



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC
DIRECCIÓN ACADÉMICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Producción de biodiésel a partir de catalizadores heterogéneos

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA

I.Q. AURORA MALDONADO SILVA

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Miguel Ángel Vaca Hernández, Director
M. en I.Q. Alejandro Torres Aldaco, Codirector (UAM-I)
Dra. Mariana Bárcenas Castañeda, Asesor/revisor
Dr. Gastón Martínez de Jesús, Asesor/revisor

Ecatepec de Morelos, México, agosto de 2024

 <p>GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO</p>	<p>DICTAMEN DE LIBERACIÓN DE PROYECTO DE TESIS</p> <p>FO-TESE-DA-90</p> <p>TIT05-ANEXO PM</p>	
--	---	---

DIRECCIÓN ACADÉMICA
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA
PROGRAMA DE POSGRADO: MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Fecha: 06 DE AGOSTO DE 2024

LIC. MARICELA REYES ALONSO
Jefa de la Unidad de Registro y Certificación
Presente

Datos generales

Nombre del alumno: MALDONADO SILVA AURORA
Apellido paterno Apellido materno Nombres (s)

Matrícula: 201922294

PROYECTO: PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE CATALIZADORES HETEROGÉNEOS

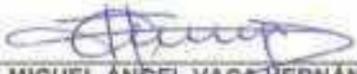
DIRECTOR: DR. MIGUEL ÁNGEL VACA HERNÁNDEZ
CO-DIRECTOR: M. EN I.Q. ALEJANDRO TORRES ALDACO

Díctamen:

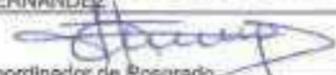
Con base en el registro No. 2, correspondiente al periodo escolar 2019-2, asignado al proyecto de tesis Producción de biodiésel a partir de catalizadores heterogéneos presentado por el alumno referido; y después de haber sido desarrolladas las actividades requeridas, el Comité Tutorial, conformado por los integrantes que firman al calce, ha determinado que SI () NO () han sido cubiertos en su totalidad los requisitos que permitan a esta División Académica liberar al alumno de los trámites académicos para tal efecto e iniciar el trámite de obtención de grado de maestría en la Unidad de Registro y Certificación de este Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Observaciones:

Comité Tutorial

 <u>DRA. MARIANA BARCENAS CASTAÑEDA</u> Asesor	 <u>M. EN I.Q. ALEJANDRO TORRES ALDACO</u> Codirector
	
 <u>DR. MIGUEL ÁNGEL VACA HERNÁNDEZ</u> Director	

c.c.p. Director de Tesis
Alumno
Expediente

Elaboró: DR. MIGUEL ÁNGEL VACA HERNÁNDEZ 	Revisó y Visto Bueno: MTRO. JUAN CARLOS BRETÓN POZAS 	Enterado: MTRO. JUAN CARLOS BRETÓN POZAS 
Coordinador de Posgrado	Encargado del Despacho de los Asuntos de la División	Director Académico

Agradezco al Programa de Desarrollo Social “BECAS COMECYT–EDOMÉX” por el financiamiento otorgado mediante la “BECA DE POSGRADO EDOMÉX PRIMERA PROMOCIÓN 2021”, con el Folio: 2021BPC1-M0317.

Dedicatorias

Ser mamá y estudiante al mismo tiempo, es difícil, sobre todo cuando sabes que alguien más se está sacrificando para que puedas lograr tus sueños, esas personas son tus hijos, por esta razón este trabajo lo dedico especialmente a mis hijos Aldo Jhair y Josué Alejandro, quienes son lo más importante para mí, son la motivación para ser mejor cada día, e inculcarles un gran ejemplo de trabajo y esfuerzo. Los amo y espero que se sientan muy orgullosos de mí porque todos mis logros son por ellos.

A mis padres, porque gracias a su apoyo, todo lo que he logrado, es gracias a ellos, por su amor, sus sacrificios y sobre todo porque siempre creyeron en mí, también por que hicieron de mí una persona de bien, con valores.

A mi madre Alicia Silva Huerta, por su apoyo incondicional, porque sin ella a mi lado no lo hubiera logrado. Porque siempre está presente cuando la necesito y por ser la mujer más importante de mi vida.

A mi esposo Pablo Antonio Ramírez, por siempre estar a mi lado apoyándome en todo, por su gran paciencia, y sobre todo por todo su amor.

A mis hermanos, Ángel y Jesús, espero ser un buen ejemplo para ustedes, como su hermana mayor.

A mis sobrinos, Sofia, Valentina, Emir y Diego porque ustedes, son parte importante en mi vida y los quiero mucho.

Agradecimientos

Esta tesis es el resultado de un tiempo largo de trabajo, esfuerzo y dedicación. Tiempo en el que he recibido apoyo de muchas personas a quienes agradezco sinceramente.

En primer lugar, agradezco a la institución a la que pertenezco, orgullosamente al TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC por haberme aceptado ser parte de ella, tanto en mis estudios de licenciatura como de posgrado, así como a los docentes que brindaron sus conocimientos para mi formación académica.

A la División de Ingeniería Química y Bioquímica por el apoyo recibido en especial, a la Jefa de División, la Maestra Judith Cervantes.

Agradezco al Dr. Miguel Ángel Vaca, Coordinador de la Maestría, y al Mtro. Alejandro Torres Aldaco por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección. Al Mtro. Aldaco agradezco especialmente su gran apoyo y dedicación a lo largo de este proyecto, por todo lo aprendido y la oportunidad que me brindo para trabajar con él.

Índice

	Página
Lista de figuras	8
Lista de tablas	14
Resumen	15
Abstract	16
Capítulo1 Introducción	17
1.1 Problemática	19
1.2 Justificación	19
1.3 Antecedentes	20
1.4 Objetivos	22
1.5 Hipótesis	23
Capítulo2 Marco teórico	24
2.1 Estado del Arte	25
2.2 Consideraciones para el diseño de catalizadores	28
2.2.1 Alúmina como soporte	28
2.2.2 Métodos para la preparación de catalizadores	28
2.2.2.1 Precipitación	28
2.2.2.2 Método de Impregnación	29
2.2.2.3 Método Sol-gel	29
2.3 Técnicas de caracterización de catalizadores	30
2.3.1 Difracción de rayos X	30
2.3.2 Espectrometría infrarroja	30
2.3.3 Método BET	31
2.4 Aceites vegetales para la producción de biodiésel	31
2.4.1 Aceites vegetales convencionales	33
2.4.2 Aceites vegetales alternativos	35
2.4.3 Aceites provenientes de otras fuentes	35
2.5 Alcoholes utilizados para la producción de biodiésel	36
2.6 Catálisis	37
2.6.1 Catálisis homogénea	37
2.6.1.1 Catalizadores ácidos homogéneos	38
2.6.1.2 Catalizadores básicos homogéneos	38
2.6.2 Catálisis heterogénea	39
2.6.2.1 Catalizadores ácidos heterogéneos	40
2.6.2.2 Catalizadores básicos heterogéneos	41
2.6.3 Catálisis enzimática	41
2.7 Reacción de transesterificación	42
2.8 Mecanismo de reacción	50
2.9 Procesos para la producción de biodiésel	51
2.9.1 Proceso Discontinuo	51

2.9.2	Proceso Continuo	52
2.9.3	Proceso en Condiciones Supercríticas	53
2.10	Técnicas de caracterización del biodiésel	53
Capítulo3	Metodología	57
3.1	Síntesis y caracterización de catalizadores heterogéneos	58
3.2	Reacción de transesterificación	65
3.3	Caracterización del biodiésel	67
3.3.1	Índice de refracción	67
3.3.2	Densidad	68
3.3.3	Viscosidad	69
3.3.4	Índice de saponificación	70
3.3.5	Índice de yodo	71
3.3.6	Índice de acidez	72
3.3.7	Punto de nube	73
3.4	Cinética de reacción heterogénea	73
Capítulo4	Resultados y discusión	74
4.1	Síntesis y caracterización de catalizadores	75
4.2	Reacción de transesterificación	77
4.3	Caracterización del biodiésel	84
4.4	Cinética de reacción	125
	Conclusiones	131
	Referencias	134
	Anexo 1 Cálculos	140
	Anexo 2 Reacción de transesterificación	143
	Anexo 3 Caracterización del biodiésel	147
	Anexo 4 Cinética de reacción	157

Lista de figuras

Figura	Descripción	Página
2.7.1	Estructura general de un triglicérido	44
2.7.2	Reacción de transesterificación estequiométrica	46
2.7.3	Mecanismo de producción del metiléster partiendo de un triglicérido	48
2.7.4	Reacción secundaria de la producción de biodiésel hacia la saponificación	49
2.7.5	Reacción secundaria de neutralización de ácidos grasos libres	49
2.9.1	Proceso de transesterificación en discontinuo para la producción de biodiésel mediante catálisis homogénea	51
2.9.2	Proceso de producción de biodiésel mediante reactores de flujo Pistón	52
2.9.3	Proceso de producción de biodiésel por método supercrítico	53
3.1.1	Proceso de síntesis de catalizadores heterogéneos	58
3.1.2	Desgasificado del soporte	59
3.1.3	Medición de volumen de poros	60
3.1.4	Dispositivo de impregnación	61
3.1.5	Impregnación (10% de plata)	62
3.1.6	Soporte después del secado (10% de plata)	62
3.1.7	Conexión de aire en la mufla para la calcinación	63
3.1.8	Catalizador después del calcinado (10% en plata)	63
3.2.1	Sistema de reacción	66
3.3.1	Refractómetro digital Abbe Mark	67
3.3.2	Viscosímetro de Ostwald	69
4.1.1	Distribución de tamaño de poro del soporte	75

4.1.2	Isoterma de adsorción de N ₂	76
4.1.3	Difractogramas de los catalizadores sintetizados	76
4.1.4	Espectros de infrarrojo de los catalizadores de plata soportados en Y-alúmina	77
4.2.1	Comportamiento de la conversión en función de la cantidad del catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C	78
4.2.2	Comportamiento de la conversión en función de la cantidad del Catalizador 2 a 45, 50 y 60 °C	79
4.2.3	Comportamiento de la conversión en función de la cantidad del Catalizador 3 a 45, 50 y 60 °C	80
4.2.4	Conversión del biodiésel producido empleando 10% en peso de catalizador 1 a 45 °C	81
4.2.5	Conversión del biodiésel producido empleando 10% en peso de catalizador 1 a 50 °C	82
4.2.6	Conversión del biodiésel producido empleando 10% en peso de catalizador 1 a 60 °C	83
4.2.7	Comportamiento del IR del metiléster con el diésel comercial	83
4.3.1	Índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C	85
4.3.2	Índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 2 a 45, 50 y 60 °C	86
4.3.3	Índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 3 a 45, 50 y 60 °C	87
4.3.4	Índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 1 en la cinética de reacción	88
4.3.5	Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 45°C, medido a 25 y 40 °C	89
4.3.5a	Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 45°C, medido a 25 y 40 °C	89
4.3.6	Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	90

4.3.6a	Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	91
4.3.7	Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	92
4.3.7a	Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	92
4.3.8	Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C	93
4.3.8a	Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C	94
4.3.9	Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	95
4.3.9a	Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	96
4.3.10	Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	96
4.3.10a	Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	97
4.3.11	Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C	98
4.3.11a	Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C	99
4.3.12	Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	100
4.3.12a	Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	101
4.3.13	Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	101
4.3.13a	Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	102

4.3.14	Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C	103
4.3.14a	Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C	104
4.3.15	Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	105
4.3.15a	Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	105
4.3.16	Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	106
4.3.16a	Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	107
4.3.17	Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C	108
4.3.17a	Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C	109
4.3.18	Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	109
4.3.18a	Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	110
4.3.19	Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	111
4.3.19a	Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	112
4.3.20	Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C	112
4.3.20a	Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C	113
4.3.21	Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	114
4.3.21a	Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C	115

4.3.22	Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	116
4.3.22a	Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C	116
4.3.23	Índice de saponificación del biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	117
4.3.24	Índice de saponificación del biodiésel producido con 10% de los tres catalizadores a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	118
4.3.25	Índice de yodo del biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	119
4.3.26	Índice de yodo del biodiésel producido con 10% de los tres catalizadores a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	120
4.3.27	Índice de acidez del biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	120
4.3.28	Índice de acidez del biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	121
4.3.29	Índice de acidez del biodiésel producido con 10% de catalizador 2 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	122
4.3.30	Índice de acidez del biodiésel producido con 10% de catalizador 3 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	122
4.3.31	Punto de nube del biodiésel producido con 10 % de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	123
4.3.32	Punto de nube del biodiésel producido con 10 % de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	124
4.3.33	Punto de nube del biodiésel producido con 10% de catalizador 2 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	124
4.3.34	Punto de nube del biodiésel producido con 10% de catalizador 3 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción	125
4.4.1	Evolución de la conversión en el tiempo para la reacción, empleando 10% de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C	126
4.4.2	Evolución de moles aceite en el tiempo a 45, 50 y 60 °C, empleando el catalizador 1	126

4.4.3	Evolución de moles de biodiésel en el tiempo a 45, 50 y 60 °C empleando el catalizador 1	127
4.4.4	Número de moles de aceite y de biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 45 °C	128
4.4.5	Número de moles de aceite y de biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 50 °C	129
4.4.6	Número de moles de aceite y de biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 60 °C	129

Lista de tablas

Tabla	Descripción	Página
2.4.1	Materias primas usadas principalmente para producir biodiésel	32
2.4.2	Ácidos grasos que componen algunos aceites vegetales comunes	32
2.4.1.1	Características del aceite de coco	34
2.6.1.1	Ventajas y desventajas de los catalizadores ácidos homogéneos	38
2.6.1.2	Ventajas y desventajas de los catalizadores básicos homogéneos	39
2.6.2.1	Ventajas y desventajas de los catalizadores ácidos heterogéneos	40
2.6.2.2	Ventajas y desventajas de los catalizadores básicos heterogéneos	41
2.6.3.1	Ventajas y desventajas de los catalizadores enzimáticos	41
2.7.1	Comparación de las propiedades del biodiésel y diésel	50
2.10.1	Estándares de calidad del biodiésel	56
3.1.1	Porcentajes de metal utilizados en la impregnación del soporte	61
3.1.2	Catalizadores sintetizados	64
3.2.1	Condiciones de operación para la reacción de transesterificación	65
3.2.2	Masa del catalizador según su % en peso	66
3.2.3	Diseño experimental de la reacción de transesterificación	67
3.3.2	Peso del picnómetro con agua destilada a 25 °C y 40 °C	68
4.1.1	Características del soporte	75
4.2.2	Bandas características en el espectro de IR del biodiésel	84

Resumen

Se sintetizaron catalizadores heterogéneos soportados en γ -alúmina, se impregnaron con 3 distintos porcentajes de plata: 10%, 15% y 20%. Los catalizadores obtenidos se caracterizaron por las técnicas difracción de rayos X, espectrometría infrarrojo y método BET.

De la caracterización del soporte por el método BET, se obtuvo una superficie específica de 260 m²/g, tamaño de partícula de 6.35 μ m, tamaño de poro de 19 Å, poro mesoporoso de forma cilíndrica.

El estudio de RX de los catalizadores presentan picos característicos de la plata en las posiciones angulares de 20° a 80°, se observa que las estructuras cristalinas se incrementan proporcionalmente con el incremento de la concentración de plata. El catalizador con 10% de Ag no presenta varios picos representativos cuando se compara el espectro de los otros catalizadores. Los espectros de IR se realizaron tomando una muestra de referencia solo de la alúmina, este espectro presenta pequeñas bandas de 486 a 426 cm⁻¹ que corresponde a la región de IR, las bandas de los metales en esta zona muestran una intensidad de radiación de 95% para el soporte de γ -alúmina. Los estudios de IR, muestran que la intensidad de radiación disminuye hasta 55 % con el aumento en la cantidad de metal en todos los casos.

Se estudió la actividad de los catalizadores empleando la reacción de transesterificación para probar su desempeño. Los experimentos se realizaron empleando aceite de coco y metanol absoluto, bajo las siguientes condiciones: relación molar metanol/aceite 12:1; temperaturas de reacción de 45°C, 50°C y 60°C. Se estudió el efecto de la cantidad de catalizador en la reacción, para esto se emplearon diferentes cantidades de 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14% en peso con respecto al peso del aceite. El tiempo de reacción se estableció de 3 horas. De los resultados obtenidos de la reacción de transesterificación se determinó que las mejores condiciones para producir biodiésel fueron utilizando 10% del catalizador 1 a 45 °C y 3 horas de reacción, obteniendo una conversión del 100%. El catalizador 3 fue el más inestable porque hubo variación en la conversión, teniendo la conversión mínima de 76.66% utilizando la cantidad de 2% en peso, está fue la conversión más baja en todos los experimentos.

Se estudio la cinética de reacción utilizando el 10% de catalizador 1, respecto a la cantidad de aceite utilizado, utilizando una relación molar de metanol/aceite 12:1, las temperaturas de reacción fueron de 45, 50 y 60 °C. Para realizar la cinética se consideraron los siguientes tiempos de reacción: 30, 60, 90, 120, 150 y 180 min. La reacción alcanzó una conversión máxima de 96.67% en un tiempo de 3 horas a 50 y 60 °C.

El aceite y el biodiésel producido fueron caracterizados de acuerdo con los siguientes parámetros: índice de refracción, densidad, viscosidad, índice de saponificación, índice de yodo, índice de acidez y punto de nube, conforme a lo establecido por las Normas Nacionales e Internacionales.

Palabras clave: biodiésel, aceite de coco, transesterificación, catálisis heterogénea, conversión.

Abstract

Heterogeneous catalysts supported in γ -alumina were synthesized, impregnated with 3 different percentages of silver: 10%, 15% and 20%. The catalysts obtained were characterized by X-ray diffraction, infrared spectrometry and BET methods.

From the characterization of the support by the BET method, a specific surface area of 260 m²/g, particle size of 6.35 nm, pore size of 19 Å, cylindrical mesoporous pore was obtained.

The X-ray study of the catalysts shows characteristic peaks of silver at the angular positions of 20° to 80°, it is observed that the crystal structures increase proportionally with the increase in silver concentration. The catalyst with 10% Ag does not have several representative peaks when comparing the spectrum of the other catalysts. The IR spectra were performed by taking a reference sample only of the alumina, this spectrum presents small bands of 486 to 426 cm⁻¹ which corresponds to the IR region, the bands of the metals in this zone show a radiation intensity of 95% for the support of γ -alumina. IR studies show that the radiation intensity decreases by up to 55% with the increase in the amount of metal in all cases.

The activity of the catalysts was studied using the transesterification reaction to test their performance. The experiments were carried out using coconut oil and absolute methanol, under the following conditions: molar ratio of methanol/oil 12:1; reaction temperatures of 45°C, 50°C and 60°C. The effect of the amount of catalyst on the reaction was studied, for this different amounts of 2, 4, 6, 8, 10, 12 and 14% by weight with respect to the weight of the oil were used. The reaction time was set at 3 hours. From the results obtained from the transesterification reaction, it was determined that the best conditions to produce biodiesel were using 10% of catalyst 1 at 45 °C and 3 hours of reaction, obtaining a conversion of 100%. Catalyst 3 was the most unstable because there was variation in conversion, having the minimum conversion of 76.66% using the amount of 2% by weight, this was the lowest conversion in all experiments.

The reaction kinetics were studied using 10% catalyst 1, with respect to the amount of oil used, using a molar ratio of methanol/oil 12:1, the reaction temperatures were 45, 50 and 60 °C. To perform the kinetics, the following reaction times were considered: 30, 60, 90, 120, 150 and 180 min. The reaction reached a maximum conversion of 96.67% in a time of 3 hours at 50 and 60 °C.

The oil and biodiesel produced were characterized according to the following parameters: refractive index, density, viscosity, saponification index, iodine index, acidity index and cloud point, in accordance with the provisions of National and International Standards.

Keywords: *biodiesel, coconut oil, transesterification, heterogeneous catalysis, conversion.*

CAPÍTULO 1

Introducción

El agotamiento en corto tiempo de las reservas fósiles y el deterioro progresivo del planeta son las razones principales que han impulsado y revitalizado la investigación de un combustible que sea amigable con el medio ambiente, por esto la sociedad científica se ha enfocado en la producción de biocombustibles que sean una alternativa de los combustibles derivados del petróleo.

Los biocombustibles son producidos empleando materia biológica, que es la materia que corresponde a un ciclo corto de carbono, ya sea que se produzca en un tiempo máximo de 10 años. Estos biocombustibles se producen en estado líquido, sólido o gaseoso. El campo del transporte usa generalmente biocombustibles líquidos, de los cuales destacan el bioetanol, la biogasolina, el biodiésel, la bioturbosina y el diésel verde.

El bioetanol puede usarse como aditivo y la biogasolina como biocombustible, en motores que operan con gasolina de origen fósil. Mientras que el biodiésel se emplea como aditivo y el diésel verde como biocombustible, en motores que funcionan con diésel de origen fósil (Fernández y col., 2022)

La producción de biodiésel se presenta como una alternativa ante la problemática ambiental. Por otro lado, el aumento en el consumo de energía obtenida por los combustibles fósiles sigue creciendo.

Debido a la demanda mundial de energía, la producción de biodiésel ha aumentado, basándose en la evolución que ha tenido este biocombustible en los últimos años, se prevé un aumento aproximado del 2%.

Para atender esta problemática se requiere de energéticos de menor costo e impacto ambiental; además, que permitan reducir los efectos de los gases de efecto invernadero debido a menos emisiones de gases de SO_x, NO_x y CO₂ con respecto a la producción de combustibles fósiles (Aldeen, 2014). Ya que el biodiésel se produce a partir de distintos aceites vegetales, ha sido objeto de investigación para poder implementarse como un biocombustible, usarlo en motores de combustión interna y reducir las emisiones (Sánchez y col., 2016).

Una de las principales ventajas que tiene el biodiésel es la reducción de las emisiones de carbono causadas por el uso de combustibles fósiles. El biodiésel reduce hasta un 78% la emisión de CO₂. Debido a que las plantas requieren del dióxido de carbono para su crecimiento y posteriormente lo liberan al ser quemado, se forma un ciclo donde casi la totalidad del dióxido de carbono producido es absorbido por las plantas, produciendo emisiones casi nulas (Zelaya, 2016).

El biodiésel en comparación con el petróleo se considera un combustible ecológico debido a las bajas emisiones de dióxido de carbono, combustible biodegradable, alto índice de cetano, alta eficiencia de combustión, menor contenido de aromáticos y azufre en comparación con el diésel de petróleo, lo que hace que el biodiésel sea un combustible competitivo en el mercado (Aldeen, 2014).

Las condiciones a las cuales se lleva a cabo la reacción de transesterificación deben ser las adecuadas para obtener un mayor rendimiento, conversión y cinética de reacción para esto, es importante la

calidad de la materia prima, el tipo y cantidad de catalizador, el tipo de alcohol y la relación molar alcohol/aceite, temperatura de reacción, presión, agitación y tiempo de reacción, estos tienen efectos característicos en la producción (Sánchez y col., 2016).

1.1 Problemática

La producción de biocombustibles es una alternativa favorable para disminuir el impacto ambiental por la generación de agentes contaminantes de efecto invernadero

El impacto ambiental y el agotamiento de los recursos fósiles son los principales problemas que se enfrentan en la actualidad, esta es la razón de sustituir los combustibles de origen fósil por biocombustibles como el biodiésel. Ya que este es un biocombustible renovable además de tener características similares a las del diésel de petróleo.

El biodiésel se produce generalmente por transesterificación, comúnmente empleando catálisis homogénea. Como resultado de este modo de operación se generan residuos contaminantes del ambiente que involucra etapas costosas de separación y neutralización, que repercute en un mayor costo de producción del biocombustible. Es por esto que el empleo de catalizadores heterogéneos para producir biodiésel ha tomado gran importancia ya que este tipo de catalizador es recuperable, además del ahorro de agua evitando etapas de lavado.

1.2 Justificación

En la actualidad, además de obtener beneficios de los combustibles fósiles, como consecuencia del uso intensivo se han ocasionado numerosos problemas sociales, económicos y políticos, tales como: división entre países vendedores y compradores, vulnerabilidad respecto a las fluctuaciones de los precios en el mercado petrolero internacional, es un recurso no renovable, dependencia casi total que el sector transporte aún mantiene respecto al petróleo, y finalmente los problemas hacia el ambiente y la salud humana, generando emisiones masivas de gases tóxicos a la atmósfera, ocasionando un cambio climático al planeta, esto debido a que el CO₂ es un gas de efecto invernadero. Por lo anterior, surge la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía, de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, es decir, de visualizar una transición energética hacia otras formas de energía renovables, considerando aspectos ambientales, oportunidades económicas, el desarrollo científico y tecnológico, la industrialización de nuevas tecnologías, el aprovechamiento de recursos naturales y la seguridad energética (Castro y col., 2012).

Una de las alternativas más factibles para reemplazar el diésel de petróleo es la producción de biodiésel. Éste es un combustible derivado de aceites vegetales (comestibles o no comestibles;

nuevos o usados) y grasas animales que posee propiedades similares a las del petróleo (Medina y col., 2012)

El biodiésel ha recibido mucha atención en la última década debido a que se reconoce su importancia ambiental, produce menos efectos negativos que el diésel derivado del petróleo ya que proviene de una fuente renovable, produce pocas emisiones de gases corrosivos y de aquellos que producen el efecto invernadero además de ser biodegradable.

Los catalizadores empleados con más frecuencia para la producción de biodiésel son los catalizadores homogéneos que por lo general son ácidos o bases fuertes, por ejemplo, el ácido sulfúrico, hidróxido de sodio e hidróxido de potasio, estos presentan algunos problemas en la separación de los productos de reacción y la recuperación del catalizador. Por lo anterior se plantea eliminar estos problemas mediante el empleo de catalizadores heterogéneos, que facilitan la separación de productos y reducen los costos de producción respecto a la producción con catálisis homogénea.

1.3 Antecedentes

El proceso de conversión de los aceites vegetales y grasas animales en monoalquil ésteres se llama transesterificación, este proceso fue desarrollado en 1853 por E. Duffy y J. Patrick muchos años antes de que una máquina diésel fuera funcional (Fajardo, 2015). En 1893, cuando Rudolf Diésel, inventor del motor que lleva su nombre, corrió su primer modelo en Alemania utilizando aceite de cacahuate como combustible.

En Brasil, durante la segunda guerra mundial y ante la escasez de combustibles fósiles, se destacó la investigación realizada por Otto y Vivacqua, sobre diésel de origen vegetal, pero fue hasta el año de 1970, que el biodiésel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética que sucedía en el momento, y al elevado costo del petróleo (Paulino, 2016).

En 1977, un científico brasileño aplicó para obtener la primera patente del “proceso para producción de biodiésel a escala industrial”. En 1979, en Sudáfrica se inició la investigación para la refinación de aceite de girasol transesterificado con la finalidad de ajustarlo a los estándares del diésel (Saval, 2012).

En Austria y Alemania, las primeras pruebas técnicas con biodiésel se llevaron a cabo en 1982 pero solo hasta el año 1985 en Silberberg (Australia), se construyó la primera planta piloto productora de RME (Rapeseed methyl ester-metil éster de semilla de colza). En 1987, una compañía austriaca estableció la primera planta piloto para la producción de biodiésel (Saval, 2012).

En Europa se comenzó en 1988. En Australia fue con una planta de biodiésel de una cooperativa de pequeños granjeros con una capacidad de aproximadamente 500 toneladas/año (Paulino, 2016), y en 1989 la primera planta industrial (Saval, 2012)

En los años siguientes se establecieron plantas en Francia, Italia, Alemania y la República Checa utilizando principalmente el aceite de canola como materia prima.

La Comisión Europea estableció en 1992 la política de tener un 10% de los suelos ocupados para producción de alimentos y el resto con el objeto de que se utilizaran cultivos no alimenticios para elaboración de biocombustibles (Paulino, 2016).

En 2002 se publicó la norma ASTM D6751 con las especificaciones para biodiésel.

Estados Unidos, en los últimos años está impulsando la producción de biodiésel, en el año 2006 tenían 53 plantas con una capacidad mayor a 75.7 millones de litros/año. En Latinoamérica en la producción de biodiésel destaca Brasil, Argentina, Colombia, México y Costa Rica. A nivel mundial, Alemania es el principal productor de biodiésel. (Saval, 2012).

México cuenta con una producción pequeña de biodiésel, esta producción actualmente es de 3.7 millones de litros/año aproximadamente, ya que ha existido problemas para comercializarlo formalmente. En la Universidad José Vasconcelos, Oaxaca a partir de 2004 existe una planta piloto para probar el biodiésel producido con aceite vegetal residual, cuenta con 38 ton/año de capacidad, este se combinaba formando una mezcla B20 (20% de biodiésel y 80% de diésel de origen fósil) se usaba como combustible en los autobuses de esta Universidad.

En junio del 2005 se inauguró en Cadereyta, Nuevo León, una planta para producir biodiésel usando como materia prima sebo animal, obteniendo una producción aproximada de 3.2 millones de litros/año, esta planta opera al 50% de su capacidad.

La ley para la Promoción y Desarrollo de Biocombustibles fue aprobada en México en 2008.

En noviembre del 2010 en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, el presidente Felipe Calderón y el gobernador Juan Sabines inauguraron la primera planta de biodiésel, empleando como materia prima el piñón, esto inició la era de los biocombustibles en México. El biodiésel producido se empleará en el sistema de transporte Tapachulteco el cual integra 45 camiones que ocupan 100% biodiésel, esto lo convierte en el primer sistema de transporte público en México y Latinoamérica en usar biodiésel producido con materia prima de origen de árbol, no alimenticio. Esta planta de biodiésel está ubicada en Puerto Chiapas, cerca de la frontera con Guatemala.

En Michoacán, fue anunciado el asentamiento de una planta de producción de biodiésel en el punto de Lázaro Cárdenas, empleando hilguerilla como materia prima, abastecido por la empresa Pro Palma, contemplando que se cuenta con 1600 sembradas de este cultivo en zonas de Tierra caliente, la cuenca Lerma-Chapala y en la región del Bajío. Se tiene una meta de producción de 7500 ton de aceite, para lo que se pretenden sembrar 6000 hectáreas de la oleaginosa (2.5 ton de semilla sobre/ha) (Paulino, 2016).

A nivel mundial, se ha dado un importante avance en materia de biocombustibles, siendo hasta el momento el biodiésel el más destacado. Los biocombustibles líquidos han adquirido importancia en

los últimos decenios en Brasil y más recientemente en Europa, los Estados Unidos, Japón y otros países pertenecientes a la OCDE (Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos), especialmente en el sector transportes (Iermanó, 2007).

Existen dos grandes pioneros en la investigación, producción y uso del biodiésel en cantidades comerciales. Ellos son Europa (principalmente Alemania, Austria, Francia, Italia, Malasia y Suecia) y América del Norte (Canadá y EEUU), diferenciándose básicamente por la materia prima utilizada (Iermanó, 2007).

A diferencia de la industria del alcohol carburante o bioetanol, que tuvo sus orígenes en países del continente americano (Brasil y Estados Unidos), la industria del biodiésel se desarrolló inicialmente en Europa. La primera planta para la producción industrial de biodiésel fue construida en 1991 en la ciudad de Aschach an der Donau, utilizando aceite de colza como materia prima (Benjumea y col., 2009).

La capacidad de producción mundial de biodiésel aumenta de 36 mil millones de litros en 2017 a 46,5 mil millones de litros en 2020, entre la producción de Malasia es de 490 millones de litros en 2017, que se estima que aumentará en un 66% en 2027, alcanzando los 815 millones de litros. La producción de biodiésel ha atraído una enorme atención y el número de publicaciones sobre la producción de biodiésel sigue aumentando (Pan y col., 2022).

1.4 Objetivos

Objetivo General

Sintetizar catalizadores activos y selectivos para producir biodiésel por catálisis heterogénea empleando Ag como especie activa y Y-alúmina como soporte.

Objetivos Particulares

- Obtener catalizadores con carácter básico.
- Caracterizar los catalizadores obtenidos por diferentes técnicas analíticas.
- Construir el sistema experimental, para producir biodiésel.
- Determinar la cinética de la reacción de transesterificación de aceite de coco y metanol, a 45, 50 y 60 °C.
- Evaluar el biodiésel producido de acuerdo con lo que establecen las Normas.

1.5 Hipótesis

Un catalizador heterogéneo soportado en γ -alúmina permite obtener conversiones altas a baja temperatura y reducir la cantidad de residuos y lavados para la neutralización del biodiésel.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2.1 Estado del Arte

Desde años atrás, los combustibles fósiles son la fuente de energía más importante. No obstante, a causa de la insuficiencia de este recurso en años próximos y debido a la contaminación ambiental que provoca, se ha vuelto prioridad encontrar fuentes de energía que sean renovables.

Son muchas las complicaciones ecológicas que se generan al consumir este tipo de energía, por ejemplo: la creación de lluvia ácida, surgimiento de smog en áreas industriales y en ciudades muy pobladas, y los cambios que han surgido de la superficie en las áreas de extracción de carbón. La secuela ambiental más seria es el incremento de los niveles de CO₂ atmosférico, esta concentración ha aumentado en proporción al combustible que es quemado, y que afecta directamente al calentamiento global mediante el “efecto invernadero”.

La investigación asociada al aprovechamiento de las energías renovables para sustituir a los combustibles fósiles ha tomado gran importancia mundialmente ya que es una alternativa atractiva.

Los combustibles sustitutos derivados del petróleo deben ser técnica y económicamente competitivos, disponer de ellos fácilmente y que sean menos contaminantes del medio ambiente.

El biodiésel y el diésel tradicional cuentan con características similares, los motores de compresión-ignición convencionales no requieren ser modificados para poder ser funcionales empleando este biocombustible. El biodiésel puede ser usado puro o mezclado con el diésel de petróleo sin producir depósitos no deseados en los motores. Este biocombustible cuenta con ventajas con respecto al diésel de petróleo, por ejemplo, la menor generación de emisiones gaseosas y que es biodegradable.

