital se expresa mediante la Ecuación 4:

$$ADC = ADC_{min} + \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} (ADC_{max} - ADC_{min}) \quad (4)$$

Donde:

ADC: lectura digital obtenida por el Arduino.

V: tensión generada por el potenciómetro.

Vmin: tensión mínima de entrada.

Vmax: tensión máxima de entrada.

ADCmin: lectura digital mínima.

ADCmax: lectura digital máxima.

Para un rango de tensión de 0 a 5 V y una lectura digital comprendida entre 0 y 1023, la expresión se simplifica a:

$$ADC = \frac{V}{5} \times 1023$$

La resolución de la conversión analógica puede determinarse mediante la Ecuación 5:

$$R_{ADC} = \frac{V_{ref}}{2^n - 1} \quad (5)$$

Para una tensión de referencia de 5 V y una resolución de 10 bits:

$$R_{ADC} = \frac{5}{1023}$$

$$R_{ADC} \approx 0.00489 \text{ V/bit}$$

Por tanto, cada incremento de una unidad en la lectura digital representa aproximadamente 4.89 mV de variación en la señal analógica.

La lectura digital también puede normalizarse como porcentaje del rango total a partir de la Ecuación 6:

$$P = \frac{ADC - ADC_{min}}{ADC_{max} - ADC_{min}} \times 100 \quad (6)$$

Donde P prepresenta el porcentaje de la señal analógica asociado a la posición de la perilla.

Cuando se considera una relación lineal entre la lectura digital y el rango nominal de velocidad, la velocidad de referencia se expresa a partir de la Ecuación 7:

$$N_{\text{ref}} = N_{\text{min}} + \frac{ADC - ADC_{\text{min}}}{ADC_{\text{max}} - ADC_{\text{min}}} (N_{\text{max}} - N_{\text{min}}) \quad (7)$$

Donde:

N_{ref} : velocidad nominal o de referencia, expresada en rpm.

N_{min} : velocidad mínima asociada al rango de la señal.

N_{max} : velocidad máxima asociada al rango de la señal.

ADC_{min} : lectura digital mínima.

ADC_{max} : lectura digital máxima.

Para un intervalo nominal comprendido entre 0 y 1400 rpm y un rango digital de 0 a 1023, la relación se simplifica a:

$$N_{\text{ref}} = \frac{ADC}{1023} \times 1400$$

De forma inversa, la lectura digital requerida para establecer una velocidad nominal determinada se calcula mediante:

$$ADC = \frac{N_{\text{ref}}}{1400} \times 1023$$

Esta relación permite asociar teóricamente la posición de la perilla y la lectura del Arduino con una velocidad nominal de agitación. Por ejemplo, el 50 % del rango de la señal corresponde aproximadamente a una lectura de 512 unidades ADC; el 75 %, a 767 unidades ADC; y el 100 %, a 1023 unidades ADC.

La conversión descrita supone una relación lineal entre la posición del potenciómetro, la señal analógica adquirida por el Arduino y la velocidad nominal asignada. En consecuencia, el valor calculado representa una referencia teórica de operación y no una medición directa de

la velocidad angular del eje. Al no existir una señal de retroalimentación de velocidad, el sistema no corresponde a un lazo cerrado de control de rpm, sino a un ajuste manual de velocidad combinado con un mando digital de marcha y parada.

2.2.9.2 Función de transferencia

El análisis del comportamiento dinámico del sistema térmico del reactor batch se realizó con el propósito de desarrollar un modelo matemático que describa la relación entre la señal de control aplicada al sistema de calentamiento y la respuesta de temperatura del reactor durante el proceso de transesterificación.

En reactores discontinuos (batch), durante la etapa de calentamiento, la energía suministrada por la resistencia eléctrica se acumula progresivamente en el medio reaccionante, ocasionando un incremento continuo de la temperatura mientras exista aporte de calor. Debido a la ausencia de un mecanismo de autorregulación en estas condiciones, el proceso presenta un comportamiento dinámico integrador, por lo que puede representarse mediante un Modelo de Proceso Integrador con Tiempo Muerto (Integrating Process with Dead Time, IPDT) (Skogestad, 2003).

La función de transferencia correspondiente a este tipo de proceso se expresa mediante la Ecuación 8:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{s} \quad (8)$$

Donde:

- K: Ganancia estática del proceso
- Θ : Tiempo muerto o retardo
- s: Variable del dominio de Laplace.

Este tipo de modelamiento es ampliamente utilizado en procesos térmicos debido a que permite describir adecuadamente la dinámica del sistema y facilita el diseño de estrategias de control automático.

2.2.9.3 Controladores PI y PID

Los controladores Proporcional-Integral (PI) y Proporcional-Integral-Derivativo (PID) son ampliamente utilizados en procesos industriales debido a su capacidad para mantener variables operativas dentro de valores deseados y reducir el error entre la señal medida y el punto de referencia. El controlador PI combina una acción proporcional y una acción integral. La acción proporcional responde de manera inmediata al error presente en el sistema, mientras que la acción integral elimina el error estacionario acumulado con el tiempo. Debido a su simplicidad y buen desempeño en procesos térmicos, el controlador PI es uno de los más empleados en reactores batch. Por otro lado, el controlador PID incorpora adicionalmente una acción derivativa, la cual permite anticipar cambios en la respuesta del sistema y mejorar la estabilidad dinámica.

La implementación de estos controladores permite reducir fluctuaciones térmicas, mejorar la estabilidad del proceso y mejorar las condiciones de reacción durante la producción de biodiésel.

2.2.9.4 Controlador por Modelo Interno (IMC)

El Control por Modelo Interno (Internal Model Control – IMC) es una metodología de diseño de controladores basada en el uso de un modelo matemático que representa el comportamiento dinámico del proceso. Este enfoque permite calcular parámetros de sintonización para controladores PI o PID, proporcionando una respuesta estable y robusta ante perturbaciones del sistema.

El método IMC es ampliamente utilizado en sistemas térmicos debido a que facilita el ajuste de controladores en procesos con dinámica lenta y presencia de tiempo muerto. Asimismo, permite obtener respuestas suaves y con menor sobreoscilación en comparación con otros métodos de sintonización convencionales.

En procesos de transesterificación, el uso de estrategias IMC contribuye a mantener la temperatura del reactor dentro de rangos adecuados, favoreciendo la estabilidad operacional y la eficiencia de conversión del aceite vegetal residual en biodiésel.

2.2.9.4.1. Modelos M y N: Aproximaciones del sistema con retardo

Para interpretar y sintonizar el comportamiento dinámico del sistema con retardo, se recurrió a dos aproximaciones analíticas propuestas originalmente por Chien y Fruehauf (1990). Ambos esquemas matemáticos pertenecen a la familia de las reglas de sintonización basadas en el Modelo de Proceso Integrador con Tiempo Muerto (IPDT) en el marco del Control de Modelo Interno (IMC). La diferencia fundamental entre ambas alternativas radica en la aproximación utilizada para linealizar el término exponencial del tiempo muerto y en el tipo de controlador industrial resultante.

- a) **Modelo M:** Este modelo considera que el retardo se produce completamente antes de que inicie la dinámica del sistema. Es simple y útil para sintonizaciones rápidas, generando los parámetros de un controlador Proporcional-Integral (PI). Las ecuaciones que forman parte de este modelo se observan en la ecuación 9.
- b) **Modelo N:** En este modelo, el retardo se considera parcialmente distribuido dentro de la dinámica del sistema, lo cual representa mejor la realidad de muchos procesos industriales, incorporando adicionalmente un término derivativo (T_d), lo que resulta en un controlador PID. A continuación, se muestra las ecuaciones de los modelos M y N empleadas para la sintonización del controlador PI

$$\begin{array}{lclclcl}
M & \frac{Ke^{-\theta s}}{s} & \frac{2\tau_c + \theta}{(\tau_c + \theta)^2} & 2\tau_c + \theta & - & \\
N & \frac{Ke^{-\theta s}}{s} & \frac{2\tau_c + \theta}{(\tau_c + \frac{\theta}{2})^2} & 2\tau_c + \theta & \frac{\tau_c\theta + \frac{\theta^2}{4}}{2\tau_c + \theta} & (9)
\end{array}$$

Donde:

- Kc: Ganancia proporcional
- τ_c : Constante de tiempo efectiva del sistema (sin retardo).
- θ : Tiempo de retardo puro (en segundos).

2.2.9.5 Interfaz HMI y Labview

Las interfaces Hombre-Máquina (HMI, Human Machine Interface) permiten supervisar y controlar variables de proceso mediante representaciones gráficas en tiempo real. Estas interfaces facilitan la visualización de parámetros operativos como temperatura, velocidad de agitación y estado de los actuadores.

LabVIEW es una plataforma de programación gráfica ampliamente utilizada en sistemas de automatización y adquisición de datos. Su aplicación en procesos industriales permite integrar sensores, módulos de adquisición y estrategias de control dentro de una misma interfaz de monitoreo.

El uso de interfaces HMI desarrolladas en LabVIEW facilita el seguimiento continuo del comportamiento del reactor batch, permitiendo registrar variables operativas, supervisar la estabilidad del sistema y mejorar la reproducibilidad experimental del proceso de producción de biodiésel.

2.2.9.5 Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID)

El Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID, por sus siglas en inglés) constituye una herramienta gráfica fundamental en la ingeniería de procesos, ya que representa de manera detallada los equipos, líneas de proceso, instrumentos de medición y lazos de control que

conforman un sistema. Este diagrama ofrece una visión general de las operaciones unitarias, el P&ID incorpora el nivel de detalle necesario para la construcción, operación y mantenimiento de un sistema, incluyendo la instrumentación específica asociada a cada variable controlada.

La simbología empleada en los P&ID se encuentra normalizada internacionalmente mediante el estándar ISA S5.1 (Instrumentation, Systems, and Automation Society), el cual establece un sistema de codificación alfanumérico para identificar cada instrumento según la variable que mide o controla (primera letra) y su función específica dentro del lazo (letras siguientes), acompañado de un número de identificación del lazo o equipo correspondiente.

La elaboración de un P&ID en la etapa de diseño de un proceso permite anticipar los requerimientos de instrumentación y control, facilitar la comunicación entre las distintas etapas de un proyecto de ingeniería, y servir como referencia documental para la operación segura del sistema.

2.2.10 Proceso de purificación

La purificación del biodiésel obtenido mediante transesterificación es una etapa fundamental para garantizar la calidad del producto final. Este proceso consiste principalmente en una serie de lavados sucesivos con agua, cuyo objetivo es remover los residuos de metanol, catalizador, jabones, glicerol y otras impurezas presentes en la fase de metil-ésteres.

En una primera etapa, se realiza una neutralización química para estabilizar la mezcla y facilitar la eliminación de compuestos básicos o ácidos. Posteriormente, se llevan a cabo lavados con agua tibia y reposos entre etapas, permitiendo que las impurezas solubles migren hacia la fase acuosa, que luego es separada cuidadosamente.

Según Pérez (2020), este procedimiento permite eliminar de forma progresiva los residuos que afectan la estabilidad y desempeño del biodiésel. Asimismo, Romano y Sorichetti (2010) señalan que los efluentes generados en este proceso están compuestos mayoritariamente

por el agua de lavado, la cual contiene cantidades variables de metanol, catalizador residual y trazas de glicerol, por lo que su adecuado tratamiento también es necesario para minimizar impactos ambientales.

2.2.11 Productos de la Transesterificación

En la Tabla 6 se muestra un resumen de las fracciones de productos que se obtienen a partir de la transesterificación.

Tabla 6

Productos obtenidos a partir del proceso de Transesterificación

Producto de la transesterificación	
Biodiésel	Glicerina
El biodiésel es un combustible renovable y una alternativa energética.	Compuesto no tóxico, no irritante, biodegradable y reciclable. Contiene una serie de propiedades químicas y físicas que pueden convertirlo en un disolvente alternativo a los disolventes orgánicos convencionales.
Al obtener biodiésel por el proceso de transesterificación el producto tendrá una mejor apariencia y un color más claro.	
El pH del biodiésel terminado debe variar entre 6 y 7, debe ser de un carácter ligeramente ácido.	Tiene un punto alto de ebullición, escasa presión de vapor, y estabilidad en condiciones normales de presión y temperatura.
	Debido a sus cualidades puede utilizarse como humectante, plastificante, espesante, lubricante, endulzante y anticongelante. También es utilizado en la cosmética, artículos de aseo, medicamentos y productos alimenticios

Fuente: Biodiesel fuel quality and the ASTM standard

2.3 Marco Conceptual

2.3.1. Biocombustible

Los biocombustibles son combustibles derivados de materia orgánica, como plantas, algas o desechos orgánicos, que se pueden utilizar en lugar de los combustibles fósiles convencionales para generar energía (Demirbas, 2009).

Hay varios tipos de biocombustibles, como el bioetanol, el biodiésel, el biogás y el biometano. Cada uno se produce a partir de diferentes fuentes y utiliza diferentes procesos de producción (Kalam et al., 2015)

2.3.2. Biodiésel

El biodiésel es un combustible alternativo que se produce mediante la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales con alcohol, lo que da como resultado una mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos (Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001)

2.3.3 Transesterificación

La transesterificación es un proceso químico que permite la transformación de los lípidos en ésteres de ácidos grasos, como el biodiésel (Nigam et al., 2011). Y puede llevarse a cabo mediante diferentes catalizadores, como los catalizadores ácidos o básicos, y mediante diferentes procesos, como la transesterificación homogénea o heterogénea (Zhang et al., 2003)

2.3.4 Reactor Batch

Un reactor batch, también denominado reactor por lotes o reactor discontinuo, es un equipo químico en el que una cantidad determinada de reactivos se introduce al inicio del proceso, permitiendo que la reacción transcurra en un sistema cerrado sin flujo de entrada ni salida de materia durante la operación. Una vez alcanzado el grado de conversión deseado, los productos son extraídos en su totalidad. Este tipo de reactor opera en condiciones no estacionarias y permite un control preciso de variables como la temperatura, el tiempo de

reacción y la agitación, lo que lo hace adecuado para procesos de producción a pequeña escala y en la industria química especializada (Chemical Engineering, s.f.; Ingeniería Química Reviews, 2020).

En esta investigación se empleará un reactor tipo batch, ya que se adapta con facilidad a distintos volúmenes de carga y tipos de materias primas. Asimismo, facilita la repetición y control de condiciones experimentales necesarias para la optimización del proceso de obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal residual.

2.3.5 Pruebas Experimentales

Las pruebas experimentales se refieren a la repetición sistemática de una misma prueba o experimento con el propósito de obtener resultados consistentes y confiables. Estas repeticiones permiten evaluar la variabilidad de los datos, identificar posibles errores o anomalías y garantizar la reproducibilidad de los resultados bajo condiciones controladas. De acuerdo con la literatura científica, la repetición de experimentos es fundamental para validar los resultados y asegurar la confiabilidad de las conclusiones obtenidas (Montgomery, 2017).

2.3.6 Análisis de los productos

El análisis de los productos consiste en la evaluación de las propiedades físico-químicas del biodiésel con el fin de verificar su calidad y cumplimiento con normas técnicas establecidas. Este proceso involucra la determinación de parámetros como la densidad, viscosidad cinemática y punto de inflamación, los cuales permiten evaluar el comportamiento del combustible en condiciones de almacenamiento, transporte y uso en motores diésel. Estas propiedades son fundamentales para asegurar que el biodiésel cumpla con estándares internacionales de calidad (Knothe et al., 2015).

2.3.6.4 Densidad

La densidad es una propiedad física que relaciona la masa y el volumen de una sustancia. En el caso del biodiésel, esta propiedad influye directamente en el proceso de combustión y en el sistema de inyección del motor. Valores adecuados de densidad permiten una correcta atomización del combustible, contribuyendo a una combustión eficiente y estable (Knothe et al., 2015).

2.3.6.5 Viscosidad Cinemática

La viscosidad cinemática es una medida de la resistencia de un fluido al flujo bajo la acción de la gravedad. En el biodiésel, esta propiedad es crucial, ya que afecta la atomización del combustible en los inyectores, la formación de la mezcla aire–combustible y el rendimiento del motor. Una viscosidad inadecuada puede provocar problemas operativos como mala combustión y formación de depósitos (Demirbas, 2009).

2.3.6.6 Punto de Inflamación

El punto de inflamación es la temperatura mínima a la cual un líquido genera vapores capaces de formar una mezcla inflamable en presencia de una fuente de ignición. Esta propiedad es fundamental para evaluar la seguridad del biodiésel durante su almacenamiento, manipulación y transporte. Un punto de inflamación elevado indica menor riesgo de incendio, lo que hace que el biodiésel sea más seguro que los combustibles fósiles convencionales (Demirbas, 2009).

2.3.6.7 Normas de Calidad del Biodiesel

Las normas de calidad del biodiésel establecen los requisitos que deben cumplir sus propiedades fisicoquímicas para garantizar su uso seguro y eficiente en motores diésel. Entre las principales normas se encuentran la ASTM D6751, utilizada en América, y la EN 14214, empleada en Europa, las cuales definen parámetros como densidad, viscosidad y punto de

inflamación. Asimismo, la Norma Técnica Peruana (NTP 321.125) adapta estos criterios al contexto nacional, asegurando el cumplimiento de estándares de calidad en el biodiésel comercializado (Knothe et al., 2015).

2.3.7 Saponificación de ácidos

La saponificación es una reacción química en la cual los ácidos grasos libres reaccionan con una base fuerte, como hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH), para formar sales de ácidos grasos (jabones) y glicerol como subproducto. Este proceso, aunque es la base de la fabricación de jabones, representa un inconveniente en la producción de biodiésel, ya que interfiere con la transesterificación y dificulta la separación del metiléster y la glicerina, disminuyendo así el rendimiento final del proceso (Mohd Zahid et al., 2020).

2.3.13 Sensores de Temperatura

Los sensores son dispositivos diseñados para detectar cambios en variables físicas o químicas del entorno y transformarlos en señales que pueden ser interpretadas por sistemas de control. De acuerdo con Fraden (2010), un sensor es un dispositivo que responde a estímulos del entorno y convierte dicha respuesta en una señal útil para su procesamiento.

En el caso de la temperatura, esta variable es crítica en numerosos procesos industriales, por lo que su medición precisa es esencial para garantizar la estabilidad y eficiencia de las operaciones. Entre los sensores más utilizados destacan los termopares, los cuales funcionan mediante el efecto termoeléctrico, generando un voltaje proporcional a la diferencia de temperatura entre dos materiales distintos. Estos sensores se caracterizan por su amplio rango de medición, rápida respuesta y alta resistencia a condiciones adversas, lo que los hace adecuados para sistemas automatizados de control de procesos.

2.3.8 Triglicéridos

Los triglicéridos son moléculas lipídicas compuestas por una molécula de glicerol unida a tres ácidos grasos mediante enlaces éster. Constituyen la forma predominante de lípidos en los aceites vegetales y grasas animales, y son los principales compuestos sometidos a transesterificación para la producción de biodiésel. Su estructura química los convierte en precursores ideales para la obtención de ésteres metílicos (Hussain et al., 2021).

2.3.9 Diglicérido

Los diglicéridos son compuestos formados por la unión de dos ácidos grasos a una molécula de glicerol. En el proceso de transesterificación, se generan como intermedios durante la conversión secuencial de triglicéridos en monoglicéridos y, finalmente, en biodiésel. Aunque también se utilizan como emulsionantes en la industria alimentaria, su presencia en este contexto indica una reacción incompleta si persisten en el producto final (Garti y Aserin, 2010).

2.3.10 Monoglicérido

Los monoglicéridos están formados por la unión de un ácido graso a una molécula de glicerol, y representan el último intermedio antes de la conversión total a metil éster en la transesterificación. Al igual que los diglicéridos, su detección en el producto final puede ser señal de una reacción parcial o de condiciones operativas inadecuadas en el proceso. Además de su uso industrial como emulsionantes, tienen relevancia en el control de calidad del biodiésel (Garti y Aserin, 2010).

2.3.11 Glicerina

La glicerina, también conocida como glicerol, es un subproducto inevitable en la producción de biodiésel mediante el proceso de transesterificación de aceites vegetales o grasas animales (Atadashi et al., 2011). Este compuesto ha sido ampliamente caracterizado en la

literatura científica, destacando sus propiedades fisicoquímicas y su versatilidad como insumo industrial.

Según diversos estudios, la obtención de glicerina puede clasificarse según el tipo de reacción química involucrada: saponificación, hidrólisis y transesterificación. De estos procesos, la transesterificación es el que produce una menor cantidad de glicerina y con un mayor contenido de impurezas; sin embargo, es también el más ampliamente empleado en la industria del biodiésel debido a su eficiencia y aplicabilidad.

2.3.12 Automatización

La automatización se define como la aplicación de sistemas tecnológicos que permiten operar y controlar procesos con mínima intervención humana, mediante el uso de dispositivos electrónicos, mecánicos y computarizados. En el ámbito industrial, esta disciplina facilita el monitoreo, supervisión y control de procesos productivos, mejorando la eficiencia, precisión y seguridad operativa. Asimismo, contribuye a la reducción de errores humanos y garantiza la repetibilidad de las operaciones, siendo fundamental en procesos donde se requiere el control continuo de variables como temperatura, presión y flujo. Según Marengo y Pereyra (2019), la automatización implica la integración de sistemas capaces de ejecutar tareas de forma autónoma, optimizando recursos y aumentando la productividad en entornos industriales.

2.3.14 Microcontrolador

El microcontrolador es un dispositivo electrónico integrado que constituye un elemento fundamental en los sistemas de automatización y control, al permitir el procesamiento y la gestión de señales provenientes de sensores y actuadores. Según Mazidi et al. (2008), un microcontrolador es un sistema completo contenido en un solo chip que integra una unidad central de procesamiento (CPU), memoria y periféricos de entrada y salida, lo cual le permite ejecutar tareas de control en tiempo real.

En aplicaciones industriales y experimentales, los microcontroladores permiten la supervisión y el control de variables de proceso, facilitando la implementación de sistemas automatizados. Su bajo consumo energético, flexibilidad y capacidad de programación los convierten en herramientas ampliamente utilizadas en sistemas de control modernos.

2.3.15 Control PID

El control PID (Proporcional–Integral–Derivativo) es una técnica de control ampliamente utilizada en sistemas industriales para regular variables de proceso como temperatura, presión o nivel. Este controlador actúa en función del error existente entre el valor medido y el valor deseado, aplicando tres acciones: proporcional, integral y derivativa, con el objetivo de mejorar la estabilidad, reducir el error y optimizar la respuesta del sistema.

Según Åström y Hägglund (2006), el controlador PID es uno de los métodos más utilizados en el control de procesos debido a su simplicidad y eficacia en una amplia variedad de aplicaciones. Su implementación permite mantener condiciones operativas constantes, lo cual resulta fundamental en procesos como la transesterificación, donde el control de la temperatura influye directamente en el rendimiento y la calidad del biodiésel.

2.4 Enfoque, Tipo y Alcance de la Investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, dado que se basa en la recolección, medición objetiva y análisis estadístico de variables numéricas críticas, tales como la temperatura (°C), la velocidad de agitación (RPM), la relación molar aceite:metanol y el rendimiento porcentual en la obtención de biodiésel (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018). Asimismo, el estudio posee un alcance explicativo y correlacional; esto se debe a que no solo busca establecer el grado de relación existente entre los parámetros operacionales, sino que persigue demostrar y explicar las causas fisicoquímicas y cinéticas por las cuales la manipulación y el control riguroso de la transferencia de masa, energía y la proporción de

reactivos optimizan la conversión del aceite vegetal residual en biocombustible (Méndez et al., 2014; Soria y Ramírez, 2020).

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis General

El control adecuado de la temperatura y la velocidad de agitación en un reactor discontinuo mejora el rendimiento del proceso de obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal residual mediante transesterificación catalítica, permitiendo obtener un producto con propiedades fisicoquímicas dentro de los estándares de calidad establecidos.

2.5.2 Hipótesis Específicas

Las propiedades fisicoquímicas del biodiésel obtenido a partir de aceite vegetal residual cumplen con los parámetros establecidos por las normas ASTM D6751 y NTP 321.125 cuando el proceso de transesterificación se realiza bajo condiciones operativas controladas.

El tipo de catalizador empleado (NaOH , KOH y Ca(OH)_2) influye significativamente en el rendimiento del proceso de transesterificación, obteniéndose diferentes porcentajes de conversión y producción de biodiésel.

Las variables operativas de temperatura, velocidad de agitación y relación molar aceite:metanol influyen significativamente en el rendimiento de producción de biodiésel a partir de aceite vegetal residual.

La implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad de agitación en un reactor discontinuo permite regular las condiciones operativas del proceso de transesterificación catalítica para la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal residual.

CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS

Las pruebas experimentales tendrán la siguiente disposición

3.1 Población y Muestra

La muestra analizada estuvo conformada por aceite de cocina usado recolectado de restaurantes de comida rápida, compuesto principalmente por aceites vegetales degradados por uso térmico prolongado. Se recolecto un volumen total de 2000 mL. Previo al proceso de transesterificación, el aceite fue sometido a etapas de pretratamiento incluyendo filtración y eliminación de impurezas.

3.2 Materiales, Reactivos y Equipos

a) Materiales

- Probeta - 100 mL
- Vaso de precipitados - 500 mL
- Erlenmeyer - 10 mL
- Pera de decantación - 500 mL
- Bureta
- Fiola – 50/100 mL
- Picnómetro - 5 mL
- Agitador magnético
- Espátulas
- Soporte Universal
- Tiras reactivas de pH
- Plataforma metálica
- Papel Aluminio
- Papel filtro / Tela
- Resistencia eléctrica (2200 W)
- Motor (90W)
- Termopares
- Tarjeta de adquisición de datos (DAQ): Arduino Mega
- Cable Jumper Dupont: Hembra a Macho (20 cm)
- Válvula mecánica y magnética ($\frac{1}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ")

b) Reactivos

- Metanol grado reactivo (CH_3OH) al 99.98%
- Catalizadores: Se evaluarán tres catalizadores en concentraciones específicas:
 - o Hidróxido de sodio (**NaOH , 1% en peso**)
 - o Hidróxido de potasio (**KOH , 0.8% en peso**)
 - o Hidróxido de calcio (**$\text{Ca}(\text{OH})_2$, 1.5% en peso**)
- Indicador de fenolftaleína: Utilizado en la titulación ácido-base para determinar la acidez del aceite
- Solución de NaOH 0.1N: Empleada como titulante en la determinación del índice de acidez
- Agua destilada
- Materia prima: Aceite vegetal residual

c) Equipos

- **Placa de calentamiento con agitación magnética**
Rango de temperatura: ambiente hasta 300 °C.
Velocidad de agitación: 0–1500 rpm.
- **Viscosímetro**: Stanbinger Viscometer - ANTON PAAR, modelo SVM 3000
Rango de viscosidad: 0.2 a 20,000 mPa·s.
Precisión: $\pm 0.35\%$.
Rango de temperatura: 15 a 100 °C.
- **Medidor de punto de inflamación**: Petrotest PMA-4 (copa cerrada)
Rango de medición: 40 a 370 °C.
Método: Copa cerrada Pensky-Martens.
- **Densímetro digital**
Rango de medición: 0 a 3 g/cm³.
Precisión: ± 0.001 g/cm³.
- **Balanza analítica**
Capacidad: 200 g.
Precisión: ± 0.0001 g.
- **Termómetro digital**
Rango de medición: -50 a 300 °C.
Precisión: ± 0.5 °C.
- **Computadora portátil**
Procesador: Intel Core i5.
Memoria RAM: 16 GB. / Programa LabVIEW

d) Reactor Batch

Para llevar a cabo el proceso de transesterificación catalítica, se utilizó un reactor batch especialmente acondicionado para este propósito. El acondicionamiento del reactor fue un paso fundamental para asegurar un control preciso de las variables clave que influyen en la reacción: la temperatura y la velocidad de agitación.

El sistema de control de temperatura fue equipado con sensores resistivos que permitieron mantener la temperatura dentro de los rangos específicos establecidos para el proceso (los sensores resistivos no mantienen la temperatura solo envían señales útiles que se puede modificar para interpretarlas en °C).

Además, se instaló un agitador mecánico que proporcionaba una agitación constante y controlada, lo cual es vital para favorecer la homogenización del alcohol en el aceite y, por ende, la eficiencia de la reacción de transesterificación. El control de estas variables fue automatizado, asegurando la estabilidad de las condiciones del proceso durante el tiempo de reacción.

Adicionalmente, fue necesario enviar a fabricar un soporte especializado, diseñado para acoplarse de manera precisa a las entradas y salidas del reactor. Este soporte permitió el montaje y fijación segura de los componentes externos, como las conexiones de los sensores y las válvulas de entrada y salida de reactivos y productos. La correcta integración de este soporte con el reactor aseguró un funcionamiento sin fugas ni desalineaciones, facilitando un flujo adecuado de los reactivos y la recolección eficiente del biodiésel y subproductos.

El sistema fue monitoreado mediante termopares conectados a un microcontrolador, el cual permitió registrar de manera continua la temperatura del proceso. Esta configuración fue clave para garantizar que las condiciones de operación se mantuvieran dentro de los rangos establecidos, favoreciendo la conversión del aceite en biodiésel. En la Figura 4 se observa el reactor previo a las modificaciones realizadas y en la Figura 5, el equipo con todos los cambios implementados.

Figura 4

Reactor batch previo acondicionamiento para el proceso de transesterificación catalítica

- 1) Válvulas de reactivos
- 2) Motor del agitador
- 3) Serpentín de cobre (intercambiador de calor)
- 4) Agitador
- 5) Cuerpo del reactor
- 6) Válvula de productos
- 7) Soporte metálico

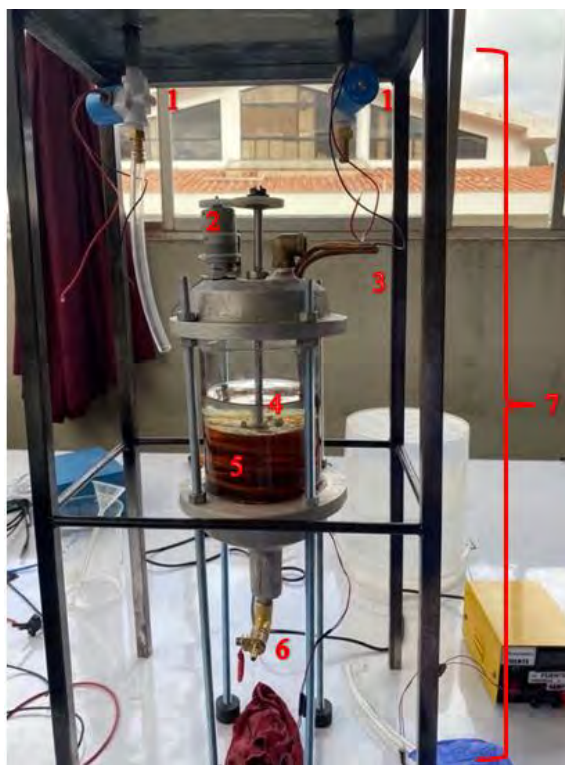
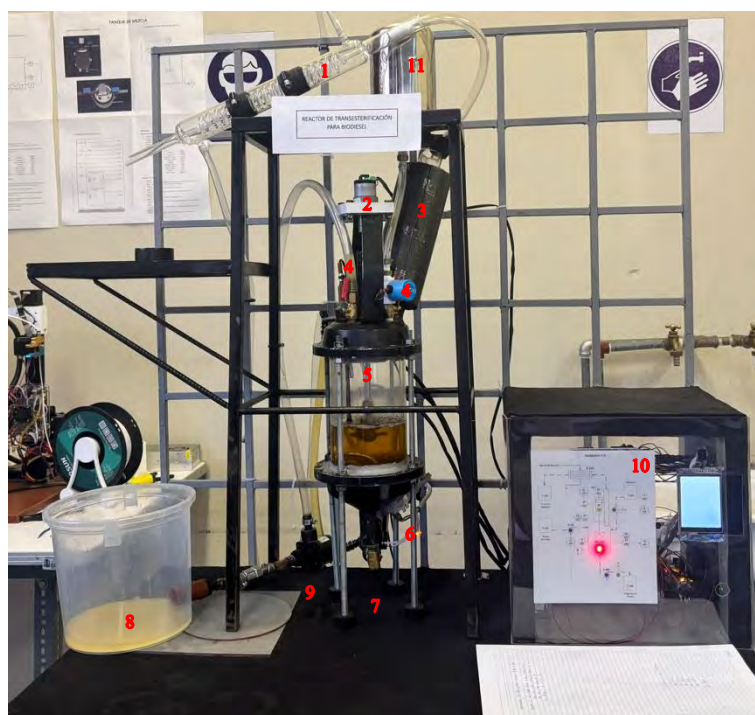


Figura 5

Reactor batch con estructura metálica, tuberías y válvulas para iniciar con la operación

- 1) Columna de refrigeración
- 2) Motor del agitador
- 3) Recolector de vapores
- 4) válvulas de admisión
- 5) Varilla de agitación
- 6) Resistencia
- 7) Válvula de producto
- 8) Tanque de alimentación
- 9) Bomba de aceite
- 10) HMI (Human Machine Interface)
- 11) Tanque de reactivos



3.3 Ámbito Espacial y Temporal

3.3.1 Ámbito Espacial

El ámbito espacial de la presente investigación se localiza en el Laboratorio de Química Orgánica de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), ubicado en la ciudad y provincia de Cusco, Perú. En dicho recinto se llevó a cabo el acondicionamiento del reactor, el desarrollo del sistema de control y la ejecución de las pruebas experimentales de transesterificación catalítica. Asimismo, la obtención de la materia prima se delimitó geográficamente a los establecimientos de comida rápida del centro urbano de la ciudad del Cusco, lugares desde los cuales se acopió el aceite vegetal residual para su posterior filtrado, acondicionamiento y caracterización.

3.3.2 Ámbito Temporal

El ámbito temporal del estudio comprendió el período establecido entre enero de 2024 y enero de 2025. Este lapso abarcó de manera secuencial las fases de recolección y análisis previo de las muestras de aceite residual, el diseño e implementación de los mecanismos de control de temperatura y agitación en el reactor, la ejecución de las pruebas experimentales combinando las distintas relaciones molares, y el posterior procesamiento estadístico y caracterización del biodiésel obtenido.

3.4 Diseño de la Investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un diseño experimental, debido a que se manipularon deliberadamente las variables operativas del proceso de transesterificación catalítica con el propósito de determinar su influencia sobre la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal residual. Se consideraron como variables independientes la temperatura, la velocidad de agitación y la relación molar aceite, mientras que las variables dependientes estuvieron representadas por el rendimiento, la densidad y la viscosidad del biodiésel obtenido.

Para el desarrollo experimental se empleó un diseño factorial completo (2^3) con punto central, considerando tres factores y dos niveles para cada uno de ellos. Este diseño permitió analizar los efectos principales de las variables independientes y las interacciones entre ellas sobre las respuestas evaluadas. Asimismo, se incorporó un punto central con la finalidad de evaluar la repetibilidad experimental y verificar la posible presencia de curvatura en la respuesta del sistema.

El diseño experimental comprendió ocho combinaciones correspondientes a los niveles de los tres factores evaluados y una condición central, totalizando nueve condiciones experimentales. Cada condición fue ejecutada por duplicado para incrementar la confiabilidad de los resultados. A partir de los resultados obtenidos se determinó la condición experimental que presentó el mejor comportamiento en función de las respuestas evaluadas.

Los valores de temperatura y velocidad de agitación correspondientes a la condición experimental seleccionada fueron utilizados como referencias de operación para el diseño e implementación del sistema de control del reactor. Dichos valores fueron establecidos como referencias de temperatura y velocidad de agitación para regular las condiciones de operación durante el funcionamiento del sistema de control.

Finalmente, los resultados obtenidos mediante el diseño experimental fueron analizados estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA), permitiendo determinar la influencia de las variables operativas sobre la producción de biodiésel. La condición experimental seleccionada sirvió, además, como base para la implementación del sistema de control de temperatura y velocidad de agitación en el reactor.

3.5 Variables y Operacionalización de Variables

VARIABLES INDEPENDIENTES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADOR	UNIDAD	TIPO DE VARIABLE
Temperatura	En la transesterificación catalítica, la temperatura ejerce influencia en el proceso para llevar a cabo la reacción y llegar al equilibrio. Esta variable se debe monitorear para evitar que exceda el punto de ebullición del metanol y promueva la saponificación (Encinar, et al. 2005).	La temperatura será monitoreada por sensores de temperatura tanto en la fase líquida como en la fase gaseosa para medir y regular la temperatura del sistema.	Física	Temperatura	°C	Continua
Velocidad de agitación	En la transesterificación catalítica, la velocidad de agitación es importante debido a que garantiza la homogeneidad completa de la mezcla, incluyendo la homogeneidad térmica dentro del reactor.	La velocidad de agitación se calculará según las revoluciones por minuto, para mantener una velocidad constante durante el tiempo que dure el proceso.	Física	Velocidad	RPM	Continua
Relación molar metanol:aceite	En la transesterificación catalítica, la relación molar metanol:aceite muestra mayor influencia en este proceso para lograr obtener un mayor rendimiento y mejorar el biodiésel.	La relación molar metanol:aceite se calculará aplicando estequiometría en el mecanismo de reacción según la elaboración del diseño experimental.	Química	Rendimiento de biodiésel	mol/mol	Continua
VARIABLES DEPENDIENTES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADOR	UNIDAD	TIPO DE VARIABLE
Rendimiento volumétrico	Se refiere a la cantidad de producción de biodiésel obtenida luego de la manipulación de parámetros operativos dentro del proceso y se recoge como producto final en la parte inferior del reactor.	El rendimiento volumétrico que se vaya a recuperar dependerá de las variables independientes y de los valores establecidos en el diseño experimental que intervienen en la producción de biodiésel obtenido por transesterificación catalítica.	Química	Concentración	mol/g	Continua
				Volumen	m ³	Continua
Densidad de Biodiésel	Se refiere a la cantidad de masa contenida en una unidad de volumen de este biocombustible. Es una propiedad física que indica cuánta "sustancia" está presente en un espacio determinado.	Se determinará la densidad del biodiésel a través de la técnica del picnómetro y se comparará con las normas ASTM y NTP.	Física	Densidad	Kg/m ³	Continua
Viscosidad de Biodiésel	Se refiere a la medida de la resistencia interna que ofrece este biocombustible al fluir debido a la fricción entre sus moléculas.	Se determinará con el viscosímetro Anton Paar SVM 3000 y el resultado se comparará con las normas ASTM y NTP.	Física	Viscosidad Cinemática	mm ² /s	Continua
Punto de inflamabilidad Biodiésel	Indica la temperatura mínima a la cual los vapores del biodiésel se inflaman en presencia de una fuente de ignición.	Se determina experimentalmente mediante el ensayo ASTM D93 utilizando equipo de copa cerrada.	Física	Punto de inflamación	°C	Continua

3.6 Métodos

Los métodos empleados en la presente investigación fueron estructurados de acuerdo con los objetivos específicos planteados, permitiendo describir de manera sistemática cada una de las etapas desarrolladas para la producción de biodiésel y la implementación del sistema de control de temperatura y agitación en un reactor discontinuo. Para ello, la metodología comprende la descripción de los procedimientos experimentales, las técnicas e instrumentos utilizados para la colecta de datos e instrumentos de medición, así como los métodos de análisis aplicados para el procesamiento e interpretación de los resultados obtenidos.

3.6.1 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del aceite vegetal residual y Biodiésel

3.6.1.1 Procedimientos

i. Pretratamiento de la Muestra

El análisis del aceite vegetal residual inició con la recolección de la muestra en diferentes establecimientos de comida rápida de la ciudad del Cusco. Posteriormente, el aceite fue sometido a un proceso de acondicionamiento previo, con el propósito de eliminar impurezas y reducir el contenido de humedad, garantizando la confiabilidad de los análisis fisicoquímicos posteriores y favoreciendo el adecuado desarrollo del proceso de transesterificación. El aceite antes recolectado, se dejó en reposo por 24 horas para facilitar la sedimentación de sólidos suspendidos, posterior a ello se procedió con la filtración para separar impurezas y restos orgánicos no sedimentados como se muestra en la Figura 6.

Figura 6
Filtrado de aceite vegetal residual



En esta etapa, se realizó una filtración mediante papel filtro y tela gruesa para remover sólidos en suspensión y residuos provenientes de los procesos de fritura. Una vez finalizado el acondicionamiento, la muestra fue almacenada en un contenedor con capacidad de 20 litros, a fin de emplear para las posteriores pruebas experimentales y preservar las características de la materia prima, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7
Recolección de aceite vegetal residual



ii. Cuantificación de impurezas

Con el propósito de cuantificar la cantidad de impurezas sólidas retenidas durante el pretratamiento del aceite vegetal residual, se determinó el porcentaje de impurezas mediante la relación entre la masa de residuos retenidos y la masa inicial de la muestra analizada. Para ello, se empleó la Ecuación 10:

$$\% \text{ de Impurezas} = \frac{m_{\text{impurezas}}}{m_{\text{Aceite}} + \text{Impurezas}} \times 100 \quad (10)$$

El índice de acidez permitió evaluar el contenido de ácidos grasos libres presentes en la muestra, mientras que la densidad y la viscosidad constituyeron parámetros fundamentales para analizar el comportamiento del aceite durante el proceso de producción de biodiésel. Una vez obtenidas las condiciones de operación para la producción del biodiésel, el producto final fue sometido a una nueva caracterización fisicoquímica. En esta etapa se determinaron la densidad, la viscosidad cinemática y el punto de inflamación, con el propósito de verificar la calidad del biodiésel obtenido y compararlo con las especificaciones técnicas establecidas para este combustible. Este procedimiento permitió verificar que el aceite cumpliera las condiciones necesarias para su utilización como materia prima. Posteriormente, se realizó la caracterización fisicoquímica del aceite vegetal residual mediante la determinación del índice de acidez, densidad y viscosidad.

3.6.1.2 Técnicas e instrumentos para la colecta de datos e instrumentos de medición

i. Caracterización fisicoquímica de aceite vegetal residual y Biodiésel

Con el fin de evaluar las características fisicoquímicas del aceite vegetal residual utilizado como materia prima, se determinaron los siguientes parámetros, de acuerdo con los procedimientos analíticos correspondientes:

a) Índice de Acidez:

Para determinar este parámetro, se realizó una titulación ácido-base con el fin de cuantificar el índice de acidez, definido como la cantidad de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesaria para neutralizar los compuestos ácidos presentes en un gramo de aceite, expresándose en mg KOH/g de muestra, y el porcentaje de ácidos grasos libres presentes en el aceite vegetal residual. Estos parámetros permiten evaluar la calidad de la materia prima y establecer las condiciones adecuadas para la transesterificación, especialmente en la selección de la cantidad de catalizador alcalino y la necesidad de un pretratamiento mediante esterificación cuando el contenido de ácidos grasos libres es elevado. El porcentaje de ácidos grasos libres, expresado como ácido oleico, se determinó mediante la siguiente Ecuación:

$$\% \text{ Ácido Oleico} = \frac{V_{NaOH} \times N_{NaOH} \times 0.282}{m_{muestra}} \times 100 \quad (11)$$

Donde:

V_{NaOH}: Volumen de hidróxido de sodio gastado en la titulación (mL)

N_{NaOH}: Normalidad de la solución de NaOH empleada como titulante (N)

Peso equivalente del ácido oleico (g/eq) = 282 (g/mol) / 1000=0.282

A partir de estos mismos datos, el índice de acidez se determinó empleando la Ecuación 12:

$$\text{Índice de Acidez} = \frac{V \times N \times 56.1}{m_{muestra}} \quad (12)$$

El índice de acidez se expresó en miligramos de KOH por gramo de muestra (mg KOH/g). Se recomienda emplear un catalizador alcalino al 1% p/p y utilizar un exceso de metanol para favorecer el desplazamiento de la reacción hacia la formación de ésteres metílicos (Torossi Baudino, 2006).

En relación con el biodiésel obtenido, este pasa una serie de pruebas fisicoquímicas con el fin de verificar que el producto cumpla con los requisitos mínimos de calidad para su uso como combustible alternativo. Los parámetros a analizados fueron:

b) Punto de inflamación

Para determinar su punto de inflamación, se empleó el equipo “PETROTEST”, que se muestra en la Figura 8, según el método de prueba ASTM D93, establecido por la NTP 321.125:2020, correspondiente al método de ensayo estándar para la determinación del punto de inflamación mediante copa cerrada de Pensky-Martens. El punto de inflamación se define como la temperatura mínima a la cual los vapores de una muestra forman una mezcla inflamable con el aire en presencia de una fuente de ignición bajo condiciones específicas de ensayo.

Figura 8

Equipo para determinación del Punto de inflamación en copa cerrada



c) Densidad

La densidad fue determinada simultáneamente en el equipo ANTON PAAR-SVM 3000, como se muestra en la Figura 9, que permite obtener este parámetro según los lineamientos del método de prueba ASTM D7042, Método de Ensayo Estándar para la determinación de la viscosidad y densidad de líquidos mediante un viscosímetro. La densidad se define como la relación entre la masa y el volumen de una sustancia

Figura 9

Equipo para la Determinación de la Viscosidad Dinámica y la Densidad de Líquidos



d) Viscosidad

Para determinar la viscosidad se empleó el equipo ANTON PAAR-SVM 3000, como se observa en la Figura 9, en función del método de prueba ASTM D7042, estándar para la medición de la viscosidad cinemática de líquidos, establecido en la norma ASTM D6751. La viscosidad cinemática se define como la medida de la resistencia al flujo bajo la acción de la gravedad

3.6.1.3 Método de Análisis de datos

Los resultados obtenidos durante la caracterización fisicoquímica del aceite vegetal residual y del biodiésel fueron organizados en tablas para facilitar su interpretación y comparación. Los valores correspondientes al porcentaje de impurezas, índice de acidez (para

el aceite vegetal residual), densidad, viscosidad y punto de inflamación fueron procesados mediante estadística descriptiva, empleando medidas de tendencia central para resumir la información experimental obtenida.

Los ensayos para determinar el punto de inflamación, la viscosidad cinemática y la densidad se realizaron conforme a las normas ASTM D93 y ASTM D7042, respectivamente. Posteriormente, los valores experimentales fueron comparados con las especificaciones establecidas en la norma ASTM D6751 (Tabla 3) NTP 321.125 (Tabla 4) y Norma Europea 14214 (Table 5), con el propósito de verificar que el biodiésel obtenido cumpliera con los requisitos de calidad exigidos para este biocombustible. Asimismo, los resultados fueron contrastados con investigaciones previas reportadas en la literatura científica, permitiendo evaluar la calidad de la materia prima utilizada y el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel obtenido.

3.6.2 Evaluación y selección de catalizadores

3.6.2.1 Procedimientos

La selección del catalizador constituye una etapa importante dentro del proceso de transesterificación, debido a que este influye directamente en la velocidad de reacción, la conversión de los triglicéridos presentes en el aceite vegetal residual y las características finales del biodiésel obtenido. Por ello, se evaluaron diferentes catalizadores básicos con el propósito de identificar el más adecuado para las condiciones experimentales establecidas en la presente investigación. La evaluación se realizó mediante pruebas de transesterificación, considerando parámetros relacionados con el rendimiento obtenido y las propiedades fisicoquímicas del producto generado.

Para la selección del catalizador empleado en la reacción de transesterificación, se evaluaron tres catalizadores básicos: hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH)

e hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). La evaluación experimental se realizó mediante pruebas preliminares de reacción, manteniendo constantes las condiciones de operación establecidas, con el propósito de comparar el comportamiento de cada catalizador durante la conversión del aceite vegetal residual en biodiésel. La selección de catalizadores básicos se fundamenta en que estos presentan una elevada actividad catalítica en la transesterificación de aceites vegetales, permitiendo obtener mayores velocidades de reacción en comparación con catalizadores ácidos, siempre que el contenido de ácidos grasos libres y humedad del aceite sea controlado (Freedman et al., 1984; Ma y Hanna, 1999).

3.6.2.2 Técnicas e instrumentos para la colecta de datos e instrumentos de medición

La concentración de catalizador fue establecida de acuerdo con las condiciones experimentales definidas para cada ensayo, empleándose hidróxido de sodio (NaOH) al 1 % p/p, hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) al 1.5 % p/p e hidróxido de potasio (KOH) al 0.8 % p/p. Estas concentraciones fueron seleccionadas considerando valores reportados en estudios de transesterificación, donde concentraciones entre 0.5 y 1.5 % en masa de catalizador respecto al aceite permiten obtener conversiones adecuadas, evitando problemas asociados al exceso de catalizador como la formación de jabones y dificultades en la separación del biodiésel (Knothe et al., 2010; Meher et al., 2006). Las reacciones se realizaron en un vaso de precipitado provisto de una estufa eléctrica y un sistema de agitación mecánica (agitador magnético) que permitió mantener homogénea la mezcla reaccionante durante todo el proceso. La temperatura de reacción fue monitoreada continuamente mediante un termómetro instalado en el recipiente de la mezcla, mientras que la velocidad de agitación fue regulada mediante el controlador del agitador.

Para la preparación de las soluciones catalíticas se empleó una balanza analítica para la dosificación de los catalizadores y material volumétrico calibrado para medir el volumen de

metanol utilizado en cada ensayo. Estas mediciones garantizaron la correcta preparación del metóxido y la repetibilidad de los experimentos realizados.

3.6.2.3 Método de Análisis de datos

Los datos obtenidos para cada uno de los catalizadores evaluados fueron organizados en tablas comparativas y analizados mediante estadística descriptiva. El rendimiento de producción de biodiésel fue calculado como la relación porcentual entre la masa de biodiésel obtenida y la masa inicial de aceite vegetal residual empleada en cada ensayo.

Posteriormente, se realizó un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con los catalizadores NaOH, KOH y Ca(OH)₂, considerando el rendimiento de producción y las propiedades fisicoquímicas del biodiésel obtenido. La selección del catalizador más adecuado se efectuó con base en el mayor rendimiento alcanzado y en el cumplimiento de las especificaciones de calidad del biocombustible, además de considerar su viabilidad operativa durante el proceso de transesterificación.

Para determinar el rendimiento de obtención del biodiésel, se midió la masa del producto final obtenido después del proceso de transesterificación y purificación, en relación con la masa inicial de aceite empleado. El cálculo del rendimiento se realizó mediante la Ecuación 13:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{masa de biodiésel obtenido}}{\text{masa de aceite inicial}} \times 100 \quad (13)$$

Este procedimiento permitió analizar la eficiencia del proceso bajo las condiciones experimentales establecidas.

3.6.3 Análisis del efecto de las variables operativas sobre la producción de biodiésel

3.6.3.1 Procedimientos

Una vez seleccionado el catalizador de mejor desempeño, se procedió a evaluar la influencia de las variables operativas sobre el rendimiento del proceso de producción de biodiésel. Para ello, se implementó un diseño experimental factorial completo considerando como factores de estudio la temperatura de reacción, la velocidad de agitación y la relación molar aceite:metanol. Incorporándose además un punto central con la finalidad de verificar la posible existencia de curvatura en la respuesta experimental y aumentar la confiabilidad del análisis estadístico.

Con base en la matriz experimental definida, se desarrollaron los tratamientos correspondientes, manteniendo constantes las demás condiciones del proceso. Durante cada ensayo se registraron las condiciones de operación y el rendimiento obtenido, calculado como el porcentaje de biodiésel producido respecto a la cantidad inicial de aceite vegetal residual utilizada. Una vez concluidos todos los experimentos, los resultados obtenidos fueron organizados para su posterior análisis estadístico, permitiendo identificar la influencia individual de cada variable operativa y las interacciones existentes entre ellas sobre la producción de biodiésel.

3.6.3.2 Técnicas e instrumentos para la colecta de datos e instrumentos de medición

La evaluación de la influencia de la temperatura, velocidad de agitación y relación molar aceite:metanol se realizó mediante la técnica de diseño experimental factorial completo, la cual permitió estudiar simultáneamente el efecto de cada variable y sus posibles interacciones sobre el rendimiento del biodiésel.

La temperatura fue regulada manualmente mediante la variación del nivel de potencia de la estufa de inducción en cada prueba experimental, excepto la prueba experimental

seleccionada, que fue escalada a nivel del reactor. Durante la etapa inicial se utilizó una potencia elevada para acelerar el calentamiento. A medida que la temperatura se aproximaba al valor establecido, la potencia fue reducida gradualmente y, cuando fue necesario, el calentamiento se interrumpió temporalmente para evitar el sobreimpulso térmico. La temperatura fue verificada continuamente mediante un termómetro digital y se mantuvo cercana al valor de operación mediante ajustes manuales sucesivos.

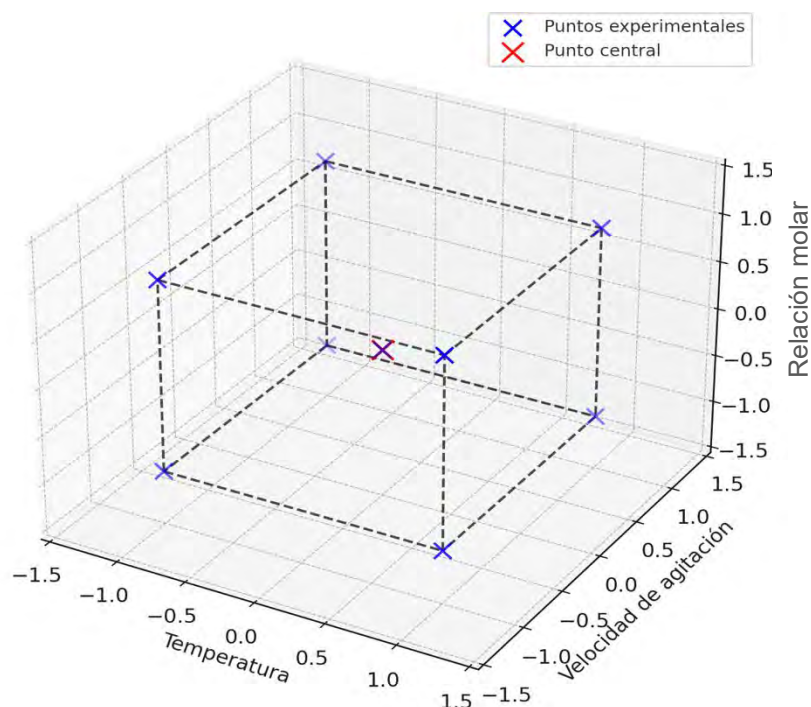
La velocidad de agitación fue evaluada mediante el ajuste de las revoluciones por minuto (RPM) del sistema de agitación magnética incorporado en la estufa de inducción. Para cada prueba experimental se establecieron los niveles de agitación definidos en el diseño factorial. La mezcla fue agitada utilizando un agitador magnético, cuya función fue favorecer el contacto entre las fases aceite-metanol y promover una adecuada transferencia de masa durante el proceso. El valor de RPM seleccionado en el equipo fue monitoreado durante el ensayo, verificando que la velocidad de agitación se mantuviera dentro del nivel establecido para las pruebas experimentales.

Por otro lado, la relación molar aceite:metanol fue seleccionada considerando la estequiometría de la reacción de transesterificación y los valores reportados en la literatura especializada. Teóricamente, esta reacción requiere una proporción de 3 moles de metanol por cada mol de triglicérido para producir tres moles de ésteres metílicos y un mol de glicerol. Sin embargo, debido al carácter reversible de la reacción, diversos autores recomiendan emplear un exceso de metanol con respecto a la relación estequiométrica (Freedman et al., 1984; Ma & Hanna, 1999; Meher et al., 2006). Sin embargo, debido a que la reacción es reversible, se utilizó una relación molar en exceso, como se describió.

3.6.3.3 Método de Análisis de datos

La reacción se llevó a cabo en el reactor batch, donde se controlaron las variables de temperatura, velocidad de agitación y relación molar basados en un diseño factorial experimental. Con la finalidad de analizar la influencia de las variables operativas sobre el rendimiento de biodiésel, se aplicó un diseño experimental factorial completo de dos niveles 2^3 aumentado con puntos centrales. De acuerdo con Montgomery (2017), los diseños factoriales permiten evaluar simultáneamente el efecto de varios factores experimentales, así como las interacciones entre ellos, mediante la combinación sistemática de sus niveles de estudio. En el presente estudio se consideraron tres variables operativas: temperatura, velocidad de agitación y relación molar aceite:metanol, evaluados cada uno en dos niveles: bajo (-1) y alto (+1). Los niveles establecidos fueron de 55 y 75 °C para la temperatura, 700 y 1400 rpm para la velocidad de agitación, y 1:4 y 1:9 para la relación molar aceite:metanol. La combinación de estos tres factores generó un total de ocho tratamientos experimentales (2^3), correspondientes a todas las posibles combinaciones entre los niveles definidos.