El biodiésel es una mezcla de metil-ésteres obtenidos a partir de la reacción de transesterificación y fue utilizado por primera vez en Europa durante la segunda guerra mundial, en motores automotrices, debido a la escasez de los derivados del petróleo que se generó en ese periodo.

A fines de los 70's y principios de los 80's la preocupación por el aumento en el precio del petróleo impulsó a una extensa experimentación de la técnica para producir biodiésel mediante aceites vegetales y grasas animales para encontrar fuentes alternativas de energía.

En los años veinte se realizaron distintas experimentaciones para producir biodiésel, sin embargo, este tomo verdadero interés a principios del siglo XXI, debido al aumento de los precios del petróleo internacionalmente.

En Austria, en el año de 1988 se desarrolló la primera planta de producción de biodiésel de 500 TM/año aproximadamente. Posteriormente comenzaron a operar nuevas plantas, fue en el año 1991 que se puso en marcha la primera planta a escala industrial, con una capacidad de 10,000 TM/año. Poco después se instalaron plantas a mayor escala por todo Europa en Livorno, Italia con una capacidad de 80,000 TM/año; Rouen, Francia con una capacidad de 120,000 TM/año, esta es la planta de producción de biodiésel más grande en el mundo; y plantas en Alemania, Suecia y República Checa. Los avances que han surgido de la investigación demuestran que el biodiésel

presenta ventajas como la reducción de emisiones contaminantes y disminución en el desgaste de motores, lo cual ha sido comprobado por muchas pruebas que se han hecho en carretera y que dan veracidad a estos resultados. Se anticipa que en un futuro habrá un aumento considerable y mejor aceptación para el empleo del biodiésel.

Rudolph Diésel en 1913 propuso el uso de aceites vegetales como combustibles puede parecer insignificante hoy, pero con el tiempo pueden convertirse en combustibles tan importantes como el petróleo o el carbón lo son en nuestros días, en la actualidad los biocombustibles derivados de materias primas de origen vegetal se consideran una buena alternativa para disminuir el impacto ambiental.

El proceso para la producción de biodiésel se conoce como transesterificación, este se lleva a cabo mediante una mezcla de un aceite vegetal o grasa animal con un alcohol y un catalizador, de esta reacción se obtienen como productos el biodiésel y glicerina.

La transesterificación con aceites vegetales se desarrolló por E. Duffy y J. Patrick en 1983, con el objetivo de obtener glicerina para la fabricación de jabón, sin embargo, en la actualidad es utilizada para obtener glicerina y biodiésel empleando una gran variedad de materias primas.

Para la reacción de producción de biodiésel se requiere de catalizadores que pueden ser ácidos o básicos donde los catalizadores básicos presentan ventajas por requerir menores tiempos de reacción.

Los catalizadores utilizados para producir biodiésel pueden ser homogéneos o heterogéneos, según la fase en que se encuentren.

Los catalizadores homogéneos generalmente son usados para la reacción de transesterificación ya que mediante este método se obtienen porcentajes elevados de rendimiento que pueden llegar hasta el 96% y tiempos de reacción cortos, cuentan con la gran desventaja de requerir procesos adicionales de lavado empleando una gran cantidad de agua. Este tipo de catálisis es más usado por su utilidad a escala industrial en procesos exotérmicos donde se favorece la disipación calórica.

La catálisis heterogénea es una alternativa ante los problemas que presentan la catálisis homogénea. Sus características son más favorables tales como minimizar el riesgo de reacciones secundarias, fácil recuperación al finalizar la reacción se puede volver a utilizar posteriormente. A diferencia de los catalizadores homogéneos no requieren de procesos adicionales para separar al catalizador. Los catalizadores heterogéneos tienen que resistir altas temperaturas y presiones superiores a la atmosférica.

Actualmente se reconoce a la catálisis heterogénea, como uno de los campos de estudio de mayor crecimiento, pero aún, con problemas por resolver. En los años 60 los catalizadores se preparaban por ensayo y error para sintetizarlos; hoy día hay un enfoque molecular, orientado hacia el diseño; la ampliación de técnicas de caracterización modernas y muy sensibles han hecho que la comprensión de los mecanismos de la reacción catalítica y el tipo de sitio catalítico esté cada vez

más definida. También los estudios computacionales han agregado detalles estructurales y energéticos a las especies que están en la superficie y cómo operar las fuerzas cinéticas en ellas. El avance en nanociencia ha incorporado a la Catálisis Heterogénea nuevos métodos en la obtención de los sólidos, más sofisticados, con concentraciones elevadas de sitios activos, identificados por estudios fundamentales mecanísticos. Actualmente las nanoestructuras añaden nuevas funcionalidades y propiedades físicas al catalizador simple, o combinan dos o más funciones primarias en un solo catalizador. Sin embargo, las nuevas herramientas aún no se han explotado, para el entendimiento de las limitaciones de los sistemas catalíticos de importancia industrial, que presenta la producción y consumo de energía, tecnologías limpias medioambientales, síntesis de materias primas y productos de química fina.

La Catálisis Heterogénea tiene una ilustre historia. Poco después de la introducción del término por Berzelius en 1835 y la definición más científica proporcionada por Ostwald en 1895, los esfuerzos para desarrollar procesos utilizando catalizadores han sido vitales para el crecimiento de la industria química. Durante muchos años, los primeros catalizadores fueron probablemente el resultado de ensayo y error, enfoque basado en las observaciones de los científicos. Cuando Berzelius definió el término de catálisis, los ejemplos que citó no incluyeron ninguna aplicación industrial.

Vázquez (2020) propuso la preparación de catalizadores heterogéneos ácidos-básicos para la producción de biodiésel por el método sol-gel, a partir de tri-sec-butóxido de aluminio empleando alcohol etílico, con H_2SO_4 , $(NH_4)_3PO_4$ y $NaOH$. Se obtuvo un xerogel que posteriormente se calcinó a una temperatura de $700\text{ }^\circ C$, finalmente se obtuvieron los catalizadores de γAl_2O_3 , $\gamma Al_2O_3-H_2SO_4$, γAl_2O_3-Na , $\gamma Al_2O_3-NH_2PO_4$.

Sánchez y col. (2021) sintetizaron un catalizador sólido bimetálico de superficie alta, basicidad alta, que se puede reutilizar en varios ciclos de reacción. Este catalizador fue preparado por el método de impregnación en húmedo dopando la sílice mesoporosa SBA-15 con 5 y 20% en peso de sodio y cerio, respectivamente. Las propiedades fisicoquímicas y de textura de los materiales, la actividad del catalizador sintetizado se evaluó mediante la reacción transesterificación empleando diferentes aceites como materia prima y metanol absoluto para producir biodiésel. También, fue evaluada la reutilización del catalizador en cuatro ciclos adicionales de reacción y la heterogeneidad de esta se comprobó mediante la prueba de filtrado en caliente.

Molero y col. (2022) utilizaron el CaO como catalizador másico, preparó tres catalizadores soportados en alúmina con 3 % de potasio por el método de impregnación por humedad incipiente: KNO_3/Al_2O_3 , KI/Al_2O_3 y KF/Al_2O_3 . Realizó pruebas catalíticas, manteniendo fijas: temperatura, presión, cantidad de catalizador y relación molar metanol:aceite, y variando tiempo de reacción y tipo de catalizador. El CaO alcanzó el 99,29 % de ésteres metílicos a las 4 h de reacción y un rendimiento de 62,16%, mostrando la mayor actividad catalítica en la reacción de transesterificación, el orden de actividad fue: $CaO > KNO_3/Al_2O_3 > KI/Al_2O_3 > KF/Al_2O_3$. La calidad del biodiésel obtenido por el uso de CaO en su punto de máxima actividad presenta valores óptimos de densidad, viscosidad cinemática y punto de inflamación según la norma, obteniendo un producto de calidad adecuado para la comercialización.

2.2 Consideraciones para el diseño de catalizadores

2.2.1 Alúmina como soporte

La alúmina es un material que se usa comúnmente en varias aplicaciones, debido a su bajo costo, la alúmina es un compuesto de transición que se usa como soporte. La gama alúmina es de gran utilidad debido a su área específica elevada, estabilidad térmica, su estructura estable. Frecuentemente es empleada en la preparación de catalizadores con poros mesoporosos. Este material comercial cuenta con área específica que se encuentra en un rango de 100-600 m² /g. Distintas fases cristalinas están presentes en la alúmina, que dependen del modo de preparación, estas generalmente se preparan mediante la deshidratación de hidróxidos de aluminio. El hidróxido de aluminio en gel se puede convertir fácilmente en cristales mediante los procesos de añejamiento o calentamiento. La capacidad de dispersión se asocia con el carácter ácido-básico de las superficies de la alúmina. La impregnación de la fase activa, sobre la superficie de soporte es una reacción química, la alúmina, con sus grupos OH de superficie, su acidez de Lewis y la polaridad de los pares ácido-base, proporciona sitios específicos para anclar especies catiónicas, aniónicas y metálicas (Vázquez, 2020). Las alúminas activadas o alúminas de transición son de gran interés para aplicaciones catalíticas, principalmente por la distribución de tamaño de poros, área superficial, propiedades ácido-base, resistencia mecánica. El desarrollo de la alúmina activa depende de la temperatura de deshidratación del hidróxido de aluminio, actividad catalítica, el área superficial, si este valor es alto el soporte no podrá utilizarse en procesos que se realicen a altas presiones ya que su resistencia mecánica disminuye. El aumento de la superficie específica es provocado por la deshidratación del hidróxido de aluminio a temperaturas entre 450-500 °C, presentando valores de 200-400 m²/g, si la temperatura de calcinación aumenta esto provoca que la densidad del material que mejora la resistencia mecánica aumente, a temperaturas mayores de 600 °C disminuye considerablemente el área superficial y aumenta la densidad esto se debe a los procesos de sinterización y crecimiento del grano. La pérdida de superficie en la calcinación, se debe a la pérdida de moléculas de agua ligada del hidróxido de aluminio, entre los 400 y 500 °C se tiene pérdidas por calcinación del 25%, considerando que la pérdida de agua máxima es del 35% donde se consigue una alúmina totalmente anhídrida y de baja área superficial (Villavicencio, 2016).

2.2.2 Métodos para la preparación de catalizadores

2.2.2.1 Precipitación

Este método, consiste en depositar un hidróxido mediante una sal soluble del metal sobre el soporte que se mantiene en suspensión en la disolución. La precipitación se lleva a cabo generalmente modificando el pH de la disolución, ocurriendo sobre la superficie del soporte. La precipitación se realiza en toda la superficie, tanto externa como interna, se homogeniza la disolución mediante

agitación, y debe evitarse una precipitación rápida fuera del soporte, para ello el pH debe ser homogéneo en toda la disolución. El precursor obtenido es, soporte con el precipitado; se lava para eliminar el álcali sobrante y una vez seco, se calcina para obtener el catalizador, la temperatura de calcinación puede proporcionar distintas especies sobre la superficie, por lo que su selección debe ser cuidada para minimizar la pérdida de fase activa (Briones, 2019).

2.2.2.2 Método de Impregnación

En la impregnación al soporte seleccionado se añade la disolución que contiene la fase activa y el disolvente es eliminado por evaporación. El volumen de la disolución debe ser el mismo que el volumen de poros del soporte, así la disolución se absorbe por los poros debido a las fuerzas capilares, enseguida es secado para eliminar el agua retenida en los poros y la sal precursora es depositada en el soporte. A este método se le llama impregnación por humedad incipiente. La velocidad de secado proporciona diferentes perfiles de distribución de la fase activa en la partícula del soporte. Cuando el precursor se seca, es calcinado para descomponer la sal y obtener la fase activa. La temperatura de calcinación debe seleccionarse de forma muy precisa, ya que las fases activas interactúan en mayor o menor grado con la superficie de los soportes (Briones, 2019).

2.2.2.3 Método Sol-gel

El sol-gel es un método que se inicia con la síntesis de una suspensión coloidal de partículas sólidas o cúmulos en un líquido (sol) y la hidrólisis y condensación de este sol para formar un material sólido lleno de solvente (gel). Este solvente es extraído del gel, se deja reposar a temperatura ambiente durante cierto tiempo, a este proceso se le llama envejecimiento, el gel se encoge y expulsa el solvente y agua residual. Al final del tiempo de envejecimiento, generalmente todavía existen en el material solventes y agua, y el tamaño de poro aun es considerable. Para solucionar esto, el material se somete a un tratamiento térmico, finalmente se obtiene una película delgada. En la eliminación del solvente se obtiene como producto un Xerogel o Aerogel. El Aerogel es obtenido mediante secado a condiciones supercríticas para evacuar el fluido, se procesan aumentando la temperatura y la presión por encima del punto crítico. En cuanto al Xerogel se obtiene evaporando al solvente y agua, cuando el líquido se evapora, la estructura del gel se colapsa.

2.3 Técnicas de caracterización de catalizadores

2.3.1 Difracción de rayos X

Es una técnica que analiza materiales, tales como fluidos, metales, minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, productos farmacéuticos, recubrimientos de capa fina, cerámicas y semiconductores. Su aplicación principal es identificar cualitativamente la composición mineralógica de una muestra sólida cristalina.

Las aplicaciones que la difracción de rayos X (DRX) en el área del estudio de los catalizadores, principalmente se utiliza para identificar compuestos o especies cristalinas, determinar el tamaño de cristal e inferir el grado de cristalinidad (Avila, 2020). La técnica de difracción de rayos-X se fundamenta en la incidencia sobre una muestra, con un determinado ángulo θ , de un haz de rayos-X. Este análisis proporciona la identificación cualitativa de compuestos cristalinos. La difracción de rayos X de polvo es un método analítico que facilita información cualitativa y cuantitativa sobre compuestos existentes en una muestra sólida. El método es basado de que cada sustancia cristalina da una única figura de difracción (patrón). Además, se utiliza para identificar formas alotrópicas y en el polimorfismo. Para llevar a cabo los experimentos se realiza un barrido iniciando con ángulos 2θ bajos hasta altos. La radiación que se difracta se recoge mediante un detector móvil que se encuentra fijamente en la misma dirección que los rayos difractados. Por lo tanto, un difractograma proporciona información sobre los planos cristalinos difractados en función del ángulo 2θ (Vázquez, 2020).

2.3.2 Espectrometría infrarroja

La espectroscopia IR es el método por el cual se estudia la absorción o emisión de energía radiante originada por la interacción entre la radiación electromagnética y el material en estudio (Piqué y Vázquez, 2012). Una de las ventajas de la espectroscopia IR es su versatilidad, permite estudiar cualquier muestra con la independencia del estado de agregación de la muestra: líquidos, disoluciones, pastas, polvos, fibras, films, gases o superficies son algunos ejemplos (Serrano, 2012).

El principio de funcionamiento de esta técnica se basa en la excitación de los modos de vibración y rotación de los enlaces entre los átomos al ser irradiados con un haz de luz infrarroja. Las moléculas, absorben la radiación de una o varias longitudes de onda específicas dependiendo de las características de sus enlaces, por esto pueden identificarse fácilmente. La técnica se basa en analizar la radiación infrarroja absorbida al atravesar un compuesto dado, de tal manera que el espectro infrarrojo registra la radiación transmitida frente a la frecuencia de la radiación incidente (Vázquez, 2020).

A continuación, se mencionan las características más importantes de esta espectroscopia:

1. Los espectros infrarrojos son distintos si dos moléculas están compuestas por átomos diferentes, cuentan con distribución isotópica o configuración diferente o están en distintos ambientes.
2. Una sustancia definida se identifica por su espectro infrarrojo, el espectro puede ser considerado como la huella digital de esta sustancia.
3. Los espectros presentan bandas características de grupos funcionales particulares y que tienen localizaciones e intensidades específicas dentro de los espectros infrarrojos
4. Partiendo de los espectros puede inferirse las estructuras moleculares, para esto es necesario tener un modelo para realizar los cálculos.
5. La intensidad de las bandas de los espectros de una mezcla, principalmente son proporcional a la concentración de los componentes individuales. Por esto, puede determinarse la concentración de una sustancia y analizar muestras que contengan varios componentes.
6. Se puede obtener espectros infrarrojos sin alteración de la muestra empleando dispositivos experimentales apropiados, esto establece a la espectroscopía como herramienta de análisis no destructiva.
7. Solo son necesarios algunos minutos para obtener y almacenar un espectro infrarrojo (Gómez y Murillo, 2006).

2.3.3 Método BET

El método BET desarrollado por Brunauer, Emmet y Teller en 1938 es reconocido mundialmente como el estándar para la determinación de la superficie específica de un catalizador. La fisisorción es ocasionada con un gas no polar que es puesto en contacto con un sólido desgasificado. Al estar en contacto el gas con la superficie del sólido se origina el equilibrio de las moléculas adsorbidas con las moléculas que se encuentran en fase gaseosa, estas dependen de la temperatura y la presión del gas. El vínculo que existe en las moléculas adsorbidas con la presión a temperatura constante es determinado en una isoterma de adsorción. Esta isoterma, permite determinar directamente el volumen que adsorbe a una presión determinada, también puede calcularse el área específica del sólido, el tamaño de poro y su distribución. La fisisorción de nitrógeno prueba las propiedades de la textura del material, histéresis (Vázquez, 2020).

2.4 Aceites vegetales para la producción de biodiésel

De acuerdo con los materiales empleados para producir el biodiésel se suele llamar de primera y segunda generación. El biodiésel de primera generación es obtenido a partir de aceites comestibles que forman parte de la cadena alimenticia del ser humano. El biodiésel de segunda generación se produce a partir de aceites no comestibles o reciclados (Benedicto, 2019). La economía de combustibles y alimentos compiten por los mismos recursos. La disponibilidad de tierra cultivable originalmente utilizada para el cultivo de alimentos se limitará. Con base en estas situaciones, es

claro que la utilización de biodiésel derivado de aceites comestibles como alternativa al diésel convencional pone en alto riesgo el suministro mundial de aceite comestible. Por lo tanto, la intención de los investigadores es desviar la atención de los recursos comestibles a recursos no comestibles que sean empleados para producir biodiésel (Mardhiah y col., 2017). Los productos no comestibles pueden reducir significativamente los costos en la producción de biodiésel (Mukhtar y col., 2022). En la Tabla 2.4.1 se mencionan las materias primas que son usadas principalmente para producir biodiésel.

Tabla 2.4.1 Materias primas usadas principalmente para producir biodiésel (Medina y col., 2012)).

Aceites vegetales convencionales	Aceites vegetales alternativos	Otras fuentes
Girasol	Brassica carinata	Semillas modificadas genéticamente
Colza	Cynara curdunculus	Grasas animales
Soya	Camelia sativa	Fritura usados
Coco	Crambe abyssinica	Producidos por microorganismo y microalgas
Palma	Pogianus	
	Jatropha curcas	

Los aceites de cocina usados ya que no son una buena opción para el consumo humano, son una buena alternativa para producir biodiésel. Sin embargo, la calidad de este tipo de aceite preocupa debido a su alto contenido de impurezas, además de que sus propiedades fisicoquímicas dependen del tipo de aceite (Castellar y col., 2014). En la Tabla 2.4.2 se enlistan los ácidos grasos que componen algunos aceites vegetales comunes para producir biodiésel.

Tabla 2.4.2 Ácidos grasos que componen algunos aceites vegetales comunes (Castellar y col., 2014)).

Ácido graso	Soya (% peso)	Coco (% peso)	Palma africana (% peso)	Semilla de algodón (% peso)
Laúrico	0.1	46.5	0.1	0.1
Mirístico	0.1	19.2	1.0	0.7
Palmítico	10.2	9.8	42.8	20.1
Esteárico	3.7	3.0	4.5	2.6
Oleico	22.8	6.9	40.5	19.2
Linoleico	53.7	2.2	10.1	55.2
Linolénico	8.6	0	0.2	0.6

2.4.1 Aceites vegetales convencionales

Para producir biodiésel se han empleado una gran variedad de materias primas, de las cuales las más utilizadas son los aceites de semillas oleaginosas, por ejemplo: el girasol, la colza, la soja y el coco, y los aceites de frutos oleaginosos como la palma. Debido a problemas del clima la colza, es producida principalmente en el norte de Europa y el girasol en los países mediterráneos del sur. El empleo de estos aceites para la producción de biodiésel está relacionado con las regulaciones de retirada obligatoria de tierras de la Política Agraria Común (PAC), esta permite que semillas oleaginosas sean cultivadas a precios accesibles. La dedicación de sólo las tierras de retirada para la producción de materias primas energéticas supone un riesgo por cuanto estas superficies varían en el tiempo, ya que el régimen de retirada de tierras depende de la oferta y la demanda de cereales alimentarios, lo que implica que este índice está sujeto a alteraciones (García y Laborda, 2006).

Aceite de girasol

El aceite de girasol es procedente de la semilla del girasol (*Helianthus annuus*), una planta originaria de América. Este aceite es utilizado como combustible biológico, con él mismo puede producirse biodiésel para usarse en automóviles que tengan motor diésel. Esta es una buena alternativa para disminuir la utilización de gasolina. Este aceite es caracterizado por su alto contenido de ácido linoleico. Mediante modificaciones genéticas se ha conseguido obtener un aceite de girasol con alto contenido en ácido oleico y con distribución de ácidos grasos, que produce mejoras en el biodiésel obtenido y ciertas ventajas respecto al aceite de colza (Gil, 2017).

El aceite de girasol tiene, en promedio, un 10 % de ácidos grasos saturados y un 90% de insaturados, de los cuales los más frecuentes son el ácido oleico (14-39%) y el ácido linoleico (48-74%). Sus semillas son valorizadas fundamentalmente por su contenido en aceite, aunque un pequeño porcentaje de la producción total se destina al consumo directo como alimento humano y componente en las raciones para alimentación de pájaros (López, 2015). El aceite de girasol mantiene una densidad relativa de 0.918 – 0.923.

Aceite de colza

Este aceite contiene ácidos grasos poliinsaturados esenciales como el ácido linoleico (Omega-6) y el ácido alfa-linolénico (Omega-3). Entre el 4% y 11% de su contenido total de ácidos grasos es alfa-linolénico (Omega-3).

Los países que principalmente producen biodiésel con este aceite son: China con el 23 %, Canadá con 12.9%, India con el 10%, y Japón con el 4.2%. Además de países que también producen biodiésel con este tipo de aceite, pero en menor proporción son México y Estados Unidos. El aceite

de colza es aún la materia prima más importante para producir biodiésel en la Unión Europea. Debido al aumento del precio de la materia prima, su implementación ha reducido ligeramente del 48-44% de 2016 a 2017. La progresiva competencia de materias primas económicas procedentes de fuera de la Unión Europea, en conjunto con el escaso y por lo tanto caro aceite de colza disminuyó la oportunidad de ser empleadas las semillas oleaginosas provenientes de la UE. El valor comercial de la colza (“rapeseed”) reside básicamente en su contenido en aceite, (también llamado aceite de canola), con la salvedad de que las variedades más antiguas son ricas en ácido erúxico, considerado insalubre (López, 2015).

Aceite de soja

El aceite de soja se obtiene a través de la extracción de la semilla de la soja (*Glycine max*), se trata de una planta leguminosa que es originaria del este asiático, aunque en la actualidad se cultiva de forma intensa a nivel mundial debido a los distintos usos y aplicaciones. A partir del grano de soja se produce el aceite que es utilizado para la producción de biodiésel. Este aceite es combinado con alcohol y mediante un proceso químico llamado transesterificación son obtenidos los ésteres metílicos. Un triglicérido es la unión de glicerina y tres ácidos grasos mediante enlaces éster, los aceites vegetales y las grasas son triglicéridos. El aceite de soja es caracterizado por su alto contenido de ácido linoleico 50-55% y ácido oleico 19-25%. Otros ácidos grasos presentes en cantidades significativas son: ácido palmítico 7-10%, ácido esteárico 5-7%, ácido linolénico 6-10%. A nivel mundial, en la actualidad, es la más importante fuente de aceite, aunque también es ampliamente consumida como grano y como un conjunto de productos derivados (leche de soja, sucedáneos de la carne) debido a su alto contenido en proteínas de las oleaginosas (López, 2015).

Aceite de coco

El aceite de coco es una materia prima con un alto contenido de aceite en el grano y un perfil de ácidos grasos favorables a la producción de biodiésel. Este aceite contiene una distribución de ácidos grasos con distinta longitud de cadena corta de carbono por ejemplo los C₈, C₁₀, C₁₂ y C₁₄. El C₁₂ tiene el mayor contenido de ácido láurico, con aproximadamente 50% en la composición total del aceite (Zelaya, 2016). En la Tabla 2.4.1.1 se enlistan las características del aceite de coco.

Tabla 2.4.1.1 Características del aceite de coco (Bakkali, 2015).

Propiedades	Valor
Gravedad específica 40°C/25°C	0.908-0.913
Índice de refracción	1.448-1.450
Punto de fusión °C	23-26
Índice de acidez, mg KOH/g	1-10

Aceite de palma

El ácido palmítico es el ácido graso que se encuentra en mayor proporción en este aceite, y en conjunto con los demás ácidos grasos libres son los causantes de sus niveles de acidez. Presente en pequeñas gotas que están ligadas a otras sustancias, el aceite crudo de palma contiene cierta cantidad de agua que puede ser generadora de la hidrólisis de los triglicéridos si se exceden niveles críticos (Zuleta y col., 2008). Produce racimos de frutos cuyo mesocarpio carnoso rodea una almendra con una cáscara sumamente dura. El aceite de palma se extrae de la pulpa (el rendimiento de un racimo oscila entre el 17 y el 27% mientras que las almendras también son oleaginosas, con un contenido de aceite de entre el 4 y el 10% (López, 2015).

2.4.2 Aceites vegetales alternativos

Además de los aceites vegetales convencionales, existen otras especies donde se desarrollan y mejor posicionadas en el ámbito de los cultivos energéticos. Los aceites de *Camelina sativa*, *Crambe abyssinica* y *Jatropha curcas* son los aceites vegetales alternativos más utilizados para producir biodiésel. La *Brassica carinata* es una buena opción para los cultivos que crecen con el agua de lluvia y los que necesitan ser regados de manera artificial. La *Cynara cardunculus* es un cultivo que dura varios años y es permanente, la tierra de siembra puede ser ocupada aproximadamente 10 años, se orienta principalmente a producir biomasa, sin embargo, sus semillas también son aprovechadas para obtener aceite. Se obtienen de 2.000 a 3.000 kilogramos de semillas, cuyo aceite sirve de materia prima para la fabricación de biodiésel (García y Laborda, 2006).

2.4.3 Aceites provenientes de otras fuentes

Aceites vegetales modificados genéticamente

Los aceites y las grasas se diferencian principalmente en su contenido en ácidos grasos. Los aceites de girasol y el de *Camelia sativa*, mejoran la eficacia del biodiésel a temperaturas bajas, aunque disminuyen su estabilidad para oxidarse, y esto repercute en un índice de yodo alto. Por este motivo, se pueden tener en consideración, como materias primas para producir biodiésel, los aceites con elevado contenido en insaturaciones, que han sido modificados genéticamente para reducir esta proporción, como el aceite de girasol de alto oleico (García y Laborda, 2006).

Grasas animales

Además de los aceites vegetales y los aceites de fritura usados, las grasas animales, y más concretamente el sebo de vaca, pueden utilizarse como materia prima de la transesterificación para

obtener biodiésel. Existen distintos tipos de calidad del sebo, dependiendo su uso para la preparación de alimentos, siendo utilizados para la producción de alimentos animales los de menor calidad. La aplicación de grasas animales surgió a raíz de la prohibición de su utilización en la producción de piensos, como salida para los mismos como subproducto (García y Laborda, 2006).

Aceites de fritura usados

El aceite de fritura usado es una de las alternativas con mejores perspectivas en la producción de biodiésel, ya que es la materia prima más barata, y con su utilización se evitan los costos de tratamiento como residuo. Los aceites usados presentan un bajo nivel de reutilización, debido a que no sufren alteraciones y muestran buena capacidad de aprovechamiento como biocombustible. El informe sobre el marco regulatorio de los carburantes propone reciclar aceite de fritura para la producción de biodiésel, esta opción cuenta con grandes ventajas, ya que además de la posibilidad de producir un biocombustible, es eliminado el aceite usado, que es un residuo altamente contaminante. El aceite usado dificulta la purificación del agua; aunque su recolección no es sencilla. La utilización de aceites usados presenta dificultades logísticas, no sólo, por su recolección, como se ha mencionado, sino también por su control y trazabilidad debido a su carácter de residuo (García y Laborda, 2006).

2.5 Alcoholes utilizados para la producción de biodiésel

La reacción de transesterificación es reversible, se utiliza alcohol en exceso para desplazar el equilibrio hacia el lado de los productos. Los alcoholes más utilizados para producir biodiésel son el metanol y el etanol, igualmente pueden ser usados propanol, butanol, iso-propanol, ter-butanol, octanol y algunos ramificados que incluyen un costo más elevado. Para elegir el tipo de alcohol entre metanol y etanol, debe considerarse que el metanol es más económico, más reactivo y los FAME que se producen son más volátiles que los FAEE, aunque el etanol es menos tóxico y más renovable ya que es obtenido mediante fermentación de una fuente amilácea o sacarificable, mientras que el metanol es obtenido generalmente del gas natural, que es una fuente no renovable. Para que la reacción de transesterificación este estequiométricamente completa es indispensable contar con una relación molar de alcohol/aceite de 3:1. En la práctica es necesaria una relación mayor para desplazar el equilibrio y aumentar el rendimiento (Castellar y col., 2014). Para la reacción de transesterificación es mejor utilizar un alcohol de cadena corta ya que cuando el alcohol tiene una cadena más larga, la actividad del catalizador decrece. Entonces se puede decir que la naturaleza alcohólica afecta la reacción y que cuanto mayor sea la longitud de la cadena de alcohol, menor es la conversión final (Becerra y col., 2011).

2.6 Catálisis

El uso de catalizadores en el proceso de producción de biodiésel es necesario para aumentar la velocidad y el rendimiento de reacción. En la actualidad la producción de biodiésel se realiza mediante catálisis homogénea, heterogénea y enzimática. Los catalizadores homogéneos forman parte de la fase líquida de los reactivos, mientras que los catalizadores heterogéneos son insolubles en los reactivos. A su vez, tanto los catalizadores homogéneos como heterogéneos pueden ser de naturaleza ácida o alcalina (Benedicetto, 2019). La composición del catalizador, la actividad, la desactivación, la selectividad y la capacidad de regeneración son factores que se emplean en el diseño y desarrollo de catalizadores. Para la transesterificación de TG para obtener FAMEs se pueden emplear catalizadores homogéneos y catalizadores heterogéneos (Molero y col., 2022). Para obtener velocidades de conversión razonables será necesario el uso de catalizadores básicos o ácidos, siendo mucho más común el uso de los primeros, ya que en condiciones moderadas presentan altas velocidades de reacción. Debido a la naturaleza reversible de esta reacción, es recomendable emplear exceso de alcohol para con esto favorecer el equilibrio hacia la formación de biodiésel (Medina y col., 2012).

2.6.1 Catálisis homogénea

La catálisis homogénea recibe este nombre porque el catalizador tiene la misma fase que los reactantes, en el caso de la transesterificación la fase de la reacción es líquida, Este proceso tiene varias desventajas entre las cuales podemos señalar la separación de los productos y reactantes que es compleja, así como remover el agua que se produce durante la reacción que tiende a producir jabones (Molero y col., 2022). Se han realizado importantes trabajos sobre la transesterificación homogénea por catálisis ácida y básica de aceites vegetales. Actualmente la mayoría del biodiésel producido se obtiene catalizando la reacción con base por las siguientes razones: la reacción es de baja temperatura y presión, se alcanzan altas conversiones de hasta 98% con reacciones secundarias mínimas y un tiempo de reacción corto, la conversión a biodiésel es directa. La producción de biodiésel a partir de materias primas con alto contenido de FFA es extremadamente difícil mediante la transesterificación catalizada alcalina ya que estos catalizadores reaccionan con los FFA y forman un jabón que dificulta que sean separados la glicerina y el éster. El ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico se utilizan normalmente como catalizadores ácidos, especialmente cuando el aceite contiene una gran cantidad de ácidos grasos libres y agua (Aldeen, 2014). En el método de dos pasos se aplica una operación de esterificación previa para eliminar los ácidos grasos libres (FFA) haciendo reaccionar el aceite con alcohol en presencia de un catalizador ácido. Una de las principales desventajas de los catalizadores homogéneos es que no se pueden reutilizar ni regenerar, porque el catalizador se consume en la reacción y la separación del catalizador de los productos es difícil y requiere más equipo, lo que podría resultar en mayores costos de producción. El catalizador ácido homogéneo se utiliza con materias primas con alto contenido de FFA, el agua debe ser

eliminada durante el proceso, ya que el aumento de la concentración del agua disminuye el rendimiento del biodiésel producido. Se usan temperaturas altas por arriba de 100 °C a presión moderada con flujo continuo de un gas inerte para eliminar el agua que conduce la reacción a una conversión alta. El catalizador ácido homogéneo tiene una velocidad de reacción más baja que el alcalino homogéneo y requiere temperaturas más altas y mucho exceso de alcohol (Aldeen, 2014).

2.6.1.1 Catalizadores ácidos homogéneos

La catálisis homogénea para la producción de biodiésel a nivel industrial se ha desarrollado utilizando usualmente ácido sulfúrico (H₂SO₄), esta práctica ha mostrado la desventaja de la corrosión producida a los equipos implicados en el proceso. Debido a esto, se han utilizado con mayor frecuencia los catalizadores básicos como el hidróxido de sodio (NaOH) en niveles que van de 0.75 a 1.5 % en peso (Cabello y col., 2017). La Tabla 2.6.1.1 menciona las ventajas y desventajas de los catalizadores homogéneos ácidos.

Tabla 2.6.1.1 Ventajas y desventajas de los catalizadores ácidos homogéneos (Castañeda, 2017).

Catalizador	Ventajas	Desventajas
Ácido homogéneo	Indiferente al contenido en ácidos grasos y agua del aceite. Eficaz empleando materias primas de calidad baja. La reacción puede ocurrir en condiciones sutiles, pero el tiempo para reaccionar aumenta.	Velocidad de reacción muy lenta. Se pueden generar problemas de corrosión en los equipos. Difícil separación del catalizador.