Adicionalmente, se incorporó un punto central correspondiente a una temperatura de 65 °C, velocidad de agitación de 1050 rpm y relación molar 1:6.5. Según Montgomery (2017), la inclusión de puntos centrales en un diseño factorial permite estimar el error experimental, determinando si el comportamiento del proceso puede ser representado adecuadamente dentro del rango experimental seleccionado. La representación del dominio experimental seleccionado para el proceso de transesterificación se ilustra en la Figura 10. En este gráfico tridimensional se observa la disposición espacial de las pruebas experimentales correspondientes al diseño factorial completo 2^3 con un punto central.

Figura 10*Diseño Factorial 2^3 con un punto medio*

Para la validación del modelo y la estimación de la variabilidad del proceso, se realizaron pruebas experimentales para los distintos valores de las variables combinadas que se muestran en la Tabla 7, las cuales fueron replicadas dos veces y de tal modo obtener una mejor confiabilidad de resultados, así mismo esto sirvió para el análisis estadístico del modelo mediante ANOVA posteriormente.

Tabla 7*Combinación de variables para las pruebas experimentales para la obtención de Biodiésel*

Prueba experimental	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	Relación Molar (aceite: metanol)
C1	55	700	1:4
C2	55	1400	1:4
C3	55	700	1:9
C4	55	1400	1:9
C5	75	700	1:4
C6	75	1400	1:4
C7	75	700	1:9
C8	75	1400	1:9
C9	65	1050	1:6.5

La velocidad de agitación de cada prueba experimental se controló mediante el agitador magnético integrado en la placa de calentamiento. Para ello, se colocó una barra magnética dentro del recipiente y se reguló su velocidad de giro mediante la perilla física del equipo. La posición de la perilla se ajustó de acuerdo con la velocidad, expresada en revoluciones por minuto (rpm), establecida para cada ensayo en la matriz experimental.

Una vez, determinada la prueba con mayor rendimiento, la velocidad de agitación se ajustó de manera independiente mediante una perilla física tipo potenciómetro conectada, a través de una protoboard, a una entrada analógica del Arduino Mega. Al variar la posición angular de la perilla, se generaba una señal analógica proporcional al nivel seleccionado. Esta señal era adquirida y digitalizada por el microcontrolador, y posteriormente relacionada con una velocidad nominal de agitación mediante las ecuaciones de conversión analógico-digital, normalización y escalamiento lineal expuestas anteriormente.

Antes del inicio de cada corrida experimental, la perilla física fue ajustada hasta la posición correspondiente a la velocidad establecida en la matriz experimental. Una vez seleccionado el nivel de operación, la posición de la perilla se mantuvo fija durante los 45 minutos de reacción, con la finalidad de conservar constante la condición nominal de agitación.

La interfaz SCADA se empleó únicamente para ejecutar la marcha y parada del agitador. La orden digital era enviada al Arduino Mega, que accionaba el módulo de relés asociado al motor. El ajuste de la velocidad se efectuó manualmente mediante la perilla física. Por tanto, la temperatura operó mediante un controlador PI en lazo cerrado, mientras que la agitación funcionó mediante un mando digital de encendido y apagado, junto con una regulación manual de la velocidad en lazo abierto.

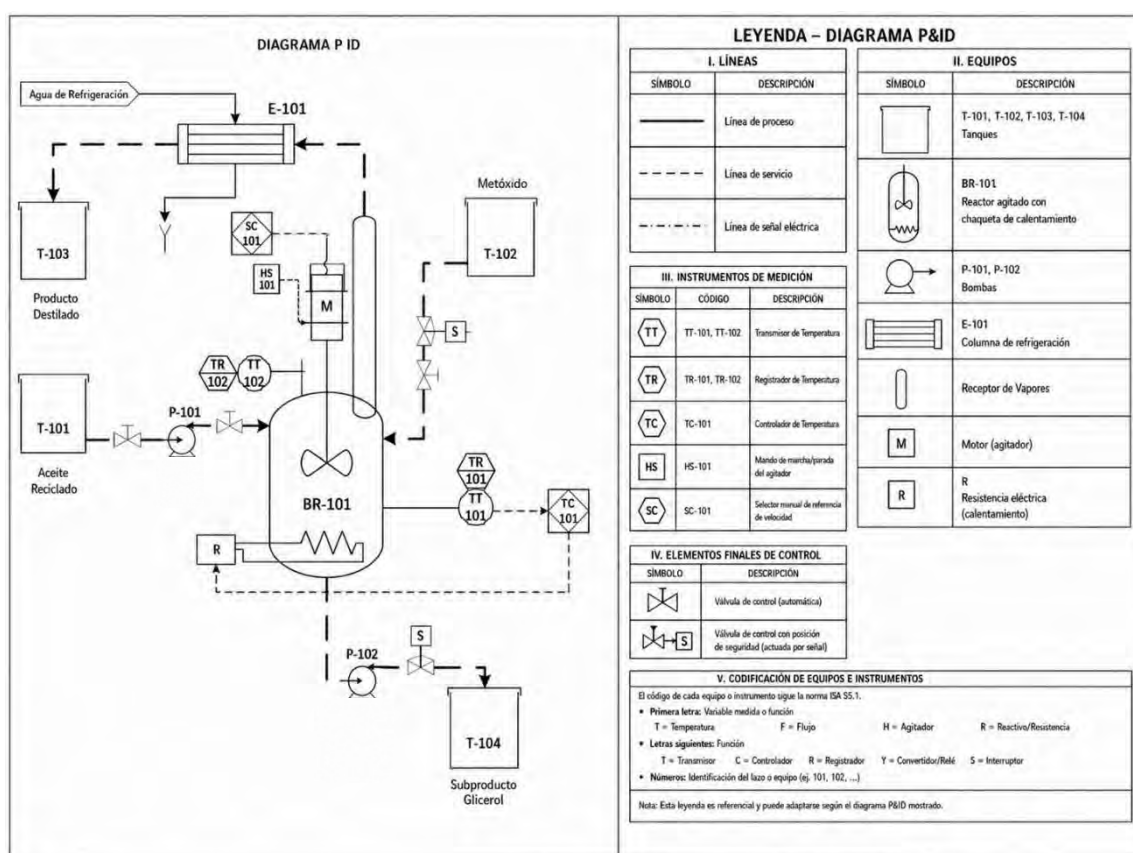
Las velocidades establecidas correspondieron a valores nominales de referencia, debido a que no se realizó una medición directa de las revoluciones del eje del agitador.

3.6.4 Evaluación del desempeño de los controladores de temperatura y agitación

3.6.4.1 Procedimientos

Con la finalidad de representar de manera integral el sistema empleado para la producción de biodiésel, se elaboró el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) del proceso que se visualiza en la Figura 11, siguiendo la simbología normalizada según la norma ANSI/ISA-5.1.

Figura 11
Diagrama P&ID del sistema implementado



El proceso se inicia con el trasiego del aceite vegetal residual previamente acondicionado, almacenado en el tanque T-101, hacia el reactor discontinuo agitado BR-101 mediante la bomba P-101. En la línea de alimentación se dispone de válvulas que permiten aislar y regular el ingreso del aceite al reactor.

Paralelamente, el metóxido, preparado a partir de metanol e hidróxido de sodio, es almacenado en el tanque T-102 e incorporado al reactor a través de su línea de alimentación. Esta línea incluye una válvula de control y una válvula con posición de seguridad, identificada mediante el elemento S, cuya función es adoptar una condición segura ante la pérdida de la señal de control o de la alimentación eléctrica, evitando el ingreso no controlado de metóxido al reactor.

Una vez completada la carga de los reactivos, se pone en funcionamiento el sistema de agitación mediante el motor M, acoplado mecánicamente al eje y a la paleta del reactor. De acuerdo con el P&ID, la marcha y parada del agitador se realizan mediante el mando HS-101. Por su parte, SC-101 representa el selector manual de referencia de velocidad, asociado a la perilla física tipo potenciómetro empleada para establecer la condición nominal de agitación. La referencia seleccionada se mantiene fija durante el tiempo de reacción, con la finalidad de favorecer la homogeneización de los reactivos y la transferencia de masa durante la transesterificación.

El calentamiento del reactor se realiza mediante una resistencia eléctrica R, instalada en la parte inferior del BR-101. La temperatura del proceso es medida continuamente por el transmisor TT-101, cuya señal es registrada por TR-101 y enviada al controlador de temperatura TC-101. Este controlador compara la temperatura medida con el valor de referencia establecido por el operador y genera la acción de control necesaria para regular la potencia suministrada a la resistencia eléctrica, manteniendo la temperatura de operación requerida. Durante el proceso, los vapores generados, constituidos principalmente por metanol no reaccionado, ascienden desde el reactor hacia el receptor de vapores. Desde este equipo, la corriente de vapor es conducida hacia la columna de refrigeración E-101, donde se suministra

agua de refrigeración para favorecer su condensación. El producto condensado es recolectado en el tanque T-103, mientras que una fracción puede retornar al reactor como parte del sistema de recuperación. El receptor de vapores y la columna de refrigeración forman parte del montaje experimental, aunque no constituyeron el objeto principal del sistema de control desarrollado.

Como complemento del monitoreo térmico, en la zona superior del reactor se dispone del transmisor de temperatura TT-102 y del registrador TR-102, utilizados para supervisar la temperatura asociada a la zona de vapores y a la etapa de condensación.

Finalizada la reacción de transesterificación, se produce la separación de fases por diferencia de densidades. La fase de glicerina, acumulada en la parte inferior del reactor, es extraída mediante la bomba P-102 y conducida hacia el tanque T-104. En esta línea se dispone de una válvula de control y una válvula con posición de seguridad identificada mediante S, destinada a mantener el aislamiento del proceso ante una pérdida de señal o alimentación. La fase superior, correspondiente al biodiésel, permanece en el reactor para las etapas posteriores de lavado, secado y caracterización fisicoquímica.

La etapa final de la investigación estuvo orientada al desarrollo e implementación del sistema de control automático de temperatura del reactor BR-101, con el propósito de garantizar el seguimiento adecuado de esta variable durante la producción de biodiésel.

Como etapa previa al diseño del controlador, se realizó una prueba experimental de calentamiento en lazo abierto, aplicando un escalón de potencia constante sobre la resistencia eléctrica R. La respuesta térmica del reactor fue registrada continuamente mediante el sistema de adquisición de datos desarrollado en LabVIEW, obteniéndose la evolución temporal de la temperatura desde la condición inicial. A partir de estos datos se identificó la dinámica del proceso y se obtuvo un modelo de Proceso Integrador con Tiempo Muerto, utilizado

posteriormente para determinar los parámetros del controlador PI mediante la metodología de sintonización seleccionada. Una vez calculados los parámetros del controlador, se implementó el sistema en lazo cerrado. En esta configuración, la señal de TT-101 fue adquirida por LabVIEW y comparada continuamente con el valor de referencia establecido por el operador. El error entre ambas señales fue procesado por el algoritmo del controlador PI, que generó la acción de control necesaria para regular la potencia suministrada a la resistencia eléctrica R y mantener la temperatura del reactor en el punto de operación deseado.

Finalmente, el desempeño del sistema de control fue evaluado bajo condiciones de operación, verificándose su capacidad para mantener estable la temperatura del reactor durante el proceso de transesterificación. En paralelo, la agitación se mantuvo mediante el motor M, con marcha y parada desde HS-101 y ajuste manual de la referencia de velocidad mediante SC-101.

3.6.4.2 Técnicas e instrumentos para la colecta de datos e instrumentos de medición

Luego de determinar que el producto cumpla con las condiciones operativas mediante el análisis experimental de las variables del proceso, se procedió al desarrollo del modelo dinámico y la evaluación del sistema de control automático de temperatura y agitación del reactor batch. La metodología comprendió la identificación experimental de la dinámica del sistema, la selección del modelo matemático representativo, la sintonización del controlador, el diseño de la estrategia de control en lazo cerrado y su implementación mediante el software LabVIEW.

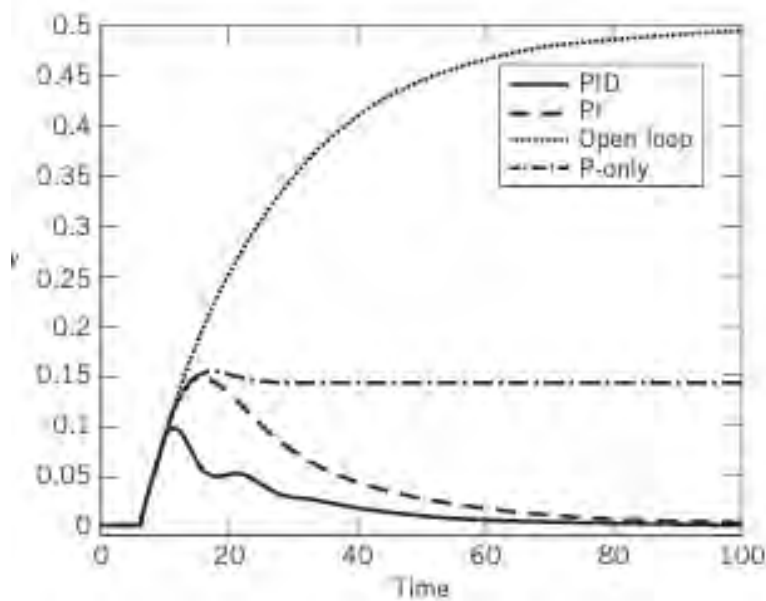
En la prueba experimental de calentamiento en lazo abierto, es decir, sin la intervención del controlador automático, el aceite vegetal residual se encontraba a temperatura ambiente; posteriormente, se energizó la resistencia eléctrica del reactor, permitiendo que la temperatura aumentara progresivamente. La temperatura fue medida mediante el sensor T1 instalado en el

reactor y adquirida a través del sistema de adquisición de datos integrado con LabVIEW. Durante la prueba experimental se almacenaron los valores de temperatura en función del tiempo para obtener la curva de reacción del proceso, la cual fue utilizada posteriormente para la identificación del modelo dinámico. La temperatura del aceite, medida por el sensor T1, fue considerada como la variable principal del sistema, debido a su influencia directa sobre el proceso de transesterificación catalítica. Asimismo, se registró la temperatura T2, correspondiente a una zona superficial o superior del reactor, con la finalidad de observar el comportamiento térmico complementario del sistema. El modelado dinámico del reactor se realizó considerando las características térmicas propias de un reactor discontinuo durante la etapa de calentamiento. En este tipo de sistemas, la energía suministrada por la resistencia eléctrica se acumula progresivamente, provocando un incremento continuo de la temperatura mientras exista aporte de calor.

Debido a este comportamiento, el proceso fue representado mediante un modelo de Proceso Integrador con Tiempo Muerto (Integrating Process with Dead Time, IPDT), el cual describe adecuadamente sistemas que presentan acumulación de energía y ausencia de autorregulación durante su operación (Skogestad, 2003). La información obtenida mediante la prueba escalón fue empleada para estimar los parámetros característicos del modelo, correspondientes a la ganancia del proceso y el tiempo muerto, necesarios para representar matemáticamente la dinámica térmica del reactor. En la Figura 12, se observa el comportamiento del modelo integrador en lazo abierto:

Figura 12

Comportamiento del sistema aplicando los tipos de controladores



El

comportamiento térmico observado durante la prueba experimental puede explicarse mediante el principio de conservación de la energía, el cual establece que la variación de energía acumulada dentro de un sistema es consecuencia del balance entre la energía suministrada y las pérdidas energéticas existentes hacia el entorno. Para el caso del reactor batch, considerando que el sistema opera durante la etapa inicial de calentamiento y que el reactor cuenta con aislamiento térmico, el balance energético puede expresarse como la diferencia entre la potencia entregada por la resistencia eléctrica y las pérdidas de calor hacia el ambiente, el cual se observa en la Ecuación 14:

$$Energía_{entrada} - Energía_{salida} = Energía_{acumulada} \quad (14)$$

Resolviendo la Ecuación 12:

$$u(t) - UA(T - T_s) = mC_p \frac{dT}{dt}$$

De donde:

$u(t)$: Potencia eléctrica suministrada

U : Coeficiente global de transferencia de calor

A : Área

T : Temperatura del reactor

T_s : Temperatura ambiente

m : Masa

C_p : Calor específico

Debido al aislamiento térmico del reactor, las pérdidas de calor hacia el ambiente son pequeñas en comparación con la energía suministrada por la resistencia eléctrica, por lo que el término $UA(T - T_s)$ se desprecia, quedando:

$$u(t) = mC_p \frac{dT}{dt}$$

La masa y el calor específico se consideran constantes ya que durante las pruebas experimentales el rango de temperatura no es muy amplio, por ello se toman estas variaciones despreciables sobre la dinámica térmica.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mC_p} u(t)$$

Definiendo la ganancia del proceso:

$$K_i = \frac{1}{mC_p} \quad (15)$$

Nos queda:

$$\frac{dT}{dt} = K_i u(t)$$

Aplicando la siguiente propiedad de Laplace:

$$L\left\{\frac{dT}{dt}\right\} = sT(s) - T(0) \quad (16)$$

Como el experimento empieza desde reposo, $T(0)=0$. Reemplazando en la Ecuación 14:

$$sT(s) = K_i U(s)$$

Por definición, $G(s) = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{T(s)}{U(s)}$

Dividiendo por el término $sU(s)$:

Considerando el tiempo muerto experimental debido a la transferencia térmica y respuesta del sensor:

$$G(s) = \frac{K_i e^{-\theta s}}{s} \quad (17)$$

La variable de referencia del sistema fue definida mediante el Set Point (SP), correspondiente al valor de temperatura objetivo establecido para la etapa de reacción de transesterificación. En este caso, el SP representa la temperatura que debe alcanzar y mantener el reactor para garantizar condiciones adecuadas de operación. Por otro lado, la Variable de Proceso (PV) corresponde al valor real de temperatura medido experimentalmente mediante el sensor T1 instalado en el reactor.

La diferencia entre ambas variables permite determinar el error instantáneo del sistema de control, definido según la Ecuación 17:

$$e(t) = SP(t) - PV(t) \quad (18)$$

Donde:

- $e(t)$: Error de control
- $SP(t)$: Temperatura de referencia o Set Point
- $PV(t)$: Temperatura medida en el reactor

Durante la operación del sistema, cuando la temperatura medida por el sensor es inferior al valor deseado, se genera un error positivo ($SP > PV$), lo cual indica que el reactor requiere un incremento de energía térmica. En respuesta a esta condición, el controlador calcula una acción correctiva y envía una señal de control hacia el actuador encargado de regular la potencia suministrada a las resistencias eléctricas. De esta manera, aumenta el flujo de energía hacia el sistema hasta reducir la diferencia existente entre la temperatura real y la temperatura establecida. Por el contrario, cuando la temperatura del reactor supera el valor de referencia ($PV > SP$), el error de control adquiere un valor negativo, indicando que existe un exceso de energía térmica acumulada. En esta condición, el controlador disminuye la señal enviada al actuador, reduciendo la potencia aplicada a las resistencias para evitar sobrepasar la temperatura requerida.

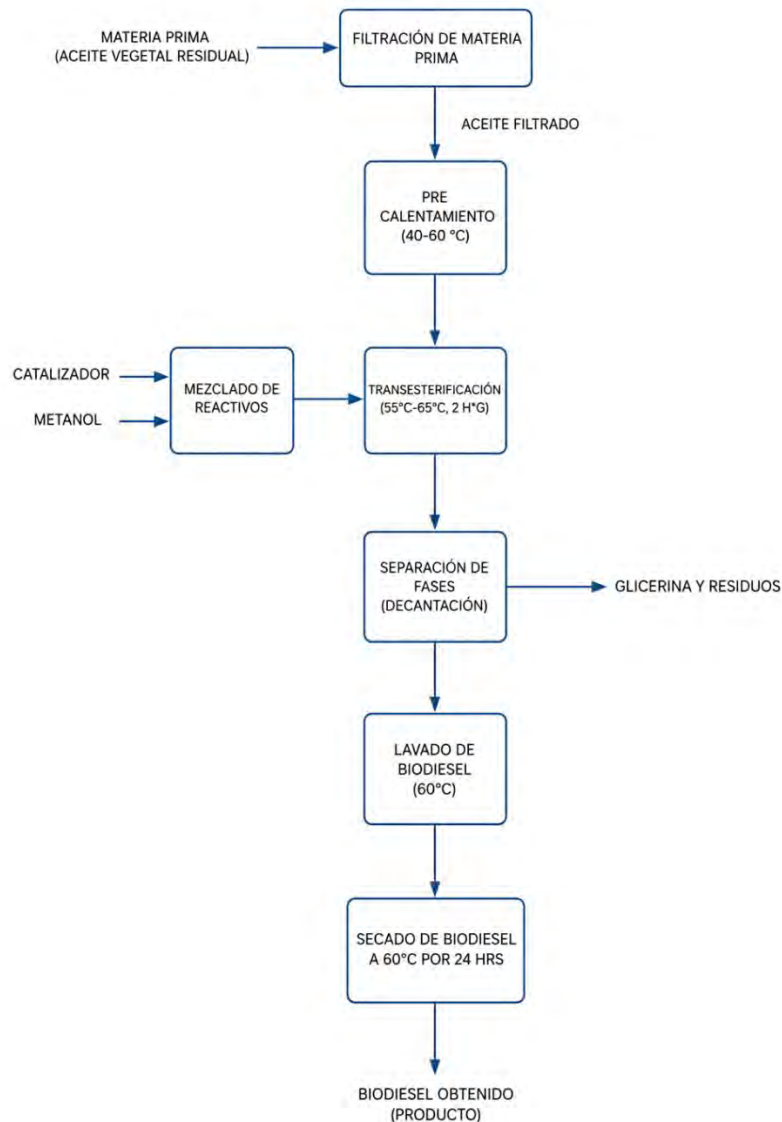
La señal generada por el controlador corresponde a la variable manipulada $u(t)$, asociada a la potencia eléctrica suministrada al sistema de calentamiento. Por lo tanto, el esquema de control implementado establece la relación dinámica entre la temperatura deseada, la temperatura medida y la acción correctiva aplicada al reactor:

$$SP \rightarrow \text{Controlador} \rightarrow u(t) \rightarrow \text{Resistencia eléctrica} \rightarrow PV$$

Los parámetros del controlador fueron ingresados y ajustados en LabVIEW hasta obtener una respuesta estable alrededor del punto de referencia establecido para el proceso de transesterificación catalítica. La Figura 13 presenta el diagrama de bloques del proceso de producción de biodiésel, destacando la etapa de transesterificación objeto de este estudio.

Figura 13

Flujograma de Operación del Proceso



3.6.4.3 Método de Análisis de datos

Una vez establecido el modelo dinámico del proceso como un Proceso Integrador con Tiempo Muerto (IPDT), de acuerdo con el comportamiento integrador descrito por Skogestad (2003), se procedió a la determinación de los parámetros del controlador proporcional–integral (PI). El modelo IPDT obtenido mediante la identificación experimental constituye la base para la aplicación de las reglas de sintonización del controlador, ya que proporciona los parámetros

dinámicos del proceso, tales como la ganancia del proceso (K) y el tiempo muerto (θ). Estos parámetros son requeridos para calcular la ganancia proporcional (K_c) y el tiempo integral (T_i) del controlador. Para la determinación de dichos parámetros se empleó la metodología de Control por Modelo Interno (Internal Model Control, IMC) propuesta por Chien y Fruehauf (1990) para procesos integradores con tiempo muerto. Esta metodología presenta dos alternativas de sintonización, denominadas Modelo M y Modelo N, las cuales establecen expresiones analíticas para el cálculo de los parámetros del controlador en función del modelo dinámico identificado.

La Figura 14 presenta las ecuaciones correspondientes a los modelos M y N utilizadas para la sintonización del controlador PI. Ambos modelos consideran como variables de diseño la ganancia del proceso (K), el tiempo muerto (θ) y la constante de tiempo de ajuste del controlador (τ_c), permitiendo seleccionar la configuración más adecuada de acuerdo con los criterios de desempeño requeridos para el sistema de control.

Figura 14

Ecuaciones de los modelos M y N empleadas para la sintonización del controlador PI

M	$\frac{Ke^{-\theta s}}{s}$	$\frac{2\tau_c + \theta}{(\tau_c + \theta)^2}$	$2\tau_c + \theta$	—
N	$\frac{Ke^{-\theta s}}{s}$	$\frac{2\tau_c + \theta}{\left(\tau_c + \frac{\theta}{2}\right)^2}$	$2\tau_c + \theta$	$\frac{\tau_c \theta + \frac{\theta^2}{4}}{2\tau_c + \theta}$

Posteriormente, los parámetros calculados fueron incorporados al algoritmo de control implementado en LabVIEW para regular automáticamente la temperatura del reactor mediante una estrategia de control en lazo cerrado.

La arquitectura de control implementada se basó en un esquema de retroalimentación, permitiendo que la variable controlada fuera monitoreada continuamente y corregida

automáticamente ante cualquier desviación respecto al punto de consigna. La programación del sistema de supervisión y control se desarrolló utilizando el entorno gráfico LabVIEW, mediante el diseño de una Interfaz Hombre-Máquina (Human Machine Interface, HMI) destinada al monitoreo y operación del reactor batch. La interfaz fue diseñada para integrar la adquisición de datos provenientes de los sensores, el procesamiento del algoritmo de control y la supervisión de las principales variables operativas del proceso. Asimismo, permitió visualizar en tiempo real la temperatura del reactor, la velocidad de agitación, el valor de referencia (Set Point), la señal de control y el comportamiento temporal de la variable controlada mediante gráficos de tendencia.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del aceite

i. Pretratamiento de la Muestra de aceite vegetal residual

El aceite residual utilizado en el proceso de transesterificación contiene una serie de impurezas que deben eliminarse antes de proceder con la reacción química. Estas impurezas incluyen sólidos suspendidos, agua y ácidos grasos libres. Si no se eliminan, pueden interferir con la transesterificación, afectando tanto el rendimiento como la calidad del biodiésel producido (Hervé, 2007). A continuación, en la Tabla 8 se observan las cantidades medidas para hallar la cantidad de impurezas contenidas en el aceite que se logran retirar aproximadamente por cada 60 mL filtrados.

Tabla 8

Datos obtenidos para el cálculo del porcentaje de impurezas presentes en el aceite vegetal residual posterior al proceso de filtración

Descripción	Peso (g)
Papel filtro	1.052
Aceite + impurezas	58.764
Papel filtro + impurezas	2.567
Impurezas	1.515
Aceite filtrado	57.249

Por cada 60 mL de aceite residual recolectado de restaurantes de comida rápida, se encontraron 2.58% de impurezas, las cuales incluyen principalmente restos de alimentos, residuos sólidos y partículas finas. Estas impurezas son comunes debido al uso repetido del aceite en frituras y otros procesos culinarios. La presencia de estas partículas es un factor crítico, ya que pueden afectar la eficiencia del proceso de transesterificación y la calidad del biodiésel producido, lo que subraya la necesidad de un adecuado pretratamiento para asegurar la pureza del aceite antes de su utilización en la producción de biocombustibles.

ii. Caracterización de la Muestra de aceite vegetal residual

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del aceite vegetal residual se presentan en la Tabla 9. A partir de la titulación ácido-base se determinaron el porcentaje de ácidos grasos libres (% AGL), expresado como ácido oleico, y el índice de acidez, expresado en mg KOH/g de muestra, empleando las ecuaciones descritas en la metodología. Estos parámetros permitieron evaluar el grado de degradación del aceite y verificar su aptitud como materia prima para el proceso de transesterificación.

Los resultados de la caracterización se muestran en la Tabla 9 que se muestra a continuación:

Tabla 9

Propiedades de la caracterización de aceite residual de cocina

Propiedades	Valor	Unidad
Viscosidad a 40°C	45	mm ² /s
Densidad	911	kg/m ³
Índice de Acidez	2.24	mgKOH/g
% de ácido oleico	1.13	-

4.2 Evaluación del efecto del tipo de catalizador en el rendimiento

i. Selección de catalizador

Se realizó la reacción de transesterificación con distintos catalizadores para obtener datos necesarios para ser analizados, así mismo la eficiencia de cada catalizador en la reacción a continuación se muestra los resultados en la Tabla 10.

Tabla 10

Porcentaje de rendimiento de los catalizadores evaluados

Catalizador	% Rendimiento	Peso de Aceite (g)	Peso de Biodiesel (g)	Peso de Metanol (g)	Viscosidad cinemática (mm²/s)
K(OH)	98.69	92.39	105.02	14.02	14.462
Na(OH)	69.44	92.39	73.92	14.07	7.350
Ca(OH)₂	No hubo reacción	92.39	-	14.00	-

Figura 15

Biodiésel obtenido con los catalizadores, de izquierda a derecha: Hidróxido de Sodio (NaOH), hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e Hidróxido de Potasio (KOH) para la prueba



El hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) no presentó reacción bajo las condiciones evaluadas como se observa en la Figura 15, lo cual se atribuye a su naturaleza como catalizador heterogéneo. A diferencia del NaOH y el KOH, que se disocian completamente en el medio de reacción (catálisis homogénea), el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presenta una solubilidad muy limitada en metanol, lo que restringe drásticamente el área de contacto entre el catalizador y los reactivos y, en consecuencia, impide la formación de los iones metóxido necesarios para iniciar la transesterificación.

Evaluando los resultados del porcentaje de rendimiento es conveniente el uso de hidróxido de potasio (KOH) como catalizador, sin embargo, al realizar la comparación de la viscosidad experimental excede el rango de la viscosidad teórica establecida por la norma ASTM D6751. Por tal motivo, se eligió como catalizador el hidróxido de sodio (NaOH) que

cumple con el rango de viscosidad medida para las reacciones de transesterificación posteriores.

ii. Relación estequiométrica

La mejor relación estequiométrica, teniendo en cuenta factores como el contenido de ácidos grasos libres y la eficiencia del catalizador, es esencial para la producción de biodiésel de alta calidad. Esta relación no solo impacta la cantidad y pureza del biodiésel obtenido, sino también la sostenibilidad económica y ambiental del proceso, considerando que un uso ineficiente de reactivos puede llevar a un aumento de los desechos y costos operativos. La estequiometría para considerar se muestra en la Tabla 11:

Tabla 11

Estequiometría aplicada para la transesterificación de Biodiésel

Descripción	Triglicérido	+	Metanol	$\rightleftharpoons$	Metiléster	+	Glicerina
n (mol)	1		3		3		1
PM (g/mol)	873.4		32.04		282.46		92.10
Peso (g)	873.4		96.12		847.39		92.10

La ecuación indica que por cada mol de triglicéridos se necesita 3 moles de metanol para formar 3 moles de metil-éster y un mol de glicerina, de acuerdo con la ecuación ajustada y balanceada, sin embargo, como anteriormente se comentó se realizó una reacción con exceso de metanol para favorecer el sentido de la reacción hacia la producción de biodiesel por tal motivo los moles de metanol utilizados en relación a un mol de aceite se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12

Relación molar de aceite y metanol

Prueba	Cantidad de aceite (mL)	Cantidad de Metanol (mL)	Relación molar
1	250	42.79	1:4
2	250	69.54	1:6.5
3	250	96.29	1:9

Estos valores se obtuvieron a partir de la Ecuación (18) de porcentaje en peso entre el aceite residual y el metanol, según cada relación molar propuesta

$$\% \frac{p}{p} = \frac{\text{Peso Metanol}}{\text{Peso aceite residual}} \times 100 \quad (19)$$

Posteriormente se halló la masa del aceite a partir del volumen empleado, utilizando la fórmula de densidad despejada en la ecuación (20)

$$\rho_{\text{Aceite}} = \frac{m_{\text{Aceite}}}{V_{\text{Aceite}}} \quad (20)$$

Usando la Ecuación 21 se determinó la masa del metanol a utilizado

$$m_{\text{Metanol}} = \% \frac{p}{p} \times m_{\text{Aceite}} \quad (21)$$

Con la finalidad de facilitar la medición de reactivos despejando la fórmula de densidad en la ecuación 22 obtuvimos el volumen de metanol

$$\rho_{\text{Metanol}} = \frac{m_{\text{Metanol}}}{V_{\text{Metanol}}} \quad (22)$$

Se partió de la ecuación balanceada correspondiente a la transesterificación de triglicéridos con metanol, que indica una relación molar de 1:3 para la conversión completa de un mol de triglicérido a metil-ésteres y glicerol. Sin embargo, debido a que la reacción es reversible, se utilizó una relación molar en exceso, para favorecer el desplazamiento del equilibrio hacia los productos.

Se determinó la cantidad de moles de aceite a partir de su masa y su masa molar promedio estimada.

Estos moles se convirtieron a masa (g) utilizando la masa molar del metanol (32.04 g/mol), y luego se expresó este valor como porcentaje en peso con respecto a la masa de aceite, a fin de ajustar la proporción para cada ensayo.

Finalmente, la masa de metanol se convirtió a volumen (mL) usando su densidad (aproximadamente 0.79 g/mL a temperatura ambiente), obteniendo así la cantidad exacta a utilizar en cada reacción experimental.

iii. Reacción de Transesterificación

Luego de realizar los cálculos estequiométricos para cada relación molar se procedió a realizar las pruebas experimentales según la propuesta para el diseño factorial.

Como se mencionó antes se realizaron dos pruebas experimentales debido a la existencia de la variabilidad de resultados asociado a los instrumentos de medición y a errores aleatorios, en la Tabla 13 se muestra el cálculo promedio y la desviación estandar.

El uso del promedio es una práctica estadística recomendada para obtener un valor más representativo del sistema y reducir la dispersión de los datos (Montgomery, 2017).

Tabla 13
Resultado promedio de la cantidad de Biodiésel obtenido

EXPERIENCIA	Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (RPM)	Relación Molar	Biodiesel Obtenido (mL)	Desviación Estandar
C1	55	700	1:4	236.5	6.36
C2	55	1400	1:4	241	5.66
C3	55	700	1:9	247.5	0.71
C4	55	1400	1:9	249	1.41
C5	75	700	1:4	248.5	0.71
C6	75	1400	1:4	243.5	4.95
C7	75	700	1:9	243.5	4.95
C8	75	1400	1:9	228.5	2.12
C9	65	1050	1:6.5	240.5	0.71

Para hallar el porcentaje de conversión en función a la materia prima, se pesó el producto obtenido para posteriormente utilizar la ecuación 23 y estimar el rendimiento de conversión como se muestra en la Tabla 14 para cada replica, así mismo se presenta el promedio del porcentaje de conversión y la desviación estándar.

$$\text{Rendimiento \%} = \frac{\text{masa}_{\text{biodiesel}}}{\text{masa}_{\text{aceite}}} \times 100 \quad (23)$$

Tabla 14
Peso promedio y rendimiento de conversión

EXPERIENCIA	Masa de Aceite (g)	Masa Biodiesel (g)	Rendimiento (%)	Desviación Estándar
C1	230.9	211.3	91.49	5.52
C2	230.9	215.1	93.13	5.23
C3	230.9	216.3	93.64	1.61
C4	230.9	217.5	94.17	1.06
C5	230.9	222.3	96.24	0.46
C6	230.9	217.6	94.22	4.16
C7	230.9	212.6	92.06	4.08
C8	230.9	199.5	86.38	2.23
C9	230.9	210.9	91.32	0.11

4.3 Análisis del efecto de las variables operativas sobre la producción de biodiésel

i. Diseño Factorial ANOVA

En la producción de biodiesel mediante el proceso de transesterificación, el rendimiento del producto depende de factores operativos como la temperatura de reacción, la velocidad de agitación y la relación molar alcohol/aceite. Para controlar estas variables y comprender su influencia, se emplean modelos estadísticos basados en diseños factoriales y análisis de varianza (ANOVA), que permiten evaluar tanto los efectos principales como las interacciones entre factores. El modelo ajustado se expresa mediante la ecuación 20:

Este enfoque permite identificar condiciones para maximizar la conversión de triglicéridos en ésteres metílicos, contribuyendo a la eficiencia del proceso y la calidad del biodiesel. El uso de ANOVA en este contexto es fundamental, ya que facilita la validación estadística del modelo y determina la significancia de cada factor y sus interacciones (Montgomery, 2013; Meher et al., 2006), tal como se muestra en la Tabla 15:

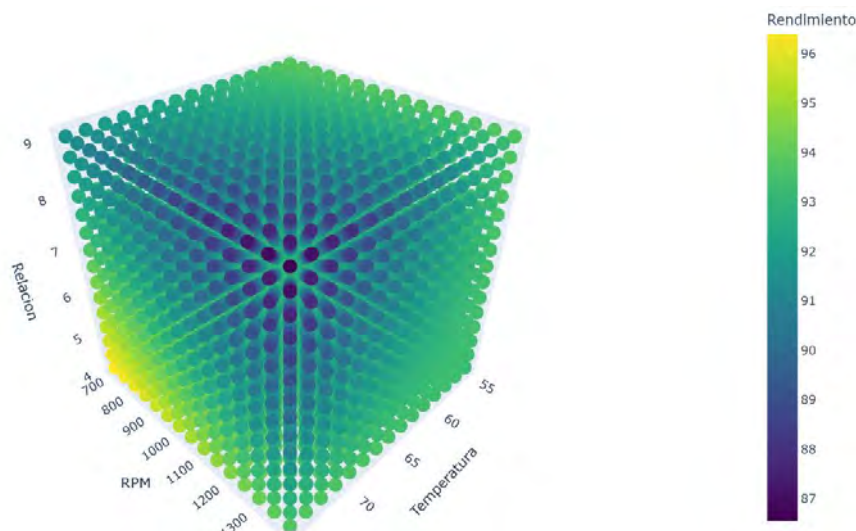
Tabla 15
Resultados del análisis de varianza (ANOVA)

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Valor F	P valor
Temperatura (β_1)	1.558	1.0	1.285	0.375
RPM (β_2)	3.823	1.0	3.154	0.218
Relación Molar (β_3)	9.746	1.0	8.042	0.105
Temperatura x RPM (β_{12})	12.177	1.0	10.048	0.087
Temperatura x Relación Molar (β_{13})	28.918	1.0	23.862	0.039
RPM x Relación Molar (β_{23})	2.844	1.0	2.347	0.265
Residual	2.424	2.0	-	-

Considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, los efectos individuales de Temperatura ($p = 0.375$) y RPM ($p = 0.218$) no son estadísticamente significativos, mientras que la Relación molar presenta una influencia moderada ($p = 0.105$). La única interacción significativa en este umbral es Temperatura $\times$ Relación molar ($p = 0.039$), lo que indica que el rendimiento depende principalmente de la combinación de estos dos factores. Este hallazgo implica que no basta con aumentar ambos parámetros simultáneamente, ya que su interacción puede reducir el rendimiento si no se controla adecuadamente. En la Figura 16, se muestra la interacción entre la temperatura, relación molar y velocidad de agitación sobre el rendimiento.

Figura 16

Interacción entre la temperatura, relación molar y velocidad de agitación sobre el rendimiento



La figura de superficie entre Relación molar, Temperatura y Velocidad de agitación junto con el análisis estadístico confirma que la optimización del proceso no depende únicamente de aumentar los factores de manera individual, sino de controlar las interacciones, especialmente entre temperatura y relación molar. Este hallazgo es fundamental para establecer condiciones operativas que maximicen el rendimiento en la producción de biodiésel.

De acuerdo con la tabla ANOVA, únicamente la interacción Temperatura $\times$ Relación molar (β_{13}) resultó significativa ($p = 0.0394$), mientras que las interacciones Temperatura $\times$ RPM (β_{12}) y RPM $\times$ Relación molar (β_{23}) no lo fueron ($p > 0.05$). Asimismo, los efectos principales de Temperatura (β_1) y RPM (β_2) tampoco mostraron significancia estadística ($p = 0.375$ y $p = 0.218$, respectivamente), mientras que la Relación molar (β_3) presentó una influencia moderada ($p = 0.105$). Por lo tanto, se decidió ajustar el modelo considerando únicamente los factores significativos y el principio de jerarquía, lo que implica conservar los efectos principales asociados a la interacción significativa. De este modo, el modelo corregido incluye los efectos de Temperatura, Relación molar y su interacción, eliminando las variables y

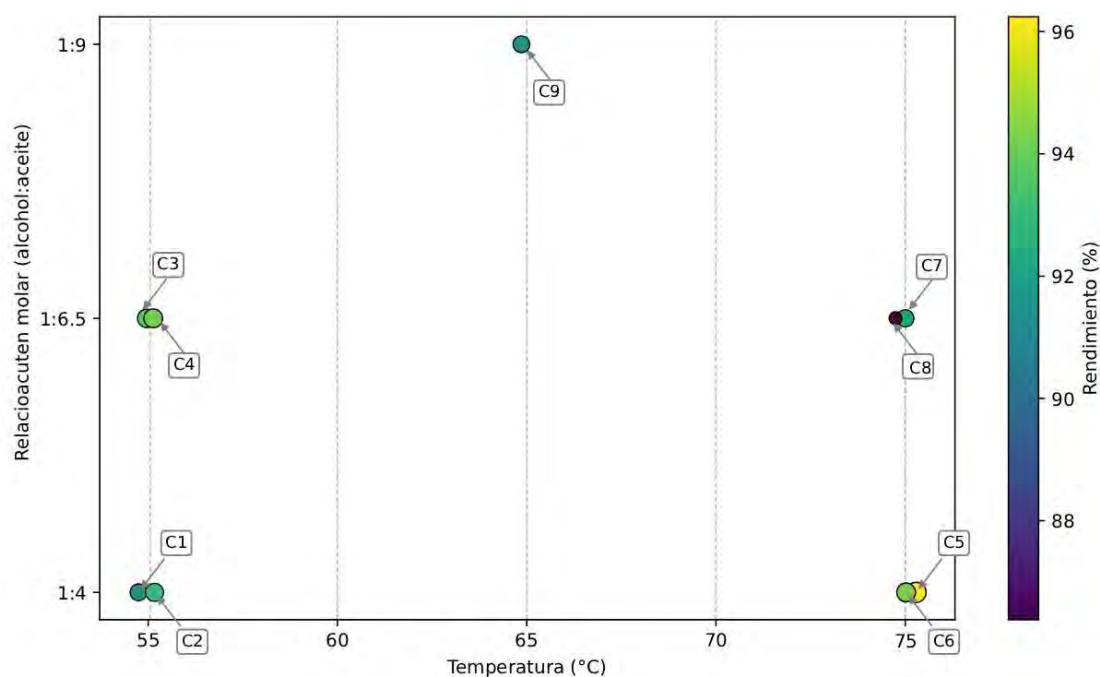
combinaciones no significativas, lo que permite una interpretación más clara y enfocada de los factores que influyen en el rendimiento del biodiésel. A continuación, se observa la fórmula corregida en la Ecuación 24 y los datos correspondientes en la Tabla 16:

$$Y = \beta_0 + \beta_1(T) + \beta_3(M) + \beta_{13}(T \times M) \quad (24)$$

Tabla 16
Tabla ANOVA aplicando el modelo corregido

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Valor F	P valor
Temperatura (β_1)	1.558	1.0	0.366	0.571
Relación Molar (β_3)	9.746	1.0	2.291	0.191
Temperatura x Relación Molar (β_{13})	28.918	1.0	6.798	0.048
Residual	21.268	5.0	-	-

Figura 17
Gráfico de Dispersión: Temperatura vs. Relación molar



A partir de la tabla ANOVA original, se suman las contribuciones de todos los efectos y el residual:

$$SS_{TOTAL} = SS_{EFECTOS} + SS_{RESIDUAL} \quad (25)$$

$$SS_{\text{Efectos}} = 1.558 + 3.823 + 9.746 + 12.177 + 28.918 + 2.844 = 59.066$$

$$SS_{\text{Total}} = 59.066 + 2.424 = 61.490$$

Se conservan los términos significativos y sus efectos principales: Temperatura (β_1), Relación molar (β_3) y la interacción Temperatura $\times$ Relación molar (β_{13}).

$$SS_{\text{Modelo reducido}} = SS_{\beta_1} + SS_{\beta_3} + SS_{\beta_{13}} \quad (26)$$

$$SS_{\text{Modelo reducido}} = 1.558 + 9.746 + 28.918 = 40.222$$

Los efectos eliminados (RPM, T $\times$ RPM, RPM $\times$ M) se suman al error original, por lo que aplicamos la Ecuación 26:

$$SS_{\text{Error reducido}} = SS_{\text{Total}} - SS_{\text{Modelo reducido}} \quad (27)$$

$$SS_{\text{Error reducido}} = 61.490 - 40.222 = 21.268$$

Los grados de libertad y media cuadrática del error (MS) los calculamos según la Ecuación 28 y 29:

$$gl_{\text{Error}} = N - p \quad (28)$$

De donde:

N: Número de observaciones inferido

p: Parámetros del modelo reducido (Intercepto+ 3 efectos)

$$gl_{\text{error}} = 9 - 4 = 5$$

$$MS_{\text{error}} = \frac{SS_{\text{error reducido}}}{gl_{\text{error}}} \quad (29)$$

$$MS_{\text{error}} = \frac{21.268}{5} = 4.254$$

F para cada efecto es el estadístico compara la variabilidad explicada por ese factor con la variabilidad del error. Se calcula según la Ecuación 30:

$$F = \frac{MS_{efecto}}{MS_{error}} \quad (30)$$

Calculando F para cada efecto:

- Temperatura (β_1):

$$F = \frac{1.558}{4.254} = 0.366 (p \approx 0.571)$$

- Relación molar (β_3):

$$F = \frac{9.746}{4.254} = 2.291 (p \approx 0.191)$$

- Temperatura $\times$ Relación molar (β_{13}):

$$F = \frac{28.918}{4.254} = 6.798 (p \approx 0.048)$$

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 16, el modelo corregido permitió evaluar la influencia de los efectos de Temperatura (β_1), Relación molar (β_3) y su interacción (β_{13}) sobre el rendimiento de conversión del biodiésel. Los valores del estadístico F y sus correspondientes valores p muestran que la interacción Temperatura $\times$ Relación molar (β_{13}) presentó significancia estadística ($F = 6.798$; $p = 0.048$), evidenciando que el comportamiento del rendimiento de conversión depende del efecto combinado de ambas variables dentro del rango experimental evaluado.

Asimismo, los efectos principales de Temperatura (β_1) y Relación molar (β_3) presentaron valores de F de 0.366 y 2.291, respectivamente, con valores de p superiores al nivel de significancia de 0.05. Esto indica que, para el modelo corregido, dichos efectos no alcanzaron significancia estadística de manera individual. En conjunto, estos resultados evidencian que la interacción entre la temperatura y la relación molar constituye el término de

mayor influencia en la variabilidad del rendimiento de conversión, mientras que la variabilidad restante es atribuida al término residual considerado en el modelo.

Según la teoría de la distribución F desarrollada por Fisher y las tablas críticas presentadas en Montgomery (2013), cuyo valor correspondiente se muestra en el Anexo 6, el valor crítico para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ con grados de libertad (1,5) es $F(1,5; 0.05) = 6.61$ (Figura 17). Dado que el estadístico calculado para la interacción Temperatura $\times$ Relación molar (β_{13}) es $F = 6.798$, este supera el valor crítico, por lo que se considera estadísticamente significativo al 5%. En contraste, los efectos principales de Temperatura ($F = 0.366$) y Relación molar ($F = 2.291$) no alcanzan dicho umbral, confirmando que el rendimiento depende principalmente de la combinación de estos dos factores y no de sus efectos individuales.

Con la finalidad de evaluar la capacidad explicativa del modelo reducido, se determinó el coeficiente de determinación (R^2), el cual representa la proporción de la variabilidad total del rendimiento del biodiésel que es explicada por las variables incluidas en el modelo. El cálculo se realizó mediante la relación entre la suma de cuadrados del modelo reducido y la suma de cuadrados total, según se muestra en la Ecuación (31).

$$R^2 = \frac{40.222}{61.490} = 0.654 \quad (31)$$

$$R^2 = 65.4\%$$

El coeficiente de determinación del modelo reducido fue 65.4%, lo que indica que el modelo conformado por la Temperatura, la Relación molar y su interacción explica el 65.4 % de la variabilidad observada en el rendimiento del biodiésel. El 34.6 % restante se atribuye a factores no considerados en el modelo y al error experimental.

4.4 Diseño e implementación del sistema de control

El modelado dinámico, la automatización y el control del reactor batch constituyeron una etapa fundamental para evaluar el comportamiento térmico del sistema durante el proceso de transesterificación catalítica. A diferencia de los fundamentos presentados en el marco teórico, en esta sección se presentan los resultados obtenidos durante la identificación experimental de la dinámica del reactor y la implementación del sistema de control.

Como parte del procedimiento experimental, se realizó una prueba de calentamiento en lazo abierto con el propósito de caracterizar la respuesta térmica del reactor frente a un cambio en la potencia suministrada a la resistencia eléctrica. A partir de la curva de reacción obtenida se identificaron los parámetros dinámicos del proceso, los cuales permitieron representar el comportamiento del reactor mediante un modelo de Proceso Integrador con Tiempo Muerto (IPDT), adecuado para procesos batch con acumulación de energía y ausencia de autorregulación térmica (Skogestad, 2003). Con base en dicho modelo, se efectuó la sintonización de un controlador Proporcional–Integral (PI) mediante el método Internal Model Control (IMC), empleando las reglas propuestas por Chien y Fruehauf (1990). Posteriormente, el controlador fue implementado en LabVIEW para regular automáticamente la temperatura del reactor durante el proceso experimental, mientras que la velocidad de agitación fue configurada de acuerdo con las condiciones establecidas para cada ensayo.

4.4.1 Modelado dinámico del proceso térmico del reactor batch

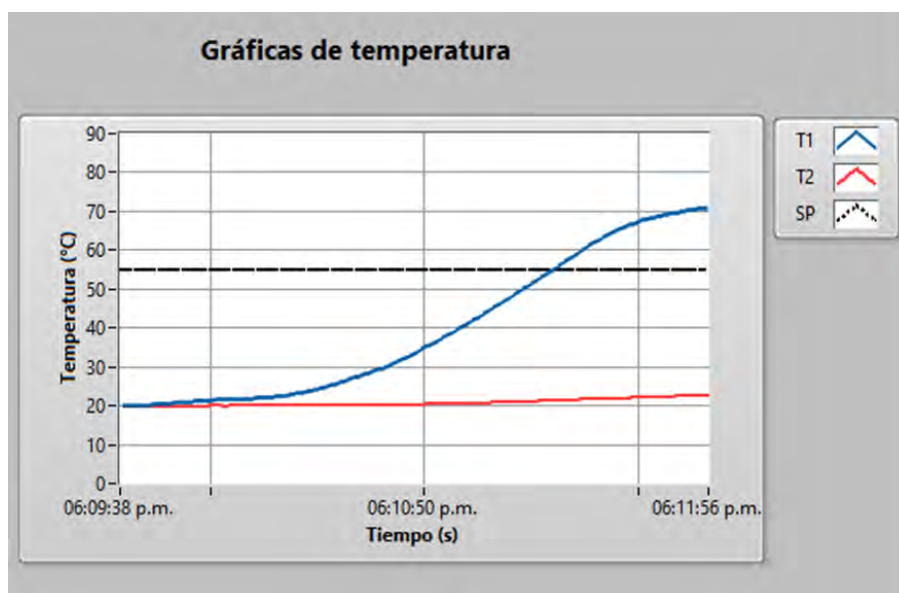
4.4.1.1 Prueba Experimental de Calentamiento

Con el objetivo de evaluar el comportamiento dinámico del sistema térmico del reactor batch, se realizó una prueba experimental de calentamiento en lazo abierto. Para ello, se energizó la resistencia eléctrica del reactor, permitiendo que la temperatura del aceite vegetal residual aumentara desde aproximadamente 20 °C hasta valores cercanos a 70 °C.

Durante esta prueba no se aplicó acción automática de control, ya que el objetivo fue observar la respuesta natural del sistema frente al calentamiento. La variable de entrada correspondió a la potencia suministrada a la resistencia eléctrica, mientras que la variable de salida estuvo representada principalmente por la temperatura del aceite registrada mediante el sensor T1. La Figura 18 muestra la curva experimental de calentamiento obtenida durante la prueba, en la cual se registraron las temperaturas medidas por los sensores T1 y T2, así como el punto de referencia establecido para el proceso.

Figura 18

Curva experimental de calentamiento del reactor batch registrada mediante LabVIEW



La Figura 18 muestra la evolución de la temperatura registrada por los sensores T1 y T2 durante la prueba de calentamiento del reactor. La señal T1 corresponde a la temperatura principal del aceite en el reactor, mientras que T2 representa la temperatura superficial o de la zona superior del sistema. La línea discontinua representa el punto de referencia establecido en 55 °C.

Por otro lado, la señal T2 mostró una variación menor, debido a que corresponde a una zona distinta del sistema, asociada a la superficie o zona superior del reactor. La respuesta del

sistema evidenció un comportamiento característico de los procesos térmicos. Inicialmente se observó un retardo asociado al tiempo requerido para que la energía suministrada por la resistencia eléctrica se transfiriera al medio reactivo y fuera detectada por el sensor de temperatura. Posteriormente, la temperatura presentó un incremento gradual, propio de sistemas con acumulación de energía térmica.

Durante la prueba, el sistema superó el punto de referencia de 55 °C debido a que el ensayo se realizó en lazo abierto, es decir, sin la intervención del controlador automático. Esta condición permitió observar la respuesta natural del sistema y obtener información útil para la identificación del comportamiento dinámico del reactor.

4.4.1.2 Determinación de parámetros dinámicos del proceso

A partir de los datos experimentales registrados durante la prueba de calentamiento en lazo abierto del reactor batch, se procedió a identificar los parámetros dinámicos utilizando un Modelo de Proceso Integrador con Tiempo Muerto (IPDT). La selección de este modelo responde a la naturaleza física del reactor por lotes con aislamiento térmico, donde la temperatura experimenta un incremento lineal continuo (comportamiento en rampa) mientras la resistencia eléctrica permanezca energizada al 100%, evidenciando una ausencia total de autorregulación térmica dentro del horizonte operativo analizado (Skogestad, 2003).

Para la determinación numérica de los parámetros de la función de transferencia integradora en el dominio de Laplace, se procesaron los datos experimentales de la curva de reacción registrada durante la prueba de calentamiento en lazo abierto (Figura 18).

4.4.1.3 Análisis del comportamiento dinámico del proceso

El comportamiento dinámico del reactor estuvo determinado principalmente por la inercia térmica del aceite, de la resistencia eléctrica y de los componentes metálicos del sistema.

Esta inercia ocasionó que la temperatura no respondiera de manera inmediata a la energización de la resistencia, sino que presentara un incremento progresivo.

La forma de la curva experimental confirma que el proceso posee una respuesta lenta y gradual. Este comportamiento resulta coherente con los sistemas térmicos, en los cuales la transferencia de calor ocurre de manera progresiva debido a la acumulación de energía en el medio y en las paredes del reactor.

El análisis de la prueba de calentamiento permitió establecer que el sistema no debe ser controlado de forma brusca, ya que una acción excesiva sobre la resistencia podría generar sobrecalentamientos o desviaciones respecto al punto de operación. Por esta razón, fue necesario implementar un controlador que permitiera regular la potencia suministrada al sistema de calentamiento y mantener la temperatura cercana al valor deseado.

4.4.2 Sintonización del controlador PI mediante el método Internal Model Control (IMC)

Con base en la prueba experimental de calentamiento y en el comportamiento dinámico observado del reactor, se realizó la sintonización del controlador de temperatura tipo Proporcional–Integral (PI). La finalidad de esta etapa fue determinar los parámetros de la ganancia proporcional (K_c) y el tiempo integral (T_i), permitiendo que el sistema mantuviera la temperatura de operación próxima al punto de consigna durante el proceso de transesterificación catalítica. Previamente, el comportamiento dinámico del reactor fue representado mediante un modelo de Proceso Integrador con Tiempo Muerto (Integrating Process with Dead Time, IPDT), considerando que durante la etapa de calentamiento el sistema presenta acumulación de energía y ausencia de autorregulación térmica, características propias de los reactores batch (Skogestad, 2003). Una vez definido el modelo IPDT e identificados sus parámetros dinámicos, la sintonización del controlador se realizó mediante el método Internal

Model Control (IMC) empleando las reglas propuestas por Chien y Fruehauf (1990) para procesos integradores con tiempo muerto.