2.6.1.2 Catalizadores básicos homogéneos

Estos catalizadores facilitan mayores velocidades de reacción que los catalizadores heterogéneos. Los costos de los procesos de separación son elevados debido a la formación de emulsiones y es necesario utilizar de 1 a 6 % en peso de catalizador para obtener rendimientos altos. Al utilizar estos catalizadores deben mantenerse controladas las condiciones de reacción, en especial la temperatura y la cantidad de catalizador, y así evitar la saponificación.

Los catalizadores básicos son utilizados a temperaturas entre 40 y 75 °C. El hidróxido de potasio e hidróxido de sodio son los más usados para producir biodiésel. La ventaja al utilizar KOH en relación con el NaOH es que la glicerina resultante del proceso es menos tóxica, lo que ha permitido

el uso de este subproducto para producir fertilizantes artificiales (Cabello y col., 2017). La Tabla 2.6.1.2 menciona las ventajas y desventajas de los catalizadores homogéneos básicos.

Tabla 2.6.1.2 Ventajas y desventajas de los catalizadores básicos homogéneos (Castañeda, 2017)).

Catalizador	Ventajas	Desventajas
Básico homogéneo	Tiempo de reacción corto. Suaves condiciones de reacción. Económicos y fácil disponibilidad.	Sensibles al contenido de ácidos grasos libres. La formación de jabones produce emulsiones de difícil limpieza que generan aguas residuales. El catalizador se hidrata al estar en contacto con el aire.

2.6.2 Catálisis heterogénea

En este tipo de catálisis, la fase del catalizador y de los reactivos es distinta. A fase se refiere no solo sólido, líquido y gas, sino también a los líquidos inmiscibles. Los catalizadores heterogéneos mayormente son sólidos, son de importancia en áreas como: la producción química industrial a granel, la síntesis selectiva de moléculas quirales y la energía. En la catálisis heterogénea, uno o más de los reactivos se dispersan sobre la superficie del catalizador y se adsorben en los sitios activos mediante la formación de enlaces químicos, al finalizar la reacción, los productos se desorben de la superficie del catalizador y se dispersan. La difusión, es un criterio importante en los sistemas de reacción heterogéneos. Si no se tienen en cuenta las velocidades de dispersión, las velocidades de reacción para muchas reacciones en las superficies dependen exclusivamente de las constantes de velocidad y las concentraciones de reactivo (Sahu y col., 2018).

Los catalizadores heterogéneos se clasifican en dos grupos: ácidos y básicos. Es de importancia mencionar que los catalizadores heterogéneos pueden ser diseñados para tener mayor actividad y selectividad en diversas reacciones, por ejemplo, para producir biodiésel, ya que se lleva a cabo la esterificación y transesterificación al mismo tiempo. El catalizador se incorpora a un reactor de flujo continuo, apoyando la optimización del proceso de producción de biodiésel, debido a esto los costos de separación y purificación del biocombustible se minimizan. Los catalizadores heterogéneos pueden separarse del producto con facilidad y pueden ser reutilizados. A continuación, se mencionan algunas razones por las que es preferible usar catalizadores heterogéneos

- Al finalizar la reacción, el catalizador se puede recuperar.
- El proceso se puede usar en operación continua.
- El catalizador es económico.

- El catalizador puede reutilizarse.

La composición de los catalizadores heterogéneos son principalmente óxidos de metales alcalinotérreos, estos son solubles en solventes orgánicos. Pueden ser algunos metóxidos, que producen una cantidad mínima de jabones. Otro tipo de catalizadores heterogéneos pueden ser: resinas de intercambio iónico y compuestos metálicos soportados sobre alúmina o sílice (Cabello y col., 2017).

2.6.2.1 Catalizadores ácidos heterogéneos

En la catálisis heterogénea son importantes una serie de parámetros de funcionamiento tales como: temperatura, cantidad del catalizador, agitación, relación molar alcohol-aceite, la presencia de impurezas y el tiempo de reacción. Para la catálisis ácida heterogénea el catalizador debe contar con superficie hidrofóbica, concentración alta de sitios ácidos y un sistema interconectado de poros. En procesos de producción de biodiésel empleando este tipo de catalizadores se han manejado tiempos de reacción de 0.5-5 hrs, presiones de 0.1-5 MPa y temperaturas de 30-200 °C. Una desventaja de los catalizadores ácidos heterogéneos es que se pueden obtener porcentajes de conversión bajos de hasta 26 %, debido a una pobre actividad catalítica, pero esto se puede contrarrestar con el aumento de la temperatura de reacción (Cabello y col., 2017).

Algunas ventajas del uso de catalizadores ácidos heterogéneos son:

- Las reacciones de esterificación y transesterificación se producen simultáneamente.
- Fácil eliminación de agua en la etapa de lavado de biodiésel.
- Es fácil separar el catalizador del producto.
- Las conversiones que emplean este tipo de catalizadores llegan a ser mayores del 95%.

En la Tabla 2.6.2.1 se mencionan las ventajas y desventajas de los catalizadores heterogéneos ácidos.

Tabla 2.6.2.1 Ventajas y desventajas de los catalizadores ácidos heterogéneos (Castañeda, 2017).

Catalizador	Ventajas	Desventajas
Ácido heterogéneo	Indiferente al contenido en ácidos grasos y agua del aceite. Eficaz usando materia prima de baja calidad. Catalizador fácilmente recuperable. Reutilización del catalizador.	Temperaturas altas, relación molar alta, tiempos de reacción largos. Grande consumo energético. Lixiviación en fase éster lo que provoca que se contamine el producto.

2.6.2.2 Catalizadores básicos heterogéneos

Para producir biodiésel se han desarrollado catalizadores como: las zeolitas básicas y óxidos de metales alcalinotérreo. El óxido de calcio es de interés ya que cuenta con una basicidad alta, es poco soluble en metanol y es posible obtenerlo a partir de la calcinación de piedra caliza e hidróxido calcio. Usando CaO, aceite de soya y metanol se han obtenido rendimientos de hasta un 93 % de esteres metílicos después de 1 h de reacción a una temperatura de reflujo de 60 °C (Cabello y col., 2017). La Tabla 2.6.2.2 menciona las ventajas y desventajas de los catalizadores heterogéneos básicos.

Tabla 2.6.2.2 Ventajas y desventajas de los catalizadores básicos heterogéneos (Castañeda, 2017).

Catalizador	Ventajas	Desventajas
Básico heterogéneo	Tiempo de reacción relativamente corto. Suaves condiciones de reacción. Catalizador fácilmente recuperable. Catalizador reutilizable.	Sensible ante el contenido de ácidos grasos libres. Forman jabones. Lixiviación en fase éster lo que provoca que se contamine el producto.

2.6.3 Catálisis enzimática

Estos catalizadores son altamente selectivos, cuentan con un costo fijo de funcionamiento, por tal razón la inversión de capital es confiable. Opera a temperaturas y presiones bajas, por lo tanto, su consumo de energía es bajo, sin reacciones secundarias en comparación con la esterificación alcalina, poca sensibilidad al contenido de agua. La reacción enzimática tiene una velocidad de reacción baja y la enzima es costosa y menos activa, por esto se considera poco rentable ya que afecta el beneficio económico del proceso. El glicerol producido recubre la enzima y reduce su eficiencia, por lo que se requieren aditivos para observar y eliminar el glicerol como el gel de sílice (Aldeen, 2014). La Tabla 2.6.3.1 menciona las ventajas y desventajas de los catalizadores enzimáticos.

Tabla 2.6.3.1 Ventajas y desventajas de los catalizadores enzimáticos (Castañeda, 2017).

Catalizador	Ventajas	Desventajas
Enzimático	Indiferente al contenido en ácidos grasos y agua del aceite. Eficaz empleando materia prima de calidad baja. Temperaturas de reacción bajas.	Tiempos de reacción largos en comparación con la catálisis ácida. Materia prima altamente costosa. Sensibilidad ante la presencia de alcoholes lo que puede provocar la desactivación de la enzima.

2.7 Reacción de transesterificación

El biodiésel es un tipo de biocombustible que es renovable, biodegradable y tiene propiedades similares al combustible diésel fósil. Es la combinación de monoalquilésteres de ácidos grasos saturados e insaturados, con otros compuestos que se consideran impurezas. El tipo de alquilésteres y la proporción en que se encuentran dependen del monoalcohol y de la materia prima empleados en la reacción de transesterificación y esterificación. El perfil de ácidos grasos del biodiésel corresponde al del aceite parental (Benjumea y col., 2009). Existen diversos métodos para transformar aceites vegetales en carburantes, sin embargo, solo con la reacción de transesterificación se puede obtener un verdadero biodiésel. Hay distintas formas de transformación, por ejemplo: el uso directo de aceites, mezclados con hidrocarburos, micro emulsiones, craqueo térmico y transesterificación. Siendo esta última la forma más común de obtención de biodiésel (Zelaya, 2016). La transesterificación es un proceso industrial utilizado en la producción de biodiésel que consiste en tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido se convierte en diglicérido, monoglicérido y glicerina consecutivamente. Un mol de éster metílico se libera en cada reacción. El biodiésel se produce por transesterificación de triglicéridos y alcohol, el usado con más frecuencia es el metanol, en presencia de un catalizador. La transesterificación es conocida también como alcoholisis, ya que desarticula el alcohol de un éster por un alcohol distinto en un proceso comparable a la hidrólisis. Este proceso se ha utilizado ampliamente para disminuir la viscosidad de los TG (Sahu y col., 2018). La transesterificación se basa en la reacción de moléculas de triglicéridos (el número de átomos de las cadenas está comprendido entre 15 y 23, siendo el más habitual de 18) con alcoholes de bajo peso molecular (metanol, etanol, propanol, butanol) para producir ésteres y glicerina (que puede ser utilizada en cosmética, alimentación, farmacia, etc.). El catalizador es usado para aumentar la velocidad de reacción, ya que la reacción es reversible, es necesario usar alcohol en exceso para desplazar el equilibrio hacia los productos. El contenido de ácidos libres debe ser bajo para evitar la reacción de saponificación (Zelaya, 2016). El objetivo principal de realizar la reacción de transesterificación es reducir la viscosidad, por ese motivo se deben obtener moléculas en forma de cadena larga muy parecidas a las moléculas de los hidrocarburos y así la viscosidad no causaría daño en los motores de los automóviles (Briones, 2019).

Los productos de transesterificación son una mezcla de ésteres, glicerol, alcohol, catalizador también, triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos (Zelaya, 2016). Aproximadamente 10% es glicerol, este puede separarse por decantación (que es lo más común, sobre todo en la producción casera o en pequeña escala) o por medio de centrífugas. Por otro lado, el glicerol contiene diversas impurezas (aceite en bruto, fracciones del catalizador, mono y diglicéridos y restos de metanol), de manera que sería necesario un refinamiento posterior para alcanzar la calidad para la venta (Iermanó, 2007).

Transesterificación catalizada por una base

Para una transesterificación catalizada por álcali, los glicéridos y el alcohol deben ser sustancialmente anhidro porque el agua hace que la reacción parcialmente cambie a la saponificación, que produce jabón. Para llevar a cabo la transesterificación con un catalizador básico, el mecanismo de reacción se fórmula de la siguiente manera; primero se ataca el átomo de carbono del carbonilo de la molécula de triglicéridos por el anión del alcohol y forma un intermedio tetraédrico que reacciona con un alcohol para regenerar el anión de alcohol. En la última etapa, el reordenamiento de un tetraédrico resultado intermedio en la formación de un éster de ácido graso y un diglicérido.

Transesterificación catalizada por ácido

Un catalizador ácido es más tolerante a los ácidos grasos libres. La protonación del grupo carbonilo del éster conduce al carbocatión, que después de un ataque nucleofílico del alcohol, produce un intermedio tetraédrico. Este intermedio elimina glicerol para formar un nuevo éster y regenera el catalizador.

Transesterificación catalizada por enzimas

Esta transesterificación es como la transesterificación básica, a diferencia de que la relación de catalizador y tiempo de agitación disolvente es diferente, en esta transesterificación, se ha utilizado catalizador de lipasa. Las lipasas cuentan con una tendencia a conducirse sobre alcoholes de cadena larga mejor que con los de cadena corta. Por lo tanto, en general, la eficiencia de la transesterificación de triglicéridos con metanol (metanólisis) es probable que sea muy bajo en comparación con el que con etanol en sistemas con o sin un disolvente. A continuación, se mencionan las variables para la reacción de transesterificación:

Materia prima

Elegir la materia prima es una de las cosas más importantes para la producción de biodiésel, la cual debe gozar de alto contenido en triglicéridos. Una correcta elección determina el proceso de producción y representa un porcentaje considerable del coste total de producción de biodiésel. Las principales propiedades de las materias primas son: distribución de ácidos grasos, acidez, humedad, contenido de materia no saponificable, presencia de impurezas, viscosidad y poder calorífico. Las materias primas utilizadas se pueden clasificar en: aceites vegetales convencionales, aceites vegetales alternativos, aceites de microalgas, aceites de freír usados y grasas animales (Gil, 2017).

El aceite de coco es un aceite vegetal que posee características fisicoquímicas aptas para la producción de biodiésel con un alto contenido de ácidos grasos insaturados y resistente a la oxidación (Sánchez y col., 2016). Los aceites vegetales están constituidos principalmente por triacilglicéridos, que son las moléculas resultantes de la esterificación del glicerol con tres moléculas de ácidos grasos como muestra la Figura 2.7.1 (Zelaya, 2016).

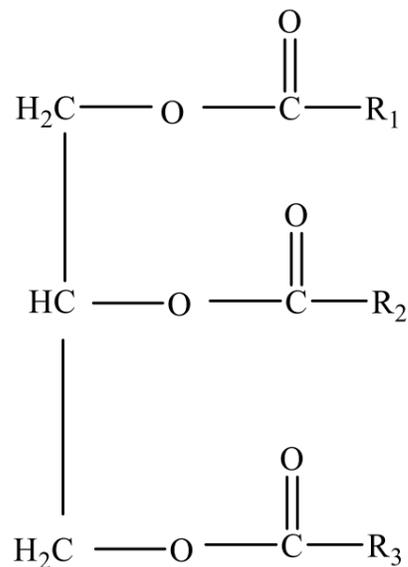


Figura 2.7.1 Estructura general de un triglicérido

Los grupos R pueden ser de distinta longitud de cadena, entonces sería un triglicérido asimétrico, por el contrario, si todos sus grupos R tienen la misma extensión, sería un triglicérido simétrico.

Temperatura de reacción

El proceso de transesterificación se realiza en relación con el punto de ebullición del alcohol, ya que, aumentando la temperatura de reacción, se eleva la solubilidad del alcohol en el aceite, ocasionando una mayor velocidad de reacción. Debe considerarse que, al aumentar la temperatura, la probabilidad de saponificarse aumenta. La temperatura influye en la reacción de transesterificación y en el rendimiento del biodiésel. Con una temperatura elevada se puede disminuir la viscosidad del aceite dando lugar a una mayor velocidad de reacción con su correspondiente disminución en el tiempo de reacción (Zelaya, 2016).

Relación molar alcohol/aceite vegetal

La relación molar alcohol/aceite representa una de las variables que más afectan el rendimiento de la reacción. Basándose en la estequiometría de la reacción, la relación molar alcohol:aceite es 3:1

para obtener 3 moles de biodiésel y 1 mol de glicerina. Por otra parte, la reacción de transesterificación es un equilibrio químico, puede desplazarse hacia los productos usando relaciones alcohol:aceite superiores a la estequiométrica. Al utilizar alcohol en un 100% de exceso, la reacción ocurre a alta velocidad obteniendo rendimientos altos de ésteres metílicos. Debe tomarse en cuenta que el alcohol no es soluble en el aceite con una relación molar mayor a 3:1, a consecuencia de esto se forman 3 fases al comenzar la reacción en caso de que el catalizador sea sólido. La presencia de estas fases hace difícil el contacto al comienzo de la reacción, a pesar de que usar alcohol en exceso favorece la reacción. Por tal razón, la concentración inicial de alcohol debe fijarse considerando la velocidad de difusión entre las fases, y el desplazamiento de la reacción hacia los productos. El catalizador a usar depende de la relación molar alcohol:aceite. Las catálisis ácidas requieren de mayores relaciones molares que las catálisis básicas, para alcanzar el mismo porcentaje de conversión (Zelaya, 2016).

Tipo y cantidad de catalizador

Los catalizadores para la producción de biodiésel pueden ser homogéneos o heterogéneos, según la fase en que se encuentren. Se clasifican en ácidos o bases dependiendo su capacidad de actuar químicamente.

Para que el biodiésel producido sea eficiente las condiciones de reacción deben ser controladas y elegir un catalizador adecuado. En la reacción de transesterificación son empleados catalizadores homogéneos o heterogéneos, esto va a depender de la naturaleza de la materia prima. Los catalizadores heterogéneos con mejor resultado en la producción de biodiésel son: los óxidos de zirconio, de titanio, de zinc, las sílices mesoporosas y las resinas de intercambio iónico, ya que se han obtenido altos rendimientos de reacción, pueden ser reutilizados y la separación del producto es fácil. Este tipo de catalizador favorece la reacción ya que cuenta con un sistema interconectado de poros y carácter ácido o básico. El empleo del ultrasonido y catalizadores heterogéneos tiende a disminuir la generación de subproductos en la transesterificación y a reducir el tiempo de reacción (Bakkali, 2015).

Velocidad de agitación

Cuando inicia la reacción, el alcohol y los triglicéridos forman 2 fases inmiscibles. Debido a la baja concentración del aceite en el alcohol, el rendimiento inicial también lo es. Por eso al iniciar la reacción debe controlarse por la transferencia de masa. Para que aumente el grado de mezcla de las dos fases es necesaria la agitación y aumentar la velocidad de reacción. Conforme los triglicéridos son convertidos en ésteres de ácidos grasos la viscosidad de la mezcla disminuye, esto provoca que la velocidad de reacción aumente. Una vez que la reacción avanza son producidos más ésteres hasta formar una sola fase y los efectos de mezcla disminuyen, el régimen de la reacción cambia a control

cinético y se controla la velocidad de reacción principalmente por la temperatura. Por lo tanto, al aumentar el grado de mezcla y la temperatura se obtiene una alta velocidad de reacción (Zelaya, 2016). La reacción de transesterificación, que se muestra en la Figura 2.7.2, se desarrolla en una proporción molar de alcohol a triglicérido de 3 a 1, reaccionando en la metanólisis 1 mol de triglicérido con 3 moles de alcohol (aunque se añade una cantidad adicional de alcohol para desplazar la reacción hacia la formación del éster metílico). El principal componente del aceite vegetal o la grasa animal es el triglicérido. Además, la formación de la base de la glicerina, inmisible con los ésteres metílicos, juega un papel importante en el desplazamiento de la reacción hacia la derecha, alcanzándose conversiones cercanas al 100% (García y Laborda, 2006).

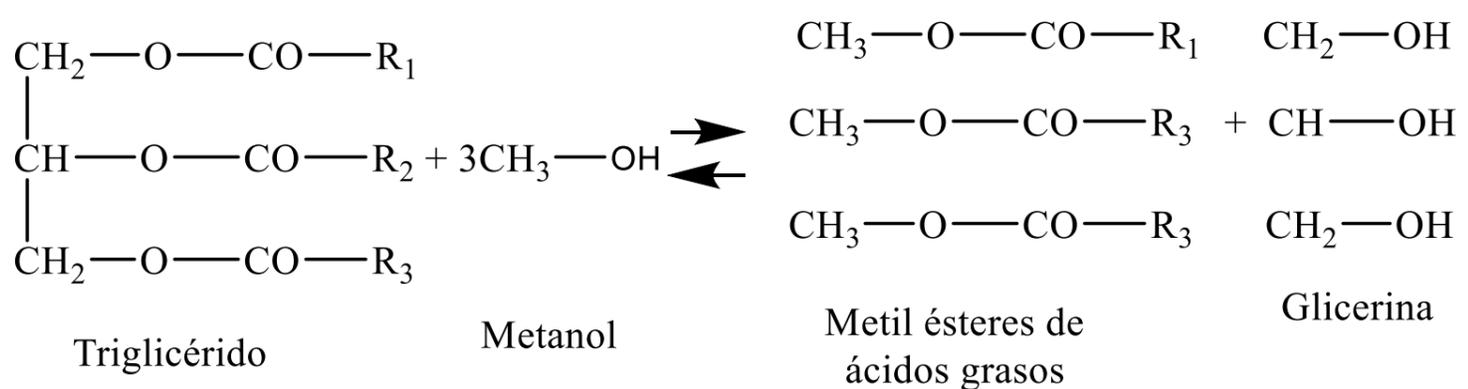
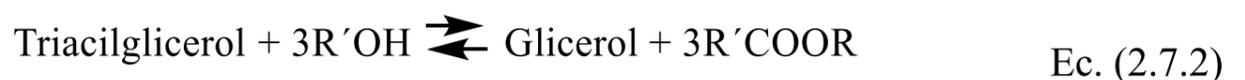


Figura 2.7.2 Reacción de transesterificación estequiométrica

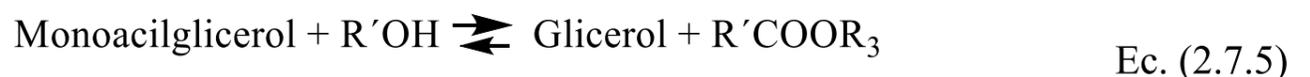
La transesterificación es una reacción química entre un éster y un alcohol que produce un nuevo éster en el que el alcohol en reacción reemplaza al grupo alcohólico original como se muestra en la ecuación 2.7.1 (Santori y col., 2012).



En la Ecuación 2.7.2 se muestra que los ésteres de alquilo de ácidos grasos y glicerol se producen cuando la reacción implica los triacilgliceroles en aceites vegetales o grasas animales (Santori y col., 2012).



La reacción de transesterificación tiene lugar en tres pasos, durante los cuales también aparecen compuestos no deseados, como diacilgliceroles y monoacilgliceroles (Santori y col., 2012).



Las tres reacciones ocurren en serie para el aceite y en paralelo para el alcohol. Cuando el aceite y el alcohol son inmiscibles, o sólo parcialmente miscibles, el carácter paralelo de las tres reacciones es evidente en los primeros minutos, cuando la transferencia de masa es un factor importante en la reacción. La reacción es completada con agitación a alta velocidad, evitando cualquier fenómeno de transporte que afecte a los tiempos de reacción.

Pasados los primeros minutos, el carácter serial de la reacción prevalecerá. Conforme los triglicéridos son convertidos en diglicéridos como se muestra en la Ecuación 2.7.3, simultáneamente los diglicéridos se transforman en monoglicéridos como se muestra en la Ecuación 2.7.4. para finalmente los monoglicéridos son convertidos en glicerina como se observa en la Ecuación 2.7.5.

En las tres reacciones, los ésteres aumentan la miscibilidad entre los compuestos de la mezcla de reacción, actuando como disolventes de alcohol y glicéridos (Santori y col., 2012). Si se utiliza metanol como disolvente en la reacción de transesterificación anterior, se denomina metanólisis.

Comúnmente, son necesarios tres moles de alcohol y un mol de triglicérido para formar ME con GL como subproducto. En la práctica, se necesita de al menos 6 veces más alcohol para toda la reacción, debido a que la transesterificación es una reacción reversible. CH_3OH y NaOCH_3 normalmente son utilizados para producir biodiésel a escala industrial debido a bajos costos y mayor reactividad. Los aceites vegetales crudos requieren un tratamiento previo para eliminar los FFA y otros componentes no grasos, es decir, gomas, antes de la transesterificación (Sahu y col., 2018).

Las reacciones de la Figura 2.7.3 tienen lugar en la transesterificación, la cual consiste químicamente en tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido se convierte consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción un mol de éster metílico es liberado (Sahu y col., 2018).

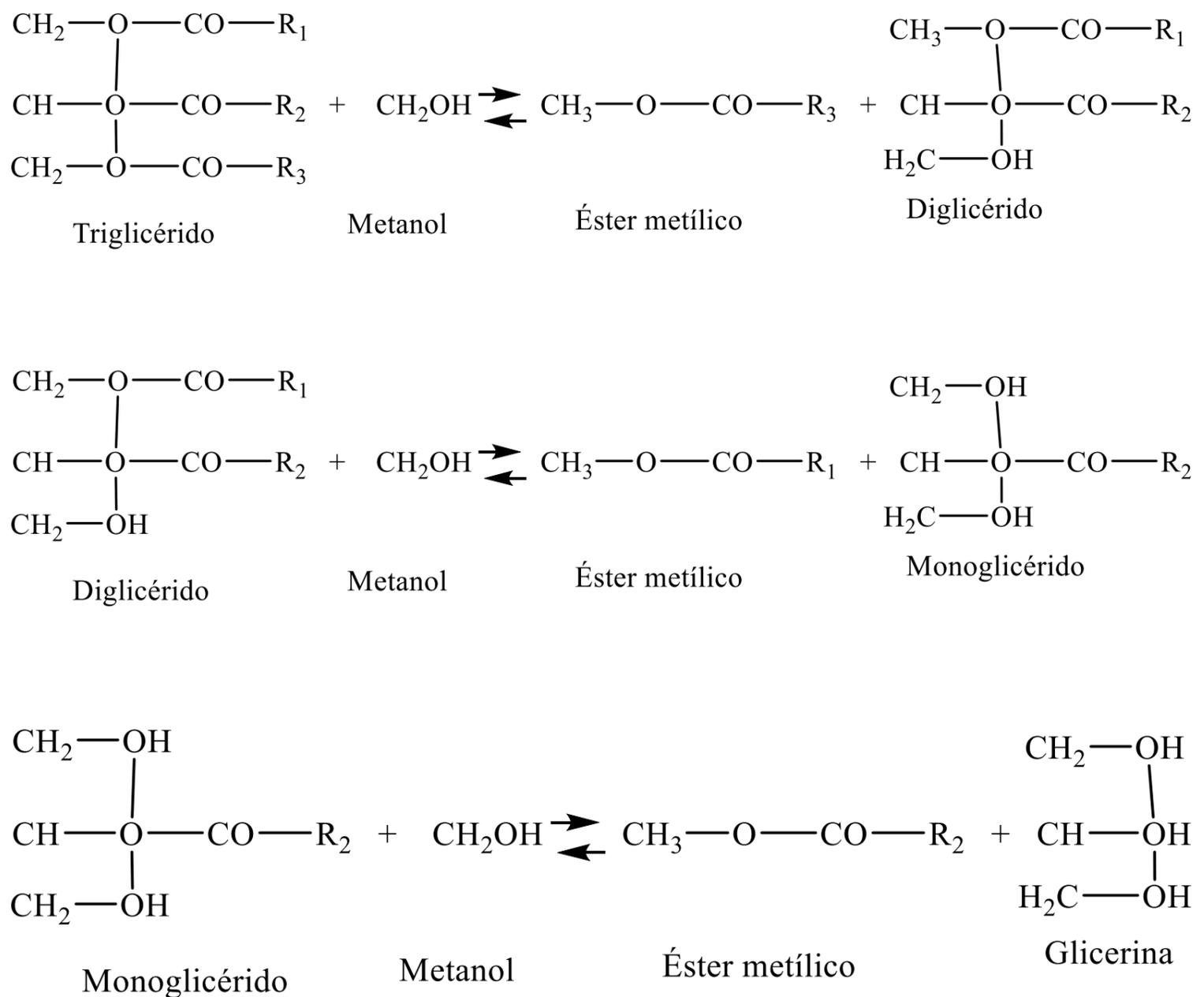


Figura 2.7.3 Mecanismo de producción del metiléster partiendo de un triglicérido

La reacción de transesterificación, cuando utiliza un catalizador ácido requiere condiciones de temperatura elevadas y tiempos de reacción largos, por ello la utilización de álcalis es la opción más utilizada a escala industrial, implica que los glicéridos y el alcohol deben ser anhidros (<0,06 % v/v) para evitar que se produzca la saponificación. Además, los triglicéridos deben tener una baja proporción de ácidos grasos libres para evitar que se neutralicen con el catalizador y formen jabón (García y Laborda, 2006).

De esta manera las reacciones secundarias que se pueden dar son las siguientes:

- Reacción de saponificación
- Reacción de neutralización de ácidos grasos libres

En la reacción de saponificación el triglicérido reacciona con el catalizador básico, consumiendo éste, en presencia de agua dando lugar a la formación de jabones, tal y como se puede ver en la Figura 2.7.4 (García y Laborda, 2006).

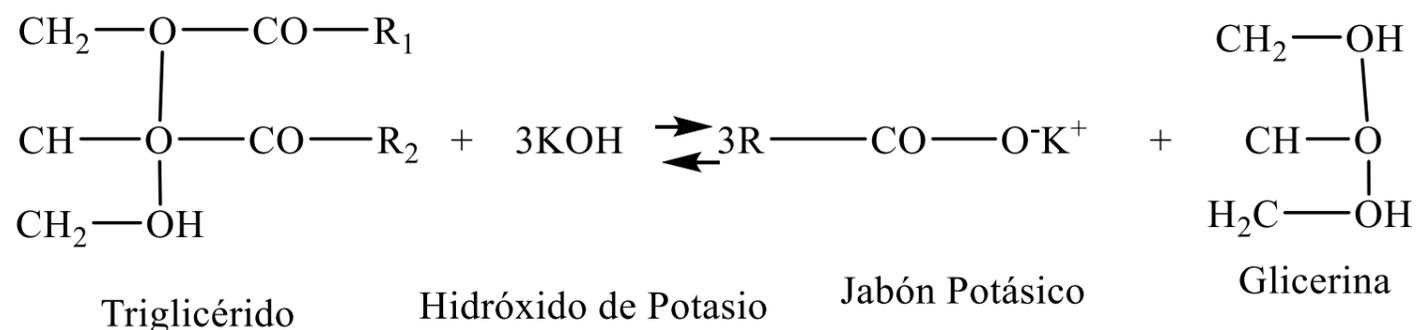


Figura 2.7.4 Reacción secundaria de la producción de biodiésel hacia la saponificación

La saponificación se favorece cuando se utiliza el NaOH o KOH, debido a que sus moléculas contienen los grupos OH responsables de esta reacción. Al utilizar estos catalizadores, debe tenerse cuidado con las condiciones de reacción, principalmente la temperatura y la cantidad de catalizador, y así evitar en la medida de lo posible la saponificación. Sin embargo, deben usarse aceites y alcoholes principalmente anhidros, debido a que el agua conduce a la formación de jabones por saponificación. Esta es la razón de eliminar el agua mediante evaporación, en aceites que contengan humedad antes de realizar la reacción de transesterificación.

Los ácidos grasos libres que se encuentran en el aceite pueden ser eliminados, y neutralizados, puesto que los ácidos grasos que se encuentran presentes en el aceite reaccionan con el catalizador básico principalmente hidróxido de sodio en presencia de agua, del mismo modo ocurre una reacción indeseable que produce jabón, como se muestra en la Figura 2.7.5. Otra forma de eliminar los ácidos grasos libres es mediante una reacción de esterificación con un catalizador ácido con lo que se formaría el éster metílico (García y Laborda, 2006).

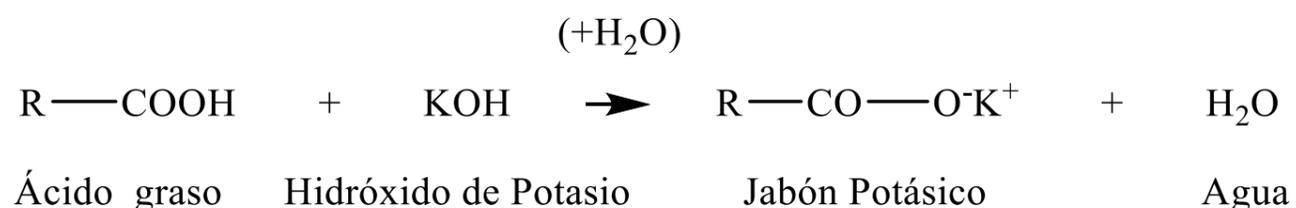


Figura 2.7.5 Reacción secundaria de neutralización de ácidos grasos libres

El biodiésel producido debe cumplir con requisitos específicos para ser utilizados en motores diésel, por ejemplo, sus propiedades fisicoquímicas deben de ser similares a las del diésel de petróleo. En la tabla 2.7.1 se comparan las propiedades físicas y químicas promedio del biodiésel y del diésel de petróleo.

Tabla 2.7.1 Comparación de las propiedades del biodiésel y diésel (Paulino, 2016).

Propiedades	Biodiésel	Diésel
Metil éster	95.5->98%	-
Carbono (% peso)	77	86.5
Azufre (% peso)	0.0024	0.05 máx.
Agua (ppm)	0.05% máx.	161
Oxígeno (% peso)	11	0
Hidrógeno (% peso)	12	13
Numero de cetano	48-55	48-55
PCI (Kj/Kg)	37700	41860
Viscosidad cinemática (40 °C)	1.9-6.0	1.3-4.1
Punto de inflamación (°C)	100-170	60-80
Punto de ebullición (°C)	182-338	188-343
Gravedad específica (Kg/L)(60°C)	0.88	0.85

2.8 Mecanismo de reacción

Los factores de interés para considerar en el diseño de un catalizador ideal y eficiente para producir biodiésel son: el mecanismo de reacción y la cinética de reacción. La producción de biodiésel depende de muchos factores, como la calidad del aceite vegetal, la proporción de masa de aceite a alcohol, la temperatura y el tiempo de funcionamiento, además del tipo de catalizador (Aldeen, 2014).

La reacción catalítica se produce en las superficies del catalizador de base sólida. La superficie del óxido de metal está compuesta por iones metálicos positivos e iones de oxígeno negativos. Primeramente, el O_2^- del óxido metálico extrae un ion H^+ de ROH para formar RO^- que presenta fuerte actividad básica y catalítica hacia la reacción de transesterificación. En seguida, el ión alcóxido de la superficie del óxido metálico es atraído por el átomo de carbono del carbonilo de la molécula de TG para formar un complejo tetraédrico. Después, un ion H^+ de la superficie del óxido metálico es atraído por el intermedio tetraédrico y, al mismo tiempo, el catalizador se regenera. En el último paso, el intermedio tetraédrico se reordena para formar un diglicérido y ME (Sahu y col., 2018).