Estas reglas contemplan dos alternativas de diseño, denominadas Modelo M y Modelo N, las cuales permiten calcular los parámetros del controlador PI a partir de la ganancia del proceso (K), el tiempo muerto (θ) y el parámetro de diseño del lazo cerrado (τ_c). En el presente trabajo se seleccionó el Modelo M para la determinación de los parámetros del controlador, debido a que esta formulación conduce a un controlador Proporcional-Integral (PI) puro, sin término derivativo. Esta decisión se adoptó para evitar la amplificación del ruido de alta frecuencia inherente a la señal del sensor de temperatura, efecto característico de la acción derivativa (T_d) que sí incorpora el Modelo N.

4.4.2.1 Modelo matemático - IPDT

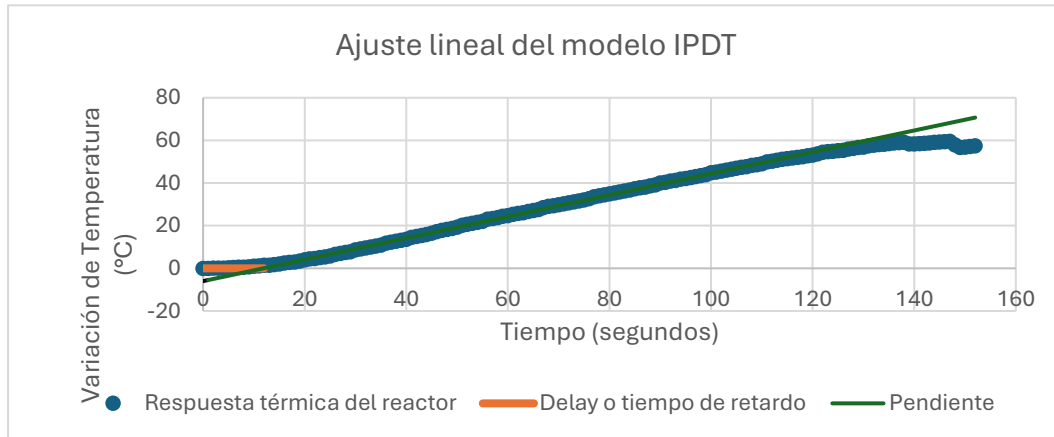
La caracterización matemática de la planta se consolidó mediante la función de transferencia de un sistema integrador puro en el dominio de Laplace, expresada por la Ecuación 32.

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{s} = \frac{0.5e^{-12s}}{s} \quad (32)$$

Este comportamiento que se observa en la Figura 19, demuestra de forma concluyente la naturaleza integradora del reactor. Al tratarse de un sistema cerrado y aislado térmicamente, el sistema actúa como un acumulador puro de energía; es decir, no disipa el calor recibido, sino que integra y acumula de manera continua cada unidad de potencia térmica inyectada por el actuador. Esta ausencia natural de autorregulación térmica dentro del horizonte operativo analizado es la que obliga matemáticamente a utilizar el término “1/s” en el denominador del modelo, validando que el sistema requiere un control automático en lazo cerrado para evitar un desborde térmico destructivo.

Figura 19

Curva de reacción experimental y ajuste lineal del modelo IPDT para el lazo de temperatura del reactor batch



- **Determinación de los parámetros del modelo IPDT**

La selección de este modelo matemático es la científicamente correcta para reactores por lotes aislados, debido a que el sistema presenta acumulación continua de energía interna y una ausencia natural de autorregulación térmica dentro del horizonte operativo analizado. Es decir, la temperatura del aceite vegetal residual experimenta un incremento lineal sostenido (comportamiento en rampa) mientras la resistencia eléctrica permanezca encendida a potencia constante (Skogestad, 2003).

1. **Tiempo muerto (θ)**

Se identificó el intervalo durante el cual la temperatura permaneció dentro del rango de resolución del sensor respecto a su valor inicial, correspondiente a los primeros 12 segundos de la prueba, antes de que la señal mostrara un incremento sostenido y consistente. Quedando el valor de tiempo muerto denominado por:

$$\theta = 12 \text{ segundos}$$

2. **Ganancia del proceso (K)**

La ganancia del proceso representa la sensibilidad térmica del reactor frente a una variación sostenida de la potencia suministrada a la resistencia eléctrica. Debido al comportamiento integrador del sistema, esta ganancia no se determinó a partir de una

temperatura final de estado estacionario, sino mediante la pendiente de la respuesta térmica observada en la región aproximadamente lineal de la curva de calentamiento.

A partir de la curva de reacción experimental mostrada en la Figura 19, se seleccionaron dos puntos representativos: el primero, correspondiente al término del retardo térmico, en $t = 12$ s y $\Delta T = 0^\circ\text{C}$; y el segundo, ubicado dentro del régimen lineal sostenido, en $t = 128$ s y $\Delta T = 58^\circ\text{C}$. La diferencia de temperatura entre ambos puntos fue de 58°C , durante un intervalo de 116 s, obteniéndose una pendiente térmica de 0.50°C/s . Considerando que el escalón de potencia aplicado fue normalizado como una entrada unitaria, la ganancia del proceso fue:

$$K = 0.5^\circ\text{C/s}$$

Este resultado indica que, una vez superado el tiempo muerto, la temperatura del reactor aumentó aproximadamente 0.50°C por segundo ante la aplicación de la entrada de potencia normalizada, consistente con el procedimiento de identificación de procesos integradores descrito por Seborg et al. (2016).

3. Constante de tiempo (τ_c)

A diferencia de las anteriores, esta variable no es una propiedad física intrínseca del reactor, sino un parámetro de desempeño que el diseñador selecciona para fijar la velocidad de respuesta que tendrá el lazo cerrado una vez que intervenga el controlador automático.

De acuerdo con los criterios de optimización para Control de Modelo Interno (IMC) propuestos por Skogestad (2003), para plantas que carecen de autorregulación (como los procesos integradores puros), el límite de velocidad más agresivo técnicamente realizable sin inducir inestabilidad u oscilaciones destructivas consiste en igualar el tiempo de respuesta del lazo a la misma magnitud del retardo físico del reactor ($T_c = \theta$) Para la sintonización del lazo

térmico de este reactor batch, se seleccionó metodológicamente una constante de tiempo de diseño con un valor de:

$$\tau_c = 12 \text{ segundos}$$

Es fundamental precisar que, aunque conceptualmente ambas variables poseen naturalezas e interpretaciones físicas totalmente independientes, establecer el parámetro de diseño (τ_c) en 12 segundos constituye una decisión de ingeniería orientada a garantizar un lazo cerrado robusto frente a perturbaciones térmicas de baja frecuencia en la transesterificación, evitando a su vez un esfuerzo excesivo que sature el actuador de potencia.

4.4.2.2 Formulación Analítica de Sintonización

Una vez identificado el modelo, se procedió con el cálculo analítico de las constantes que gobernarán el algoritmo de control Proporcional-Integral (PI), basándose en las directrices establecidas por de Chien y Fruehauf (1990).

De acuerdo con el enfoque analítico del Modelo M, el método introduce una constante de tiempo de filtro para aproximar de forma lineal el término exponencial del tiempo muerto en el lazo cerrado. Las ecuaciones algebraicas agrupan originalmente las variables bajo el concepto de Ganancia Global del Lazo Cerrado ($K_c K$) acoplando la acción del algoritmo (K_c) con la sensibilidad física del reactor (K) para manejar una escala temporal pura basada exclusivamente en segundos:

Las expresiones matemáticas cerradas para derivar las constantes del controlador PI se observan en la Ecuación 4.

- **Determinación de la Ganancia Proporcional (K_c):**

Sustituyendo los valores identificados previamente K_c queda representado por:

$$K_c = 0.0625$$

- **Cálculo del Tiempo Integral del Controlador (τ_i):**

Como último paso del desarrollo secuencial, se determinó el tiempo integral del lazo en segundos:

$$\tau_i = 36 \text{ segundos} = 0.6 \text{ minutos}$$

Para la sintonización del lazo de control de temperatura se seleccionó la implementación de un controlador PI en lugar de un controlador PID completo. Esta decisión se fundamenta rigurosamente en la naturaleza del proceso térmico analizado y en las directrices de diseño del Anexo 7, Chien y Fruehauf (1990) para el Caso M; el cual suprime por completo el tiempo derivativo al tratar con sistemas integradores puros con elevada capacidad de almacenamiento energético.

En este tipo de sistemas, la acción derivativa no aporta una mejora significativa en el desempeño global del control. La función principal del término derivativo es anticipar cambios rápidos evaluando la tasa de cambio instantánea de la señal de error a altas frecuencias. Dado que las transiciones térmicas en el reactor batch ocurren de forma progresiva, gradual y a muy baja frecuencia debido a la gran inercia del volumen de aceite vegetal residual, la componente derivativa pierde utilidad práctica. Por otro lado, la inclusión de la acción derivativa introduce una susceptibilidad crítica frente al ruido de alta frecuencia intrínseco en las lecturas analógicas de los sensores de temperatura (termopares).

Dado que el objetivo del sistema automatizado es guiar la temperatura de manera suave hasta el valor de consigna de 55 °C y mantenerla en estado estacionario anulando el error remanente, las acciones proporcional e integral del algoritmo PI cubren con total eficiencia y robustez los requerimientos del proceso. Su implementación simplifica la estructura del lazo en LabVIEW, disminuye el esfuerzo del actuador y evita la complejidad operacional y los

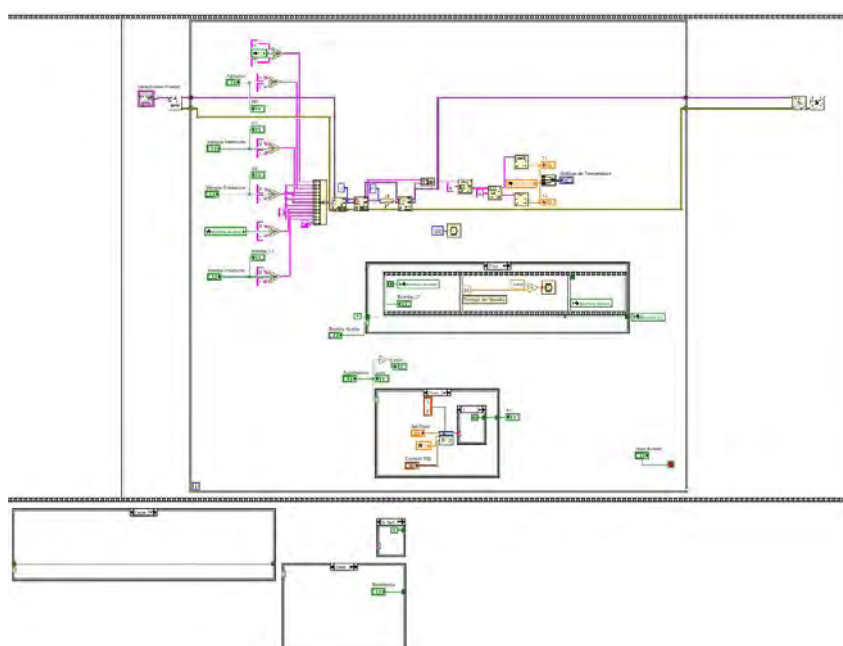
problemas de inestabilidad asociados a una acción derivativa innecesaria en sistemas térmicos integradores.

4.4.3 Implementación del sistema de control en LabVIEW

El controlador PI fue implementado en la interfaz HMI desarrollada en LabVIEW, la cual permitió adquirir, procesar y visualizar en tiempo real las señales provenientes del reactor. La temperatura fue medida mediante los sensores instalados en el sistema, mientras que la acción de control se aplicó sobre la resistencia eléctrica encargada del calentamiento del medio reactivo. Adicionalmente, la HMI incorporó funciones para el accionamiento del sistema en modo manual y automático, el ingreso del valor de referencia de temperatura, la configuración de la velocidad de agitación y la visualización del estado de los dispositivos asociados al proceso. Esta interfaz facilitó la interacción entre el operador y el sistema de control, permitiendo la supervisión y operación del reactor desde una única plataforma. La Figura 20 presenta la interfaz desarrollada en LabVIEW para el monitoreo y control del sistema.

Figura 20

Programación del interfaz HMI en LabView

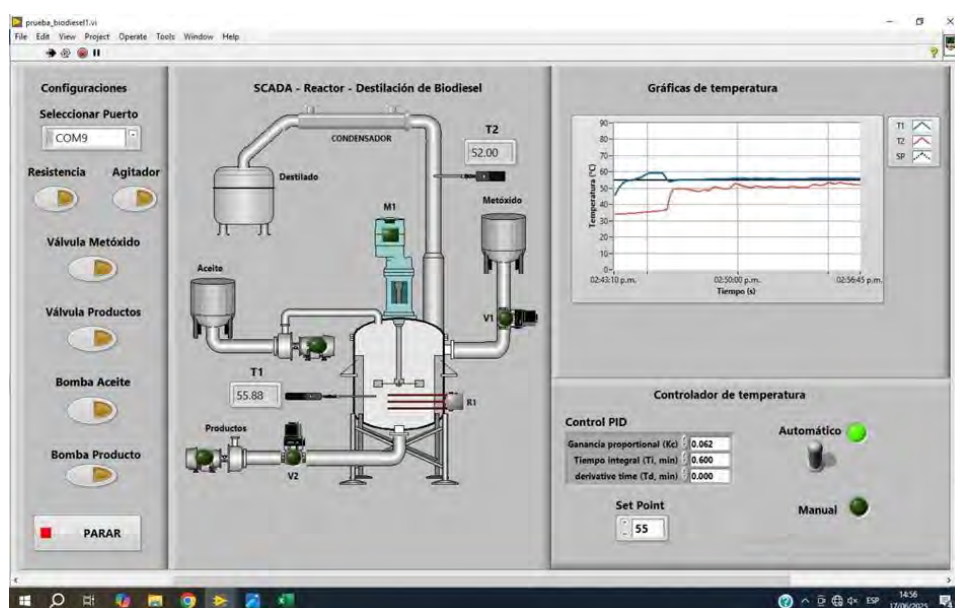


La interfaz permitió establecer el punto de referencia de temperatura, ingresar los parámetros del controlador, visualizar la evolución del proceso y monitorear el comportamiento de las señales T1, T2 y SP. Asimismo, el sistema permitió operar el reactor en modo automático, activando la lógica de control para mantener la temperatura cercana al valor deseado.

Como se observa en la Figura 21, los parámetros obtenidos durante la sintonización del controlador fueron ingresados en la interfaz HMI desarrollada en LabVIEW. En dicha interfaz se estableció un setpoint de 55 °C y se activó el modo automático, permitiendo que el sistema regulara la potencia suministrada a la resistencia eléctrica en función del error de temperatura.

Figura 21

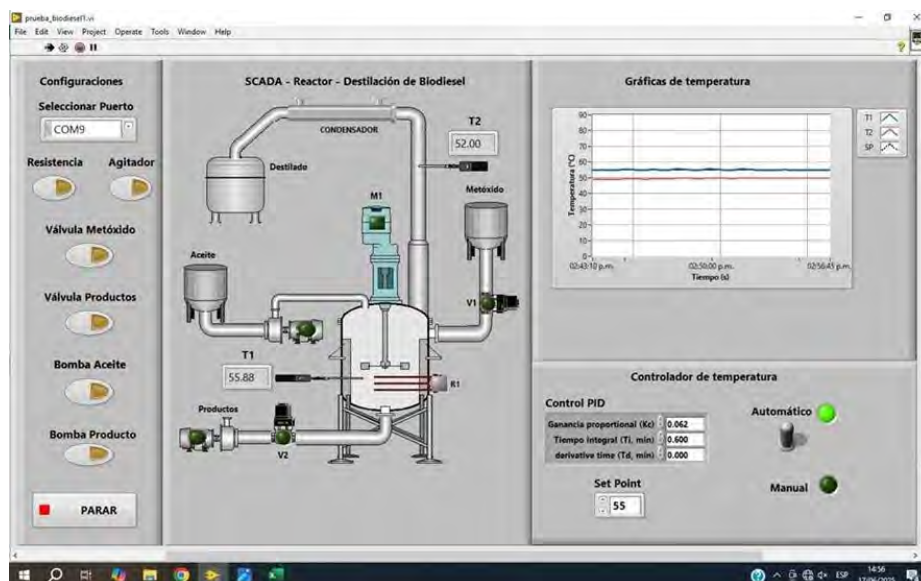
Interfaz HMI del reactor batch durante la operación automática del controlador PI de temperatura



La Figura 21 muestra la interfaz HMI desarrollada en LabVIEW durante la operación automática del reactor batch. Se observan los parámetros del controlador PI: $K_c = 0.062$ y $\tau_i = 0.6$ min, el setpoint de 55 °C, las lecturas de temperatura T1 y T2, y la gráfica de seguimiento térmico del sistema.

Figura 22

Interfaz HMI del reactor batch con temperatura estabilizado al aplicar control de lazo cerrado



Durante la operación automática, la temperatura principal del reactor, representada por el sensor T1, se mantuvo cercana al punto de referencia establecido, alcanzando valores aproximados de 55.88 °C. Por su parte, el sensor T2 registró una temperatura aproximada de 52.00 °C, correspondiente a una zona distinta del sistema. Esta diferencia entre ambas lecturas se atribuye a la ubicación de los sensores y a la distribución térmica interna del reactor.

La gráfica de temperatura muestra que, luego de la etapa inicial de calentamiento, el controlador ajustó la señal de salida para mantener la temperatura alrededor del valor deseado. Esto evidencia que los parámetros calculados y ajustados permitieron regular el comportamiento térmico del reactor y reducir desviaciones significativas respecto al setpoint.

4.4.4 Exportación y análisis de datos registrados en LabVIEW

Los datos registrados durante las pruebas de calentamiento y control fueron exportados desde LabVIEW a una hoja de cálculo para su posterior análisis. Esta exportación permitió organizar los valores de tiempo, temperatura T1, temperatura T2 y setpoint, así como calcular el error de control, el error absoluto y la estabilidad del sistema respecto al punto de operación.

La Tabla 17, corresponde a datos exportados que permitieron verificar la evolución de la temperatura durante la prueba de calentamiento y durante la operación automática del controlador PI. Asimismo, permitió identificar el instante en que la temperatura alcanzó el valor correspondiente al 63.2 % de la variación total, empleado para estimar la constante de tiempo del sistema térmico.

Tabla 17

Estructura de datos exportados desde LabVIEW para el análisis del control de temperatura

Tiempo (s) - T1	Temperatura (°C) - T1	Tiempo (s) - T2	Temperatura (°C) - T2	Tiempo (s) - SP	Temperatura (°C) - SP
6:09:39 p. m.	20	6:09:39 p. m.	19.75	6:09:38 p. m.	55
6:09:42 p. m.	20.12	6:09:42 p. m.	19.75	6:09:42 p. m.	55
6:09:45 p. m.	20.25	6:09:45 p. m.	19.75	6:09:44 p. m.	55
6:09:46 p. m.	20.37	6:09:46 p. m.	19.75	6:09:46 p. m.	55
6:09:49 p. m.	20.5	6:09:49 p. m.	19.75	6:09:48 p. m.	55
6:09:50 p. m.	20.62	6:09:50 p. m.	19.75	6:09:49 p. m.	55
6:09:51 p. m.	20.75	6:09:51 p. m.	19.75	6:09:50 p. m.	55
6:09:53 p. m.	20.87	6:09:53 p. m.	19.75	6:09:52 p. m.	55
6:09:54 p. m.	21	6:09:54 p. m.	19.75	6:09:54 p. m.	55
6:09:56 p. m.	21.12	6:09:56 p. m.	19.75	6:09:55 p. m.	55
6:09:57 p. m.	21.25	6:09:57 p. m.	19.75	6:09:57 p. m.	55
6:09:59 p. m.	21.37	6:09:59 p. m.	19.87	6:09:58 p. m.	55
6:10:01 p. m.	21.5	6:10:01 p. m.	19.87	6:10:00 p. m.	55
6:10:03 p. m.	21.62	6:10:03 p. m.	19.75	6:10:02 p. m.	55
6:10:05 p. m.	21.75	6:10:05 p. m.	19.87	6:10:05 p. m.	55
6:10:08 p. m.	21.87	6:10:08 p. m.	19.87	6:10:07 p. m.	55
6:10:10 p. m.	22	6:10:10 p. m.	19.87	6:10:09 p. m.	55

Tiempo (s) - T1	Temperatura (°C) - T1	Tiempo (s) - T2	Temperatura (°C) - T2	Tiempo (s) - SP	Temperatura (°C) - SP
6:10:13 p. m.	22.12	6:10:13 p. m.	19.87	6:10:12 p. m.	55
6:10:14 p. m.	22.25	6:10:14 p. m.	19.87	6:10:13 p. m.	55
6:10:15 p. m.	22.37	6:10:15 p. m.	19.87	6:10:14 p. m.	55
6:10:16 p. m.	22.5	6:10:16 p. m.	19.87	6:10:15 p. m.	55
6:10:17 p. m.	22.62	6:10:17 p. m.	19.87	6:10:17 p. m.	55
6:10:18 p. m.	22.87	6:10:18 p. m.	19.87	6:10:17 p. m.	55
6:10:19 p. m.	23	6:10:19 p. m.	19.87	6:10:18 p. m.	55

4.4.5 Aplicación del sistema de control de temperatura y velocidad de agitación

- *Control de Temperatura*

La implementación del controlador PI permitió mejorar la regulación de temperatura durante el proceso de transesterificación catalítica. El reactor presentó una dinámica térmica lenta, asociada a la acumulación de energía y al retardo propio del sistema de calentamiento; sin embargo, el controlador permitió mantener la temperatura alrededor del punto de operación establecido. El control de temperatura resultó fundamental para evitar desviaciones que pudieran afectar la cinética de reacción, la evaporación prematura del metanol o la formación de subproductos no deseados. Asimismo, la regulación de la agitación contribuyó a mejorar la transferencia de masa entre las fases presentes en el sistema, favoreciendo la reproducibilidad del proceso.

El desempeño del sistema de control evidenció que los parámetros PI implementados permitieron mantener la temperatura cercana al setpoint de 55 °C. La identificación previa del comportamiento térmico del reactor y el ajuste experimental del controlador en LabVIEW permitieron establecer una operación más estable, segura y reproducible.

- **Control de Agitación**

A diferencia del sistema de control de temperatura, que requirió el diseño e implementación de un controlador Proporcional–Integral (PI) sintonizado mediante el método IMC, el sistema de agitación se implementó mediante una estrategia de regulación manual de la velocidad utilizando el controlador (SC-101), el Arduino Mega y el variador de frecuencia (SY-101). La velocidad de operación fue establecida como una referencia fija mediante el ajuste de la perilla del potenciómetro, sin incorporarse una señal de retroalimentación de la velocidad del eje. Durante la implementación del sistema de control en el reactor se reprodujo únicamente la condición experimental de mayor rendimiento (C3), correspondiente a una velocidad nominal de agitación de 700 rpm, debido a que esta condición presentó el mayor rendimiento en las pruebas experimentales previas y fue seleccionada para la validación del sistema de control de temperatura.

La velocidad de referencia fue establecida mediante el ajuste del potenciómetro conectado al Arduino Mega, cuya señal analógica fue convertida por el conversor analógico-digital y enviada al variador de frecuencia (SY-101), encargado de regular la frecuencia de alimentación del motor (M). Para esta condición, la correspondencia teórica entre la velocidad nominal y la señal de referencia se presenta en la Tabla 18.

Tabla 18

Correspondencia teórica entre la señal adquirida por el Arduino y la velocidad de agitación

Velocidad de referencia (rpm)	Porcentaje de señal (%)	Tensión estimada (V)	Lectura ADC teórica	ADC redondeado
700	50	2.50	511.50	512

Los resultados del escalamiento mostraron que la velocidad nominal de agitación implementada en el reactor, correspondiente a la condición experimental con mayor rendimiento: C3, fue de 700 rpm. Este valor representó el 50 % del rango de la señal analógica, equivalente a una tensión de 2.50 V y una lectura de 512 unidades ADC.

Previo al inicio de la reacción, la perilla del controlador de velocidad (SC-101) fue ajustada a dicho valor y se mantuvo fija durante el tiempo de operación, mientras el variador de frecuencia (SY-101) reguló la frecuencia de alimentación del motor (M) para establecer la velocidad nominal de agitación. La implementación permitió mantener constante la condición de agitación establecida durante toda la prueba experimental, proporcionando condiciones uniformes de mezcla durante la validación del sistema de control de temperatura.

4.5 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del Biodiésel y rendimiento del producto

Una vez finalizada la transesterificación, los productos principales de la reacción, el biodiésel y la glicerina, deben separarse. Estos dos compuestos tienen diferencias significativas en densidad, lo que permite su separación mediante decantación (Hervé, 2007). El biodiésel, al ser menos denso que la glicerina, flota en la parte superior del reactor, mientras que la glicerina se acumula en el fondo, tal como se observa en el Apéndice 3.

La correcta separación de las fases es crucial, ya que la presencia de glicerina residual en el biodiésel puede afectar negativamente sus propiedades de combustión y su estabilidad a largo plazo (Hernández et al., 2018). A continuación, se observa en la Figura 23 y 24 los resultados de la separación de fases realizadas de la prueba 1 a la 4 correspondientemente:

Figura 23

Resultados de la separación de fases correspondientes a las pruebas experimentales 1 al 4 de la réplica 1



Figura 24

Resultados de la separación de fases correspondientes a las pruebas experimentales 1 al 4 de la réplica 2



4.5.1 Lavado de Biodiesel

El lavado se realizó utilizando agua destilada a 60°C, una temperatura que favorece la solubilidad de los compuestos no deseados y permite una eliminación más eficiente de estos. Este proceso se repitió varias veces para garantizar que el biodiésel estuviera libre de impurezas.

Después de varias etapas de lavado, el agua utilizada debe estar lo más libre posible de estos contaminantes. Por esta razón, el pH del agua destilada, que originalmente debería ser neutro (pH 7), es monitoreado cuidadosamente. Si el pH del agua del lavado se mantiene cerca de 7, indica que no hay residuos ácidos ni básicos significativos presentes en el biodiésel, lo que sugiere que el proceso de purificación ha sido efectivo. Si el pH del agua fuera más bajo (ácido) o más alto (básico), sería una señal de que aún quedan impurezas en el biodiésel que necesitan ser eliminadas para garantizar la pureza del producto final. En la Figura 25 y Figura 26 se observa la aplicación del lavado de biodiésel a los diferentes experimentos realizados.

Figura 25

Lavado de Biodiésel correspondientes a los experimentos C1, C2, C3 y C4



Figura 26

Lavado de Biodiésel correspondiente a la prueba 3 de la replica 1 (C3)



4.5.2 Secado de Biodiesel

Para el secado de biodiesel se utilizó una estufa a la temperatura de 60°C durante un período de 24 horas, como se observa en el Apéndice 4 Esta temperatura es suficiente para evaporar el agua residual que puedan contener las muestras posteriores al lavado, así mismo se llevó el control de peso del biodiesel antes del ingreso a la estufa y al concluir el tiempo de secado, los resultados se observan en la Tabla 19.