2.9 Procesos para la producción de biodiésel

Existen múltiples opciones de operación viables para la fabricación de biodiésel. Algunos procesos son combinados de distintas formas modificando las condiciones de reacción y la alimentación del proceso. La elección del proceso dependerá de la capacidad deseada de producción, alimentación, calidad y recuperación del alcohol y del catalizador.

Generalmente, plantas de capacidad mínima y distinta calidad en la alimentación acostumbran a usar procesos Batch o discontinuos. Sin embargo, los procesos ideales para plantas de mayor capacidad son los continuos.

2.9.1 Proceso Discontinuo

Esta es la forma más fácil para producir biodiésel. Consta de reactores con agitación, el cual debe estar sellado y contar con un condensador de reflujo como se observa en la Figura 2.9.1. La temperatura de reacción habitualmente es de 65°C. El catalizador usado con más frecuencia es el hidróxido de sodio, sin embargo, también es utilizado el KOH, en rangos del 0.3% - 1.5%. Se requiere agitar rápidamente para obtener una concentración uniforme en el reactor de aceite, alcohol y catalizador. Un poco antes de finalizar la reacción, debe disminuirse la agitación para que el glicerol pueda separarse de la fase éster.

Algunas plantas en operación utilizan reacciones en dos etapas, eliminando el glicerol en una de ellas, y así obtener rendimientos superiores al 95%. Altas temperaturas y relaciones molares superiores de alcohol:aceite pueden aumentar el rendimiento de la reacción. El tiempo de reacción suele ser entre 20 minutos y una hora (García y Laborda, 2006).

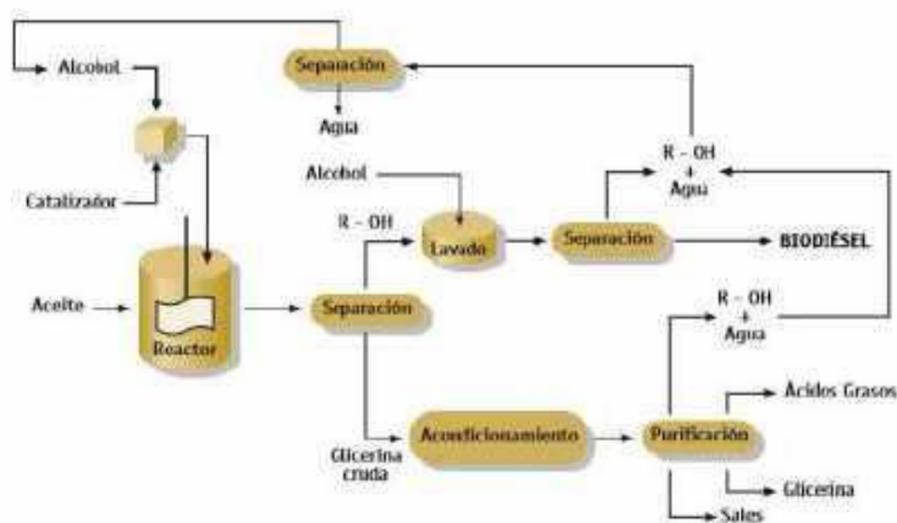


Figura 2.9.1 Proceso de transesterificación discontinuo para la producción de biodiésel mediante catálisis homogénea

2.9.2 Proceso Continuo

Otra opción de proceso son los tanques con agitación conocidos como CSTR del inglés, Continuous Stirred Tank Reactor, este es un reactor continuo. Este tipo de reactor puede variar en el volumen, para obtener tiempos de residencia más altos y aumentar la conversión de la reacción. Para obtener el glicerol por decantación la reacción en un segundo CSTR es mucho más rápida, con un porcentaje del 98% de producto final de la reacción. Un aspecto primordial para diseñar los reactores CSTR es tener la seguridad de contar con un mezclado perfecto, para mantener la composición prácticamente constante dentro del reactor. Así aumenta la dispersión del glicerol en la fase éster. Como resultado se tiene un incremento en el tiempo para la separación de las fases. Existen algunos procesos que usan la mezcla intensa para favorecer la reacción de esterificación, para lo cual se utiliza un reactor de tipo tubular. La mezcla de reacción se mueve longitudinalmente por este tipo de reactores, con poca mezcla en la dirección axial. Este tipo de reactor de flujo pistón, Plug Flow Reactor (PFR), se comporta como si fueran pequeños reactores CSTR en serie (García y Laborda, 2006). El resultado es un sistema en continuo que requiere tiempos de residencia menores (del orden de 6 a 10 minutos) –con el consiguiente ahorro, al ser los reactores menores para la realización de la reacción. Estos reactores pueden operar a temperaturas y presiones altas para aumentar la conversión final.

En la Figura 2.9.2 se muestra el diagrama de un proceso de transesterificación mediante reactores de flujo pistón. En este proceso, se introducen los triglicéridos con el alcohol y el catalizador y se somete a diferentes operaciones (se utilizan dos reactores) para dar lugar al éster y la glicerina (García y Laborda, 2006).

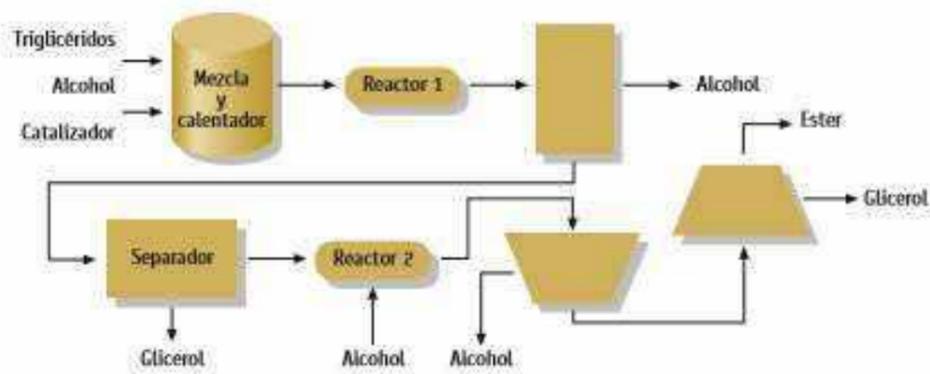


Figura 2.9.2 Proceso de producción de biodiésel mediante reactores de flujo pistón

Dentro de la catálisis heterogénea los catalizadores básicos se desactivan fácilmente por la presencia de ácidos grasos libres (FFA) y de agua que favorece la formación de estos.

2.9.3 Proceso en Condiciones Supercríticas

Si un fluido o gas se somete a una temperatura y presión que exceda su punto crítico, se presentan una serie de propiedades inusuales, por ejemplo: la desaparición de la diferencia entre la fase líquida y vapor, contando con la presencia de una sola fase de fluido. Así mismo, los disolventes que contienen grupos OH, toman las propiedades de super ácidos.

Como ejemplo de un sistema que no utiliza catalizadores es el que se lleva a cabo con una elevada relación molar de alcohol:aceite. En condiciones supercríticas de 350-400°C y presiones mayores a 80 atm la reacción es completada en 4 minutos. Los costos de instalación y de operación son más elevados y es mayor la energía que se consume, sin embargo, aunque los resultados que se obtienen de este proceso son de interés, el escalado de estas instalaciones a nivel industrial puede ser difícil. En la Figura 2.8.3 se representa el diagrama de un proceso en el que se utiliza un reactor supercrítico, sin necesidad de añadir catalizadores (García y Laborda, 2006).

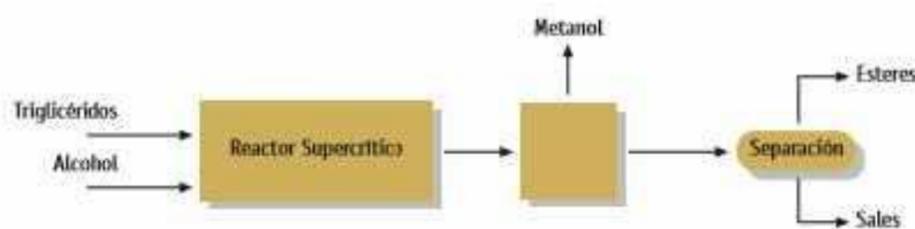


Figura 2.9.3 Proceso de producción de biodiésel por método supercrítico

2.10 Técnicas de caracterización del biodiésel

Para caracterizar el biodiésel se determina sus propiedades físicas y químicas, entre ellas están, la densidad, viscosidad, punto de nube, humedad, índice de saponificación, índice de yodo, índice de acidez, punto de inflamación y combustión, e índice de cetano (Zelaya, 2016).

Densidad

En los combustibles, la densidad es una de las propiedades muy importantes, debido a que los sistemas de inyección, bombas e inyectores deben suministrar la cantidad de combustible con precisión con el fin de que se dé una combustión adecuada en el motor. El contenido de esteres y la cantidad de alcohol son factores que afectan la densidad del biodiésel. Por lo tanto, esta propiedad está determinada principalmente por el aceite seleccionado, y de manera secundaria por la purificación aplicada posteriormente (Zelaya, 2016).

Viscosidad

La viscosidad es la principal razón por la cual los aceites y grasas se transesterifican a biodiésel. La viscosidad del aceite vegetal es aproximadamente mayor que la del diésel de petróleo, mientras tanto, la viscosidad del biodiésel solo es ligeramente mayor que la de diésel mineral. Existen 2 tipos de viscosidad: cinemática y dinámica. La viscosidad cinemática es la forma de la viscosidad prescritas en las normas de biodiésel (es decir, la viscosidad del éster es dos veces superior a la del gasóleo frente a diez veces o más de la del aceite crudo) (Fajardo, 2015).

En los biocombustibles, la viscosidad cinemática es otra de las propiedades más significativas debido a que afecta la atomización del combustible en la inyección de este en la cámara de combustión del motor, y con ello propicia la formación de depósitos. Esta propiedad es el motivo primordial por el cual se lleva a cabo la transesterificación en las grasas y aceites hacia biodiésel. Con esto se logra reducir considerablemente la viscosidad en el biocombustible (Zelaya, 2016). La viscosidad de un éster del ácido graso depende de la longitud de la cadena, así como el número y la naturaleza de los enlaces dobles. Entre más grupos CH_2 en la cadena mayor es la viscosidad, a mayor número de dobles enlaces cis, menor es la viscosidad. Los compuestos con un doble enlace trans tienen casi la misma viscosidad que los compuestos saturados correspondientes, por lo tanto, dobles enlaces trans imparten viscosidad más elevada que el cis (Fajardo, 2015). Para medir la viscosidad del fluido se utilizan diversos instrumentos, como el viscosímetro Ubbelohde y el viscosímetro de Ostwald (Mukhtar y col., 2022).

Punto de nube

El punto de nube es aquella temperatura a la cual se empiezan a formar cristales en el biodiésel. Es necesario conocer este punto ya que al almacenar el combustible se debe de tener en cuenta la temperatura a la cual se va a mantener (Zelaya, 2016). El biodiésel generalmente contiene un punto de enturbiamiento mayor al del combustible diésel de petróleo.

El punto de nube es la temperatura a la que un material graso se vuelve turbio como consecuencia de los cristales formados y a la solidificación de los ácidos grasos saturados. Los sólidos y cristales crecen y se aglomeran rápidamente, tapando las tuberías de combustible y filtros y causando importantes problemas de operabilidad en los motores, sistemas de almacenamiento y tuberías de distribución. En México, este punto es significativo en las zonas norte y parte del centro de nuestro país principalmente en invierno, debido a que en raras ocasiones se tienen temperaturas lo suficientemente bajas en la demás zona (Fajardo, 2015).

Índice de saponificación

El índice de saponificación representa los miligramos de hidróxido de potasio necesarios para saponificar el biodiésel. El índice depende principalmente del peso molecular de la materia prima utilizada en el proceso de transesterificación y no de las condiciones en las cuales se llevó a cabo (Zelaya, 2016). El índice de saponificación es inversamente proporcional al valor de los pesos moleculares de los ácidos grasos de los glicéridos presentes en aceites o grasas. Es expresado como los miligramos de KOH necesarios para saponificar 1 gramo de grasa o aceite. La muestra se saponifica con un exceso de álcali cáustico alcohólico, cuya cantidad consumida se calcula valorando por retorno con ácido clorhídrico (Pisarello, 2010).

Índice de yodo

Este índice se define como el yodo absorbido en 100 g de muestra, y se relaciona con el nivel de insaturación presente en el aceite. Como este parámetro depende del aceite vegetal utilizado, el biodiésel producido presentara un índice de yodo similar (Zelaya, 2016). El índice de yodo de un aceite es la medida de su insaturación, ya que mide el contenido de dobles enlaces capaces de reaccionar con el halógeno, calculado como yodo, absorbido en condiciones de ensayo. Los aceites y grasas cuentan con un cierto rango de índice de yodo, este apoya a su identificación. El índice de yodo de las grasas sólidas es menor que el de los aceites de mayor insaturación. Las insaturaciones presentes en el aceite reaccionan con una cantidad definida de halógeno presente en la solución de Wijs. El grado de absorción se estima valorando el yodo en exceso con tiosulfato de sodio (Pisarello, 2010).

Índice de acidez

Los productos derivados del petróleo nuevos o usados o del biodiésel pueden contener componentes ácidos que están presentes como aditivos o como productos de degradación formados durante el servicio, tales como productos de oxidación. El número de acidez es una medida de esta cantidad de sustancia ácida en el aceite, siempre bajo las condiciones de prueba. El índice de acidez se usa para determinar la cantidad de ácidos grasos libres o ácidos presentes en el biodiésel. El biodiésel con un índice de acidez alto ha demostrado aumentar el depósito en el sistema de combustible y puede aumentar la probabilidad de corrosión (Fajardo, 2015). Esta propiedad se eleva con la degradación del combustible y se asocia con la presencia de depósitos en el sistema de combustible, además reduce la vida útil de la bomba y filtros utilizados para el trasiego de biocombustibles (Zelaya, 2016). Es una medida del grado en que la hidrólisis ha liberado los ácidos grasos de la molécula de glicérido original. Para calcular la acidez es necesario tomar en cuenta el peso molecular del ácido graso libre en 100 gramos de muestra. Cuando hay mezclas de aceites

involucrados se prefiere usar el Índice de Acidez, que se define como los miligramos de KOH necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en 1 gramo de muestra (Pisarello, 2010). En la Tabla 2.10.1 se muestran los estándares de calidad del biodiésel de acuerdo con la normatividad ASTM.

Tabla 2.10.1 Estándares de calidad del biodiésel (Paulino, 2016).

Parámetro	Método ASTM	Limites	Unidades
Agua y sedimentos	D2709	0.05 máx.	% vol
Viscosidad cinemática (40 °C)	D445	1.9-6.0	mm ² /s
Ceniza sulfatada	D874	0.020 máx.	% peso
Azufre	D5453	0.0015 máx.	%peso
No. de cetano	D613	47 min	----
Punto de nube	D2500	S/E	----
Residuo de C	D4350	0.050 máx.	% peso
No. De ácido	D664	0.80 máx.	mg K o H/g
Glicerina libre	D6584	0.020 máx.	% peso
Glicerina total	D6584	0.240 máx.	% peso
Temp. 90 % destilado	D1160	360 máx.	°C

CAPÍTULO 3

Metodología

La experimentación para producir biodiésel se realizó mediante las siguientes etapas:

- Síntesis y caracterización de catalizadores heterogéneos.
- Reacción de transesterificación.
- Caracterización del biodiésel producido.
- Cinética de reacción.

3.1 Síntesis y caracterización de catalizadores heterogéneos

El proceso para la síntesis de catalizadores heterogéneos se llevó a cabo como se muestra en la Figura 3.1.1.

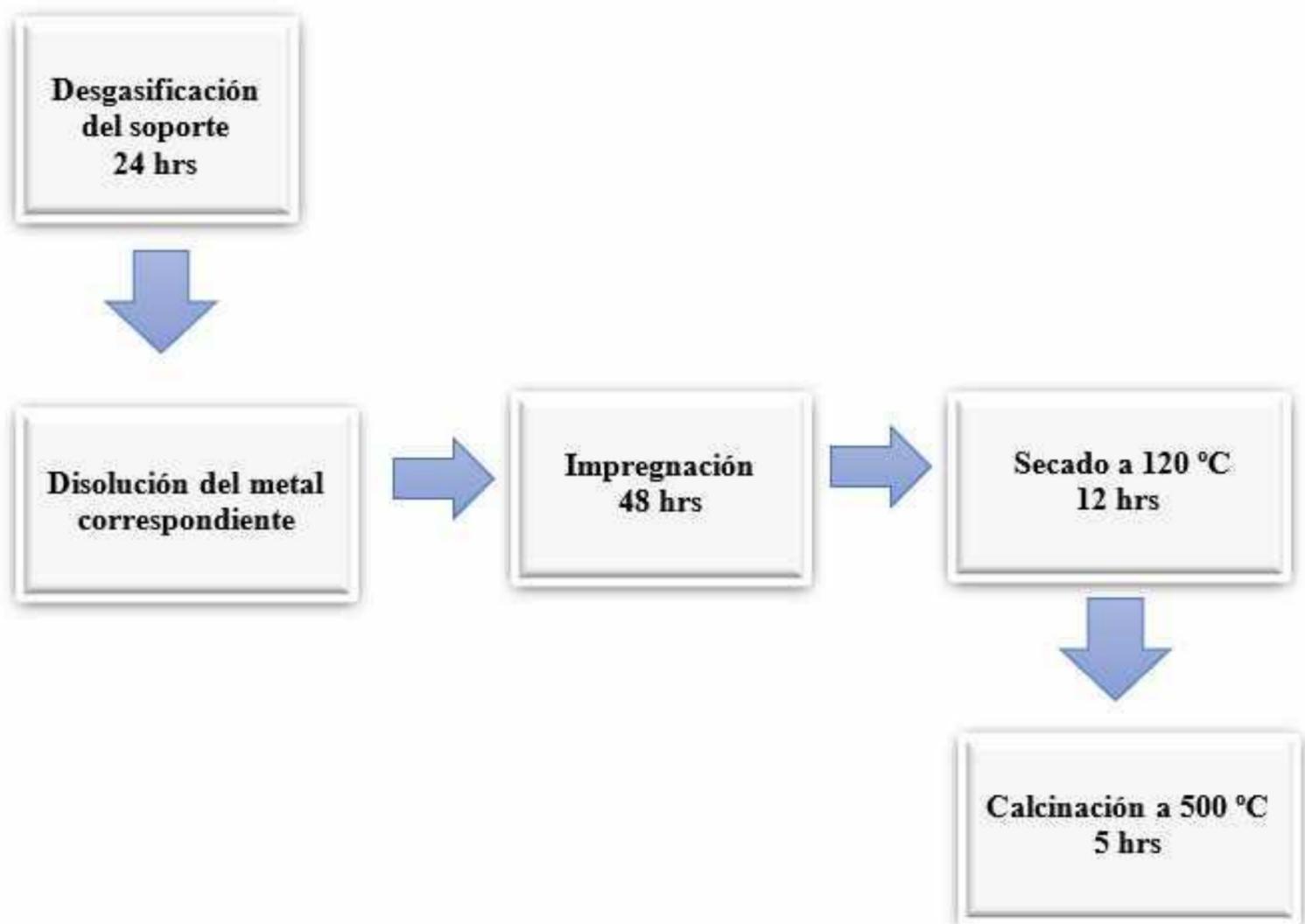


Figura 3.1.1 Proceso de síntesis de catalizadores heterogéneos

-Desgasificación del soporte

Se pesaron 30 gr de g-alúmina, posteriormente se colocó en un matraz conectado a una bomba de vacío durante 24 horas, como se muestra en la Figura 3.1.2, en este tiempo la alúmina se mantuvo en movimiento constante para obtener un desgasificado homogéneo.



Figura 3.1.2 Desgasificado del soporte

-Disolución de la solución impregnante.

Para la preparación de las soluciones metálicas es necesario conocer el volumen de poro del soporte de manera que el volumen de la solución metálica sea el mismo a impregnar.

El volumen de poro se cuantifica por medio del volumen absorbido por el soporte como se muestra en la Figura 3.1.3, en una probeta de 250 ml se colocó 100 ml de agua destilada y posteriormente se agregaron 30 gr de soporte. Se midió el volumen alcanzado del agua con el soporte.

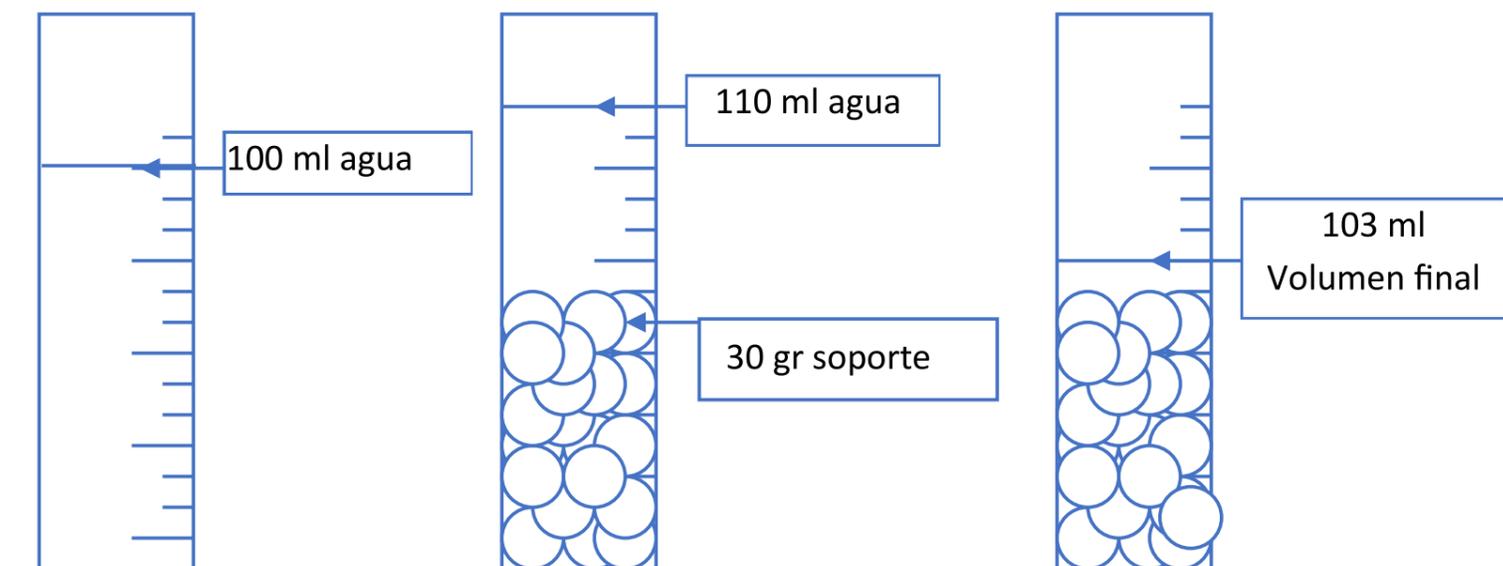


Figura 3.1.3 Medición de volumen de poros

El volumen de poro del soporte se calcula con la Ecuación 3.1, como se muestra a continuación:

$$V_{ps} = V_i - V_f \quad \text{Ec. (3.1)}$$

En donde

V_{ps} = volumen de poro del soporte

V_i = volumen inicial

V_f = volumen final

$$V_{ps} = 110 \text{ ml} - 103 \text{ ml} = 7 \text{ ml}$$

El volumen de poro de los 30 gr de soporte desoxigenada fue de 7 ml.

Determinado el volumen de poro del soporte, se preparan las disoluciones metálicas. Se realizan cálculos estequiométricos para conocer la cantidad de metal a ocupar para los diferentes porcentajes (Anexo 1).

En la Tabla 3.1.1 se muestran los porcentajes y cantidades de AgNO_3 utilizadas para la elaboración de las soluciones metálicas. El AgNO_3 es disuelto en 7 ml de agua destilada para formar soluciones metálicas con distintos porcentajes de metal a emplearse en la impregnación.

Tabla 3.1.1 Porcentajes de metal utilizados en la impregnación del soporte

Soporte g-alúmina (gr)	% metal	AgNO ₃ (gr)
30	10	4.72
30	15	7.08
30	20	9.44

-Impregnación

Las soluciones preparadas anteriormente son colocadas en una bureta conectada a un dispositivo de impregnación para que la solución caiga por goteo, mientras tanto el soporte se mantiene en movimiento continuo para que la impregnación sea homogénea como se muestra en la Figura 3.1.4, el soporte se mantiene en impregnación durante 48 horas.

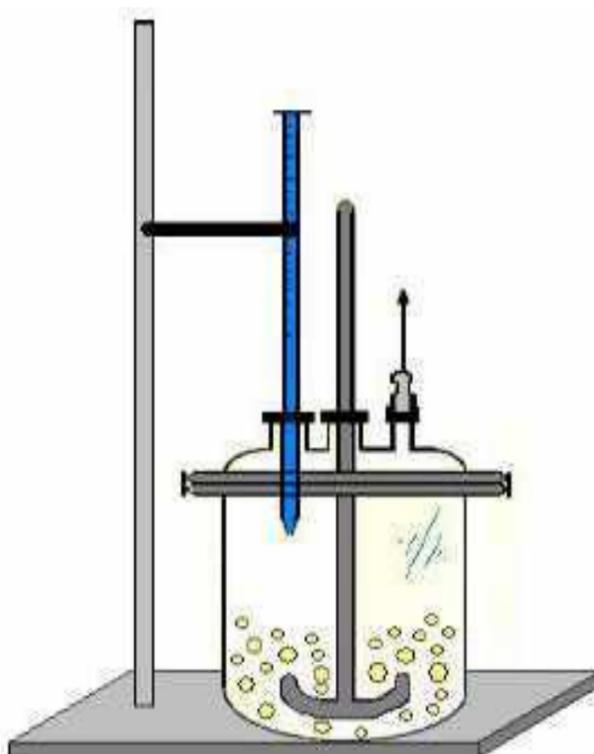


Figura 3.1.4 Dispositivo de impregnación

En la Figura 3.1.5 se muestra el soporte después de 48 horas de impregnación de 10% de plata



Figura 3.1.5 Impregnación (10% de plata)

-Secado y calcinación

Para el secado y calcinado de las muestras, se utilizó una mufla marca Nabertherm. Antes de iniciar el secado, la mufla se programó con una rampa de 3.2 °C/min partiendo de 24 °C durante 30 minutos para alcanzar una temperatura de 120°C, posteriormente las partículas impregnadas se colocaron dentro de la mufla y se secaron durante 12 horas.

En la Figura 3.1.6 se observan las partículas impregnadas con 10% de plata después de 12 horas de secado.



Figura 3.1.6 Soporte después del secado (10% de plata)

Para la calcinación, la mufla se programó con una rampa de $15.86\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ partiendo de $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 30 min para alcanzar una temperatura de 500°C , posteriormente se introdujeron las partículas dentro de la mufla y se calcino por 5 horas, esto en presencia de un flujo de aire de 59.17 ml/s (Figura 3.1.7), de esta forma se logra la activación del catalizador.



Figura 3.1.7 Conexión de aire en la mufla para la calcinación

En la Figura 3.1.8 se muestra el catalizador impregnado con 10% de plata después del calcinado.



Figura 3.1.8. Catalizador después del calcinado (10% en plata)

En la Tabla 3.1.2 se muestran los catalizadores sintetizados con diferentes porcentajes de plata.

Tabla 3.1.2 Catalizadores sintetizados

Catalizador	% Plata
1	10
2	15
3	20

Los catalizadores sintetizados se caracterizaron mediante los siguientes métodos:

Difracción de Rayos X

La muestra se pulverizó lo más finamente posible de forma que esté constituida generalmente por partículas cristalinas en cualquier orientación. Para asegurar la orientación totalmente al azar de estas pequeñas partículas con respecto al haz incidente la muestra localizada en la cámara de polvo se giró en el haz de rayos X durante la exposición.

En la cámara de polvo un haz monocromático de rayos X pasa a través de un colimador dentro de un cilindro de metal en el centro del cual se encuentra la muestra de polvo. Los haces difractados al incidir sobre la muestra se registran en una delgada película fotográfica localizada en el interior de la pared del cilindro. Cuando el haz monocromático incide sobre la muestra se producen al mismo tiempo todas las difracciones posibles.

Espectrometría infrarroja

Para realizar esta técnica se utilizó un espectrofotómetro Spectrum One FT-IR Spectrometer, Perkin Elmer, con software Spectrum V5.0. Las muestras de biodiésel se compararon con diésel comercial, para ser validadas.

Se realizaron 20 barridos a una resolución de 4 cm^{-1} . La muestra se colocó en el accesorio de ATR y se utilizó una prensa con el propósito de que la muestra tuviera buen contacto con la superficie del cristal del accesorio.

Método BET

Las propiedades texturales, como el área específica, el volumen de poro y el diámetro promedio de poro, del soporte y los catalizadores se determinaron mediante la fisisorción de N₂ (BET) utilizando un analizador de adsorción física marca Quantachrome, modelo iQ,

La muestra se desgasificó al vacío durante 16 horas, posteriormente se colocó 0.5 g de muestra en celdas de vidrio de 12 mm para ser analizadas por la maquina BET. La celda se colocó en el puerto de análisis, se utilizó nitrógeno líquido para enfriar la muestra y mantenerla a temperatura constante ya que debe mantenerse una temperatura baja para que la interacción entre las moléculas de gas y la superficie de la muestra sea suficientemente fuerte para producir cantidades medibles de adsorción. El nitrógeno se inyectó en la celda de muestra con un pistón calibrado. El volumen muerto en la celda de la muestra se calibró antes y después de cada medición, utilizando gas helio para una corrida en blanco, ya que el helio no se absorbe sobre la muestra.

3.2 Reacción de transesterificación

Las series de experimentos para probar los catalizadores sintetizados se realizaron de acuerdo con las condiciones presentadas en la Tabla 3.2.1 para un total de 21 experimentos para determinar la mejor condición de temperatura y cantidad de catalizador.

Tabla 3.2.1 Condiciones de operación para la reacción de transesterificación

Condición	Magnitud
Aceite	27.3 gr
Etanol	19.27 ml
Tiempo	3 horas
Agitación	650 rpm
Catalizador	2,4,6,8,10,12,14% en peso con respecto al peso del aceite
Temperatura	45,50,60 °C

El sistema de reacción se compone por un reactor tipo Bach de 250 ml conectado a un sistema de refrigeración con recirculación de agua a 5°C, como se muestra en la Figura 3.2.1. La temperatura se controló con el control de la parrilla de calentamiento de tipo On Off y un baño de aceite como amortiguador de los picos de temperatura, la temperatura interna se midió con un termopar tipo K conectado a un display. Se colocó el aceite de coco dentro del reactor a la temperatura de reacción y se agregaron los catalizadores. Posteriormente se alimentó por goteo el metanol empleando una bureta, se mantuvo una agitación continua de 650 RPM, la reacción se realizó por un periodo de 3

horas. Al finalizar el tiempo de reacción, la mezcla se lavó y se colocó en un embudo de separación para separarse por decantación y posteriormente secarse.



Figura 3.2.1 Sistema de reacción

Para llevar a cabo la reacción se utilizó:

- Aceite de coco
- Metanol anhídrido marca Fermont grado reactivo

Para la reacción de transesterificación se utilizó 27.3 gr de aceite de coco, 19.24 ml de metanol (los cálculos se detallan en el Anexo 1) y distintas cantidades de catalizador (% en peso con respecto al peso del aceite) que se muestran en la Tabla 3.2.2.

Tabla 3.2.2 Masa del catalizador según su % en peso

% peso	Masa del catalizador (gr)
2	0.54
4	1.09
6	1.63
8	2.18
10	2.73
12	3.27
14	3.82

En la Tabla 3.2.3 se muestra el diseño experimental de la reacción que se llevó a cabo empleando catalizadores de Ag

Tabla 3.2.3 Diseño experimental de la reacción de transesterificación

% de Ag	Relación molar metanol-aceite	Temperatura de reacción
10	12:1	45 °C
15	12:1	50 °C
20	12:1	60 °C

3.3 Caracterización del biodiésel

La caracterización de los productos obtenidos de la reacción de transesterificación se realizó de acuerdo con lo estipulado en las Normas Oficiales Mexicanas para el biodiésel.

3.3.1 Índice de refracción

Para el índice de refracción se empleó un refractómetro digital marca Abbe Mark como el de la Figura 3.3.1.



Figura 3.3.1. Refractómetro digital Abbe Mark

Al conectar el refractómetro se tiene un tiempo de espera de 20 min para el calentamiento del instrumento, una vez estando a 27 °C se puede iniciar las lecturas de IR.

Proceso de calibración del instrumento

Se coloca una gota de agua destilada sobre el prisma inferior y se presiona con el superior hasta que ambos queden juntos.

Se enfoca el ocular sobre las líneas transversales cruzadas y con la cremallera de ajuste se gira hasta que aparezca una línea fina de separación perfectamente definida.

Se presiona el botón **READ**, y se espera unos segundos.

Una vez finalizado el tiempo, se toma la lectura del agua que corresponde a 1.333. Con lo anterior se garantiza que el instrumento está calibrado.

Se limpia y se pone una gota de la muestra para seguir con el mismo procedimiento que se llevó a cabo en la calibración.

Entre una muestra y otra, siempre debe calibrarse el instrumento

3.3.2 Densidad

Para el cálculo de la densidad es necesario el uso de un picnómetro.

Para calibrar el picnómetro se mide el peso del picnómetro vacío, posteriormente se llena con agua destilada y se vuelve a pesar. Los experimentos se realizaron con agua destilada a 25°C y 40°C. Los resultados se mencionan en la Tabla 3.3.2.