Tabla 19

Peso de las muestras antes y después del proceso de secado a 60°C promedio de pesos y desviación estándar

Prueba Experimental	Peso final (g)	Desv. final (g)	Peso inicial (g)	Desv. inicial (g)
C1	211.312	5.512	211.366	5.516
C2	215.099	5.226	215.15	5.223
C3	216.277	1.612	216.329	1.609
C4	217.502	1.057	217.555	1.061
C5	222.288	0.464	222.34	0.46
C6	217.627	4.163	217.682	4.164
C7	212.634	4.062	212.687	4.064
C8	199.524	2.235	199.574	2.236
C9	210.92	0.105	210.972	0.107

4.5.3 Caracterización de las Propiedades Fisicoquímicas del Biodiesel

4.5.3.1 Punto de inflamación

Para la determinación del punto de inflamación del biodiésel en este estudio, se utilizó el equipo PetroTest, el cual podemos observar en la Figura 27. Fue diseñado específicamente para realizar pruebas de seguridad y características de combustibles líquidos, incluyendo el biodiésel. Este equipo funciona siguiendo el método estándar de copa cerrada, en el cual una pequeña cantidad de la muestra de biodiésel se coloca en una cámara cerrada, y la temperatura de la muestra se aumenta de manera controlada. Durante el calentamiento, se introduce una pequeña llama a intervalos específicos, y el punto de inflamación se determina como la temperatura más baja a la cual se produce una ignición espontánea de los vapores emitidos por

el biodiésel, tal como se observa en el Apéndice 6. Este procedimiento es clave para asegurar que los resultados obtenidos sean reproducibles y cumplan con las exigencias de la Norma Técnica Peruana 321.125, que establece que el biodiésel debe tener un punto de inflamación mínimo de 93°C.

Figura 27

Determinación del punto de inflamación de las muestras utilizando el equipo PetroTest



A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 20, correspondientes al punto de inflamación:

Tabla 20

Resultados del punto de inflamación de la Primera y Segunda prueba experimental de las 9 muestras de Biodiésel obtenidas

Experimento	Punto de inflamación/ignición (°C)			
	Replica 1	Replica 2	Promedio	Desviación Estándar
C1	86.7	86.0	86.35	0.49
C2	88.2	88.3	88.25	0.07
C3	128.5	115.0	121.75	9.55
C4	87.3	88.3	87.80	0.71
C5	90.0	87.5	88.75	1.77
C6	88.4	87.9	88.15	0.35
C7	134.5	129.5	132.00	3.54
C8	130.0	101.0	115.50	20.51
C9	87.4	87.0	87.20	0.28

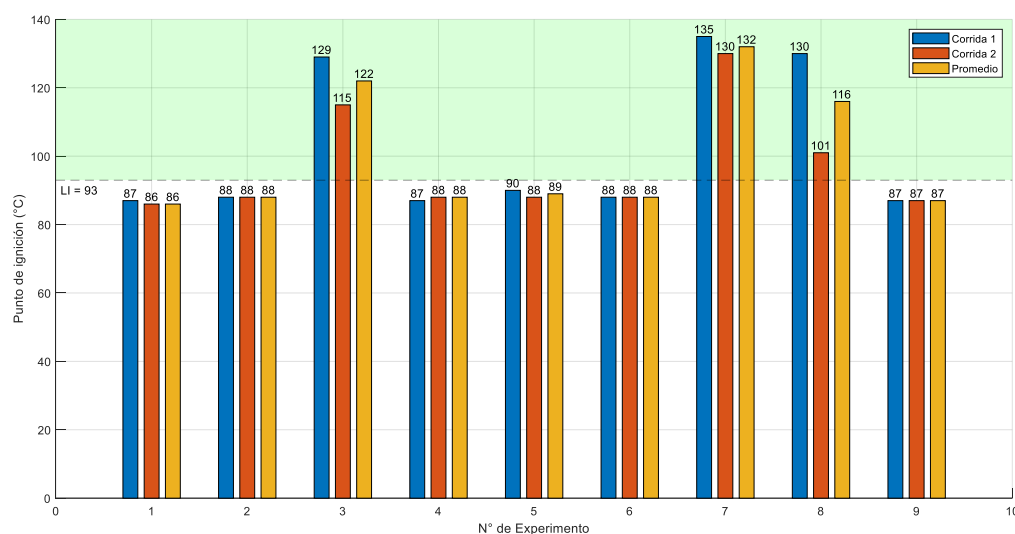
Los resultados obtenidos en las pruebas de punto de inflamación del biodiésel plasmado en la Tabla 20, revelan la influencia significativa de las condiciones experimentales sobre las propiedades del producto, al variar deliberadamente los parámetros, como la temperatura y las concentraciones de reactivos, se observó que algunas pruebas de biodiésel alcanzaron el punto de inflamación mínimo de 93°C establecido por la NTP (pruebas 3, 7 y 8), mientras que otros no (pruebas 1, 2, 4, 5, 6 y 9), quedando por debajo de este valor.

Estos resultados demuestran que, al ajustar ciertas variables, es posible cumplir con los requisitos normativos para el biodiésel, pero también que no todas las combinaciones de parámetros generan productos que cumplan con el estándar. Esto resalta la importancia de continuar ajustando los diferentes parámetros experimentales para identificar las condiciones operativas adecuadas que garanticen la producción de biodiésel con características adecuadas, como el punto de inflamación requerido.

Así, el trabajo experimental permite determinar con precisión cuáles condiciones de producción favorecen el cumplimiento de los estándares de calidad, y cuáles necesitan ser mejoradas para controlar el proceso.

Figura 28

Resultados del punto de inflamación por muestra: Replica 1, Replica 2 y promedio



La Figura 28 muestra una gráfica de barras elaborada en MATLAB, en función a los resultados presentados en la Tabla 20. Esta visualización permite evaluar con claridad la reproducibilidad de los datos y verificar el cumplimiento del valor mínimo exigido por la Norma Técnica Peruana NTP 321.125, que es de 93 °C. En la gráfica se aprecia que únicamente las muestras correspondientes a los experimentos C3, C7 y C8 lograron superar dicho umbral, con promedios de 122 °C, 132 °C y 116 °C respectivamente. Las demás muestras (experimentos C1, C2, C4, C5, C6 y C9) presentan puntos de inflamación promedio inferiores a 90 °C, por lo que no cumplen con el estándar de seguridad requerido. Además, se observa una buena consistencia entre las dos pruebas experimentales en la mayoría de las muestras, lo que refleja la confiabilidad del procedimiento experimental. Esta representación permite concluir que sólo ciertas condiciones del proceso favorecen la obtención de un biodiésel con un punto de inflamación adecuado, y resalta la importancia de controlar estrictamente los parámetros para asegurar la calidad del producto final.

Figura 29

Representación 3D del punto de inflamación generado en MATLAB según parámetros experimentales

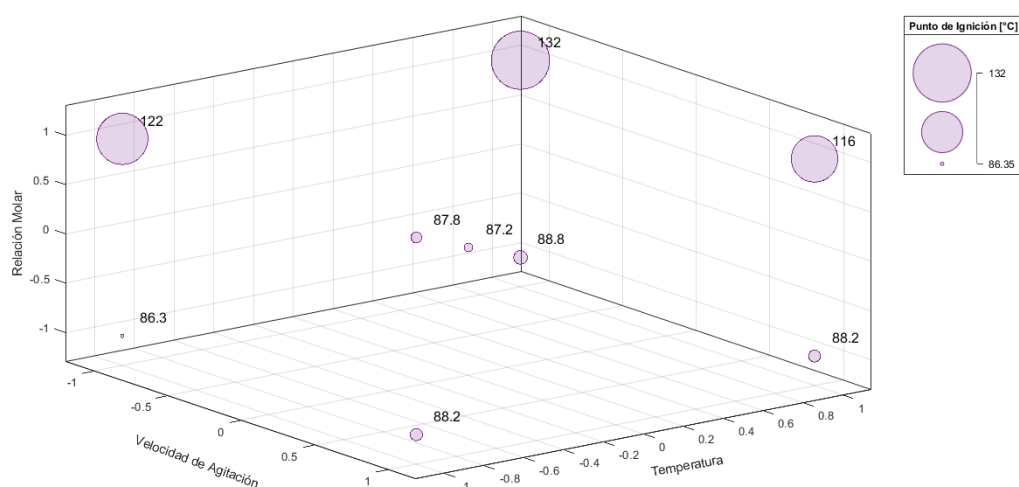
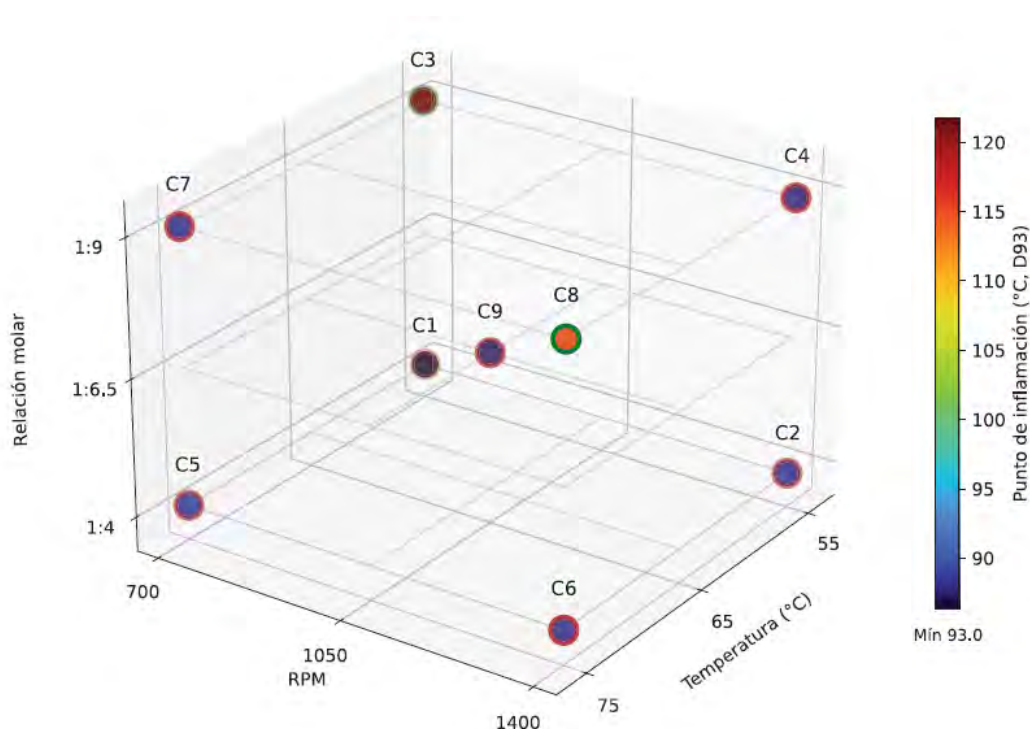


Figura 30

Diagrama de Dispersión 3D sobre resultados del punto de inflamación



La Figura 29 y 30 presenta una visualización tridimensional generada en MATLAB, en la que se representa el punto de inflamación de las muestras de biodiésel en función de la temperatura, la velocidad de agitación y relación molar que se muestra en la Tabla 20. En esta

gráfica, el tamaño de cada burbuja corresponde al valor del punto de inflamación alcanzado por cada muestra. Se observa que únicamente tres muestras superaron el valor mínimo de 93 °C exigido por la Norma Técnica Peruana NTP 321.125, alcanzando 116 °C, 122 °C y 132 °C, lo que indica un mejor comportamiento en cuanto a estabilidad térmica. Estas muestras se encuentran asociadas a condiciones de mayor velocidad de agitación y temperaturas que oscilan entre moderadas y altas, lo cual sugiere que estos parámetros influyen positivamente en la reducción de compuestos volátiles, como el metanol residual, que disminuyen el punto de inflamación. En contraste, el resto de las muestras, con valores entre 86.2 °C y 88.8 °C, no cumplen con el estándar, y se ubican principalmente en regiones del gráfico con menor temperatura y agitación. Esta representación permite identificar claramente cómo la combinación de parámetros experimentales puede afectar el punto de inflamación del biodiésel, y resalta la necesidad de ajustar estas variables para garantizar un producto que cumpla con los requisitos normativos de seguridad.

4.5.3.2 Densidad

Las mediciones de densidad se realizaron a 15°C y se pasó cada prueba experimental por el equipo Stanbinger Viscometer – ANTON PAAR- SVM 3000, cada muestra se analizó tres veces para comparar los resultados con los valores de referencia y asegurar que el biodiesel producido cumpla con los estándares de calidad. En la Tabla 21 se observan los resultados de densidad obtenidos de las 9 pruebas obtenidas:

Tabla 21

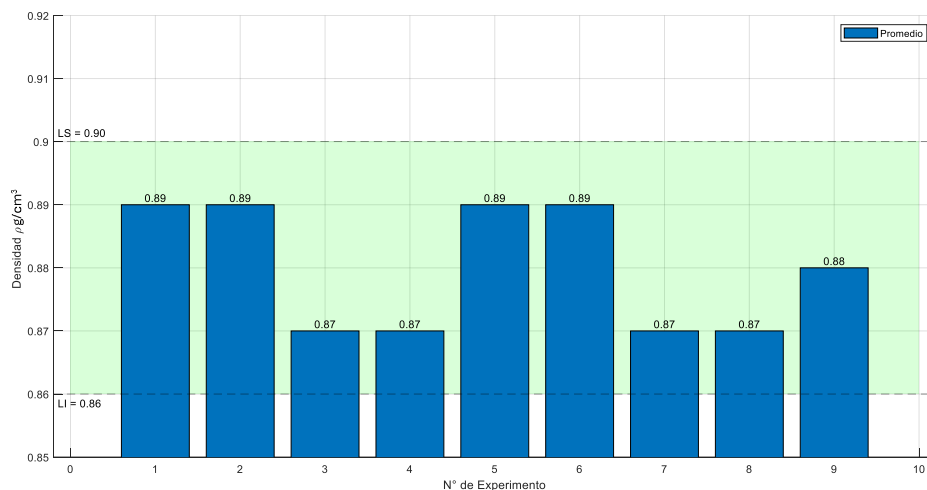
Resultados de densidad de la Primera y Segunda prueba experimental de las 9 muestras de Biodiésel obtenidas

Experimento	Densidad (kg/m ³)			
	Replica 1	Replica 2	Promedio	Desviación Estándar
C1	893	894	894	0.0007
C2	892	893	893	0.0007
C3	871	877	874	0.0042
C4	873	874	874	0.0007
C5	895	894	895	0.0007
C6	893	895	894	0.0011
C7	873	874	874	0.0007
C8	872	874	873	0.0014
C9	876	879	878	0.0021

Los resultados de densidad obtenidos en ambas pruebas experimentales cumplen con los requisitos establecidos por la normativa, ya que se encuentran dentro del rango de 0.860 a 0.900 g/cm³. Sin embargo, es importante destacar que, aunque la densidad del biodiesel esté dentro del rango aceptable, para determinar que el producto final cumple con todos los requisitos para ser considerado biodiésel, debe evaluarse también otros parámetros. Por lo tanto, si bien el producto cumple con las especificaciones de densidad, es necesario que cumpla con otros parámetros para confirmar su calidad como biodiesel.

Figura 31

Promedio de la densidad obtenida en pruebas experimentales



En la Figura 31 se presenta el gráfico elaborado en MATLAB que muestra la variación de la densidad promedio del biodiésel presentada en la Tabla 21. El área sombreada en verde representa el rango establecido por la NTP 321.125 y la EN 14214, comprendido entre 0.860 y 0.900 g/cm³ a 15 °C. Los resultados evidencian que todas las muestras se encuentran dentro de este intervalo, lo que confirma que el biodiésel obtenido cumple con los estándares. Se observa que las densidades más bajas (0.871–0.874 g/cm³) se relacionan con mayores temperaturas de reacción y velocidades de agitación, condiciones que favorecen una conversión más completa de los triglicéridos y, por tanto, una reducción en la presencia de impurezas residuales. En contraste, las densidades más altas (0.893–0.895 g/cm³) se obtuvieron en condiciones de menor temperatura y relación molar, lo cual puede asociarse con una conversión parcial o con restos de glicerol y metanol no reaccionado.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Vasudevan y Briggs (2008), quienes indicaron que una reacción de transesterificación más eficiente tiende a disminuir ligeramente la densidad del biodiésel debido a la eliminación de compuestos pesados. Asimismo, Knothe (2005) señala que la densidad del biodiésel depende directamente del tipo de ácidos grasos y del grado de conversión alcanzado, encontrándose normalmente entre 0.86 y 0.90 g/cm³, rango en el que se ubican todas las muestras de este estudio. En conjunto, el análisis confirma que el proceso experimental permitió obtener un biodiésel con propiedades físicas estables y dentro de las especificaciones normativas, evidenciando una adecuada eficiencia en la reacción de transesterificación.

Figura 32

Representación 3D de la densidad generado en MATLAB según parámetros experimentales

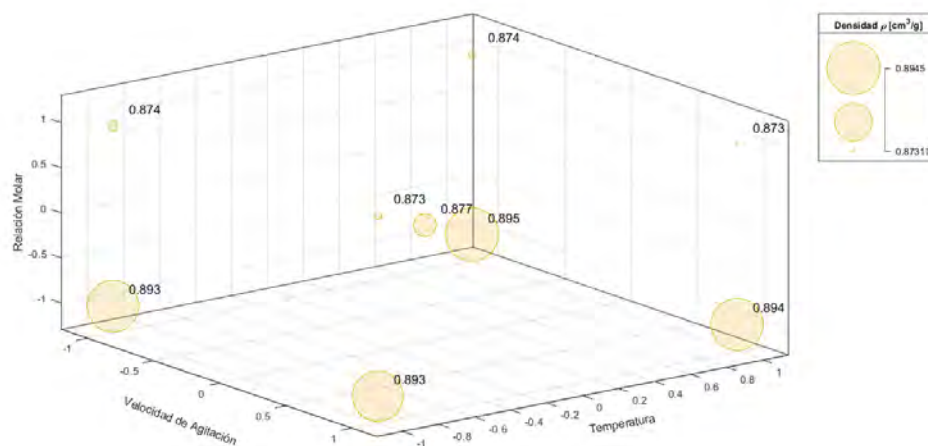
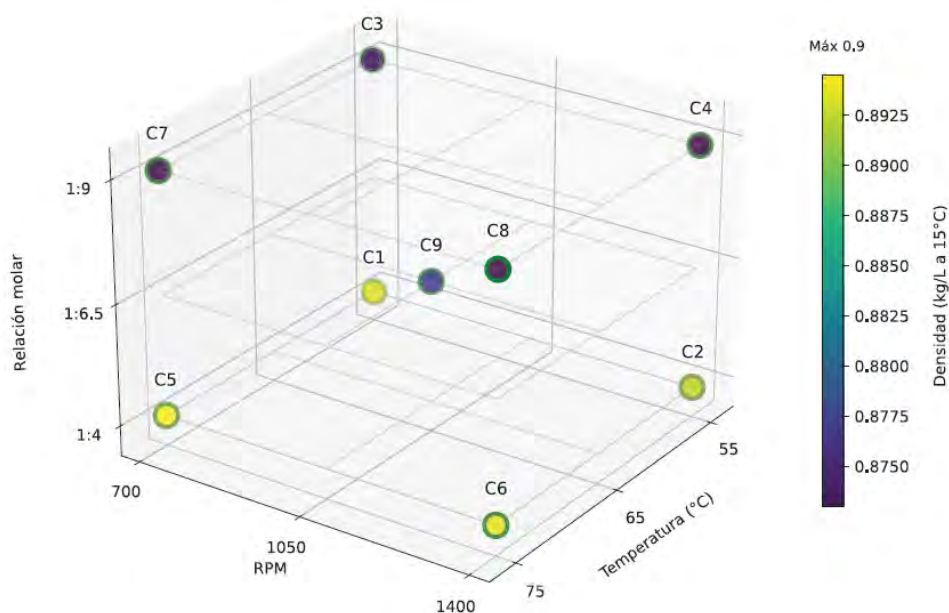


Figura 33

Diagrama de Dispersión 3D sobre resultados de densidad



En la Figura 32 y 33 se presenta la representación tridimensional obtenida en MATLAB que relaciona la densidad del biodiésel de la Tabla 21 con las variables de temperatura, velocidad de agitación y relación molar. Los valores de densidad obtenidos entre 0.871 y 0.895 g/cm^3 se encuentran dentro del rango establecido por la NTP 321.125 y la EN 14214, lo que confirma la conformidad del producto con los estándares. En el gráfico se aprecia que las mayores densidades (0.894–0.895 g/cm^3) se concentran en condiciones de baja temperatura y

menor relación molar, mientras que los valores más bajos (0.871–0.874 g/cm³) se asocian con temperaturas más elevadas y mayor velocidad de agitación. Esto indica que el incremento de la temperatura y la agitación puede favorecer una mejor conversión de triglicéridos, reduciendo ligeramente la densidad del producto final al disminuir la presencia de compuestos no reaccionados. En general, la tendencia observada respalda que la densidad del biodiésel está influenciada directamente por las condiciones de reacción, siendo un parámetro sensible para evaluar la eficiencia del proceso de transesterificación.

4.5.3.3 Viscosidad cinemática

Para medir la viscosidad se utilizó el equipo Stanbinger Viscometer – ANTON PAAR-SVM 3000, y así determinar la viscosidad de todas las pruebas. En la Tabla 22 se detallaron los resultados obtenidos en los análisis de viscosidad.

Tabla 22
Resultados de Viscosidad (mm²/s) de la Primera y Segunda prueba experimental de las 9 muestras de Biodiésel obtenidas

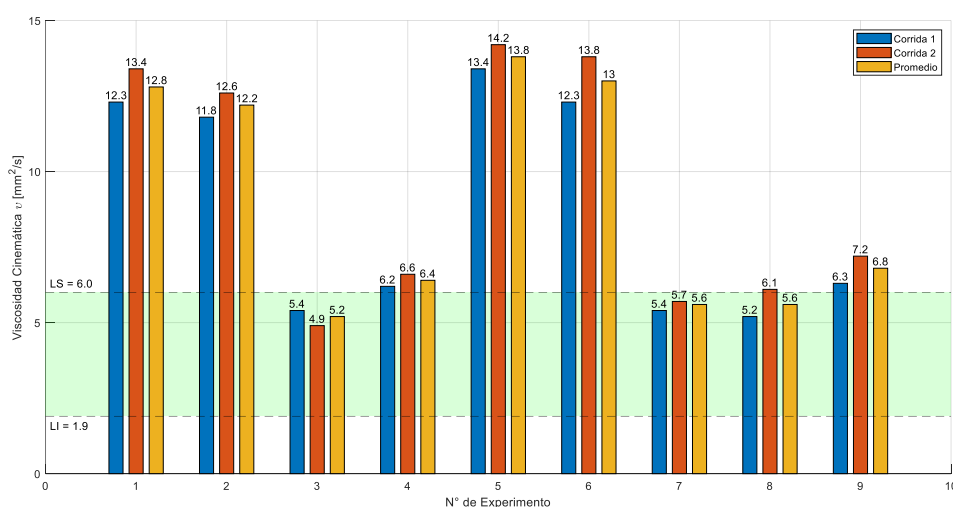
Prueba experimental	Viscosidad			
	Replica 1	Replica 2	Promedio	Desviación Estándar
C1	12.34	13.29	12.82	0.67
C2	11.76	12.60	12.18	0.59
C3	5.59	4.87	5.23	0.51
C4	6.23	6.61	6.42	0.27
C5	13.45	14.26	13.86	0.57
C6	12.35	13.98	13.16	1.15
C7	5.31	5.73	5.52	0.30
C8	5.16	6.07	5.62	0.64
C9	6.40	7.32	6.86	0.65

En las dos pruebas experimentales realizadas, los resultados de viscosidad mostraron variabilidad en las muestras analizadas. En la primera replica, las muestras C3, C7 y C8 presentaron viscosidades dentro del rango recomendado (entre 5.090 y 6.231 mm²/s), mientras que las muestras C1, C2, C5 y C6 tuvieron viscosidades significativamente altas (entre 12.177

y 13.459 mm²/s), fuera del rango ideal. La muestra C4 presentó una viscosidad cercana al límite superior de la norma. En la segunda prueba experimental, las muestras C3 y C7 cumplieron con los valores esperados (4.935 a 5.017 mm²/s), mientras que las muestras C1, C2, C5 y C6 tuvieron viscosidades altas (entre 13.246 y 14.335 mm²/s), excediendo el rango permitido. Las muestras C4, C8 y C9 presentaron valores cercanos al límite superior del rango normativo. En resumen, algunas muestras cumplieron con los requisitos de viscosidad, mientras que otras se encuentran fuera del rango recomendado, lo que sugiere que se deben ajustar los parámetros de producción para obtener un biodiesel con características de viscosidad más consistentes y dentro de los estándares normativos.

Figura 34

Resultados de viscosidad cinemática por muestra: Réplica 1, Réplica 2 y promedio



En el gráfico correspondiente a resultados de viscosidad a partir de la Tabla 22, se observa una variabilidad considerable en los resultados obtenidos para las diferentes muestras de biodiésel en ambas pruebas experimentales. Las barras representan las viscosidades de las muestras de biodiésel en la primera y segunda prueba experimental, y en general, los valores muestran una tendencia a exceder el rango recomendado de viscosidad de 1.9 a 6.0 mm²/s para biodiésel. En particular, las muestras C1, C2, C5 y C6 presentan viscosidades consistentemente

por encima del límite superior del rango normativo, con valores que oscilan entre 12.34 y 14.35 mm²/s en ambas pruebas. La muestra 4, por otro lado, presenta una viscosidad que excede ligeramente el límite superior del rango recomendado, con valores entre 6.23 y 6.61 mm²/s, lo que la sitúa fuera del intervalo ideal. Por otro lado, las muestras C3, C7 y C8 se mantienen dentro del rango deseado, con viscosidades que se ajustan al intervalo recomendado (entre 5.16 y 6.07 mm²/s), lo que indica que, bajo ciertas condiciones experimentales, se puede producir un biodiésel con viscosidad adecuada para cumplir con las normativas. Este comportamiento subraya la importancia de ajustar parámetros como la temperatura y la velocidad de agitación en el proceso de producción, ya que estos pueden influir significativamente en la viscosidad del producto final.

Figura 35

Representación 3D de la viscosidad generado en MATLAB según parámetros experimentales

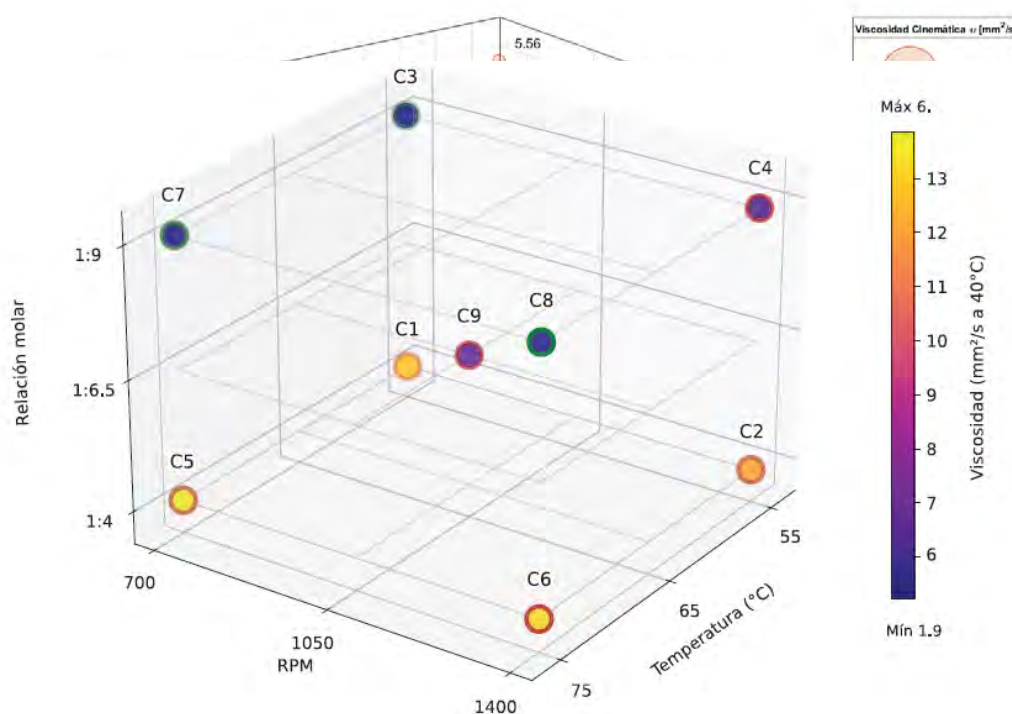


Figura 36

Diagrama de Dispersión 3D sobre resultados de viscosidad

En la Figura 36, se observa la relación entre tres variables: la velocidad de agitación, la temperatura y la viscosidad cinemática. Las burbujas representan los valores de viscosidad para

cada combinación de estas variables, y su tamaño está proporcional a la viscosidad cinemática medida en cada prueba. Las muestras con mayores viscosidades se representan con burbujas más grandes, mientras que las que tienen viscosidades menores se muestran con burbujas más pequeñas.

En el gráfico se puede notar que algunas combinaciones de velocidad de agitación y temperatura resultan en viscosidades más altas. Por ejemplo, las muestras con viscosidades cercanas a 13, como las representadas en las posiciones más altas de la gráfica, están asociadas a combinaciones de alta temperatura y velocidad de agitación. En cambio, muestras con viscosidades más bajas, como las que se encuentran cerca de 5.17 mm²/s, se asocian con valores intermedios de temperatura y velocidad de agitación. Esto sugiere que tanto la temperatura como la velocidad de agitación influyen de manera significativa en la viscosidad del biodiésel.

También se destaca que, para obtener una viscosidad más baja (en el rango recomendado), es necesario ajustar adecuadamente estas variables. El comportamiento de las burbujas indica que el biodiésel producido bajo ciertas condiciones experimentales con temperaturas y velocidades de agitación moderadas presenta viscosidades dentro del rango esperado para cumplir con las normativas. Este análisis visual subraya la importancia de mejorar los parámetros de proceso para obtener un biodiésel con las propiedades de viscosidad requeridas.

4.5.4 Porcentaje de rendimiento

Para determinar la muestra con mejor desempeño que sería replicada en el reactor, se evaluaron los resultados de cada prueba experimental considerando tres parámetros clave: densidad, viscosidad cinemática y punto de inflamación, conforme a los límites establecidos por las normas técnicas previamente expuestas (ASTM D6751, EN 14214 y NTP 321.125). A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 22 para cada prueba

experimental, destacando los porcentajes de rendimiento y su relación con los parámetros fisicoquímicos evaluados.

Cabe mencionar que, para definir la muestra más representativa, también se consideró el promedio de los porcentajes de rendimiento obtenidos en las dos réplicas de la misma condición experimental. Este criterio permitió seleccionar la muestra que, además de cumplir con las especificaciones normativas, mostró un rendimiento de conversión elevado y estable, ideal para ser replicada a escala mayor en el reactor.

Tabla 23
Porcentaje de rendimiento de las pruebas experimentales realizadas

Prueba Experimental	Rendimiento %
C1	91.5
C2	93.1
C3	93.6
C4	94.2
C5	96.2
C6	94.2
C7	92.1
C8	86.4
C9	91.3

Durante la etapa de pruebas a pequeña escala, se evaluaron nueve condiciones distintas para la producción de biodiésel mediante el proceso de transesterificación catalítica, variando principalmente la relación molar aceite:metanol. Los resultados de rendimiento (se muestran en la Tabla 23. Si bien algunas pruebas experimentales, como la C5 (96.2%), alcanzaron conversiones notablemente altas, no todas ellas resultaron adecuadas para su escalamiento,

debido a que no cumplieron con las especificaciones de calidad exigidas por la normativa técnica.

4.5.4.1 Balance de materia para la relación molar 1:4

Según la Tabla 15, para esta condición se emplearon:

- Aceite vegetal residual: 250 mL
- Metanol: 42.79 mL

Considerando una masa de aceite de 230.96 g y una densidad del metanol de 0.792 g/mL:

$$m_{\text{Metanol}} = 42.79 \times 0.792 \quad (34)$$

$$m_{\text{Metanol}} = 33.89 \text{ g}$$

Las pruebas experimentales correspondientes a esta condición fueron C1, C2, C5 y C6.

De acuerdo con la Tabla 22, la masa promedio de biodiésel obtenida fue:

$$m_{\text{Biodiesel}} = \frac{211.311 + 215.095 + 222.283 + 217.626}{4} \quad (35)$$

$$m_{\text{Biodiesel}} = 216.58 \text{ g}$$

La masa total alimentada al sistema fue:

$$\Sigma m_{\text{entrada}} = 230.96 + 33.89 + 2.31 \quad (36)$$

$$\Sigma m_{\text{entrada}} = 267.16 \text{ g}$$

La masa correspondiente a glicerina, metanol residual, formación de jabones y pérdidas del proceso fue:

$$m_{\text{otros}} = 267.16 - 216.58 \quad (37)$$

$$m_{\text{otros}} = 50.58 \text{ g}$$

Comprobación del balance:

$$230.96 + 33.89 + 2.31 = 216.58 + 50.58 \quad (38)$$

$$267.16 \text{ g} = 267.16 \text{ g}$$

Por lo tanto, se verifica el cumplimiento de la Ley de Conservación de la Masa para la relación molar 1:4.

4.5.4.2 Balance de materia para la relación molar 1:6.5

Según la Tabla 13, para esta condición se emplearon:

Aceite vegetal residual: 250 mL

Metanol: 69.54 mL

La masa de metanol fue:

$$m_{\text{Metanol}} = 69.54 \times 0.792 \quad (39)$$

$$m_{\text{Metanol}} = 55.07 \text{ g}$$

Esta condición corresponde a la prueba experimental central C9 (Tabla 8).

De acuerdo con la Tabla 19, la masa promedio de biodiésel obtenida fue:

$$m_B = 210.918 \text{ g}$$

La masa total de alimentación fue:

$$\Sigma m_{\text{entrada}} = 230.96 + 55.07 + 2.31 \quad (40)$$

$$\Sigma m_{\text{entrada}} = 288.34$$

La masa asociada a glicerina, metanol residual y pérdidas del proceso fue:

$$m_{\text{otros}} = 288.34 - 210.918 \quad (41)$$

$$m_{\text{otros}} = 77.42 \text{ g}$$

Comprobación del balance:

$$230.96 + 55.07 + 2.31 = 210.918 + 77.42 \quad (42)$$

$$288.34 \text{ g} = 288.34 \text{ g}$$

Por lo tanto, se verifica el cumplimiento de la Ley de Conservación de la Masa para la relación molar 1:6.5.

4.5.4.3 Balance de materia para la relación molar 1:9

Según la Tabla 13, para esta condición se emplearon:

Aceite vegetal residual: 250 mL

Metanol: 96.29 mL

La masa de metanol fue:

$$m_{\text{Metanol}} = 96.29 \times 0.792 \quad (43)$$

$$m_{\text{Metanol}} = 76.28 \text{ g}$$

Las pruebas experimentales correspondientes a esta condición fueron C3, C4, C7 y C8 (Tabla 8).

De acuerdo con la Tabla 19, la masa promedio de biodiésel obtenida fue:

$$m_{\text{Biodiesel}} = \frac{216.275 + 217.501 + 212.634 + 199.520}{4} \quad (44)$$

$$m_{\text{Biodiesel}} = 211.48 \text{ g}$$

La masa total alimentada fue:

$$\Sigma m_{entrada} = 230.96 + 76.28 + 2.31 \quad (45)$$

$$\Sigma m_{entrada} = 309.55$$

La masa correspondiente a glicerina, metanol residual, formación de jabones y pérdidas fue:

$$m_{otros} = 309.55 - 211.48 \quad (46)$$

$$m_{otros} = 98.07 \text{ g}$$

Comprobación del balance:

$$230.96 + 76.28 + 2.31 = 211.48 + 98.07 \quad (47)$$

$$309.55 \text{ g} = 309.55 \text{ g}$$

Por lo tanto, se verifica el cumplimiento de la Ley de Conservación de la Masa para la relación molar 1:9.

4.5.4.4 Análisis comparativo de los balances de materia

Tabla 24

Tabla resumen del balance de masa

Relación molar	Entrada total (g)	Biodiésel promedio (g)	Otros productos y pérdidas (g)
1:4	267.16	216.58	50.58
1:6.5	288.34	210.92	77.42
1:9	309.55	211.48	98.07

Los resultados de la Tabla 24, muestran que el incremento de la relación molar incrementa la cantidad de metanol alimentada al sistema y, por consiguiente, la masa total de entrada. Sin embargo, este incremento no produjo una mejora proporcional en la masa de biodiésel recuperada.

La relación molar 1:4 presentó la mayor masa promedio de biodiésel obtenida (216.58 g). No obstante, la selección de la condición de referencia del proceso no se realizó únicamente considerando el rendimiento de conversión.

De acuerdo con los resultados de calidad obtenidos, la prueba experimental C3 presentó un rendimiento de 93.64 % y fue la única condición experimental que cumplió simultáneamente con los requisitos de densidad, viscosidad cinemática y punto de inflamación establecidos por las normas ASTM D6751, EN 14214 y NTP 321.125. Por esta razón, fue seleccionada como la condición de referencia para las etapas posteriores de la investigación.

Asimismo, los balances desarrollados para las tres relaciones molares verifican el cumplimiento de la Ley de Conservación de la Masa y confirman la consistencia de los resultados experimentales obtenidos durante la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal residual.

En particular, la viscosidad cinemática es una propiedad crítica que debe mantenerse dentro de los límites establecidos por la Norma Técnica Peruana (NTP 321.125), que se basa en estándares como ASTM D6751 y EN 14214, para asegurar un funcionamiento óptimo en motores diésel. Las muestras C1, C2, C4, C5, C6, C8 y C9, aunque algunas con rendimientos superiores al 94%, presentaron valores de viscosidad fuera del rango permitido, lo que las descartó como candidatas para la fase de replicación en reactor.

La muestra número C3 fue seleccionada como la condición de mayor rendimiento para la siguiente fase experimental porque, además de presentar un rendimiento alto (93.6% y 94.2% en pruebas repetidas), fue la única que cumplió simultáneamente con los tres parámetros normativos clave:

- Densidad (EN 14214),
- Viscosidad cinemática (ASTM D6751)
- Punto de inflamación (ASTM D6751)

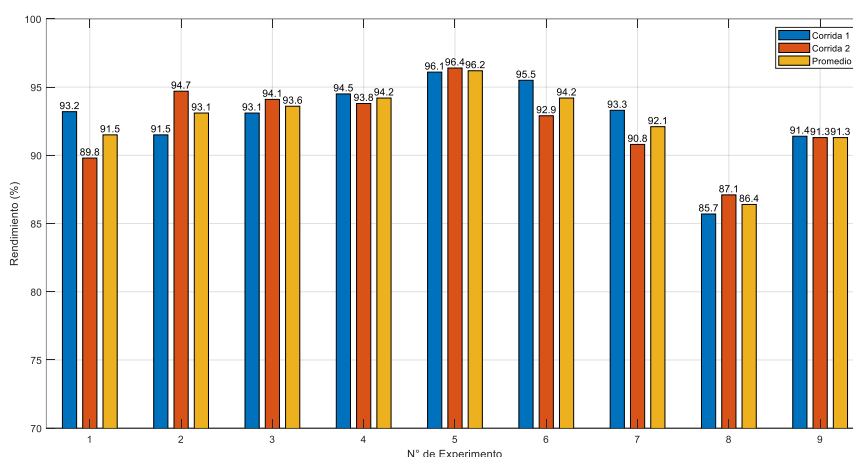
Cabe destacar que diversos autores han señalado que un alto rendimiento en la conversión de triglicéridos no garantiza automáticamente la obtención de un biodiésel de calidad adecuada. Según Encinar et al. (2007), “los productos obtenidos con conversiones

elevadas pueden no cumplir con las especificaciones del biodiésel si no se controlan adecuadamente parámetros como la viscosidad, el contenido de agua o los residuos de glicerol”. Asimismo, Meher et al. (2006) indican que “la calidad del biodiésel depende no solo del porcentaje de conversión, sino también de factores como la purificación del producto, la eliminación de impurezas y la estabilidad del combustible”.

Por tanto, la elección de la muestra C3 responde a un criterio integral de evaluación, priorizando no solo el rendimiento, sino la conformidad con las normas técnicas de calidad del biodiésel, lo cual es indispensable para un posible uso comercial o para futuras investigaciones a mayor escala.

Figura 37

Resultados de rendimiento por muestra: Réplica 1, Réplica 2 y promedio



En la Figura 37, se presenta la comparación de los porcentajes de rendimiento obtenidos en cada prueba experimental mostrados en la Tabla 23, considerando las dos réplicas realizadas y su respectivo valor promedio. Se observa que los rendimientos fluctúan entre 86.4% y 96.2%, evidenciando una ligera variabilidad entre las pruebas bajo las mismas condiciones, atribuible a las diferencias en la eficiencia de la reacción o a pequeñas variaciones operativas durante el proceso.

Las pruebas experimentales C3, C4, C5 y C6 registraron los mayores rendimientos, superiores al 93%, destacando la prueba experimental 5 con un valor máximo de 96.2%. No obstante, pese a su elevada conversión, esta muestra no cumplió con las especificaciones de viscosidad cinemática establecidas por la normativa técnica, lo que impidió su selección como condición de referencia para la fase de escalamiento. Por otro lado, la prueba experimental C3 mostró un rendimiento elevado y estable (93.6% y 94.2% en sus dos réplicas), además de cumplir con los parámetros de densidad, viscosidad cinemática y punto de inflamación exigidos por las normas ASTM D6751, EN 14214 y NTP 321.125, por lo que fue seleccionada como la muestra representativa para la siguiente etapa de experimentación.

En general, la tendencia del gráfico indica que la eficiencia del proceso se mantuvo en niveles altos para la mayoría de las pruebas experimentales, demostrando una buena conversión de triglicéridos a ésteres metílicos. Sin embargo, la calidad final del biodiésel dependió no solo del rendimiento porcentual, sino también de la conformidad de sus propiedades fisicoquímicas con los límites normativos establecidos.

Figura 38

Representación 3D de rendimiento generado en MATLAB según parámetros experimentales

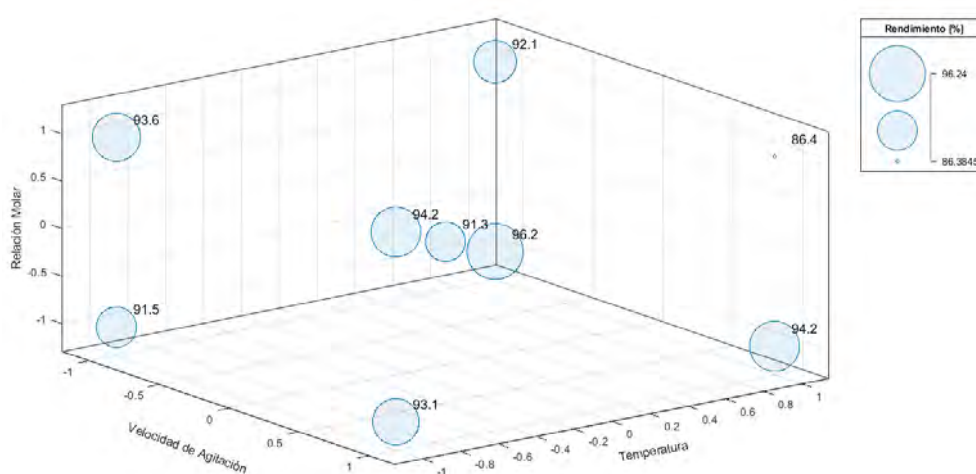
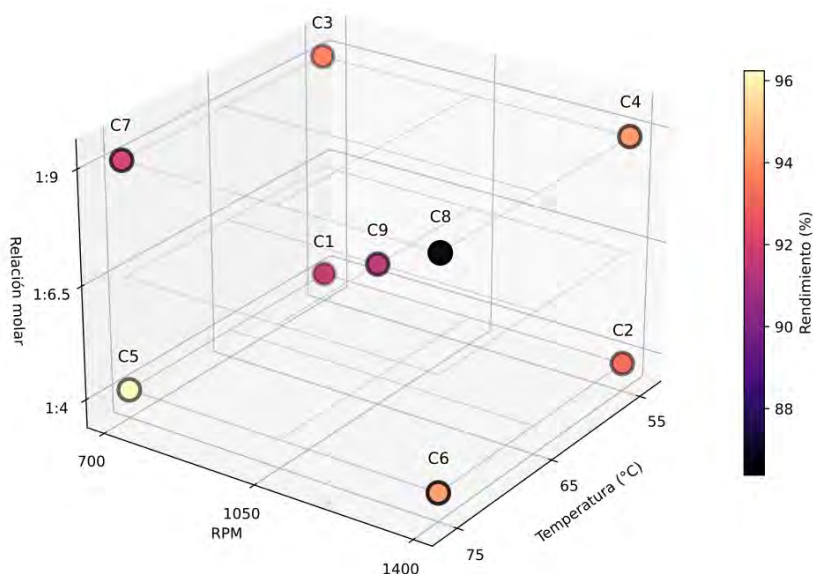


Figura 39

Diagrama de Dispersión 3D sobre resultados del rendimiento



En la Figura 38 y 39, se muestra cómo las tres variables: velocidad de agitación, temperatura y relación molar aceite:metanol, influyen en el rendimiento del proceso de transesterificación. El tamaño de las burbujas es proporcional al porcentaje de rendimiento alcanzado, lo que permite visualizar rápidamente las condiciones que generaron los mejores resultados de conversión.

De acuerdo con los datos, las muestras con los mejores rendimientos, como las representadas por las burbujas más grandes (96.2% y 94.2%), se encuentran en el área del gráfico con combinaciones de alta velocidad de agitación y temperatura moderada. En cambio, las condiciones con rendimientos más bajos, como la muestra 8 (86.4%), se corresponden con valores más bajos de estos parámetros. La muestra C5, que alcanzó un rendimiento notablemente alto (96.2%), aparece en una región similar, con una combinación de temperatura y velocidad de agitación que favorece la conversión.

Este gráfico resalta que, para obtener un biodiésel con buen rendimiento, las condiciones experimentales deben ser cuidadosamente ajustadas, y aunque las altas conversiones son deseables, es fundamental que el producto final también cumpla con las

especificaciones de calidad, como la viscosidad y el punto de inflamación. En resumen, las mejores condiciones para un alto rendimiento se identifican en el gráfico con la muestra 3, que destaca no solo por su rendimiento, sino también por su capacidad para cumplir con los parámetros normativos de calidad, lo que la hace la mejor opción para la replicación a mayor escala en el reactor.

CONCLUSIONES

- Se caracterizó fisicoquímicamente el aceite vegetal residual empleado como materia prima, obteniéndose un contenido de impurezas sólidas de 2.58% en masa, una densidad de 911 kg/m³ (0.911 g/cm³), una viscosidad de 45 mm²/s a 40°C, un índice de acidez de 2.24 mg KOH/g y un contenido de ácidos grasos libres (expresado como ácido oleico) de 1.13%. Estos valores resultaron consistentes con los reportados por Abdelhady et al. (2019) para aceite de cocina usado (densidad: 0.920 g/cm³; viscosidad: 63.38 mm²/s; índice de acidez: 3.08 mg KOH/g), presentando el aceite de este estudio valores de acidez y viscosidad menores, lo cual sugiere un menor grado de degradación térmica del aceite recolectado. Adicionalmente, el índice de acidez obtenido se encontró por debajo del umbral crítico correspondiente a un 5% de ácidos grasos libres, reportado por Gerpen (2004) como límite para la viabilidad de la catálisis básica homogénea, confirmando la pertinencia de la ruta metodológica seguida en el presente estudio. Estos resultados evidenciaron, no obstante, la necesidad de una etapa de pretratamiento (filtración) previa a la reacción de transesterificación, dado el nivel de impurezas presentes en el aceite recolectado.

Por su parte, el biodiésel obtenido en la condición experimental seleccionada (C3) presentó una densidad de 874 kg/m³, una viscosidad cinemática de 5.23 mm²/s y un punto de inflamación de 121.75°C, valores que se encontraron dentro de los rangos establecidos por las normas NTP 321.125, EN 14214 y ASTM D6751 (0.860–0.900 g/cm³; 1.9–6.0 mm²/s; mínimo 93°C, respectivamente), confirmando la calidad del producto final obtenido bajo dicha condición operativa.

- Se evaluó la influencia de tres catalizadores sobre el rendimiento de conversión, obteniéndose 98.69% con hidróxido de potasio (KOH), 69.44% con hidróxido de sodio (NaOH), y ausencia total de reacción con hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), consistente con

la menor actividad catalítica de este compuesto reportada en la literatura frente a los hidróxidos alcalinos. El KOH fue el catalizador que presentó el mayor rendimiento de conversión en las pruebas experimentales de selección; sin embargo, fue descartado por exceder el rango de viscosidad cinemática establecido por la norma ASTM D6751 (determinada mediante el método ASTM D7041), seleccionándose el NaOH como catalizador para el desarrollo de la experimentación, al garantizar simultáneamente un rendimiento aceptable y el cumplimiento de las especificaciones de calidad.

- Mediante un diseño factorial 2^3 con punto central, se evaluó el efecto de la temperatura, la velocidad de agitación y la relación molar aceite:metanol sobre el rendimiento de conversión, obteniéndose valores entre 86.38% (C8) y 96.24% (C5) en las nueve pruebas experimentales realizadas. El análisis de varianza (ANOVA) determinó que únicamente la interacción Temperatura $\times$ Relación molar resultó estadísticamente significativa ($p = 0.039$), mientras que los efectos individuales de temperatura ($p = 0.375$) y velocidad de agitación ($p = 0.218$) no lo fueron; el modelo ajustado con los factores significativos presentó un coeficiente de determinación (R^2) de 65.4%. La prueba experimental C3 (55°C, 700 rpm, relación molar 1:9) presentó un rendimiento de 93.64% y, si bien no registró el mayor rendimiento de conversión (obtenido en la prueba C5, 96.24%), fue la única condición que cumplió simultáneamente con la totalidad de los estándares de calidad fisicoquímica establecidos para el biodiésel, por lo que fue seleccionada para la etapa de réplica, caracterización final y validación del sistema de control.
- Se identificó el comportamiento dinámico del reactor como un proceso integrador con tiempo muerto (IPDT), determinándose una ganancia de proceso $K = 0.5$ °C/s y un tiempo muerto $\theta = 12$ s mediante el análisis de la curva de reacción experimental. A partir de estos parámetros, se diseñó un controlador Proporcional-Integral (PI) mediante el enfoque de Control por Modelo Interno, seleccionando el Modelo M (Chien y Fruehauf, 1990) en

lugar del Modelo N, debido a que este último incorpora un término derivativo (T_d) que, si bien puede mejorar la velocidad de respuesta ante perturbaciones, tiende a amplificar el ruido de alta frecuencia presente en la señal del sensor de temperatura, comprometiendo la estabilidad de la acción de control. Para la constante de tiempo de lazo cerrado (τ_c) se adoptó un valor igual al tiempo muerto del proceso ($\tau_c = \theta = 12$ s), siguiendo el criterio de sintonización propuesto por Skogestad (2003), el cual establece que dicha igualdad constituye el límite de velocidad más rápido que puede exigirse al lazo de control sin comprometer su estabilidad, dado que el tiempo muerto representa la restricción fundamental de la respuesta dinámica del sistema. A partir de estos parámetros, la aplicación del Modelo M permitió obtener una ganancia proporcional $K_c = 0.0625$ y un tiempo integral $T_i = 0.6$ min. El sistema de control automático logró estabilizar la temperatura del reactor en el punto de consigna de 55°C , mejorando la reproducibilidad del proceso frente a una operación sin control automático.

Por su parte, la velocidad de agitación se reguló mediante un esquema de lazo abierto, constituido por un potenciómetro físico (SC-101) y un microcontrolador Arduino Mega, sin retroalimentación de la velocidad angular del eje. Para la condición experimental seleccionada (C3), la velocidad de referencia se estableció en 700 rpm, equivalente al 50% del rango de la señal analógica (2.50 V, 512 unidades ADC), valor que se mantuvo fijo durante el tiempo de reacción. El accionamiento de marcha/parada del motor se gestionó de forma independiente mediante la interfaz SCADA, confirmándose que el sistema de agitación implementado correspondió a una regulación manual de referencia, y no a un lazo cerrado de control de velocidad angular.

RECOMENDACIONES

- Conviene estandarizar un protocolo estricto de recolección y almacenamiento del aceite vegetal residual en los establecimientos de Cusco, priorizando aquellos con menores ciclos de fritura y un manejo adecuado que evite la contaminación con agua, partículas sólidas y otros residuos. Un aceite recolectado bajo estas condiciones ingresaría a la etapa de pretratamiento con un menor contenido de impurezas y un índice de acidez inicial más bajo, reduciendo la intensidad del proceso de filtrado y acondicionamiento requerido antes de la transesterificación, así como la eventual necesidad de una etapa previa de esterificación ácida. Esto se traduciría en una disminución de los costos operativos y del tiempo total del proceso de producción de biodiésel.
- Como línea de trabajo futura, se recomienda ampliar la evaluación de catalizadores heterogéneos en general, dado que en el presente estudio el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) no logró iniciar la reacción de transesterificación bajo las condiciones establecidas. Esto permitiría aprovechar las ventajas propias de la catálisis heterogénea, ampliando el panorama de opciones evaluadas más allá de los catalizadores homogéneos empleados en este estudio.
- Se recomienda poner en funcionamiento el sistema de recuperación y destilación por condensación contemplado en el diseño del proceso, el cual no fue empleado durante la fase experimental del presente estudio, y evaluar su desempeño real en la recuperación del exceso de metanol utilizado en la reacción de transesterificación. Debido a que el diseño experimental trabaja con un exceso estequiométrico de alcohol para desplazar el equilibrio químico, la puesta en operación de este sistema permitiría cuantificar la cantidad de metanol recuperable en la fase posterior al secado, evaluando su viabilidad para la reutilización en lotes subsecuentes, así como su efecto en la

reducción de la emisión de vapores orgánicos volátiles y en los niveles de seguridad industrial del laboratorio.