Tabla 3.3.2 Peso del picnómetro con agua destilada a 25°C y 40°C

25°C	40°C
40.30 gr	gr

El picnómetro es secado completamente y se llena con la muestra. Las muestras se pesaron a 25°C y 40°C (las muestras deben calentarse a baño maría).

Para calcular la densidad se utilizó la Ecuación 3.3.1:

$$\rho = \frac{M3-M1}{Vp} \quad \text{Ec. (3.3.1)}$$

donde:

M3= picnómetro con muestra

M1= picnómetro vacío

Vp= volumen del picnómetro

3.3.3 Viscosidad

Para medir la viscosidad del biodiésel se utilizó un viscosímetro de Ostwald.

El viscosímetro se calibró de la siguiente manera, con una pipeta se agregó agua destilada dentro del viscosímetro hasta la marca C, posteriormente se succionó con una propipeta por la entrada hasta llegar a la marca A. Se tomó el tiempo que tardó en descender el agua destilada hasta la marca B, como se muestra en la Figura 3.3.2, los experimentos se realizaron en un baño de agua a 25 y 40 °C. En el Anexo 3 se muestran los resultados de la calibración de los viscosímetros utilizados.

Se realizó el mismo procedimiento para cada una de las muestras, donde se sustituyó el agua destilada por las muestras de biodiésel.

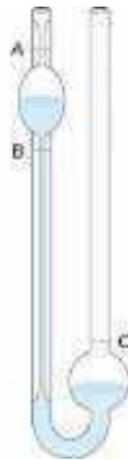


Figura 3.3.2 Viscosímetro de Ostwald

Para calcular la viscosidad del biodiésel se utilizaron las siguientes Ecuaciones:

$$\mu = k/t \quad \text{Ec. (3.3.2)}$$

$$k = \frac{\mu_{H_2O}}{t} \quad \text{Ec. (3.3.3)}$$

En donde:

μ_{H_2O} = viscosidad del agua

t = tiempo que tarda en descender el biodiésel

3.3.4 Índice de saponificación

El índice de saponificación del biodiésel producido en la reacción de transesterificación se realizó de acuerdo con lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana **NMX-F-174-SCFI-2014**

Para este experimento fue necesario preparar las siguientes soluciones:

- Ácido clorhídrico 0.5 N
- Hidróxido de potasio en solución alcohólica al 0.71 N
- Solución indicadora de fenolftaleína – 1,0 % en alcohol etílico al 96%

Se pesaron 0.5 gramos de muestra y se colocó dentro de un matraz redondo de fondo plano de 10 ml, se agregó 1 ml de Ciclohexano para disolver la muestra y luego 5 ml de la solución alcohólica de hidróxido de potasio 0.71 N, se depositaron 3 perlas de vidrio de 5 mm de diámetro dentro del matraz. El matraz se conectó a un condensador con reflujo con mangueras de látex para entrada y salida de agua. Se colocó en una parrilla de calentamiento durante 60 minutos. Al término de ese tiempo, se apagó y retiró la parrilla y se dejó fluir el agua fría durante 5 minutos adicionales para el enfriamiento total del sistema. Posteriormente se añadieron 4 gotas de fenolftaleína al 0.1%. El KOH residual se tituló con una solución estandarizada de HCl 0.5 N. El punto final de la titulación se detectó cuando el color de la solución viró del rosa al incoloro.

Se realizó un ensayo como blanco agregando 1 ml de ciclohexano y 5 ml de la solución alcohólica de KOH 0.71 N al procedimiento antes mencionado.

Con los resultados obtenidos de ambas titulaciones se calculó el Índice de saponificación, empleando la Ecuación 3.3.4:

$$\text{índice de saponificación} = \frac{(A-B)(N)(28.05)}{m} \quad \text{Ec. (3.3.4)}$$

En donde:

A = Volumen de solución de HCl gastado en la titulación del blanco

B = Volumen de solución de HCl gastado en la titulación de la muestra

N = Normalidad de la solución del HCl estandarizado

28.05 = equivalentes de KOH

m = masa de la muestra en gramos

3.3.5 Índice de yodo

El índice de yodo del biodiésel producido en la reacción de transesterificación se realizó de acuerdo con lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana **NMX-F-152-SCFI-2011**

Los reactivos empleados para esta experimentación fueron los siguientes:

Los reactivos mencionados a continuación, deben ser grado analítico; cuando se indique agua, debe entenderse agua destilada.

- Ácido acético glacial (efectuar la prueba del permanganato antes de usarlo).
- Cloro líquido de 99.8% de pureza.
- Tetracloruro de carbono.
- Ácido clorhídrico concentrado con densidad de 1.49.
- Solución de almidón.
- Monocloruro de yodo.
- Ácido sulfúrico concentrado.
- Solución de yoduro de potasio (KI).
- Solución valorada de tiosulfato de sodio 0.1 N.
- Solución de Wijs.

En un matraz de 500 ml se colocaron 20 ml de tetracloruro de carbono, se agregó la masa de la muestra determinada (La determinación de la masa de la muestra debe ser tal, que permita la existencia después de la absorción, de un exceso de 50 a 60% de la solución de Wijs agregada).

Con una pipeta se agregó 25 ml de la solución de Wijs dentro del matraz con la muestra y se mantuvo en agitación para lograr una mezcla homogénea.

Se prepararon y usaron como mínimo dos blancos intercalados en cada grupo de muestras; las determinaciones se hicieron con diferencia de 5 minutos con el fin de lograr en esta forma las mismas condiciones en todas las muestras y los blancos.

Los matraces se colocaron al abrigo de la luz durante 30 minutos a una temperatura de 20 a 25°C, posteriormente se adiciono 20 ml de yoduro de potasio al 15%, se mezcló y en seguida se añadió 100 ml de agua destilada, lavando el tapón.

Se tituló con solución de tiosulfato de sodio 0.1 N adicionándolo gradualmente con agitación constante y vigorosa. La titulación se continuó hasta lograr que el color amarillo, casi desaparezca, se adicionó de 1 a 2 ml de solución indicadora de almidón y se prosiguió con la titulación hasta la desaparición del color azul.

El índice de yodo (I) se calculó utilizando la Ecuación 3.3.5:

$$I = \frac{(V_t - V_m) \cdot N \cdot 12.69}{m} \quad \text{Ec. (3.3.5)}$$

En donde:

I=índice de yodo

Vt=Volumen de solución de tiosulfato de sodio gastado en la titulación del blanco, en ml.

Vm=Volumen de solución de tiosulfato de sodio gastado en la titulación de la muestra, en ml.

N=Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.

12.69=Equivalente del yodo.

m=Masa de la muestra en gramos.

3.3.6 Índice de acidez

El índice de acidez del biodiésel producido en la reacción de transesterificación se realizó de acuerdo con lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana **NMX-F-101-SCFI-2012**

Para la determinación del índice de acidez, se prepararon las siguientes soluciones:

- Fenolftaleína al 1%
- Solución de KOH 0.1 N

Se pesó 1 gr de muestra y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 100 ml, se agregaron 10 ml de alcohol etílico absoluto y 0.1 ml de Fenolftaleína al 1 % p/v. Se colocó dentro del matraz una barra magnética y se puso sobre una parrilla de agitación durante 5 minutos para homogenizar la muestra. La mezcla se tituló con una solución estandarizada de KOH 0.1 N, cuando se redujo la intensidad del color, la solución de hidróxido se adiciona gota a gota y el matraz se agitó manualmente, en forma vigorosa. El punto final de la titulación se estableció cuando el vire al color rosa dado por la fenolftaleína se mantiene durante un minuto.

El Índice de acidez (IA) se calculó aplicando la ecuación 2.3.6, de acuerdo con la norma NMX-F-021-S-1979:

$$IA = \frac{N*V*56.11}{P} \quad \text{Ec. (3.3.6)}$$

En donde:

N= Normalidad de la solución de KOH utilizada en la titulación de la muestra

V=mililitros de la solución de KOH, gastados en la titulación de la muestra

56.11= equivalentes de KOH

P=masa de la muestra en gramos

3.3.7 Punto de nube

La muestra para analizar se somete a una temperatura de por lo menos 14°C por sobre el punto de nube esperado. Se retiró cualquier humedad presente mediante filtrado utilizando papel filtro.

En un frasco de muestra se colocó la muestra hasta la marca de nivel, cerrado herméticamente por el centro que lleva el termómetro de prueba, asegurándose de que el bulbo del termómetro esté apoyado en el fondo del frasco de prueba.

Se colocó un vaso dentro del baño de enfriamiento a $0 \pm 1.5^\circ\text{C}$, 10 minutos antes de insertar el frasco de prueba dentro.

El frasco con la muestra se colocó dentro del vaso. Se saca del vaso cada 1°C hasta identificar la formación de cristales en el fondo del recipiente. Se toma lectura de la temperatura.

3.4 Cinética de reacción heterogénea

La cinética de reacción se realizó mediante la reacción de transesterificación, utilizando el catalizador con mejor desempeño que fue de 10% en peso del catalizador 1 (impregnado con 10% de Ag), bajo las siguientes condiciones de operación: temperaturas de 45, 50 y 60 °C a 30, 60, 90, 120, 150 y 180 minutos.

Se colocó dentro del reactor 27.3 gr de aceite de coco previamente calentado y se le agregó 2.73 gr del catalizador 1 manteniendo una agitación continua a 650 RPM. Posteriormente se alimentó por goteo 19.24 ml de metanol empleando una bureta y se dejó la reacción por 30, 60, 90, 120, 150 y 180 minutos.

Terminada la reacción inmediatamente se introducía el reactor dentro de un baño de hielo para detener la reacción.

Esto se realizó para todas las temperaturas de estudio 45, 50 y 60 °C.

Al finalizar, la mezcla obtenida de la reacción se lavó y se colocó en un embudo de separación para separarse por decantación y posteriormente secarse.

CAPÍTULO 4

Resultados y discusión

4.1 Síntesis y caracterización de catalizadores

La γ -alúmina se caracterizó por medio del método BET para estimar el área superficial. Los resultados obtenidos a partir de ese método se observan en la Tabla 4.1.1.

Tabla 4.1.1 Características del soporte

γ -alúmina	
Área superficial – BET	260 m ² /g
Diámetro de partícula	6.35 mm
Diámetro medio de poro	19 Å
Tipo de poro	Mesoporoso
Geometría de poro	Cilíndrica

En la Figura 4.1.1 se muestra la distribución del tamaño de poro del soporte que se obtuvo por quimisorción de N₂, esta indica un diámetro medio de poro de 19 Å.

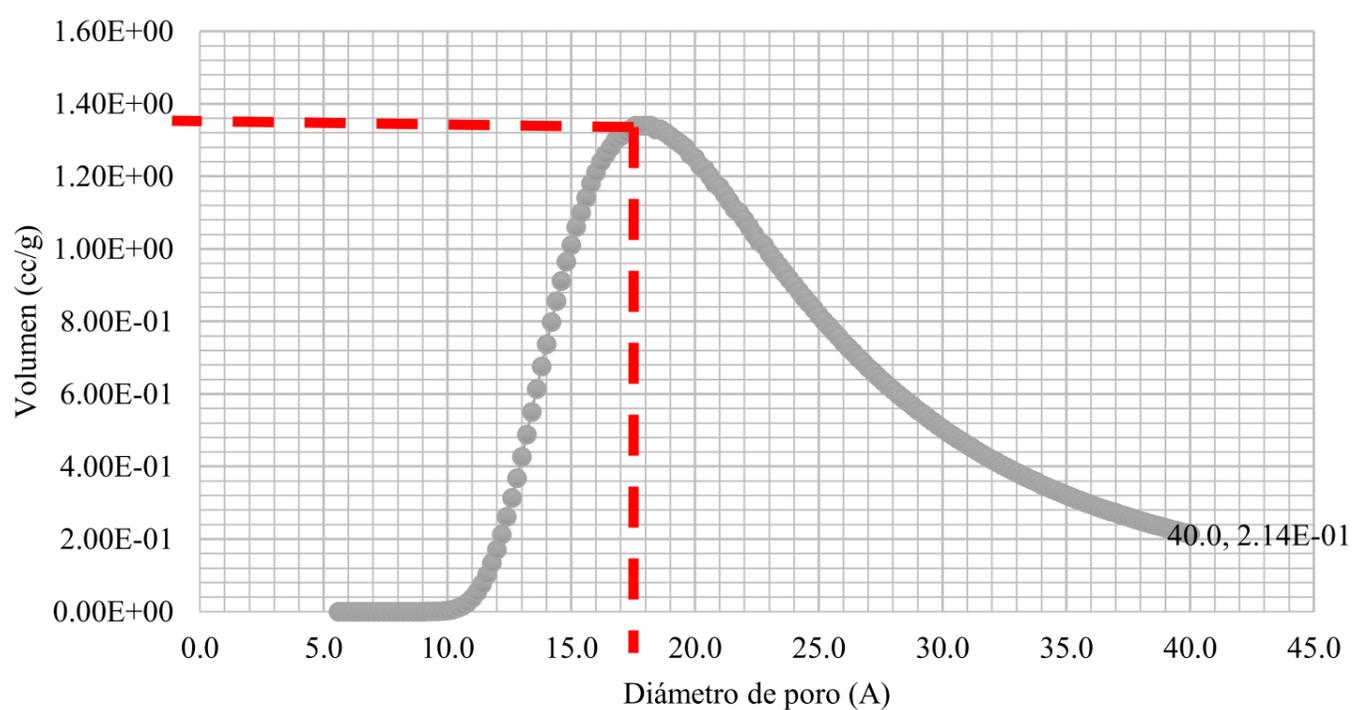


Figura 4.1.1 Distribución de tamaño de poro del soporte

La Figura 4.1.2 presenta la isoterma de adsorción del soporte de γ -Al₂O₃ de acuerdo con su forma se observa que corresponde al tipo IV, según la definición IUPAC, esto indica que hay presencia de mesoporos, de forma cilíndrica. Los mesoporos son generados por las nano-fibras y distribuidos irregularmente en los aglomerados. La isoterma de forma irregular con el ciclo de histéresis tipo E confirma que los poros en el aglomerado tienen una forma irregular, conocidos como tipo tintero.

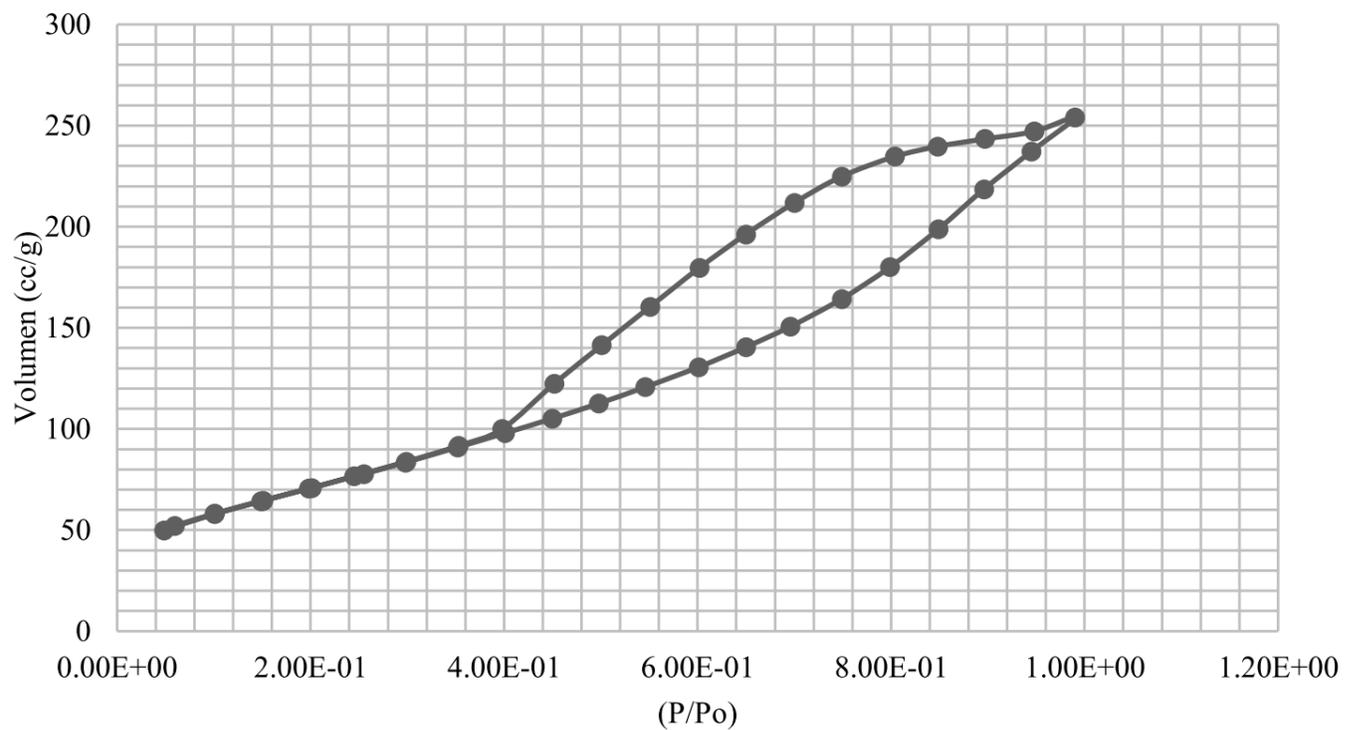


Figura 4.1.2 Isotherma de adsorción de N_2

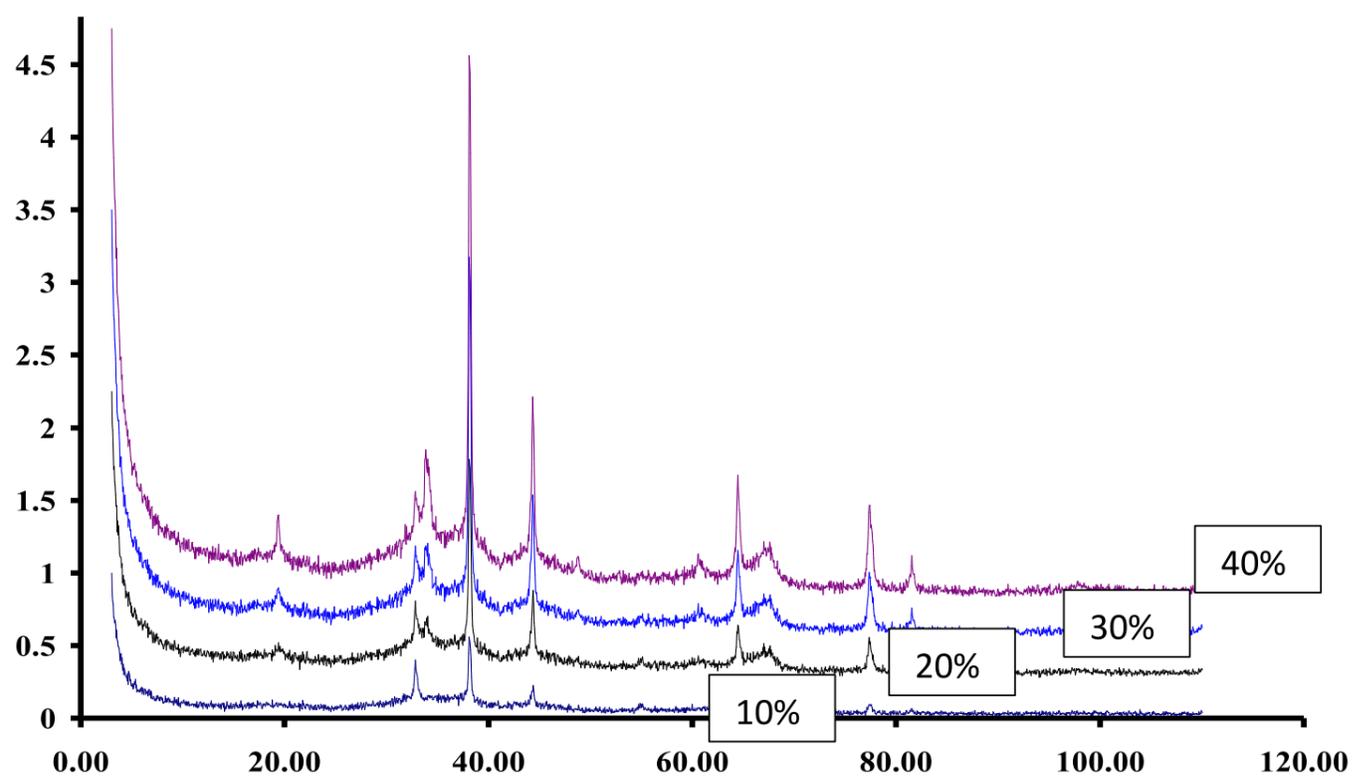


Figura 4.1.3 Difractogramas de los catalizadores sintetizados

La Figura 4.1.3 presenta el difractograma de los catalizadores de plata sintetizados soportados sobre γ -alúmina para distintos porcentajes de Ag. No se observan picos de XRD considerables, lo que indica que esto corresponde a un material amorfo con poca cristalinidad. La precipitación homogénea garantiza la síntesis de precursores amorfos, como el SBA y la PB, para obtener gamma alúmina, con un área superficial específica alta y baja cristalinidad. En las posiciones 2θ se observan los picos característicos de la plata y de 20 a 80 se observa que las estructuras cristalinas crecen

proporcionalmente con la concentración de plata. Los picos de difracción anchos y con poca altura indican que el material tiene poca cristalinidad, con posibilidades de generar una gran área superficial. En el difractograma del catalizador impregnado con 10% de Ag se observa que no existen varios picos representativos si se compara con los otros catalizadores, como las estructuras en las posiciones angulares: 20, 62 y 82. El catalizador impregnado con 20% de Ag no presenta las estructuras en la posición angular 62. Para los catalizadores impregnados con 30% y 40% de Ag se observa que aparecen todas las estructuras representativas salvo que, en el catalizador de 30% la proporción en la posición angular 62 es 50% menor en comparación con la estructura del catalizador de 40% en la misma posición angular.

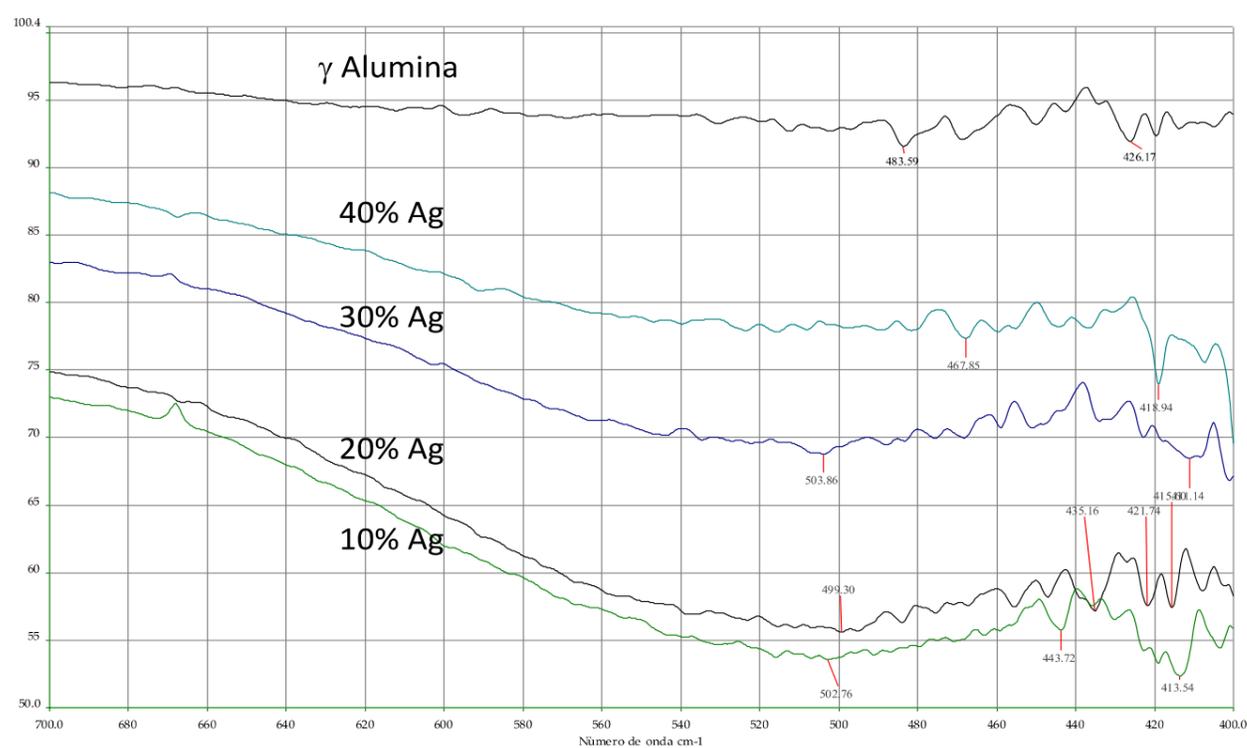


Figura 4.1.4 Espectros de infrarrojo de los catalizadores de plata soportados en γ -alúmina

La Figura 4.1.4 corresponde a los espectros de IR de los catalizadores de plata soportados en γ -alúmina para porcentajes del 10 al 40%. Se tomó una muestra de referencia solo de la alúmina, este espectro presenta pequeñas bandas de 486 a 426 cm^{-1} que corresponde a la región de IR, las bandas de los metales en esta zona muestran una intensidad de radiación de 95% para el soporte de γ -alúmina. Los estudios de IR, muestran que la intensidad de radiación disminuye hasta 55% con el aumento en la cantidad de metal en todos los casos.

4.2 Reacción de transesterificación

La reacción de transesterificación se realizó utilizando diferentes cantidades de los 3 catalizadores sintetizados con distinto porcentaje de Ag, en un tiempo de 3 horas a 45, 50 y 60 $^{\circ}\text{C}$.

En la Figura 4.2.1 se muestra el comportamiento de la conversión en la reacción de transesterificación, empleando el catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C. Empleando 2 % de catalizador a 45 °C se obtuvo la conversión de 90%, a 50 °C la conversión fue de 80% y a 60 °C la conversión fue de 86%. Empleando 4% de catalizador, la conversión a 45 °C aumento a 93.33%, mientras que a 50 y 60 °C la conversión permaneció constante. Empleando 6% de catalizador, a 45 °C la conversión disminuyo a 90%, a 50 °C aumento a 83.33%, y a 60°C la conversión permaneció constante. Empleando 8% de catalizador, a 45 °C la conversión aumento a 96.66%, mientras que a 50 y 60 °C la conversión se mantuvo constante.

El catalizador muestra un buen desempeño empleando 10% en peso, alcanzando 100% de conversión a la temperatura de 45°C.

A 50°C y 60°C se logró la conversión de 90 y 93.33% para las temperaturas de 50 °C y 60 °C respectivamente.

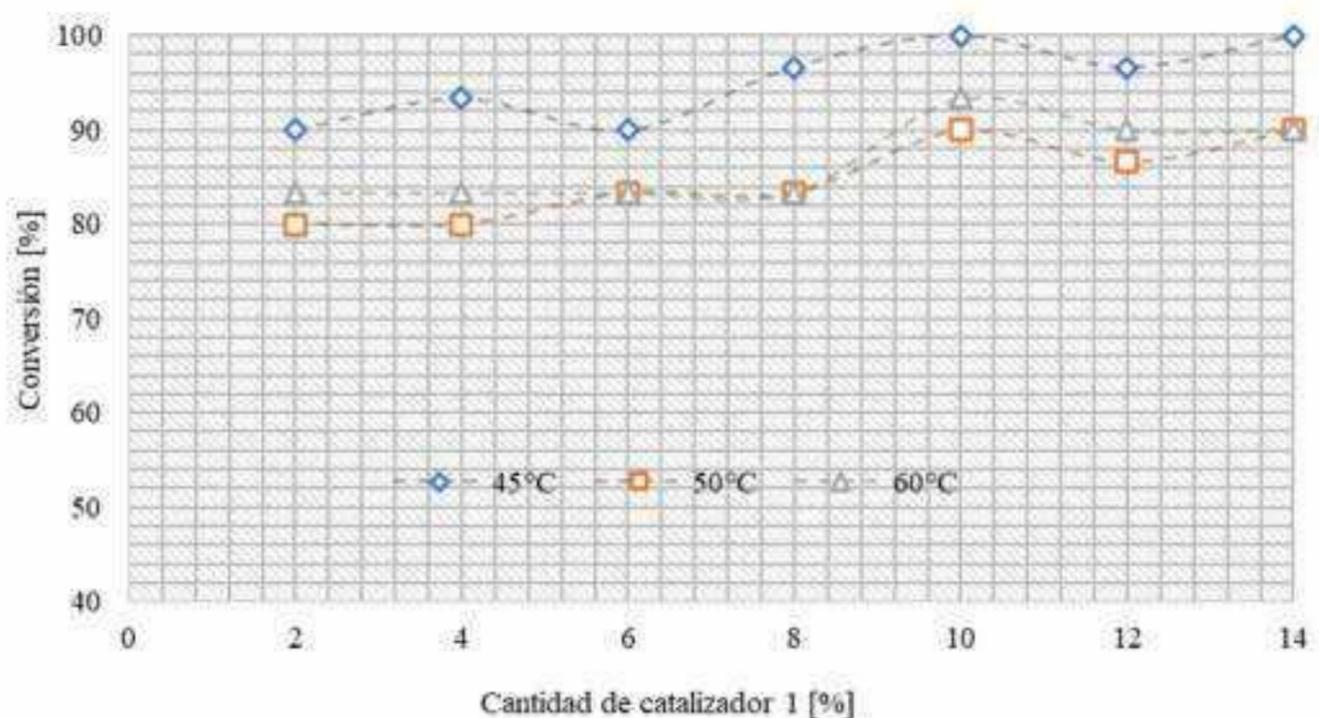


Figura 4.2.1 Comportamiento de la conversión en función de la cantidad de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C

Empleando 12% de catalizador la conversión disminuyó a las tres temperaturas de reacción, obteniendo conversiones de 96.66, 86.66 y 90% a 45, 50 y 60 °C respectivamente.

Utilizando 14% de catalizador se tuvo una conversión de 100% a 45°C, mientras que a 50 y 60 °C la conversión fue de 90%.

El biodiésel producido con el catalizador 1 presentó mejor conversión trabajando a 45 °C y se puede observar que la conversión incrementó al aumentar la cantidad de catalizador, en cambio a 50 y 60 °C las conversiones fueron menores., Bajo estas condiciones se logra la mayor conversión a la menor temperatura favoreciendo la producción de biocombustibles empleando menor consumo de energía.

En la Figura 4.2.2 se muestra el comportamiento de la conversión en la reacción de transesterificación empleando el catalizador 2.

Se observa que empleando 2% de catalizador se alcanzó la conversión de 96.66% para todas las temperaturas estudiadas.

Empleando 4% de catalizador a 45 y 50 °C se mantuvo la conversión constante y a 60 °C se alcanzó la conversión de 100%.

Empleando 6% de catalizador a 45 °C la conversión disminuyó a 93.33%, a 50 °C la conversión aumentó a 100% y a 60 °C se tuvo la conversión más baja de 90%.

Empleando 8% de catalizador se obtuvo la conversión de 93.33% para las tres temperaturas estudiadas.

Empleando 10% de catalizador a 45 °C la conversión permaneció constante, a 50 °C se alcanzó la conversión de 100% y a 60 °C la conversión fue de 83.33%.

Empleando 12% de catalizador a 45 y 50 °C hubo una disminución de la conversión a 90%, mientras que a 60 °C la conversión permanece constante.

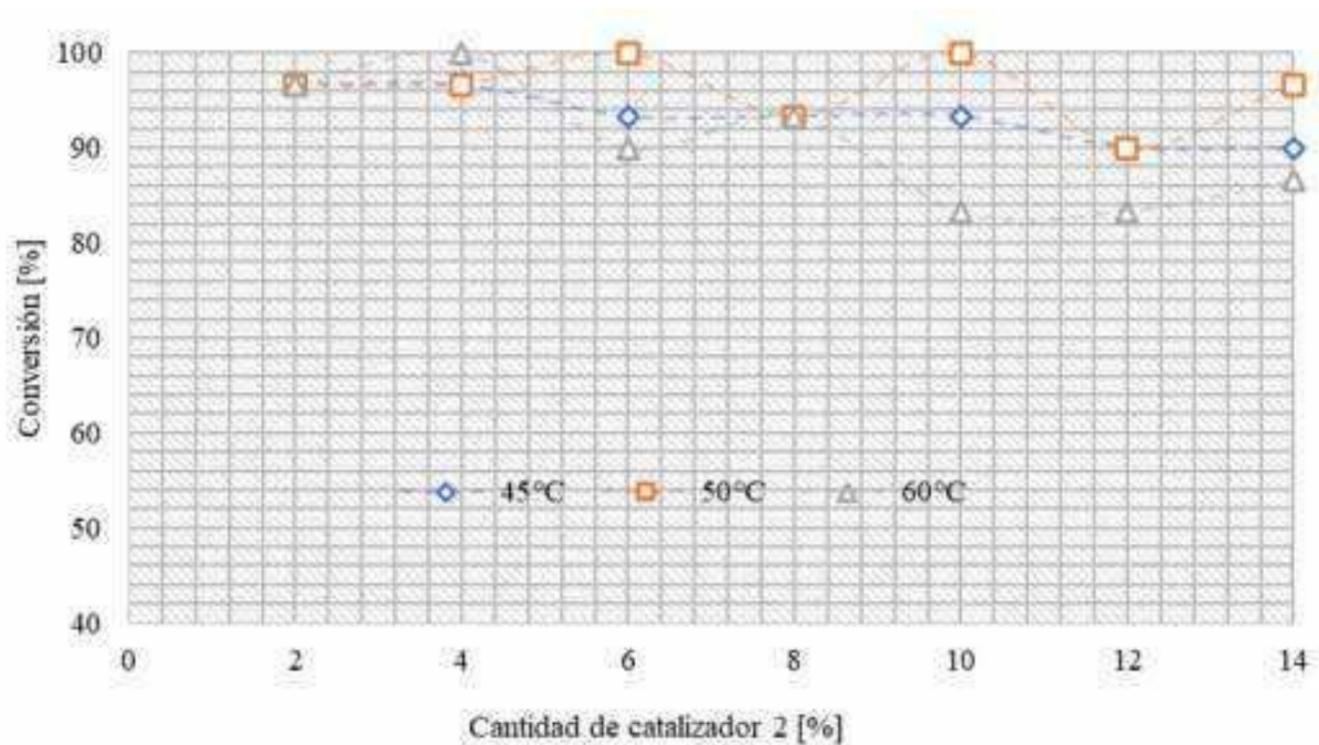


Figura 4.2.2 Comportamiento de la conversión en función de la cantidad de catalizador 2 a 45, 50 y 60 °C

Empleando 14% de catalizador a 45 °C la conversión se mantiene constante, a 50 °C aumentó la conversión a 96.66% y a 60 °C la conversión aumentó a 86.66%.

Las conversiones máximas se obtuvieron a 50 y 60 °C y aunque a 60 °C es menor el empleo de catalizador también es más la energía utilizada. Lo más favorable es ahorrar energía ya que el catalizador es recuperable y reutilizable.

En las reacciones realizadas a 45 y 60 °C se observa que con 4% de catalizador se llega a un máximo y en cantidades superiores hay un decaimiento de la conversión, este comportamiento se atribuye a que la reacción sigue una ruta de conversión de reacción alterna hacia la saponificación.

En la Figura 4.2.3 se muestra el comportamiento de la conversión en la reacción de transesterificación empleando el catalizador 3.

Empleando 2% de catalizador a 45 °C se obtuvo la conversión de 80%, a 50 °C la conversión fue de 93.33% y a 60 °C la conversión fue de 76.6%. Empleando 4% de catalizador a 45 °C la conversión se mantuvo constante, a 50 °C la conversión aumentó a 96.66% y a 60 °C la conversión aumentó a 86.66%. Utilizando 6% de catalizador a 45 y 60 °C la conversión fue de 90%, mientras que a 50 °C la conversión disminuyó a 86.66%. Con 8% de catalizador a 45 y 50 °C la conversión fue de 90% y a 60 °C la conversión aumentó a 96.66%. Empleando 10% de catalizador a 45 °C la conversión aumentó a 93.33%, a 50 y 60 °C la conversión disminuyó a 86.66%. Empleando 12% de catalizador a 45 °C la conversión disminuyó a 83.33%, a 50 °C la conversión se mantuvo constante y para 60 °C la conversión aumentó a 96.66%. Con 14% de catalizador a 45 °C la conversión aumentó a 90%, a 50 °C la conversión se mantuvo constante y a 60 °C la conversión disminuyó a 93.33%.

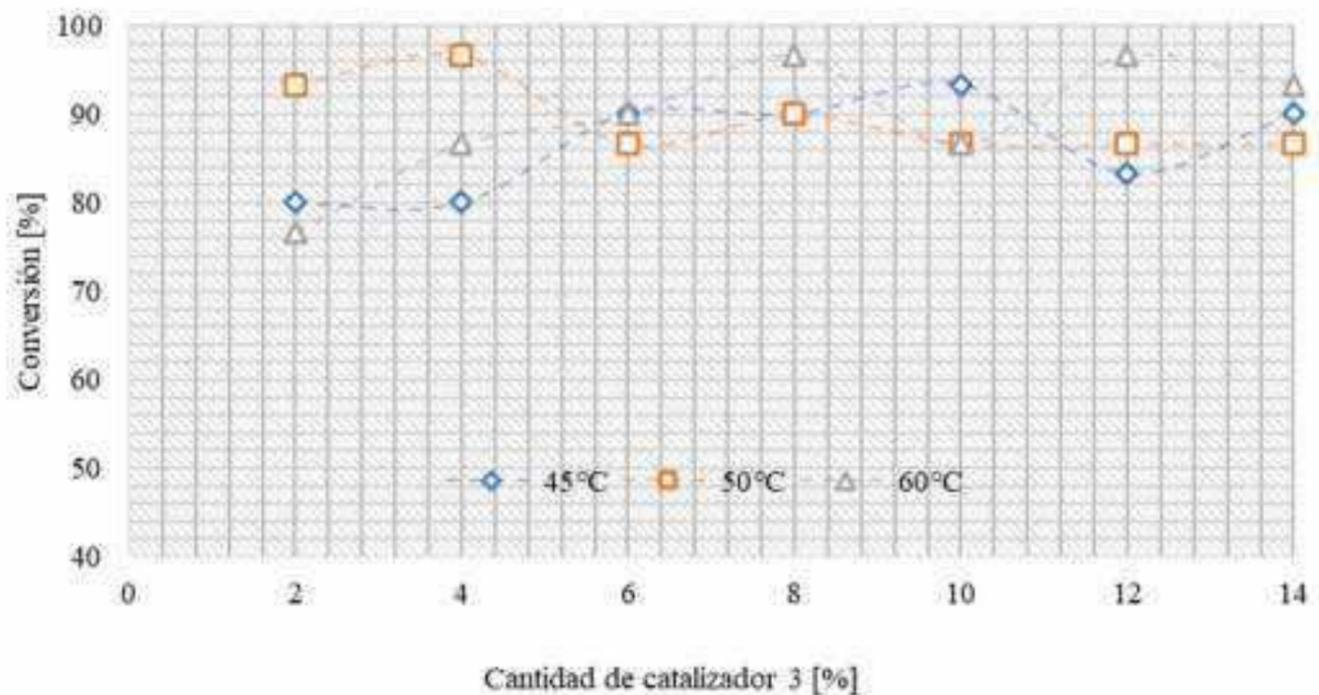


Figura 4.2.3 Comportamiento de la conversión en función de la cantidad de catalizador 3 a 45, 50 y 60 °C

A 45 °C la conversión sigue una tendencia ascendente hasta llegar a un máximo de 93.33% empleando 10% de catalizador, sin embargo, al aumentar la cantidad de catalizador la conversión disminuye a 83.33% empleando 12% de catalizador, lo que indica la existencia de una reacción alterna de saponificación. En cambio, a 50 °C empleando menor cantidad de catalizador se obtuvo

una buena conversión, esto es por el aumento de temperatura, al utilizar 6% de catalizador en adelante hubo una disminución en la conversión, notando la presencia de la saponificación.

Cinética de la reacción de transesterificación con el catalizador 1.

La cinética de reacción se realizó empleando una cantidad de catalizador de 10% en peso, para esta serie de experimentos se utilizó el catalizador 1. Los experimentos para la cinética de la reacción se realizaron a las temperaturas de 45, 50 y 60 °C y tiempos de reacción de 0.5, 1.0, 1.5 2.0, 2.5 y 3 hrs.

En la Figura 4.2.4 se muestra la conversión de la reacción a biodiésel, a 45 °C, en el intervalo de 0.5 a 1 hr se obtuvo una conversión de 83.33%, en el intervalo de 1.5 a 2 hrs se obtuvo una conversión de 86.67%, a 2.5 hrs la conversión se incrementó a 90% y finalmente en 3 horas de reacción la conversión máxima obtenida fue de 93.33%. Como se puede observar en la gráfica, el aumento de la conversión sucede cada hora de reacción, debido a la baja temperatura con la que se realizó este experimento, sin embargo, al pasar media hora de la reacción se obtuvo una buena conversión, lo que significa que el catalizador acelero la reacción adecuadamente.

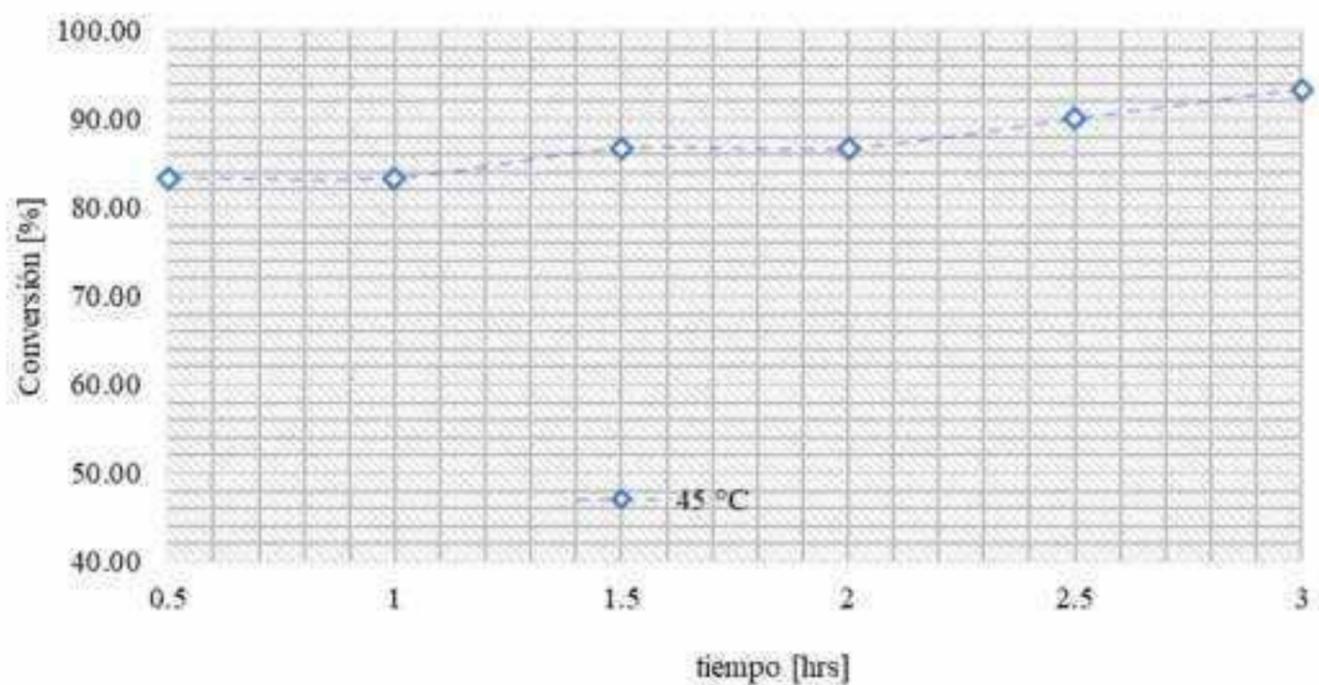


Figura 4.2.4 Conversión del biodiésel producido empleando 10% en peso de catalizador 1 a 45 °C

En la Figura 4.2.5 se muestra el comportamiento de la cinética de la reacción de transesterificación a biodiésel que se produjo empleando 10% del catalizador 1 a la temperatura de 50 °C, tiempo de reacción de 3 hrs. Se observa que conversión es de 83.33% a 0.5 hrs, tiene un incremento a 86.67% a 1 hr de reacción esta permanece constante hasta 1.5 hrs. A las 2 hrs de reacción, la conversión

aumentó a 93.33% y permanece constante hasta las 2.5 hrs de reacción. Finalmente, a las 3 hrs de reacción se alcanzó la conversión máxima de 96.67%. Al igual que en la gráfica anterior el cambio en la conversión se observa cada hora, pero en este caso al trabajar con una temperatura más alta que la anterior, los cambios en la conversión son más altos, al término de 2 horas se obtuvo la misma conversión a 50 °C que a 3 horas de reacción a 45 °C.

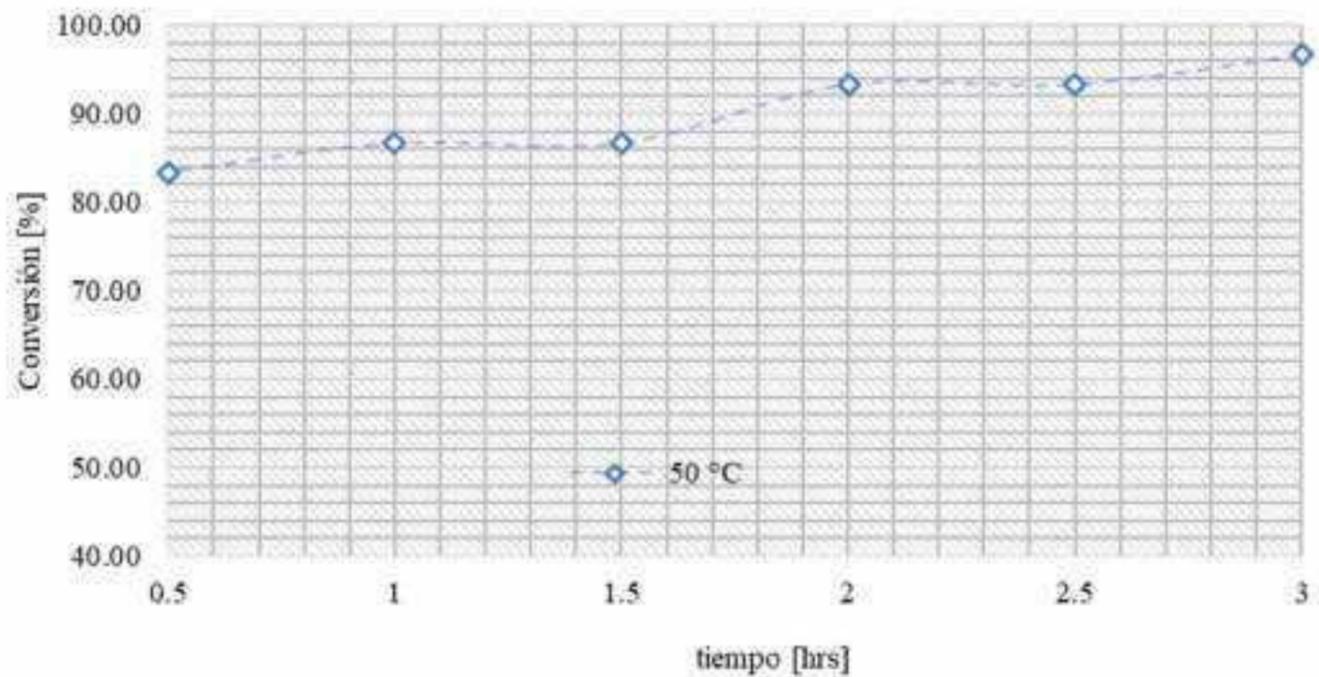


Figura 4.2.5 Conversión del biodiésel producido empleando 10% en peso de catalizador 1 a 50 °C

En la Figura 4.2.6 se muestra la evolución de la conversión a biodiésel en la cinética de reacción, empleando 10% del catalizador 1 a 60 °C, en un tiempo de reacción de 3 hrs. Se obtuvo una conversión constante de 90% en el intervalo de 0.5 y 1 hrs, en el intervalo de 1.5 a 2 hrs la conversión aumentó a 93.33%. En el intervalo de 2.5 a 3 hrs la reacción obtuvo una conversión máxima de 96.67% a biodiésel.

En este experimento, al igual que los anteriores, el cambio de la conversión se observa cada hora, sin embargo, al transcurrir media hora de reacción se obtuvo una buena conversión. En comparación con el experimento realizado a 45 °C, en el cual su mejor conversión se alcanzó en 3 horas de reacción y ente caso se obtuvo el mismo resultado, pero en una hora y media. A pesar de que se alcanza la misma conversión en la mitad del tiempo, es necesario aumentar la temperatura y esto indica usar más energía.

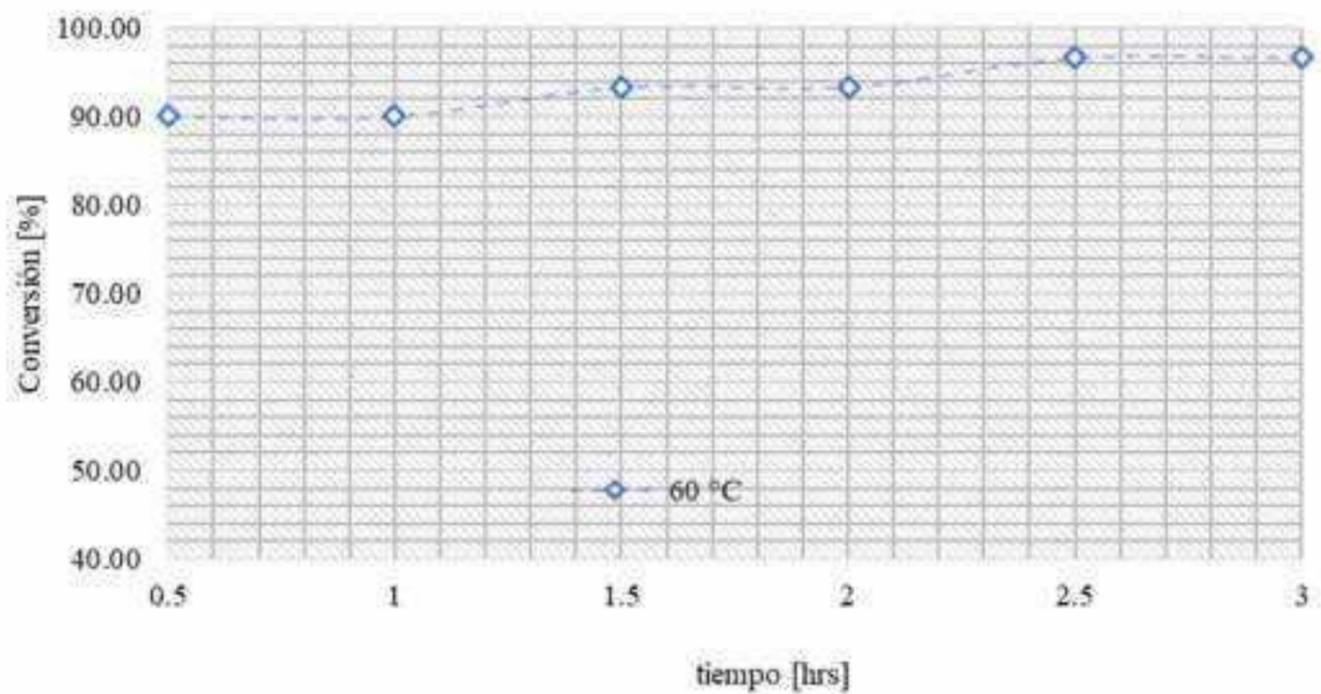


Figura 4.2.6 Conversión del biodiésel producido empleando 10% en peso de catalizador 1 a 60 °C

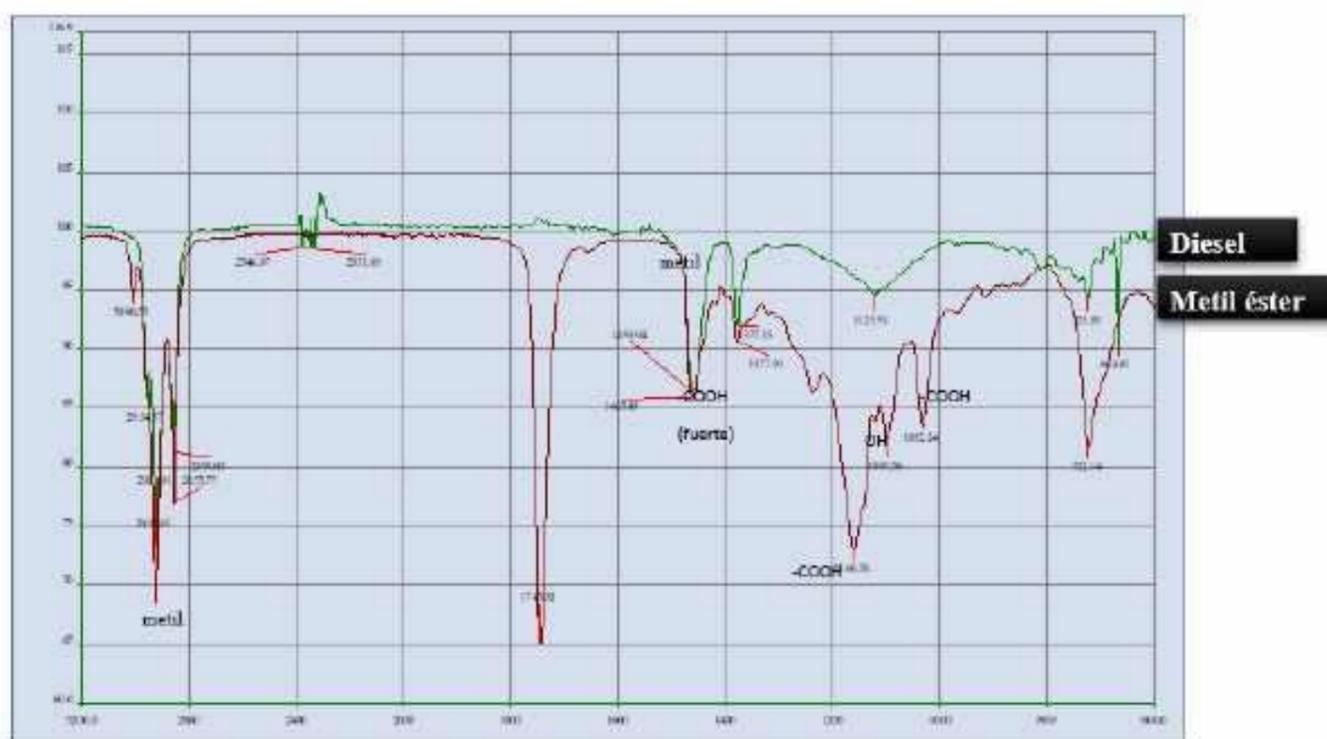


Figura 4.2.7 Comparación del IR del metil éster con el diésel comercial

En la Figura 4.2.7 se observa que las bandas características del metil se encuentran entre 2700 y 3200. De 1800 a 1600 se observa una banda correspondiente a un ácido graso fuerte. En la región de 1200 a 1000 se observan bandas características de dos ácidos grasos que se encuentran en 1160.38 y 1030.24 y un alcohol que se encuentra en 1097.56. La información sobre los grupos funcionales

se obtuvo de la librería del equipo. También se observan otras bandas características que el diésel no presenta, estas corresponden a los ácidos grasos que no reaccionaron. Los espectros son consistentes para el biodiésel y sus mezclas, así como para el diésel comercial mostrando las bandas características. La diferencia entre el diésel y sus mezclas biodiésel-diésel son los grupos funcionales $-C=O$ del grupo carbonilo. También se observa que a mayor cantidad de biodiésel en la mezcla biodiésel-diésel se intensifican más los picos de $C=O$, $C-O$ Y $C-C$.

En la Tabla 4.2.2 se muestran las señales características del biodiésel y los grupos funcionales. Las bandas anchas se encuentran entre 1970 y 2860 cm^{-1} , la banda intensa se encuentra en 1700 cm^{-1} , bandas entre 1180 y $1,350\text{ cm}^{-1}$ y entre 710 y 730 cm^{-1} a excepción de las vibraciones de tensión $C-O$ en 1050 cm^{-1} corresponde al grupo funcional alquil éster (metil éster $CH_3-O-(CO)-$).

Tabla 4.2.2 Bandas características en el espectro de IR del biodiésel

Número de onda ν (cm^{-1})	Tipo de vibración	Grupo funcional
2970-2860	Tensión C-H	Metilo ($-CH_3$)
1750-1715	Estiramiento $C=O$	Carbonilo ($C=O$)
1365-1470	Flexión C-H	Metilo ($-CH_3$)
1350-1180	Vibraciones C-O	Ester
1050	Estiramiento C-O	Metil éster ($CH_3-(CO)-O$)
730-710	Vibración C-C	Cadena de metilenos ($-(CH_2)_n-$)

4.3 Caracterización del biodiésel

El biodiésel obtenido de la reacción de transesterificación se caracterizó mediante los siguientes parámetros:

- Índice de refracción
- Densidad
- Viscosidad
- Índice de saponificación
- Índice de yodo
- Índice de acidez
- Punto de nube

Índice de refracción

La literatura establece un índice de refracción promedio del biodiésel de 1.4541, los índices de refracción del biodiésel producido se encuentran en un intervalo de 1.4545 -1.4565, que representa 3% de desviación máxima de acuerdo con lo establecido en la literatura. Lo anterior indica que los valores obtenidos se encuentran dentro de los valores promedio establecidos, para el biodiésel producido con los tres catalizadores.

En la Figura 4.3.1 se muestra el índice de refracción del biodiésel producido en la reacción de transesterificación, empleando el catalizador 1, se observa que a 45 °C en el intervalo de conversión de 90 a 100% hay un índice de refracción de 1.4555 que disminuye hasta 1.4547 conforme aumenta la conversión a biodiésel.

A 50 °C en el intervalo de 80 a 90% de conversión, se tiene el índice de refracción mínimo de 1.4545 y el máximo de 1.4565. A 60 °C, en el intervalo de 83.33 a 93.33% de conversión se obtuvo un índice de refracción en el rango de 1.4549 a 1.4563. El biodiésel que alcanzó la conversión más baja obtuvo valores de índice de refracción más elevados y por lo tanto más alejados del que establece la literatura, debido a que el biodiésel tiene una conversión baja no se considera de buena calidad. Conforme la conversión aumenta, el índice de refracción se acerca al establecido en la literatura.

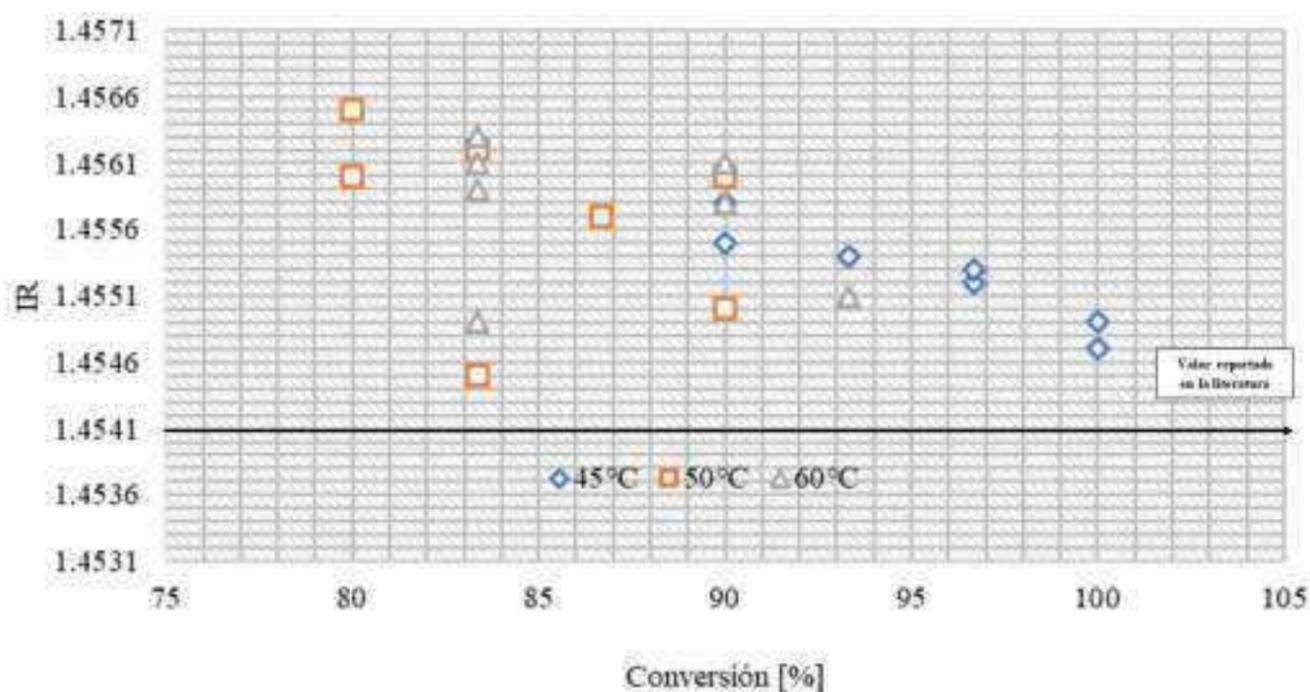


Figura 4.3.1 Índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C

En la Figura 4.3.2 se muestra el índice de refracción del biodiésel producido en la reacción de transesterificación empleando el catalizador 2, se muestra que a 45 °C en el intervalo de la conversión de 90 a 96.66% hay un índice de refracción mínimo de 1.4550 y el máximo de 1.4561.

A 50 °C en el intervalo de la conversión de 90 a 100% el índice de refracción mínimo fue de 1.4557 a la conversión de 96.66% y el máximo fue de 1.4566 a la conversión de 90%.

A 60 °C en el intervalo de la conversión de 83.33 a 100% el índice de refracción mínimo fue de 1.4555 a la conversión de 83.33% y el máximo fue de 1.4566 a la conversión de 100%.

A diferencia del experimento anterior, en este caso se observa que entre más aumenta la conversión, el índice de refracción se aleja del esperado, lo cual es raro ya que al tener mejor conversión se esperaría que los parámetros sean similares a los establecidos. El índice de refracción más cercano al que establece la literatura se obtuvo a 45 °C con una conversión de 90%, lo cual indica que, bajo estas condiciones, se obtuvo un biodiésel de buena calidad.

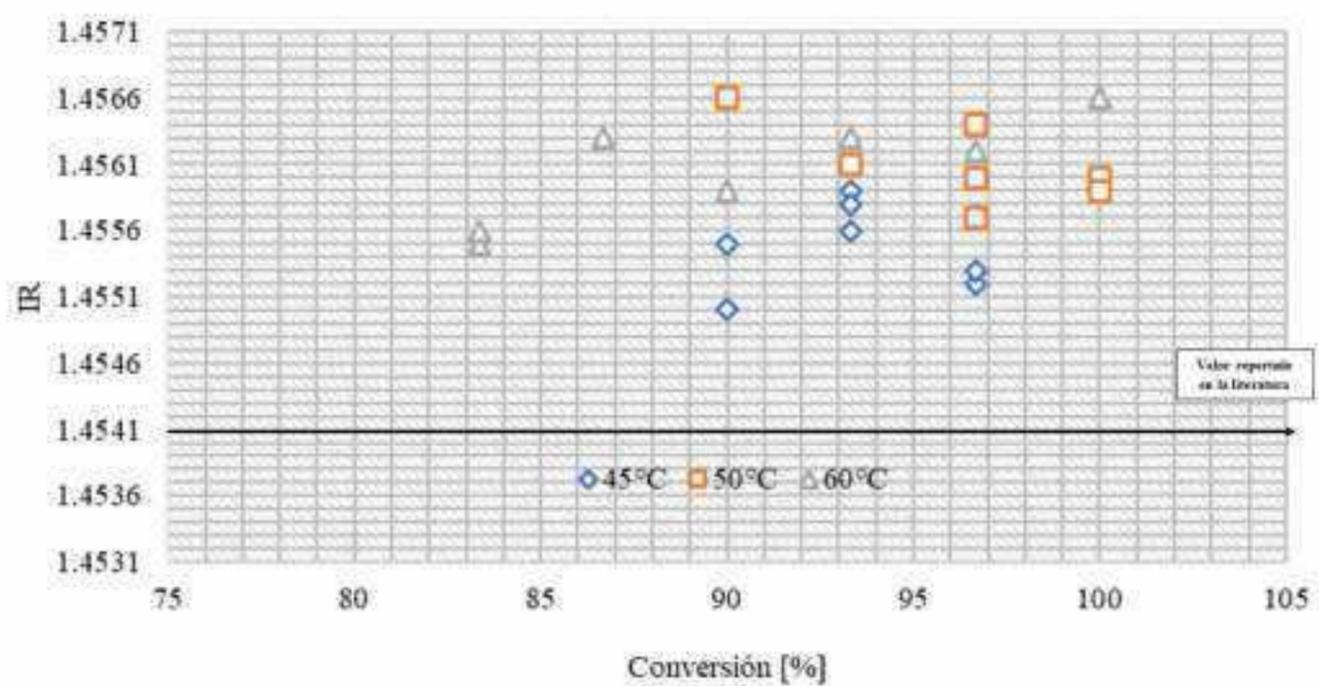


Figura 4.3.2 Índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 2 a 45, 50 y 60 °C

En la Figura 4.3.3 se muestra el índice de refracción del biodiésel producido en la reacción de transesterificación, empleando el catalizador 3, se observa que a 45 °C en el intervalo de la conversión a biodiésel de 80 a 93.33% el índice de refracción mínimo es de 1.4546 a la conversión de 80% y el índice de refracción máximo es de 1.4559 a la misma conversión a biodiésel.

A 50 °C en el intervalo de la conversión a biodiésel de 86.66 a 96.66% el índice de refracción mínimo es de 1.4556 a la conversión de 86.66% y el índice de refracción máximo es de 1.4565.

A 60 °C en el intervalo de la conversión de biodiésel de 76.66 a 96.66% el índice de refracción mínimo es de 1.4559 a una conversión de 96.66% y el índice de refracción máximo es de 1.4567 a la conversión a biodiésel de 90%.

El índice de refracción más cercano al que establece la literatura se obtuvo a 45 °C con una conversión de 80%, en este caso los valores están muy por arriba de los esperados ya que el biodiésel producido con el catalizador no se considera de buena calidad debido a que el catalizador no acelero

la reacción correctamente. Sin embargo, el biodiésel con los mejores índices de refracción fue el producido a 45 °C.