- En cuanto al control de agitación, se recomienda incorporar un sensor de velocidad angular (tacómetro o encoder) acoplado al eje del agitador, con el fin de medir directamente las revoluciones por minuto reales del sistema y construir una curva de calibración experimental entre la señal del potenciómetro y la velocidad efectiva de agitación. Esto permitiría sustituir la estimación teórica lineal empleada en el presente estudio por una medición validada, mejorando la trazabilidad y precisión de los resultados relacionados con esta variable.
- Se plantea la necesidad de un estudio de viabilidad económica y escalado industrial de la unidad piloto batch desarrollada en los laboratorios de nuestra casa de estudios hacia un sistema continuo o semicontinuo. De igual forma, resultaría beneficioso gestionar alianzas estratégicas con las municipalidades locales para formalizar el acopio del aceite doméstico usado, garantizando el suministro continuo de materia prima y maximizando el impacto socioambiental positivo de la tecnología propuesta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ab Razak, A. F., Abidin, M. Z., Abdullah, M. S., Razak, A. A., Afandi, M. S. M., Karim, R., Saari, N., Ibadillah, W. Z. W., Lim, S. A. H., Hamim, N. A., Ibrahim, S. G., & Mat Noh, N. A. (2020). Physical and chemical characterization of Kenaf seed MH 8234. *Journal Name, Volume(Issue), Page Range*. <http://doi.org/10.3570/bjost.2021.3.1-01>
2. Abdelhady, H., Elkelawy, M., Bastawissi, H. A., et al. (2019). Optimized biodiesel production from waste cooking oil (WCO) using calcium oxide (CaO) nano-catalyst. *Scientific Reports*, 9, 18909.
3. Acosta Solares, A., Pérez Navarro, O., Pérez Cruz, E. R., & Martínez García, D. (2022). Optimización de parámetros operacionales, escalado y determinación de requerimientos para la inversión enzimática de sacarosa. *Revista Centro Azúcar*, 49(2), 1–14. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/697
4. Agencia Peruana de Noticias Andina. (2018, 25 de febrero). *Moderna planta de transformación evitará contaminar el río Vilcanota*. <https://andina.pe/agencia/noticia-moderna-planta-transformacion-evitara-contaminar-rio-vilcanota-700321.aspx>
5. Aliseda, R. (2002). *Estudio de la transesterificación de aceite vegetal con metanol* [Trabajo de fin de carrera, Universidad Rey Juan Carlos].
6. Amar-Gil, S., Ardila-Arias, A. N., & Barrera-Zapata, R. (2019). Simulation and obtaining of synthetic fuels from the pyrolysis of plastic wastes. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 306–326. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.1285>
7. American Society for Testing and Materials. (2009). *Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels*.
8. Antolín, G., Tinaut, F. V., Briceño, Y., Castaño, V., Pérez, C., & Ramírez, A. I. (2002). Optimization of biodiesel production by sunflower oil transesterification. *Bioresource Technology*, 111–114.
9. Aracil, J. (2003). *Proceso de producción de biodiesel, materias primas y alternativas*. Universidad Complutense de Madrid.
10. Asaad, S. M., Inayat, A., Jamil, F., Ghenai, C., & Shanableh, A. (2023). Optimization of biodiesel production from waste cooking oil using a green catalyst prepared from glass waste and animal bones. *Energies*, 16(5), 2322. <https://doi.org/10.3390/en16052322>
11. Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
12. Atadashi, I. M., Aroua, M. K., & Abdul Aziz, A. R. (2010). High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1999–2008.
13. Avellán, A., García, S., Burgos, G., Moreira, C., García, O., & Banchón, C. (2019). Factores limitantes en la producción del biodiésel de *Jatropha curcas* L. *Revista Riemat*, 4.
14. Babbie, E. (2017). *Fundamentos de la investigación social*. Universidad Chapman. <https://tecnicasmasseroni.files.wordpress.com/2012/02/babbie-fundamentos-de-la-investigacion-social.pdf>

15. Banerjee, A., & Chakraborty, R. (2009). Parametric sensitivity in transesterification of waste cooking oil for biodiesel production – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 486–492. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.01.005>
16. Barrera, D. (2006). *Evaluación de las propiedades de superficie del óxido de zinc y su actividad catalítica en la transesterificación de aceite de palma con metanol*. Universidad de los Andes.
17. Bashir, M. A., Wu, S., Zhu, J., Krosuri, A., Khan, M. U., & Aka, R. J. N. (2022). Recent development of advanced processing technologies for biodiesel production: A critical review. *Fuel Processing Technology*, 227, 107120.
18. Benjumea, P., Agudelo, J., & Ríos, L. (2007). Propiedades de flujo a baja temperatura del biodiesel de aceite de palma. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (42). http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302007000400007&script=sci_arttext
19. Betancourt, C., Mello, R., Castellanos, L., & Silva, C. (2016). Características de la glicerina generada en la producción de biodiesel, aplicaciones generales y su uso en el suelo. *Ministerio de Educación Superior, Cuba*, 37.
20. Blanco, C., & Toledano, F. (2019). Transesterificación del aceite de palma utilizando arcillas impregnadas con NaOH y KOH como catalizadores. *Revista Tecnocientífica URU*, 17, 19–31. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15610113>
21. Bravo, F. (2014). *Optimización del proceso de obtención de biodiésel a partir de aceite de cocina usado* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional Autónoma de México].
22. Canakci, M., & Van Gerpen, J. (2001). Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1429–1436.
23. Candia, R., Vilches, L., & Villanueva, J. (2015). *Diseño e implementación de un proceso de obtención de un biocombustible: Biodiesel a partir de aceite usado*. España.
24. Castellar, G., Angulo, E. R., & Cardozo, B. M. (2014). Transesterification of vegetable oils using heterogeneous catalysts. *Prospect*, 12(2), 90–104.
25. Castillo Fernández, K. (2018). *Caracterización teórica de parámetros del biodiésel y estudio de algunas de sus emisiones* [Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid].
26. Castro, P., Coello, J., & Castillo, L. (2007). *Opciones para la producción de biodiésel en el Perú*. Soluciones Prácticas-ITDG.
27. Chien, I.-L., & Fruehauf, P. S. (1990). Consider IMC tuning to improve controller performance. *Chemical Engineering Progress*, 86(10), 33–41.
28. Darnoko, D., & Cheryan, M. (2000). Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(12).
29. Demirbas, A. (2009). *Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines*. Springer Science & Business Media.
30. Demirbas, A. (2009). *Biodiesel: Production, properties, and applications*. Springer.
31. Demirbas, A. (2009). Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review.

32. Díaz, H. B. (2013). *Optimización de la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado a nivel laboratorio y a nivel planta piloto* [Tesis de título profesional, Instituto Politécnico Nacional].
33. Díaz Silva, L. V., & Quispe García, C. O. (2018). *Identificar y reducir el cuello de botella, para mejorar la productividad de los procesos de la planta de biodiesel de la Universidad Nacional Agraria la Molina* [Tesis, Universidad Nacional Agraria la Molina].
34. Dirección General de Salud Ambiental [DIGESA]. (2013). *Manual de gestión de aceites y grasas residuales*. Ministerio de Salud del Perú.
35. Encinar, J. M., González, J. F., & Rodríguez-Reinares, A. (2007). Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. *Fuel Processing Technology*, 88(5), 513–522.
36. European Committee for Standardization. (2008). *EN 14214:2008 – Automotive fuels – Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines – Requirements and test methods*.
37. Fangrui, M., & Milford, A. H. (1999). Biodiesel production: A review. *Bioresource Technology*, 70.
38. Felizardo, P., Correia, M. J. N., Raposo, I., Mendes, J. F., Berkemeier, R., & Bordado, J. M. (2006). Production of biodiesel from waste frying oils. *Waste Management*, 26(5), 487–494.
39. Firestone, D. (2009). *Bailey's industrial oil and fat products* (6th ed.). John Wiley & Sons.
40. Fogler, H. S. (2016). *Elements of chemical reaction engineering* (5th ed.). Pearson Education.
41. Fraden, J. (2010). *Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications* (4th ed.). Springer.
42. Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), 405–416.
43. García, S., Lafargue, F., Labrada, B., Díaz, M., & Sánchez, A. (2018). Propiedades físico-químicas del aceite de biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 220–228.
44. Gerpen, J. V., Shanks, B., & Pruszek, R. (2004). *Biodiesel production technology*. National Renewable Energy Laboratory.
45. Gil Martín, R. (2017). *Producción de biodiésel a partir de aceite de girasol en una planta piloto de reacción por cavitación* [Tesis, Universidad de Valladolid].
46. Grau, M. (1999). *Estudio del comportamiento de reactores discontinuos y semicontinuos: Modelización y comprobación experimental*. Universidad Politécnica de Catalunya.
47. Guerra Quispe, R., Ocaña Ángeles, J., Torres León, G., & Trigos Medina, J. (2007). *Análisis estratégico de la industria del biodiésel en el Perú*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
48. Gunstone, F. D., Harwood, J. L., & Dijkstra, A. J. (2007). *The lipid handbook* (3rd ed.). CRC Press.
49. Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.

50. Ingeniería Química Reviews. (2020). *Reactores intermitentes o reactores batch*. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/10/reactores-intermitentes-batch.html>
51. Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2021). *NTP 321.125: Biodiésel – Requisitos y métodos de ensayo*.
52. Instituto Nacional de la Calidad. (2008). *Norma Técnica Peruana 321.125. Biodiésel. Especificaciones*.
53. International Society of Automation [ISA]. (2024). *ANSI/ISA-5.1-2024: Instrumentation and control symbols and identification*.
54. Iqbal, K. (2023). *1.2: First-order ODE models*. Engineering LibreTexts.
55. Issariyakul, T., & Dalai, A. K. (2014). Biodiesel from vegetable oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 446–471.
56. Journey to Forever. (2005). *Cómo hacer biodiésel*.
57. Kent, J. A. (2011). *Biodiesel: A renewable energy*. Elsevier.
58. Kim, H., Kang, B., Kim, M., Park, Y., Kim, D., Lee, J., & Lee, K. (2004). Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst. *Catalysis Today*, 93–95.
59. Klein, M., Aserin, A., Ishai, P. B., & Garti, N. (2010). Interactions between whey protein isolate and gum Arabic. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 79(2), 377–383.
60. Knothe, G. (2005). Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1059–1070.
61. Knothe, G., Van Gerpen, J., & Krahl, J. (2015). *The biodiesel handbook* (2nd ed.). AOCS Press.
62. Laura, D. (2011). *Obtención de biodiésel en condiciones supercríticas* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Litoral].
63. Leung, D. Y., Wu, X., & Leung, M. K. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083–1095.
64. Lin, L., Cunshan, Z., Vittayapadung, S., Xiangqian, S., & Mingdong, D. (2011). Opportunities and challenges for biodiesel fuel. *Applied Energy*, 88(4), 1020–1031.
65. Marchetti, J. M. (2007). Technologies for biodiesel production from used cooking oil: A review. *Energy Conversion and Management*.
66. Marchetti, J. M., Miguel, V. U., & Errazu, A. F. (2005). Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
67. Marengo, S. J., & Pereyra, R. (2019). *Automatización de planta de producción de biodiesel* [Tesis de grado, Departamento de Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina].
68. Mayné, J. (2003). *Sensores acondicionadores y procesadores de señal* (2ª ed.). Silica: An Avnet Division.
69. Mazidi, M. A., Mazidi, J. G., & McKinlay, R. D. (2008). *PIC microcontroller and embedded systems*. Pearson International Edition.
70. Mazidi, M. A., Mazidi, J. G., & McKinlay, R. D. (2008). *The 8051 microcontroller and embedded systems* (2nd ed.). Pearson.
71. Mazidi, M. A., Naimi, S., & Naimi, S. (2011). *The AVR microcontroller and embedded systems: Using Assembly and C*. Prentice Hall.

72. Meher, L. C., Vidya Sagar, D., & Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248–268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>
73. Ministerio del Ambiente. (2026, 7 de abril). *Resolución Directoral N.º D000284-2026-MINAM-VMGA-DGGRS*. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/8013588-d000284-2026-minam-vmga-dggrs>
74. Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
75. Nigam, P. S., & Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37, 52–68.
76. Njoku, C. N., & Otisi, S. K. (2023). Application of central composite design with Design Expert v13 in process optimization. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109704>
77. NTP 900.050:2022. (2022). *Gestión de residuos. Manejo de aceites usados. Generalidades* (3ª ed.).
78. Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Pearson.
79. Pérez Sánchez, J. F., Díaz Zavala, N. P., & Suárez Domínguez, E. J. (2020). *Química sostenible en la síntesis de derivados de ácido gálico: Estudio de esterificación y eterificación*. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.
80. Pisarello, M. L. (2010). *Producción de biodiesel: Equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Litoral]. <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/bitstream/handle/11185/291/tesis.pdf>
81. Quispe, D., & Ccala, P. (2014). *Obtención de biodiésel a partir de la semilla de nabo silvestre (Brassica rapa)* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/1581>
82. Ramos, W., & Pretell, V. (2021). *Optimización y caracterización de combustibles líquidos obtenidos a partir de la pirólisis catalítica de residuos plásticos*. Universidad Nacional de Ingeniería. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.95>
83. Rivas Méndez, J. A., & Matamorros Huayra, R. M. (2020). *Obtención de biodiesel a partir de aceite de fritura usado en establecimientos de comida rápida en Iquitos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana].
84. Rivera, D. E., Morari, M., & Skogestad, S. (1986). Internal model control: PID controller design. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 25(1), 252–265.
85. Rodríguez Bustamante, J. I., Meza Gago, D. J., & Gutiérrez Rodríguez, I. D. (2022). Rendimiento de producción de biodiesel por transesterificación a partir de aceite de soja usado. *Fides et Ratio*, 23(23), 149–175. <https://doi.org/10.55739/fer.v23i23.112>
86. Romano, S. D., & Sorichetti, P. A. (2010). *Dielectric spectroscopy in biodiesel production and characterization*. Springer.
87. Salinas Callejas, E., & Gasca Quezada, V. (2009). *Los biocombustibles* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco].

88. Sánchez, N. (2015). *Obtención de biodiésel mediante transesterificación de aceite de ricino y grasas animales. Aprovechamiento energético de la glicerina como subproducto del proceso* [Tesis de doctorado, Universidad de Extremadura].
89. Schuchardt, U., Serchelía, R., & Matheus, R. (1998). Transesterification of vegetable oils: A review. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 9(1), 199–210.
90. Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle III, F. J. (2011). *Process dynamics and control* (3rd ed.). Wiley.
91. Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle III, F. J. (2016). *Process dynamics and control* (4th ed.). Wiley.
92. Singh, A., & Gaurav, K. (2018). Advancement in catalysts for transesterification in the production of biodiesel: A review. *Biochemical Technology Society*, 2014–2018.
93. Skogestad, S. (2003). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, 13(4), 291–309. [https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(02)00062-8)
94. Smith, C. A., & Corripio, A. B. (2005). *Principles and practice of automatic process control* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
95. Sovacool, B. K. (2019). Diversificación energética y desarrollo sostenible: Una evaluación del potencial de las energías renovables en Europa. *Diario de Energía y Desarrollo Sostenible*.
96. Stanescu, R.-C., Leahu, C.-I., & Soica, A. (2023). Aspects regarding the modelling and optimization of the transesterification process through temperature control of the chemical reactor. *Energies*, 16(6), 2883. <https://doi.org/10.3390/en16062883>
97. Tacias Pascacio, V., Rosales Quintero, A., & Torrestiana, B. (2016). Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiesel: Un caso de estudio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(3), 303–313. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.05>
98. Torossi Baudino, F. D. (2006). *La transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura usado* [Tesis de maestría, Universidad de La Rioja]. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2082917.pdf>
99. Torossi Baudino, F. D. (2006). *Reacciones en contexto: La transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura usado*. Real Sociedad Española de Química.
100. Torres-Rivero, L. A., Ben-Youssef, B. C., & Pérez-Gasca, M. F. (2019). Características de la glicerina obtenida del proceso de la reacción del metóxido de sodio en la producción del biodiesel. *Revista de Energía Química y Física*, 6(18), 18–28. <https://doi.org/10.35429/JCPE.2019.18.6.18.28>
101. United States Environmental Protection Agency. (2021). *EPA contact and resource aid: Oil and petroleum contamination on tribal lands* (EPA-560-F-21-026).
102. Van Gerpen, J. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1097–1107. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.005>
103. Vasudevan, P., & Briggs, M. (2008). Biodiesel production – A review. *Energy for Sustainable Development*, 12(3), 1–8.

104. Wasiak, C., Kalam, M. A., Rahman, M. M., & Masri, A. (2015). Prospect of biofuels as an alternative transport fuel in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 331–351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.047>
105. Zhang, Y., Dubé, M. A., McLean, D. D., & Kates, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*, 89, 1–16.
106. Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, 64, 759–768.

ANEXOS

ANEXO 1

Norma Europea para Biodiésel en 14214 – 2008

Tabla 2. Norma Europea para Biodiésel en 14214 – 2008				
Propiedad	Límite		Unidad	Método de prueba
	Min	Max		
Contenido de éster	96.5			en 14103
Punto de inflamación	101		°C	en iso 2719 en iso 3679
Contenido de metanol		0.20	% (m/m)	en 14110
Contenido de agua		500	mg/kg	en iso 12937
Valor ácido		0.50	mg KOH / g	en 14104
Ceniza sulfatada		0.02	% (m/m)	iso 3987
Corrosión lámina de cobre	No. 1			en iso 2160
Residuo de carbono (10% residuo dist.)		0.30	% (m/m)	en iso 10370
Contaminación total		24	mg/kg	en 12662
Densidad a 15°C	860	900	kg/m ³	en iso 3675 en iso 12185
Viscosidad cinemática	3.5	5.0	mm ² /s	en iso 3104
Número de cetano	51			en iso 5165
Estabilidad de oxidación, 110°C	6		horas	en 14112
Glicerina libre		0.020	% (m/m)	en 14105 en 14106
Glicerina total		0.240	% (m/m)	en 14105
Contenido de monoglicéridos		0.80	% (m/m)	en 14105
Contenido de diglicéridos		0.20	% (m/m)	en 14105
Contenido de triglicéridos		0.20	% (m/m)	en 14105
Índice de yodo		120	g yodo / 100 g	en 14111
Contenido de ácido linoléico		12	% (m/m)	en 14103
Contenido de fame con ≥ 4 enlaces dobles		1	% (m/m)	
Metales Grupo I (Na + K)		5	mg/g	en 14108 en 14109 en 14538
Metales Grupo II (Ca + Mg)		5	mg/g	en 14538
Azufre		10	mg/kg	en iso 20846 en iso 20884
Contenido de fósforo		4	mg/kg	en 14107

ANEXO 2

Norma ASTM para biodiésel D6751-09

Tabla 1. Norma ASTM para biodiésel D6751-09				
Propiedad	Límite		Unidad	Método de prueba
	Min	Max		
Punto de inflamación	93		°C	93
Control de alcohol Debe cumplir con una de las siguientes: Contenido de metanol Punto de inflamación	130	0,2	masa % °C	en 14110 D93
Agua y sedimento		0,050	% volumen	D2709
Número ácido		0,50	mg KOH / g	D664
Ceniza sulfatada		0,020	% masa	D874
Corrosión lámina de cobre		No. 3		D130
Residuo de carbono		0,050	% masa	D4530
Viscosidad cinemática	1.9	6,0	mm ² /s	D445
Número de cetano	47			D613
Punto de turbidez	Reporte		°C	D2500
Filtrabilidad de impregnado en frio		360	Segundos	Anexo A1
Estabilidad de oxidación	3		horas	en 14112
Glicerina libre		0,020	% masa	D6584
Glicerina total		0,240	% masa	D6584
Sodio y potasio, combinados		5	ppm (µg/g)	en 14538
Calcio y magnesio, combinados		5	ppm (µg/g)	en 14538
Azufre*		0,0015 0,05	% masa (ppm)	D5453
Contenido de fósforo		0,001	% masa	D4951
Temperatura destilación, Temperatura atmosférica equivalente, 90% recuperado		360	°C	D1160

* Diferentes límites de azufre para S15 (15 ppm azufre) y S500 (500 ppm azufre combustible).

ANEXO 3

Estructura demográfica y envejecimiento poblacional según el departamento de Cusco

– Censo 2025

Ubicación geográfica	Datos de población			Población total por sexo	
	Población total	Población censada	Población omitida	Hombres	Mujeres
Cusco	1 379 003	1 295 172	83 831	681 485	697 518

Fuente: INEI - Censos Nacionales de Población y Vivienda 2025

ANEXO 4

Población Censada y Tasa de Crecimiento Promedio Anual según provincia (2007 y 2017)

Provincia	2007		2017		Variación intercensal 2007-2017		Tasa de crecimiento
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	% promedio anual	
	1 171 403						
Total	367 791	100,0		100,0		2,9	0,3
Cusco	27	31,4	1 205 527	37,2	34 124	21,7	2,0
Acomayo	357	2,3	447 588 22 940	1,9	79 797	-16,1	-1,7
Anta	54 828	4,7	56 206	4,7	-4 417	2,5	0,2
Calca	65 407	5,6	63 155	5,2	-4 417	-3,4	-0,3
Canas	38 293	3,3	32 484	2,7	1 378 -2 252	-15,2	-1,6
Canchis	96 937	8,3	95 774	7,9	-5 809	-1,2	-0,1
Chumbivilcas	75 585	6,5	66 410	5,5	-1 163	-12,1	-1,3
Espinar	62 698	5,4	57 582	4,8	-9 175	-8,2 -	-0,8
La Convención	166	14,2	147 148 25 567	12,2	-5 116	11,8	-1,2
Paruro	833	2,6	42 504	2,1	-19 685 -5 372	-17,4	-1,9
Paucartambo	30	3,9	87 430	3,5	-3 373 5 257	-7,4	-
Quispicanchi	939	7,0	60 739	7,3	4 054	6,4	0,8
Urubamba	45 877	4,8		5,0		7,2	0,6
	82 173						0,7
	56 685						

Fuente: INEI - Censos Nacionales de Población y Vivienda 2007 y 2017.

ANEXO 5

Población Censada Urbana y Rural según provincia (2007 y 2017)

Provincia	2007						2017					
	Total	Urbana		Rural			Total	Urbana		Rural		
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Total	1.171.403	100,0	567.916	48,5	603.487	51,5	1.205.527	100,0	731.252	60,7	474.275	39,3
Cusco	367.791	100,0	348.935	94,9	18.856	5,1	447.588	100,0	432.662	96,7	14.926	3,3
Acomayo	27.357	100,0	9.493	34,7	17.864	65,3	22.940	100,0	10.384	45,3	12.556	54,7
Anta	54.828	100,0	9.318	17,0	45.510	83,0	56.206	100,0	16.907	30,1	39.299	69,9
Calca	65.407	100,0	16.408	25,1	48.999	74,9	63.155	100,0	28.308	44,8	34.847	55,2
Canas	38.293	100,0	2.308	6,0	35.985	94,0	32.484	100,0	3.870	11,9	28.614	88,1
Canchis	96.937	100,0	53.286	55,0	43.651	45,0	95.774	100,0	59.677	62,3	36.097	37,7
Chumbivilcas	75.585	100,0	9.936	13,1	65.649	86,9	66.410	100,0	15.794	23,8	50.616	76,2
Espinar	62.698	100,0	24.566	39,2	38.132	60,8	57.582	100,0	33.241	57,7	24.341	42,3
La Convención	166.833	100,0	45.267	27,1	121.566	72,9	147.148	100,0	57.019	38,7	90.129	61,3
Paruro	30.939	100,0	-	-	30.939	100,0	25.567	100,0	-	-	25.567	100,0
Paucartambo	45.877	100,0	3.556	7,8	42.321	92,2	42.504	100,0	3.990	9,4	38.514	90,6
Quispicanchi	82.173	100,0	20.015	24,4	62.158	75,6	87.430	100,0	38.049	43,5	49.381	56,5
Urubamba	56.685	100,0	24.828	43,8	31.857	56,2	60.739	100,0	31.351	51,6	29.388	48,4

Fuente: INEI - Censos Nacionales de Población y Vivienda 2007 y 2017.

ANEXO 6

Tabla de valores críticos de la distribución F

Upper-Tail Probabilities								
F_{α, ν_1, ν_2}								
ν_2	α		0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	
1	1	161.45	199.50	215.71	230.16	230.16	241.88	237.35
2	2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.25	19.33	18.32
3	3	13.61	13.00	13.16	13.23	13.23	13.08	17.98
4	4	14.86	14.00	14.14	11.16	11.16	9.38	13.36
5	5	3.43	4.06	6.61	6.01	6.01	3.68	3.48
6	6	5.08	6.18	5.91	4.36	4.36	3.72	3.40
7	7	4.38	4.51	4.37	3.78	3.78	3.00	2.83
8	8	4.30	4.81	4.95	3.12	3.12	2.78	2.78
9	9	3.96	4.04	4.39	3.02	3.05	2.53	2.68
10	10	3.94	2.88	2.78	2.88	2.84	2.54	2.58
11	12	4.15	2.91	2.62	2.58	2.53	2.25	2.54
12	15	4.08	2.91	2.59	2.33	2.23	2.20	2.52
15	20	4.08	2.49	2.31	2.34	2.23	2.20	2.53
20	25	4.08	3.55	3.23	2.23	2.23	2.84	2.56
40	30	3.84	3.55	3.23	2.23	2.84	2.84	2.56
60	60	3.84	3.37	3.10	2.10	2.75	2.56	2.46

ANEXO 7

Ajustes del controlador IMC para un controlador PID de estructura en paralelo (Chien y Fruehauf, 1990)

Casé	Model	$K_p K$	τ_i	τ_{d1}
A	$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{\tau_c}$	τ	—
B	$\frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_c}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$
C	$\frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}$	$\frac{2\zeta \tau}{\tau_c}$	$2\zeta \tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
D	$\frac{K(-\beta s + 1)}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}, \beta > 0$	$\frac{2\zeta \tau}{\tau_c + \beta}$	$2\zeta \tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
E	$\frac{K}{s}$	$\frac{2}{\tau_c}$	$2\tau_c$	—
F	$\frac{K}{s(\tau s + 1)}$	$\frac{2\tau_c + \tau}{\tau_c^2}$	$2\tau_c + \tau$	$\frac{2\tau_c \tau}{2\tau_c + \tau}$
G	$\frac{K e^{-\theta}}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{\tau_c + \theta}$	τ	—
H	$\frac{K e^{-\theta}}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau + \frac{\theta}{2}}{\tau_c + \frac{\theta}{2}}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau \theta}{2\tau + \theta}$
I	$\frac{K(\tau_1 s + 1)e^{-\theta}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2 - \tau_3}{\tau_c + \theta}$	$\tau_1 + \tau_2 - \tau_3$	$\frac{\tau_1 \tau_2 - (\tau_1 + \tau_2 - \tau_3)\tau_3}{\tau_1 + \tau_2 - \tau_3}$
J	$\frac{K(\tau_1 s + 1)e^{-\theta}}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}$	$\frac{2\zeta \tau - \tau_3}{\tau_c + \theta}$	$2\zeta \tau - \tau_3$	$\frac{\tau^2 - (2\zeta \tau - \tau_3)\tau_3}{2\zeta \tau - \tau_3}$
K	$\frac{K(-\tau_3 s + 1)e^{-\theta}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2 + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}}{\tau_c + \tau_3 + \theta}$	$\tau_1 + \tau_2 + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}$	$\frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta} + \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2 + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}}$
L	$\frac{K(-\tau_3 s + 1)e^{-\theta}}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}$	$\frac{2\zeta \tau + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}}{\tau_c + \tau_3 + \theta}$	$2\zeta \tau + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}$	$\frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta} + \frac{\tau^2}{2\zeta \tau + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}}$
M	$\frac{K e^{-\theta}}{s}$	$\frac{2\tau_c + \theta}{(\tau_c + \theta)^2}$	$2\tau_c + \theta$	—
N	$\frac{K e^{-\theta}}{s}$	$\frac{2\tau_c + \theta}{\left(\tau_c + \frac{\theta}{2}\right)^2}$	$2\tau_c + \theta$	$\frac{\tau_c \theta + \frac{\theta^2}{4}}{2\tau_c + \theta}$
O	$\frac{K e^{-\theta}}{s(\tau s + 1)}$	$\frac{2\tau_c + \tau + \theta}{(\tau_c + \theta)^2}$	$2\tau_c + \tau + \theta$	$\frac{(2\tau_c + \theta)\tau}{2\tau_c + \tau + \theta}$

APÉNDICE

Apéndice 1 Aceite vegetal usado recolectado



Apéndice 2 Transesterificación para seleccionar el catalizador (KOH , NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$)



Apéndice 3 Inicio de las pruebas con los catalizadores de hidróxido de Sodio (NaOH) e hidróxido de Potasio (KOH) bajo diferentes condiciones variables



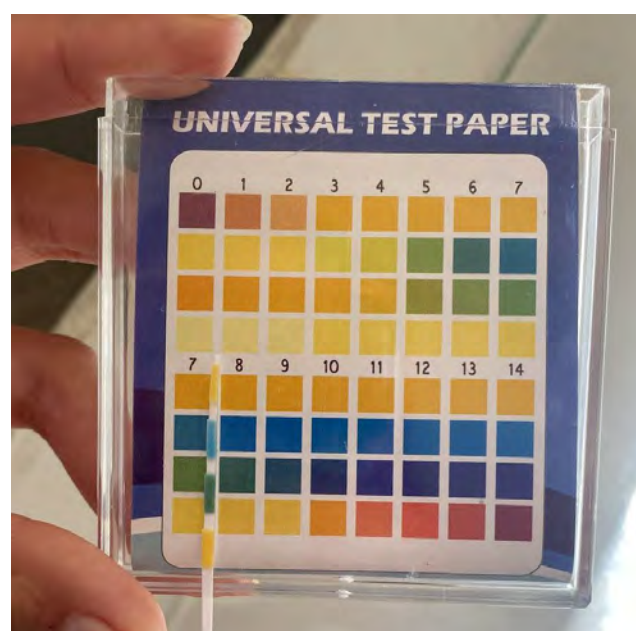
Apéndice 4 Biodiésel posterior a la separación de fases



Apéndice 5 Colocación de muestras al horno del laboratorio para eliminar exceso de agua proveniente al proceso de lavado de biodiésel



Apéndice 6. Medición del pH de las muestras después del proceso de lavado de biodiésel utilizando agua destilada a 60°C



*Apéndice 7 **Determinación del Punto de Inflamación del Biodiésel obtenido empleando el equipo PetroTest.***



*Apéndice 8 **Separación de glicerina obtenida***



*Apéndice 8 **Recolección del aceite***



*Apéndice 9 **Filtración del aceite***



Apéndice 10 Separación de glicerina del aceite



Apéndice 11 Transesterificación a 55°C con una relación Aceite:metanol de 1:9



Apéndice 12 Pruebas en Interfaz SCADA-HMI del reactor batch para la producción de biodiésel