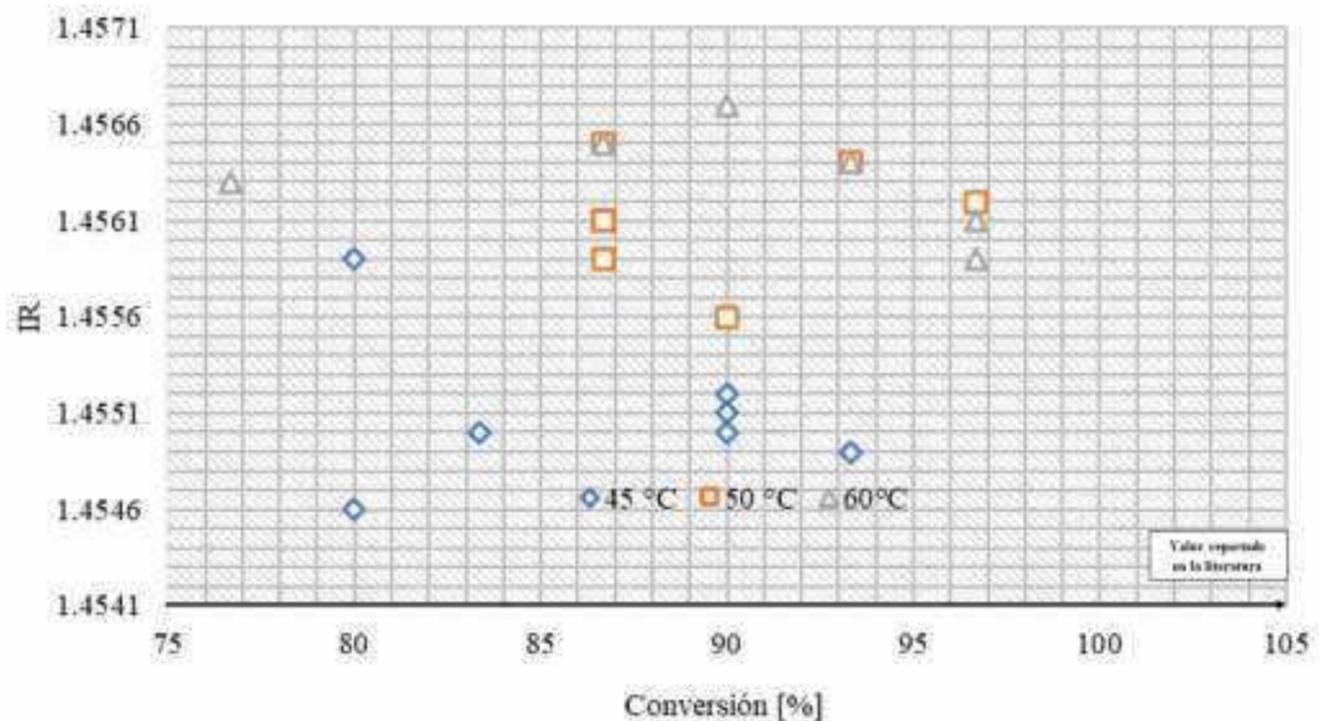


Figura 4.3.3 Índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 3 a 45, 50 y 60 °C

Índice de refracción del biodiésel producido en la cinética de reacción

En la Figura 4.3.4 se muestra el índice de refracción del biodiésel producido en la cinética de reacción a 45, 50 y 60 °C, en el intervalo de tiempo de 0.5 a 3 hrs, empleando la cantidad de 10% en peso del catalizador 1. Se observa que a 45 °C en el intervalo de conversión a biodiésel de 83.33 a 93.33% se tiene el índice de refracción mínimo de 1.4558 a la conversión de 93.33% y el índice de refracción máximo de 1.4565 a la conversión de 96.66%.

A 50 °C en el intervalo de conversión de biodiésel de 83.33 a 96.66% se tiene el índice de refracción mínimo de 1.4553 a la conversión de 96.66% y el índice de refracción máximo fue de 1.4567 a la conversión de 83.33%, en este caso se observa que, a menor conversión de biodiésel, el índice de refracción es mayor.

A 60 °C en el intervalo de la conversión a biodiésel de 90 a 96.66% se obtuvo el índice de refracción mínimo de 1.4558 a la conversión de 93.33% y el índice de refracción máximo fue de 1.4565 a la conversión a biodiésel de 96.66%.

El índice de refracción más cercano al establecido en la literatura se obtuvo a 50 °C con una conversión de 96.6%, entre menor es la conversión, el índice de refracción se aleja del esperado, esto porque a menor conversión, el biodiésel producido no es de buena calidad.

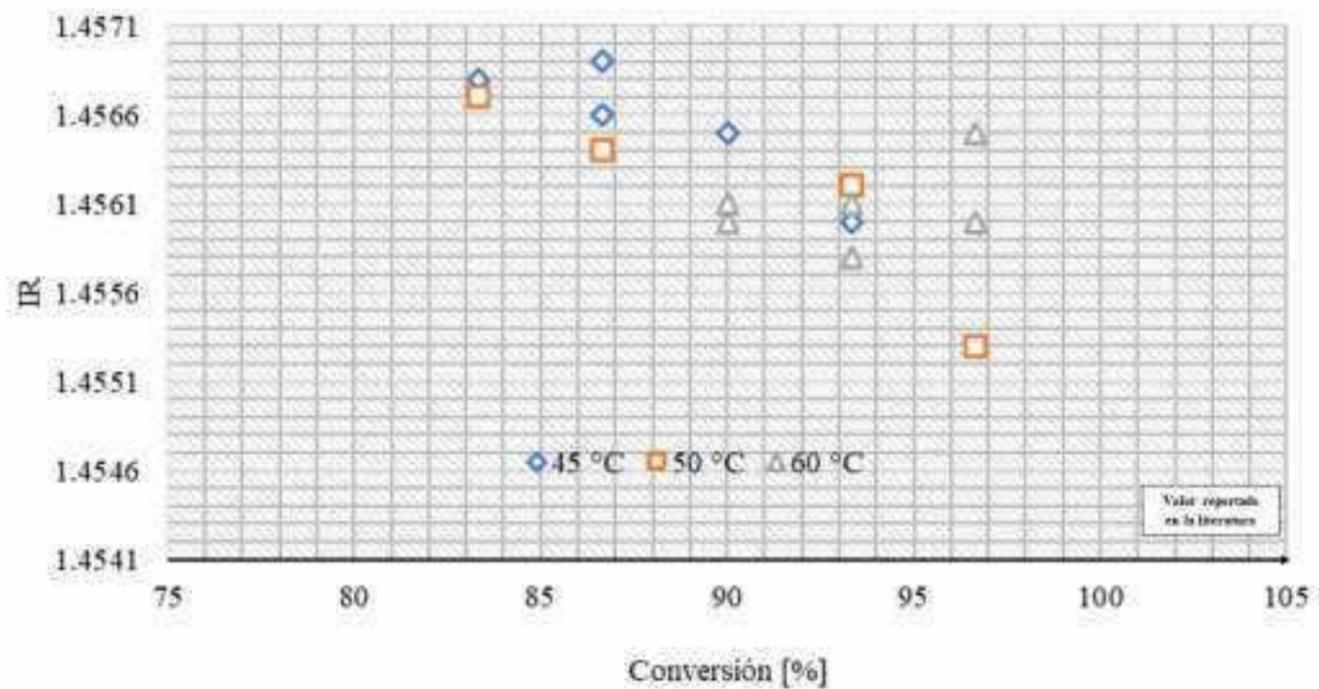


Figura 4.3.4 Índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 1 en la cinética de reacción

Densidad

Las densidades se midieron a 25 y 40 °C, medidas a 25 °C se obtuvieron valores mayores que a 40 °C, esto se debe a que cuanto mayor sea la temperatura, mayor será el volumen y por lo tanto la densidad será menor.

En la Figura 4.3.5 se observa la variación de la densidad del biodiésel producido a 45 °C empleando diferentes cantidades del catalizador 1.

El propósito de esta gráfica es visualizar si existe una influencia en la densidad del biodiésel por efecto de la cantidad de catalizador. Como se puede observar, la cantidad de catalizador no influye en la densidad del biodiésel, ya que su comportamiento es prácticamente lineal, excepto empleando 8% de catalizador en donde se obtuvo la densidad más baja medida a 40 °C que fue de 0.805.

La densidad del biodiésel medida a 25 °C se encuentra en el rango de 0.8205 a 0.8388 gr/ml y medida a 40 °C se encuentra en el rango 0.805 a 0.8227 gr/ml, en comparación con los valores de densidad del biodiésel establecidos en la literatura se tiene una desviación máxima de 10%.

En cuanto menor es el valor de la densidad del biodiésel la longitud de la cadena es mayor.

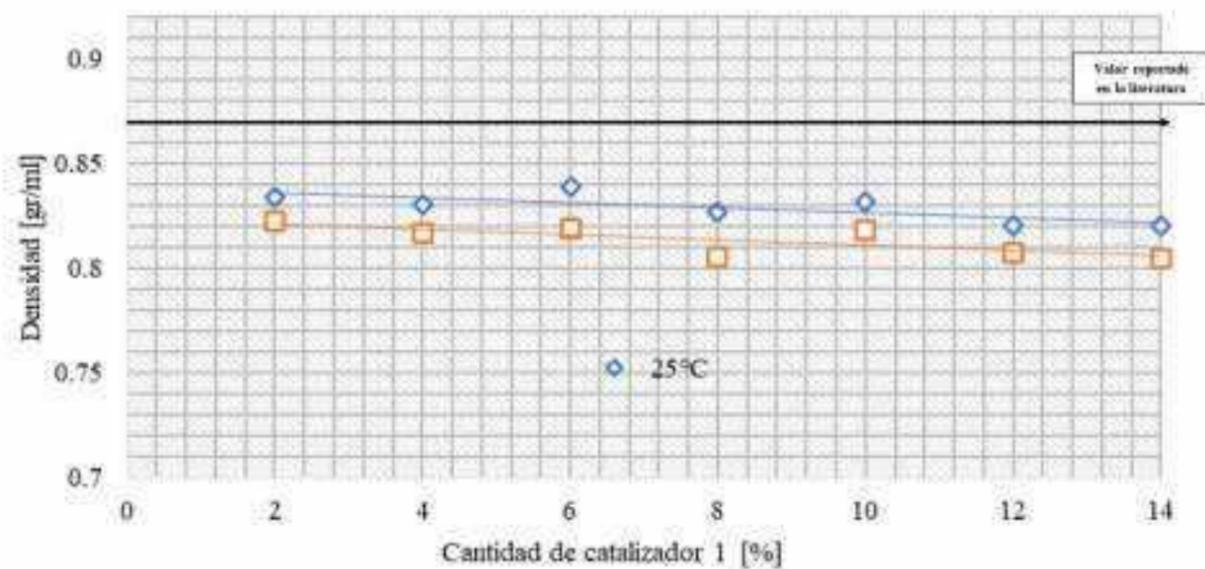


Figura 4.3.5 Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C

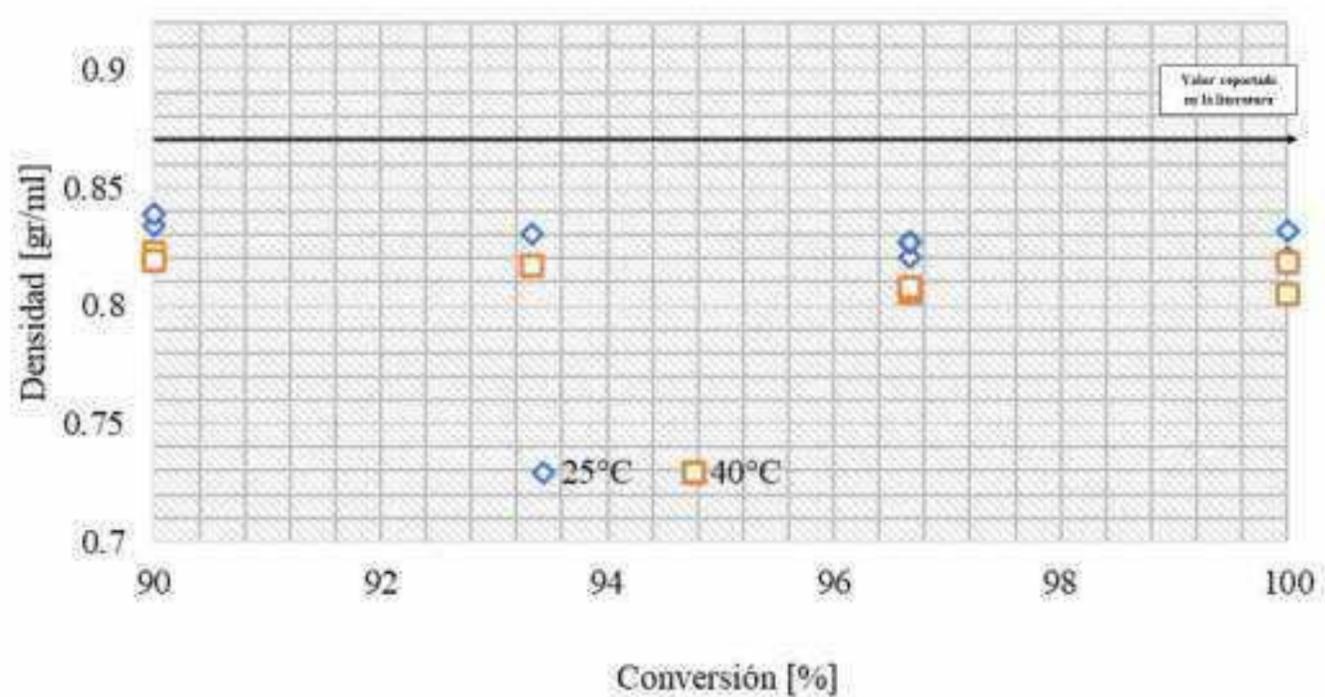


Figura 4.3.5a Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.5a se observa la variación de la densidad del biodiésel producido a 45 °C, empleando el catalizador 1, en función de la conversión.

Se observa que el valor más bajo de la densidad medida a 25 °C fue de 0.8133 gr/ml con una conversión de 100% y el valor de densidad más alto fue de 0.8338 gr/ml a la conversión de 92%. El

valor más bajo de la densidad medida a 40 °C fue de 0.805 gr/ml a la conversión de 100% y el valor más alto fue de 0.8227 gr/ml a la conversión de 90%.

Por lo tanto, se puede decir que, a mayor conversión a biodiésel, la densidad es más baja.

Las densidades se encuentran en el rango de 0.8 a 0.84, están cercanos al valor esperado, a 90% de conversión se obtuvo el valor de densidad más cercano al que establece la literatura, por lo tanto, podemos decir que bajo esas condiciones se obtuvo un biodiésel de buena calidad.

En la Figura 4.3.6 se observa la variación de la densidad del biodiésel producido a 50 °C empleando diferentes cantidades de catalizador 1.

Bajo estas condiciones se observó que, existe influencia de la cantidad de catalizador, ya que como se puede observar con 2 y 4% de catalizador la densidad se mantiene constante a las dos temperaturas de medición, de 0.83 gr/ml a 25 °C y 0.82 gr/ml a 40 °C. El valor de densidad más cercano al que establece la literatura a 25 °C es de 0.846 gr/ml, empleando 6% de catalizador, mientras que el más alejado es de 0.81 gr/ml empleando 12 % de catalizador.

El valor de densidad más cercano al que reporta la literatura medida a 40 °C es de 0.8277 gr/ml empleando 6% de catalizador, mientras que el más alejado es de 0.8072 gr/ml empleando 12% de catalizador.

La densidad promedio de las muestras medidas a 25 y 40 °C fue de 0.83 y 0.82 gr/ml respectivamente, teniéndose una desviación de 8.79% a 25 °C y 8.88% a 40 °C en comparación con los valores de densidad del biodiésel que se reportan en la literatura.

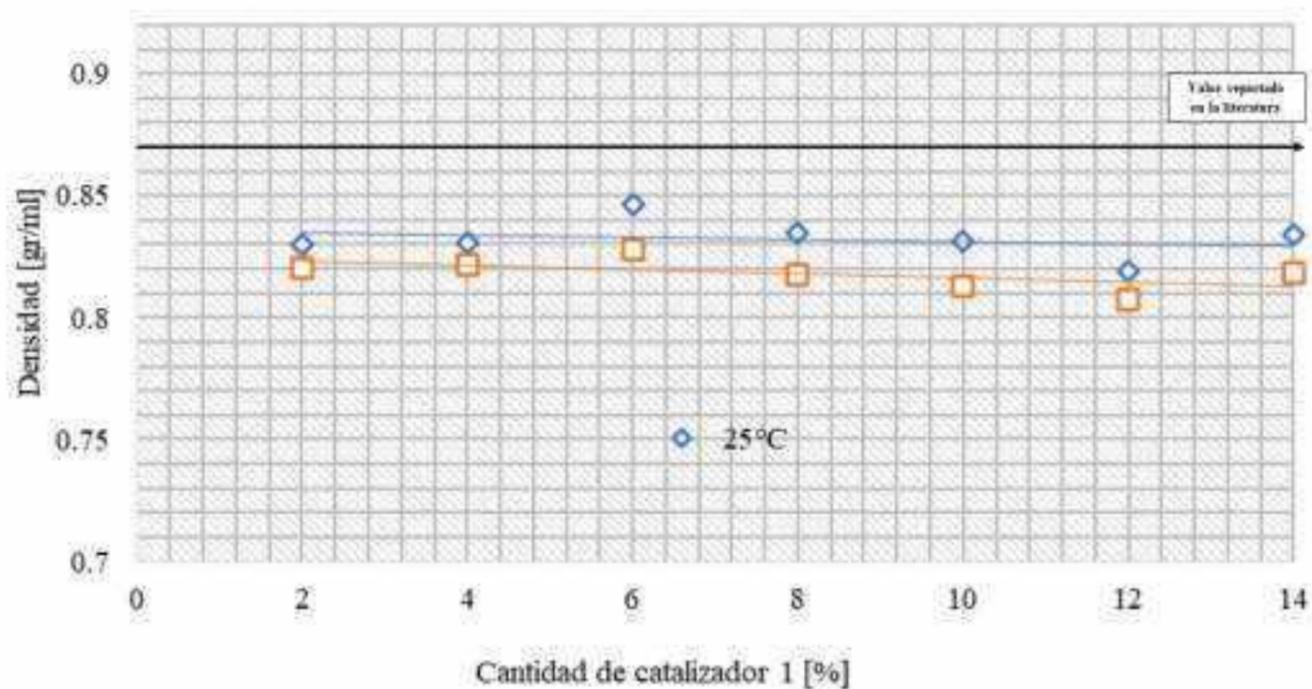


Figura 4.3.6 Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.6a se observa la variación de la densidad del biodiésel producido a 50 °C, empleando el catalizador 1, en función de la conversión.

Se observa que el valor más bajo de la densidad medida a 25 °C fue de 0.812 gr/ml a la conversión de 90% y el valor de densidad más alto fue de 0.846 gr/ml a la conversión de 83.33%.

A la medición de 40 °C la densidad más baja fue de 0.80 gr/ml a la conversión de 86.66% y la densidad más alta fue de 0.827 gr/ml a la conversión de 83.33%.

Las densidades se encuentran dentro del margen de la densidad de referencia, esto significa que el biodiésel producido cuenta con características similares a las esperadas. Teniendo la mejor densidad con 83.33% de conversión, lo que indica que a esta conversión se obtuvo un biodiésel que cuenta con una de las principales características para poder ser utilizado en un motor diésel.

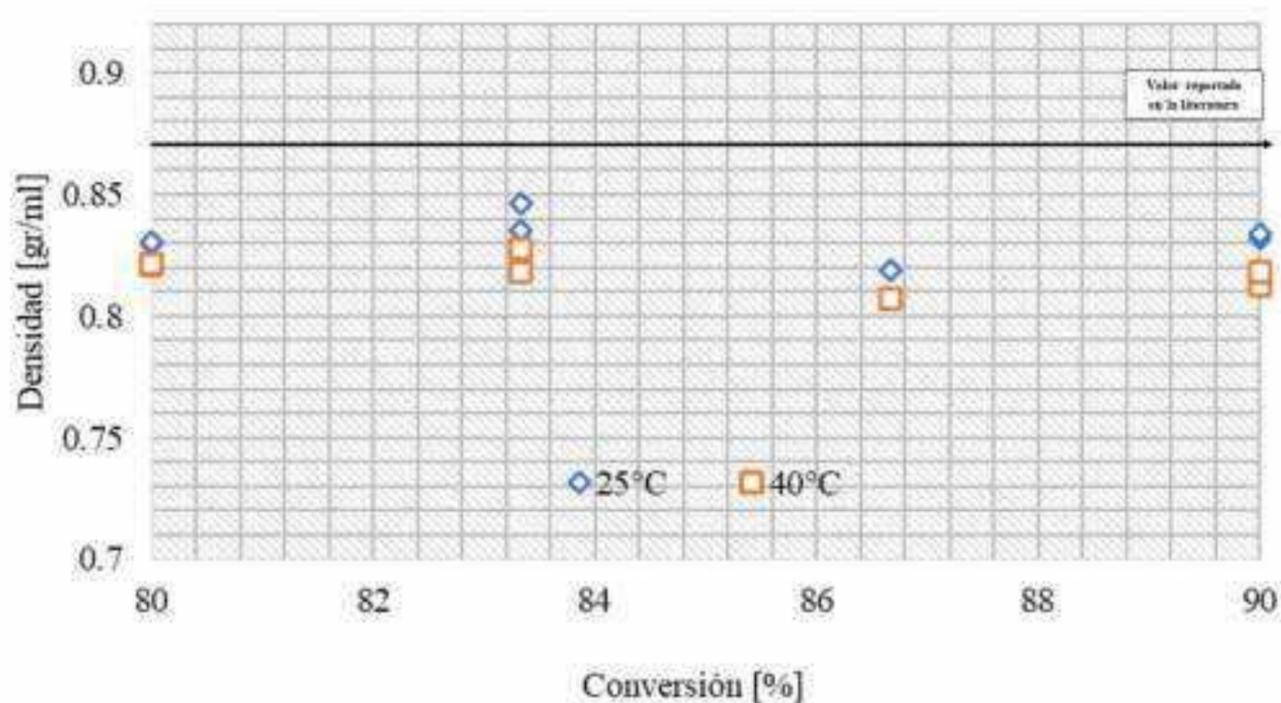


Figura 4.3.6a Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.7 se observa la variación de la densidad del biodiésel producido a 60 °C empleando diferentes cantidades de catalizador 1.

Se observa que el comportamiento de la densidad medida a 25 °C es lineal excepto empleando 6% de catalizador que es donde se obtiene el valor de la densidad más baja y por lo tanto más alejada del valor que se reporta en la literatura y el mejor valor de la densidad fue de 0.8366 gr/ml empleando 12% de catalizador. Se puede decir que la cantidad de catalizador no influye en la densidad del biodiésel bajo estas condiciones.

Para las temperaturas de medición de 25 y 40 °C, la densidad promedio del biodiésel fue de 0.83 gr/ml a 25 °C y 0.81 gr/ml a 40 °C, teniendo una desviación de 8.79% y 10% respectivamente, en comparación con los valores de densidad del biodiésel reportados en la literatura.

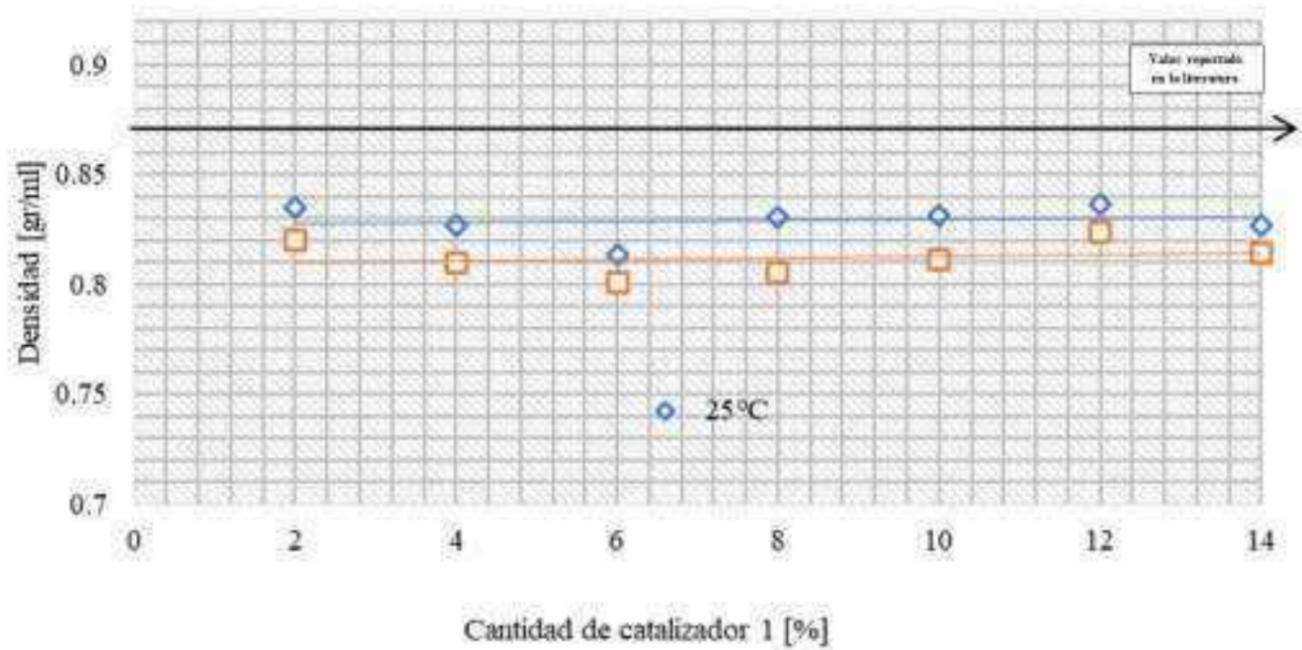


Figura 4.3.7 Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 60°C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.7a se muestra el comportamiento de la densidad del biodiésel producido a 60 °C, empleando el catalizador 1, en función de la conversión.

Se observa que el valor más bajo de la densidad medida a 25 °C fue de 0.81 gr/ml con una conversión de 83.33% y el valor de densidad más alto fue de 0.8366 gr/ml a la conversión de 90%.

A la temperatura de medición de 40 °C la densidad más baja fue de 0.80 gr/ml a la conversión de 83.33% y la densidad más alta fue de 0.8238 gr/ml a la conversión de 90%. Por lo tanto, se puede decir que, bajo estas condiciones, a mayor conversión a biodiésel, la densidad es mayor.

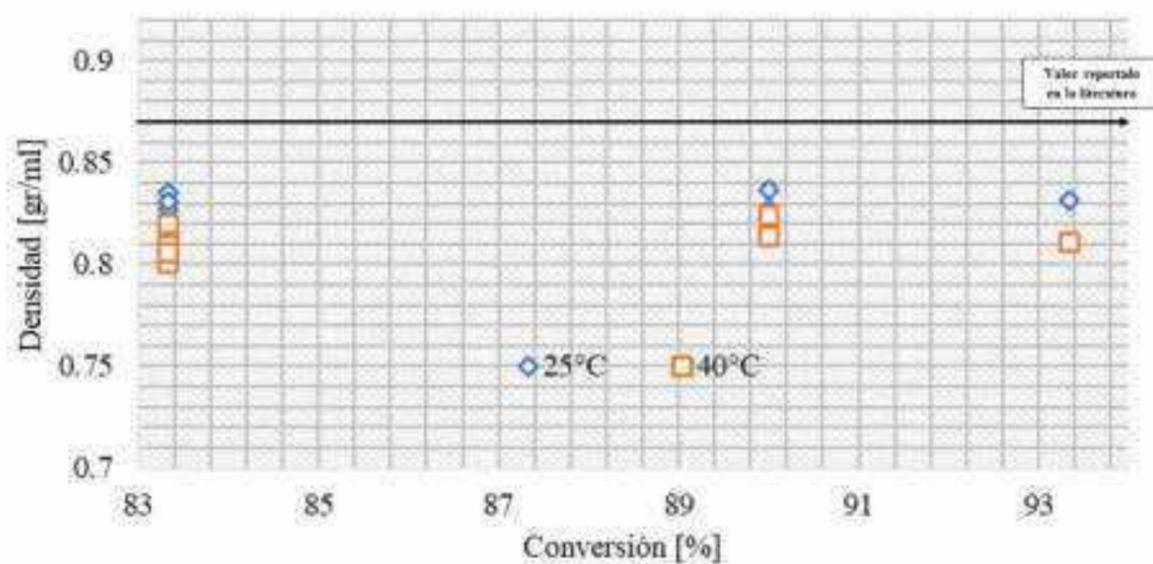


Figura 4.3.7a Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 60°C, medido a 25 y 40 °C

El biodiésel debe cumplir con ciertos parámetros establecidos según ASTM D6751, el valor de la densidad debe encontrarse entre 0.86 gr/ml-0.9 gr/ml, ya que la densidad del biodiésel producido con el catalizador 1 a las distintas temperaturas estudiadas se encontró entre 0.8-0.85 gr/ml, lo cual muestra una desviación de 0.03%, estando muy cerca de los estándares, de esta manera el cumplimiento de estos parámetros influyen en la eficiencia de inyección del combustible en los motores y a mayor densidad, mayor será la cantidad de combustible inyectado.

En la Figura 4.3.8 se muestra el comportamiento de la densidad del biodiésel producido con diferentes cantidades de catalizador 2, a 45 °C.

Bajo estas condiciones se encontró que, si hay influencia de la cantidad de catalizador a 25 °C, ya que el valor de la densidad se mantiene casi lineal excepto empleando 8 y 10 % de catalizador que hubo un aumento de 0.01 gr/ml de la densidad.

A la medición de 40 °C si hubo influencia en la cantidad de catalizador ya que empleando 8 y 10% de catalizador la densidad aumentó 0.026 gr/ml.

Para las temperaturas de medición de 25 y 40 °C, la densidad promedio de las muestras fue 0.82 gr/ml y 0.81 gr/ml, respectivamente, teniendo una desviación de 9.89% a 25 °C y 10% a 40 °C, en comparación con los valores de densidad del biodiésel reportados en la literatura.

Se observa que, a las dos temperaturas de medición, la densidad disminuyó al aumentar la cantidad de catalizador, excepto empleando 8 y 10%, que se obtuvieron densidades más cercanas a la esperada. Significa que el biodiésel producido con esa cantidad de catalizador cumple mejor con los estándares esperados.

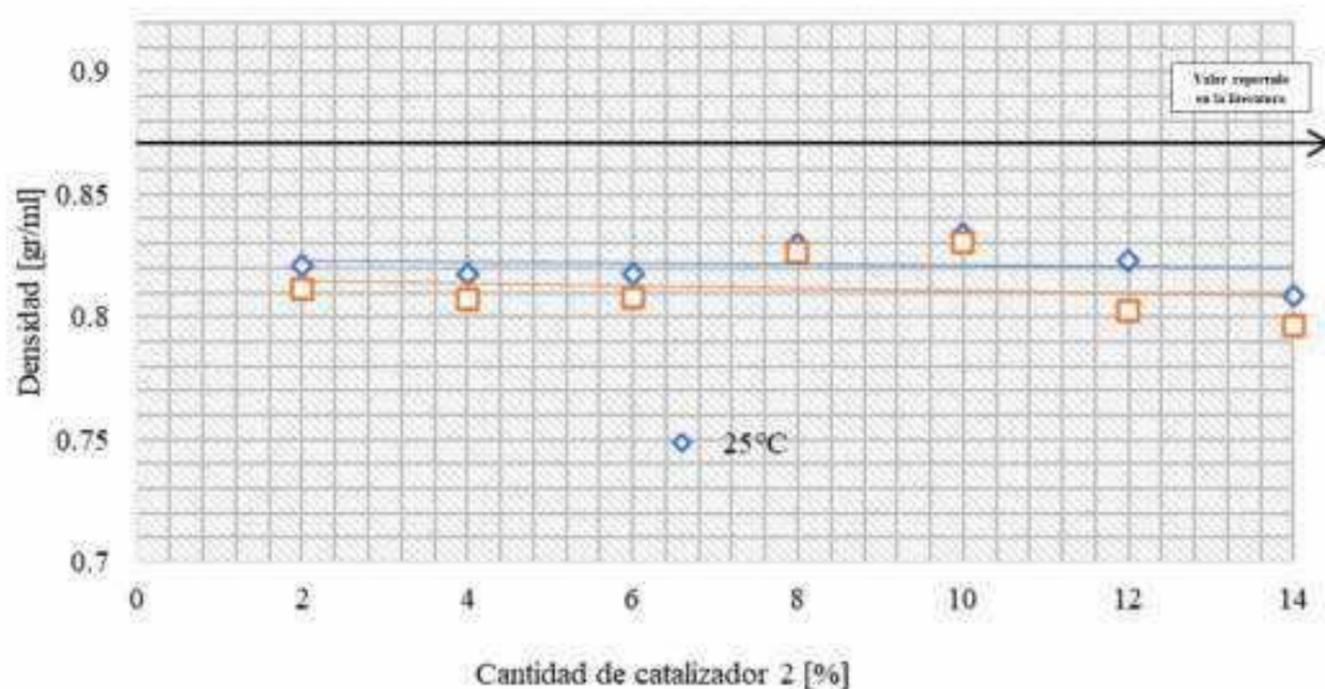


Figura 4.3.8 Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 45°C, medido a 25 y 40 °C

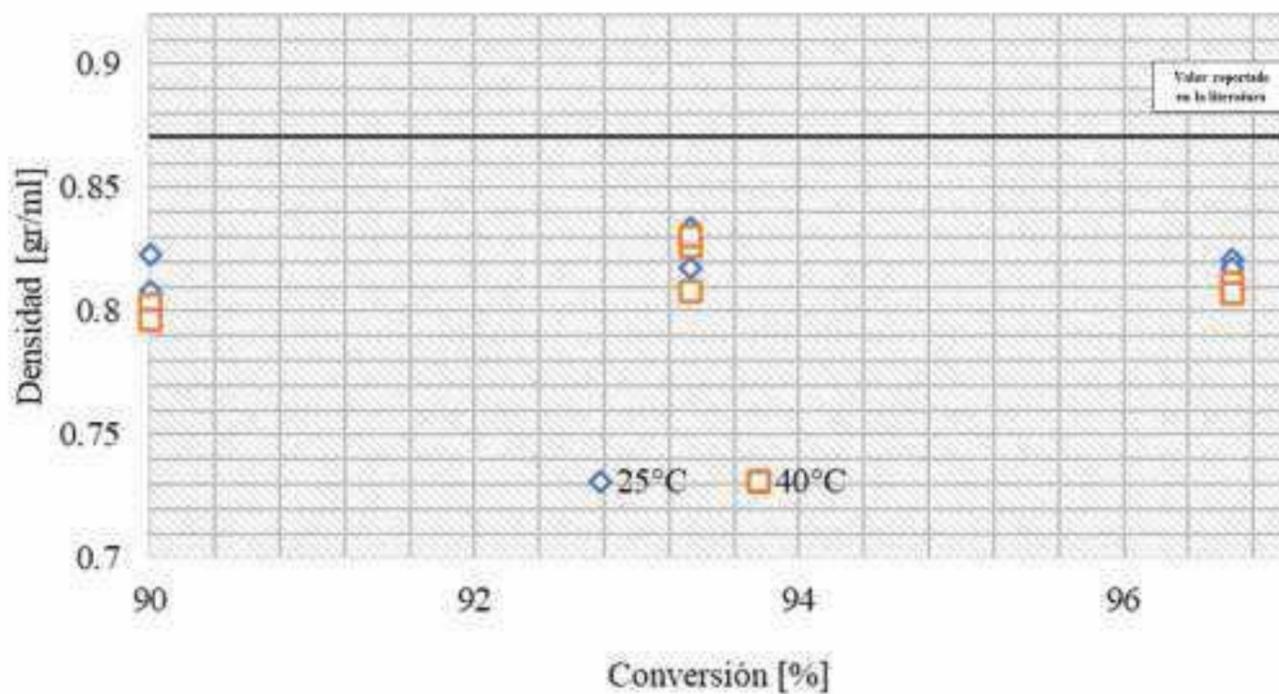


Figura 4.3.8a Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.8a se muestra el comportamiento de la densidad del biodiésel producido a 45 °C, empleando el catalizador 2, en función de la conversión.

Se observa que el valor más bajo de la densidad medida a 25 °C fue de 0.80 gr/ml con una conversión de 90% y el valor de densidad más alto fue de 0.83 gr/ml a la conversión de 93.33%. El valor más bajo de densidad medida a 40 °C fue de 0.79 gr/ml a la conversión de 90% y la densidad más alta fue de 0.83 gr/ml a la conversión de 93.33%.

Las densidades obtenidas con 93.33% de conversión se acercaron más al valor esperado, lo cual indica que con esta conversión se obtuvo biodiésel de buena calidad ya que su valor se encuentra cercano al del diésel convencional y es una de las propiedades más importantes ya que afecta directamente el rendimiento del motor.

En la Figura 4.3.9 se muestra el comportamiento de la densidad del biodiésel producido empleando el catalizador 2, a la temperatura de 50 °C, las muestras de biodiésel se obtuvieron utilizando diferentes cantidades de catalizador.

En esta gráfica se puede observar que la cantidad de catalizador no influye en la densidad del biodiésel excepto empleando 2% de catalizador se obtiene los valores de densidad más bajos de 0.80 gr/ml medida a 25 °C y 0.79 gr/ml medida a 40 °C, mientras que empleando 4% de catalizador se obtuvieron los mejores valores de densidad a las dos temperaturas de medición, 0.83 gr/ml a 25 °C y 0.82 gr/ml a 40 °C, siendo estos los resultados más cercanos a los valores reportados en la literatura.

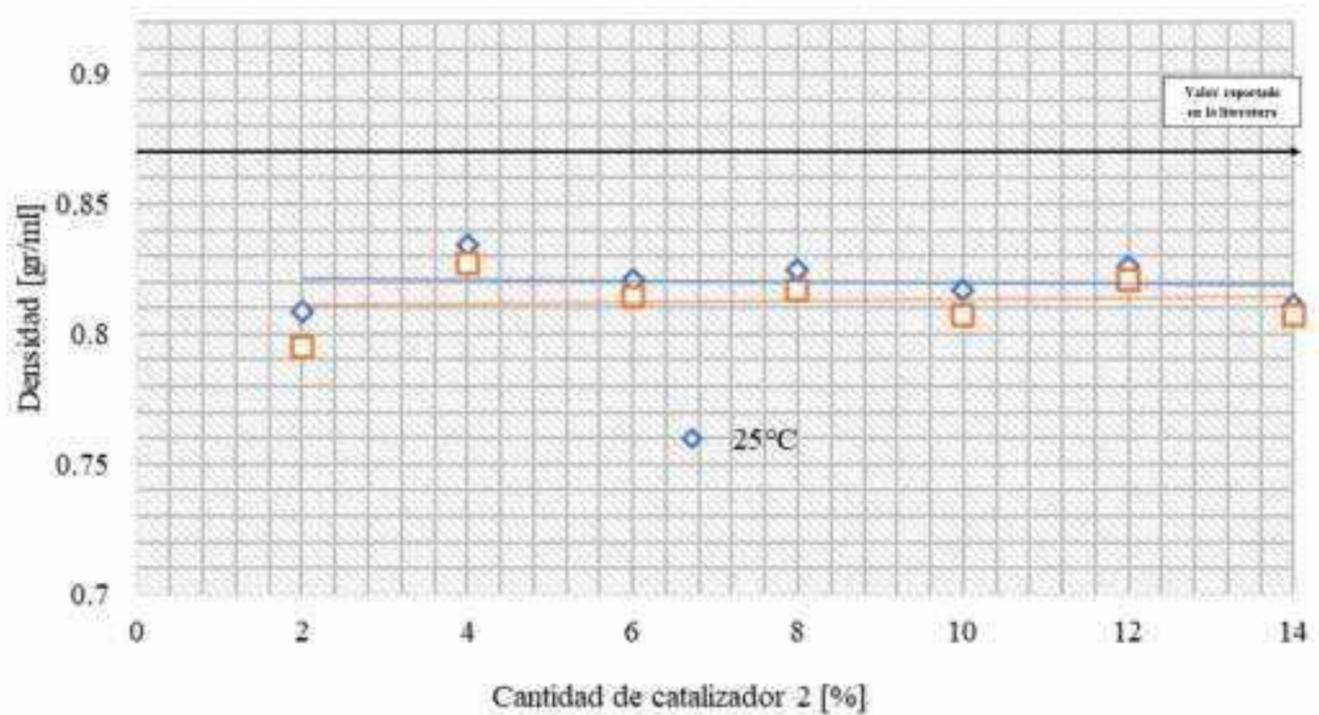


Figura 4.3.9 Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 50°C, medido a 25 y 40 °C

Para las temperaturas de medición de 25 y 40 °C, la densidad promedio del biodiésel fue de 0.83 gr/ml a 25 °C y 0.81 gr/ml a 40 °C, teniendo una desviación de 8.79% y 10% respectivamente, en comparación con los valores de densidad del biodiésel reportados en la literatura.

Aunque todos los valores de densidad obtenidos a las dos temperaturas de medición se encuentran muy cercanos entre ellos, el valor que mostró un comportamiento diferente fue con 4% de catalizador y fue el más cercano al esperado, aun así, este valor está por debajo del valor esperado para el biodiésel, sin embargo, está cercano a la densidad del diésel, lo cual es favorable.

En la Figura 4.3.9a se muestra el comportamiento de la densidad del biodiésel producido a 50 °C, empleando el catalizador 2, en función de la conversión.

Se observa que el valor más bajo de la densidad medida a 25 °C fue de 0.81 gr/ml con una conversión de 100% y el valor de densidad más alto fue de 0.83 gr/ml a la conversión de 96.66%.

A la temperatura de medición de 40 °C la densidad más baja fue de 0.79 gr/ml a la conversión de 96.66% y la densidad más alta fue de 0.82 gr/ml a la misma conversión.

Por lo tanto, se puede decir que a las dos temperaturas medidas, a menor conversión a biodiésel, la densidad es mayor, excepto a la conversión de 96.66% que fue donde se encontró el valor de densidad más alto y por lo tanto cercano a la densidad esperada.

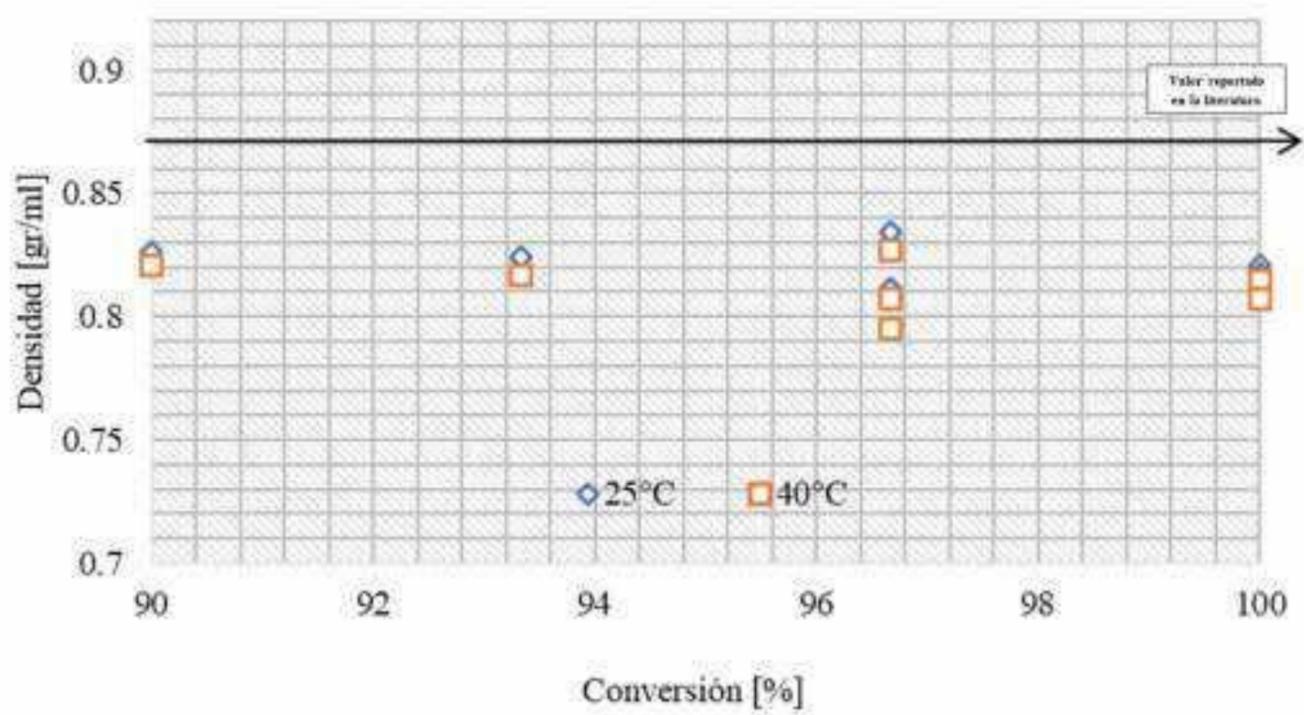


Figura 4.3.9a Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 50°C, medido a 25 y 40 °C

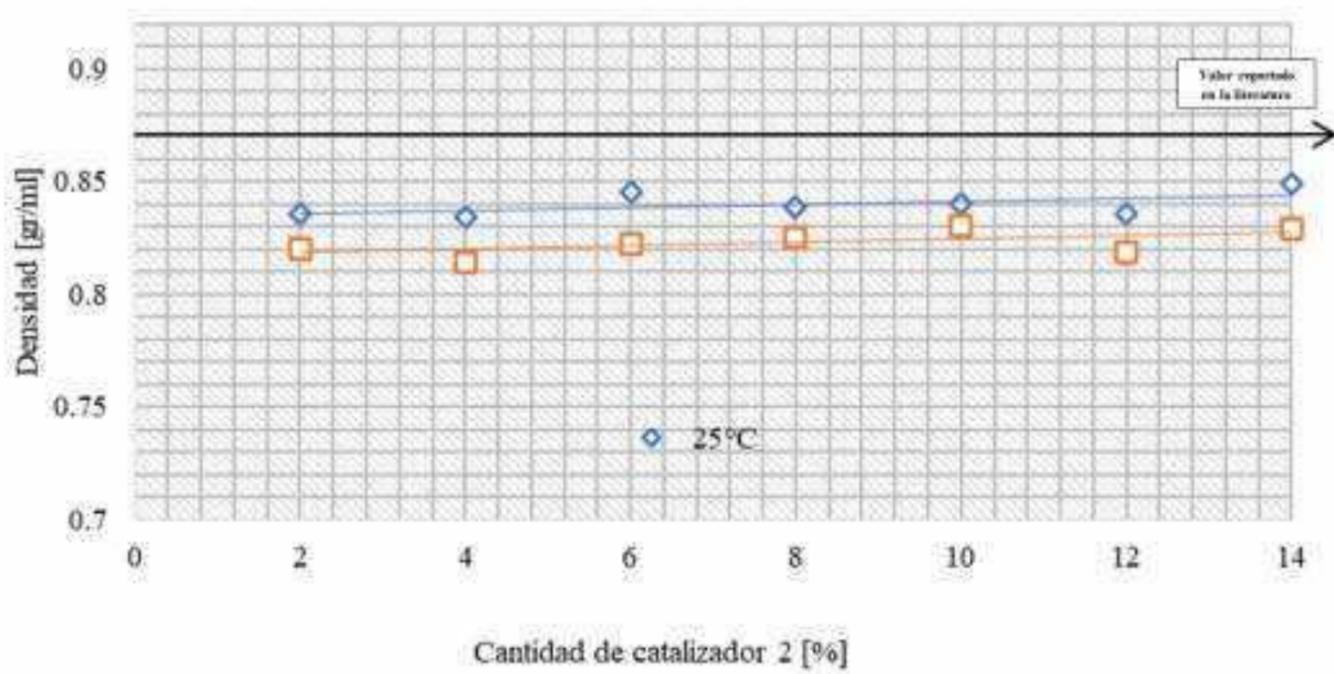


Figura 4.3.10 Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 60°C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.10 se muestra el comportamiento de la densidad del biodiésel producido empleando el catalizador 2, a la temperatura de 60 °C, las muestras de biodiésel se obtuvieron utilizando diferentes cantidades de catalizador.

En esta gráfica se puede observar que la cantidad de catalizador si influye en la densidad del biodiésel ya que al aumentar la cantidad de catalizador la densidad del biodiésel aumenta, la densidad medida a 25 °C se mantiene en el rango de 0.8344 gr/ml a 0.8488 gr/ml empleando diferentes cantidades de catalizador, lo que indica un intervalo de 0.0144 gr/ml. La densidad medida a 40 °C se mantiene en el rango de 0.8138 gr/ml a 0.8305 gr/ml empleando diferentes cantidades de catalizador, lo que indica un intervalo de 0.0167 gr/ml.

Para las temperaturas de medición de 25 y 40 °C, la densidad promedio del biodiésel fue de 0.84 gr/ml a 25 °C y 0.83 gr/ml a 40 °C, teniendo una desviación de 7.69% y 7.7% respectivamente, en comparación con los valores de densidad del biodiésel reportados en la literatura.

Los valores de densidad reportados en esta grafica son los que se encuentran más cercanos al valor que establece la literatura para el biodiésel. La muestra medida a 25 °C empleando 14% de catalizador obtuvo el valor de la densidad del diésel de petróleo.

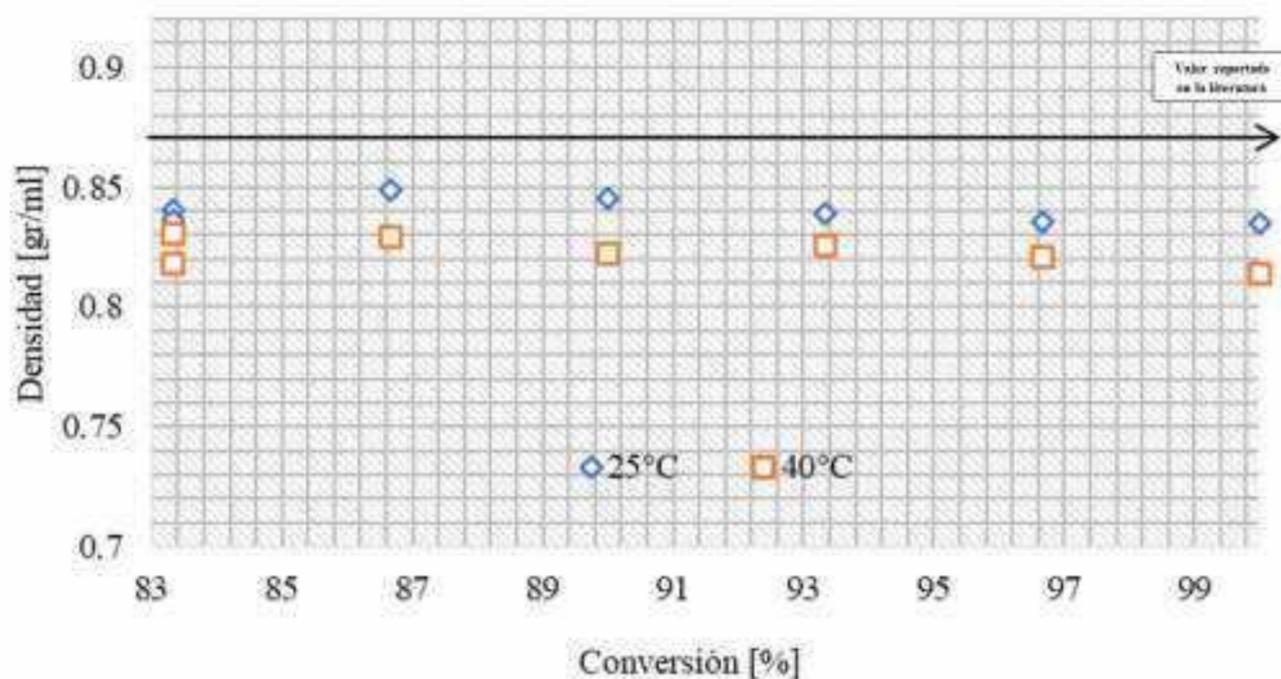


Figura 4.3.10a Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 60°C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.10a se muestra el comportamiento de la densidad del biodiésel producido a 60 °C, empleando el catalizador 2, en función de la conversión.

Se observa que el valor más bajo de la densidad medida a 25 °C fue de 0.8344 gr/ml con una conversión de 100% y el valor de densidad más alto fue de 0.8488 gr/ml a la conversión de 100%. El valor más bajo de la densidad medida a 40 °C fue de 0.8138 gr/ml a la conversión de 100% y la densidad más alta fue de 0.8305 gr/ml a la conversión de 83.33%, bajo estas condiciones, a menor

conversión a biodiésel, la densidad es mayor, obteniendo un buen combustible a la conversión de 86.66% en donde se obtuvo el valor de densidad del diésel convencional, lo que indica que el biodiésel obtenido cuenta con una de las propiedades más importantes para no afectar el rendimiento del motor.

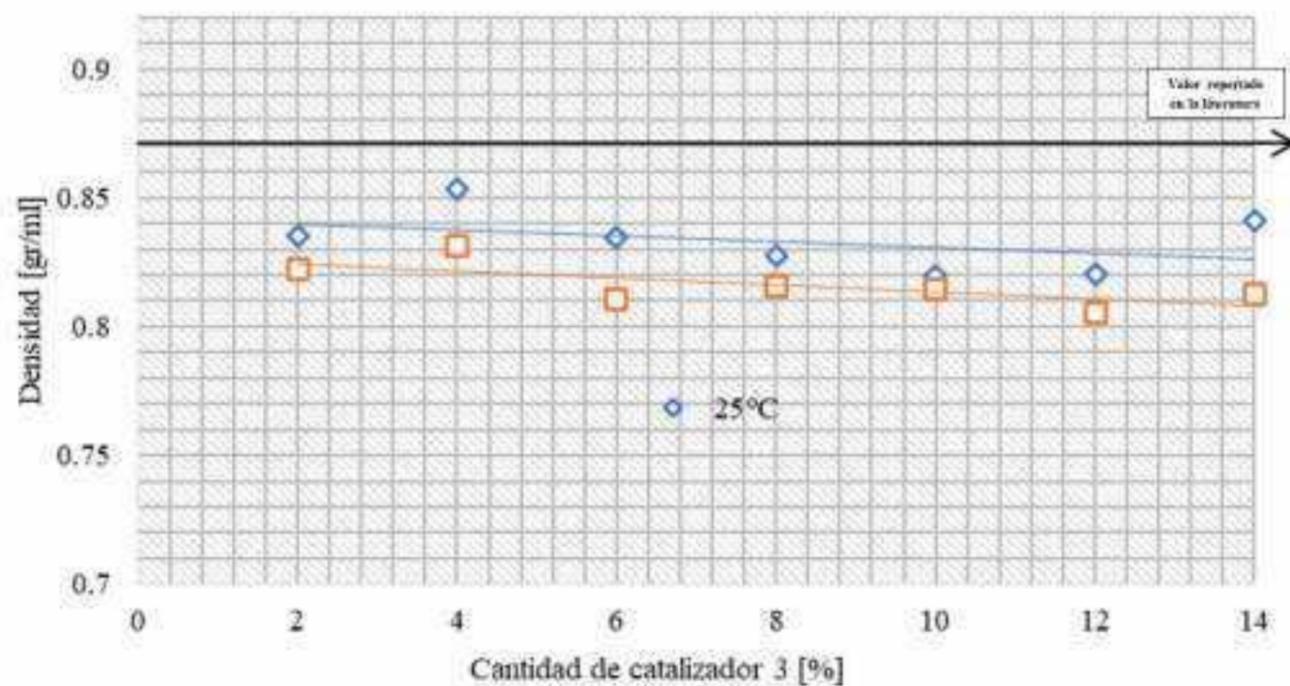


Figura 4.3.11 Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.11 se muestra el comportamiento de la densidad del biodiésel producido con el catalizador 3, a una temperatura de 45 °C, las muestras de biodiésel se obtuvieron utilizando diferentes cantidades de catalizador.

En esta gráfica se puede observar que la cantidad de catalizador si influye en la densidad del biodiésel, ya que los valores de densidad más altos se obtuvieron empleando 2 y 4% de catalizador y entre más catalizador se empleó la densidad fue menor a las dos temperaturas de medición.

El valor más bajo de la densidad medida a 25 °C fue de 0.8194 gr/ml empleando 10% de catalizador y el más alto fue de 0.8533 gr/ml empleando 2% de catalizador. Mientras que a la temperatura de medición de 40 °C la densidad se mantuvo en el rango de 0.8055 a 0.8161 gr/ml empleando a partir de 6 hasta 14% de catalizador.

Para las temperaturas de medición de 25 y 40 °C, la densidad promedio del biodiésel fue de 0.84 gr/ml a 25 °C y 0.81 gr/ml a 40 °C, teniendo una desviación de 8.33% y 7.69% respectivamente, en comparación con los valores de densidad del biodiésel reportados en la literatura.

se observa que empleando 4% de catalizador medido a 25 °C se obtuvo el valor de densidad del diésel de petróleo, aunque los demás valores se encuentran por debajo de la densidad del biodiésel son buenos resultados ya que se acercan a la densidad del diésel, entre más baja sea la densidad del biodiésel es mayor la longitud de la cadena

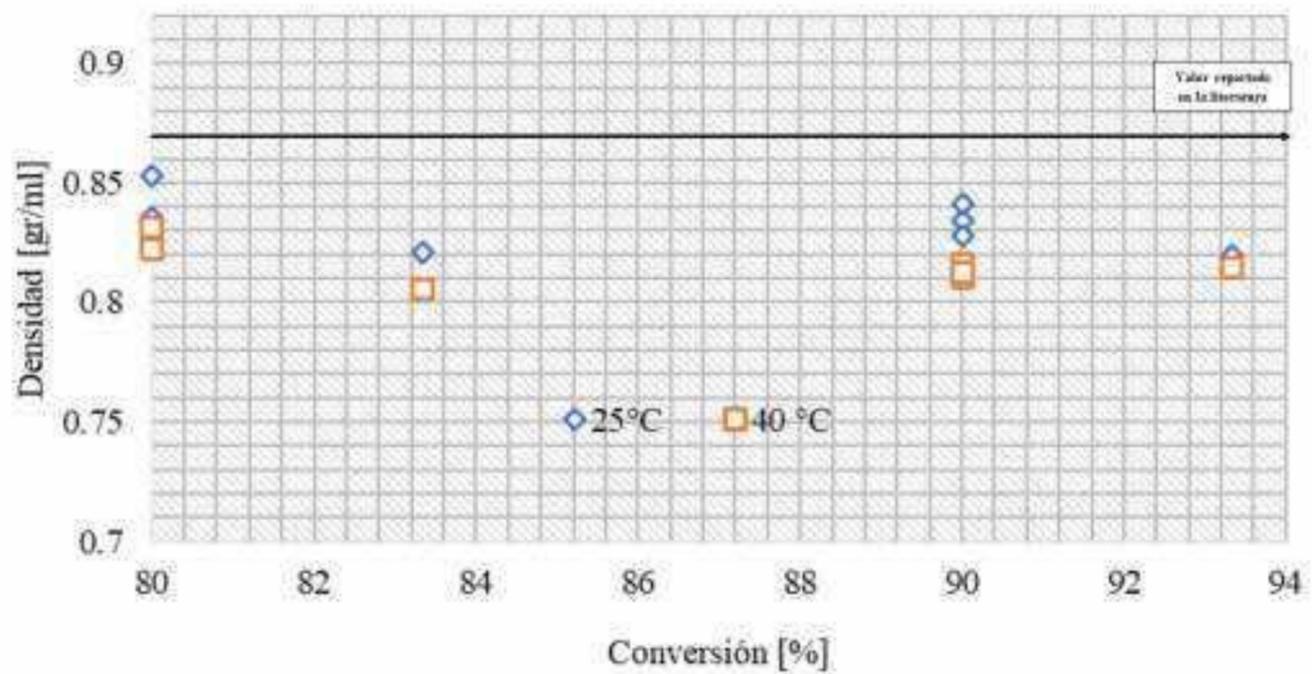


Figura 4.3.11a Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 45°C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.11a se muestra el comportamiento de la densidad del biodiésel producido a 45 °C, empleando el catalizador 3, en función de la conversión.

Se observa que el valor más bajo de la densidad medida a 25 °C fue de 0.8194 gr/ml con una conversión de 93.33% y el valor de densidad más alto fue de 0.8533 gr/ml a la conversión de 80%. El valor más bajo de la densidad medida a 40 °C fue de 0.8055 gr/ml a la conversión de 83.33% y la densidad más alta fue de 0.8316 gr/ml a la conversión de 80%.

Con la menor conversión se obtuvo el valor de la densidad del biodiésel más cercano al que reporta la literatura medida a 25 °C, aunque no se tiene una conversión alta, el biodiésel producido cuenta con características similares a las del diésel y no presentaría complicaciones al ser usado en un motor de diésel convencional.

En la Figura 4.3.12 se muestra el comportamiento de las muestras de biodiésel producido con diferentes cantidades del catalizador 3, a la temperatura de reacción de 50 °C.

Bajo estas condiciones se encontró que, si hay influencia de cantidad de catalizador, ya que al incrementar la cantidad de catalizador la densidad del biodiésel disminuyó, los valores más altos de densidad fueron empleando 2 y 4% de catalizador a las temperaturas de medición. A la temperatura de medición de 25 °C, la densidad más alta fue de 0.855 gr/ml empleando 4% de catalizador y la densidad más baja fue de 0.82 gr/ml empleando 14% de catalizador. A la temperatura de medición de 40 °C, la densidad más alta fue de 0.84 gr/ml empleando 4% de catalizador y la densidad más baja fue de 0.8094 gr/ml empleando 10% de catalizador.

Para las temperaturas de medición de 25 y 40 °C, la densidad promedio de las muestras fue 0.83 gr/ml y 0.81 gr/ml, respectivamente, teniendo una desviación de 8.79% a 25 °C y 10% a 40 °C, en comparación con los valores de densidad del biodiésel reportados en la literatura, sin embargo, tomando en cuenta las densidades obtenidas con menor cantidad de catalizador se llegó al valor de la densidad del diésel de petróleo.

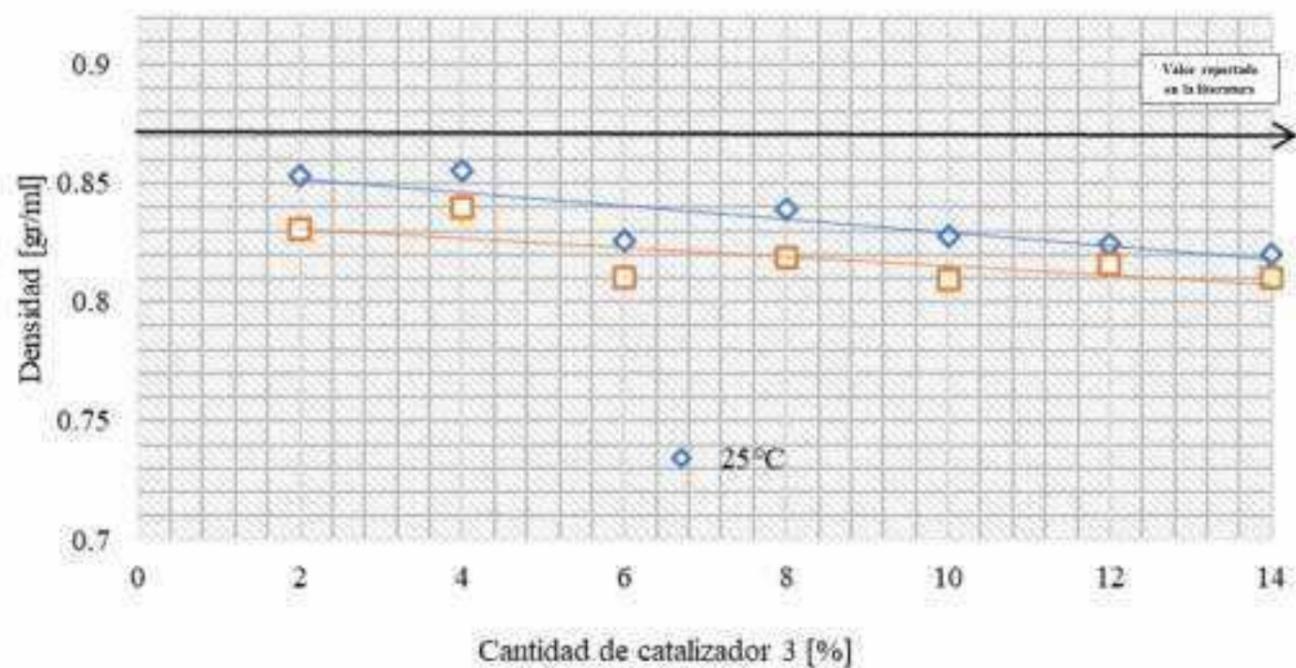


Figura 4.3.12 Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.12a se muestra el comportamiento de la densidad del biodiésel producido a 50 °C, empleando el catalizador 3, en función de la conversión.

Se observa que el valor más bajo de la densidad medida a 25 °C fue de 0.82 gr/ml con una conversión de 86.66% y el valor de densidad más alto fue de 0.855 gr/ml a la conversión de 96.66%.

A la temperatura de medición de 40 °C la densidad más baja fue de 0.809 gr/ml a la conversión de 86.66% y la densidad más alta fue de 0.84 gr/ml a la conversión de 96.66%.

Por lo tanto, se puede decir que a las dos temperaturas medidas, a menor conversión a biodiésel, la densidad es menor.

Alcanzando la conversión de 96.66% se obtuvo el valor más cercano al esperado, lo que indica que el biodiésel producido bajo esas condiciones es de buena calidad al haber alcanzado la conversión máxima y la mejor densidad.

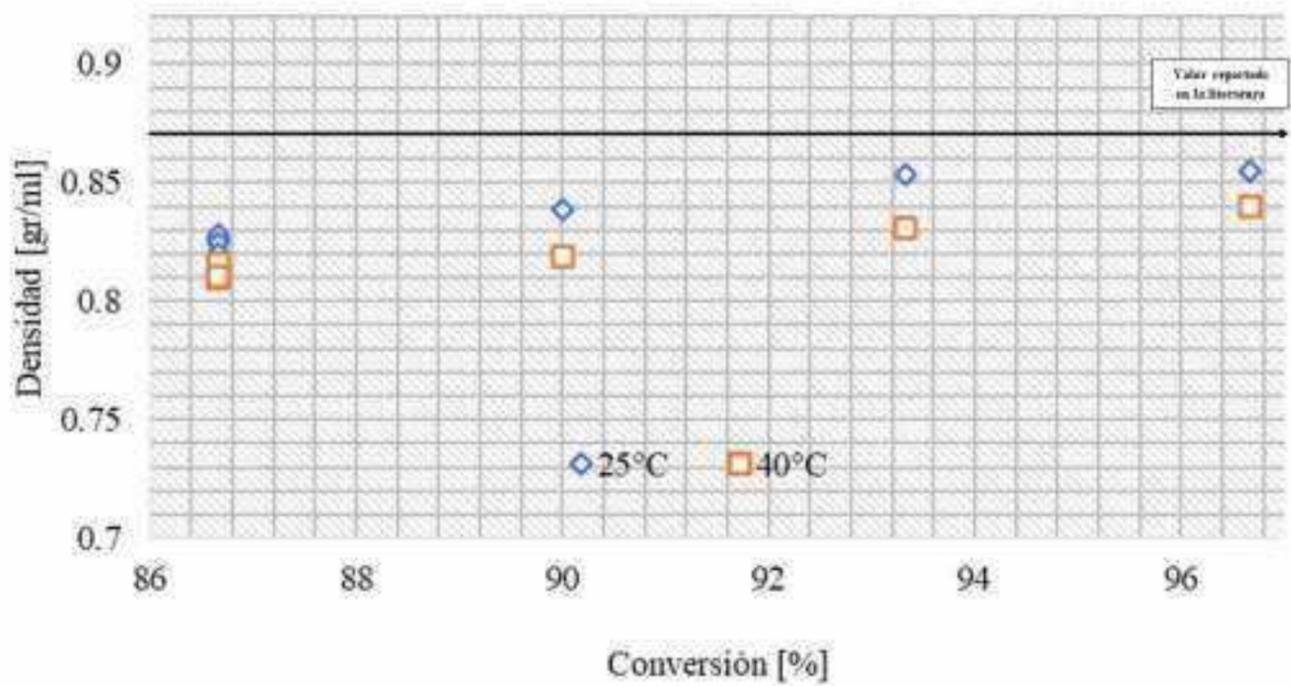


Figura 4.3.12a Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 50°C, medido a 25 y 40 °C

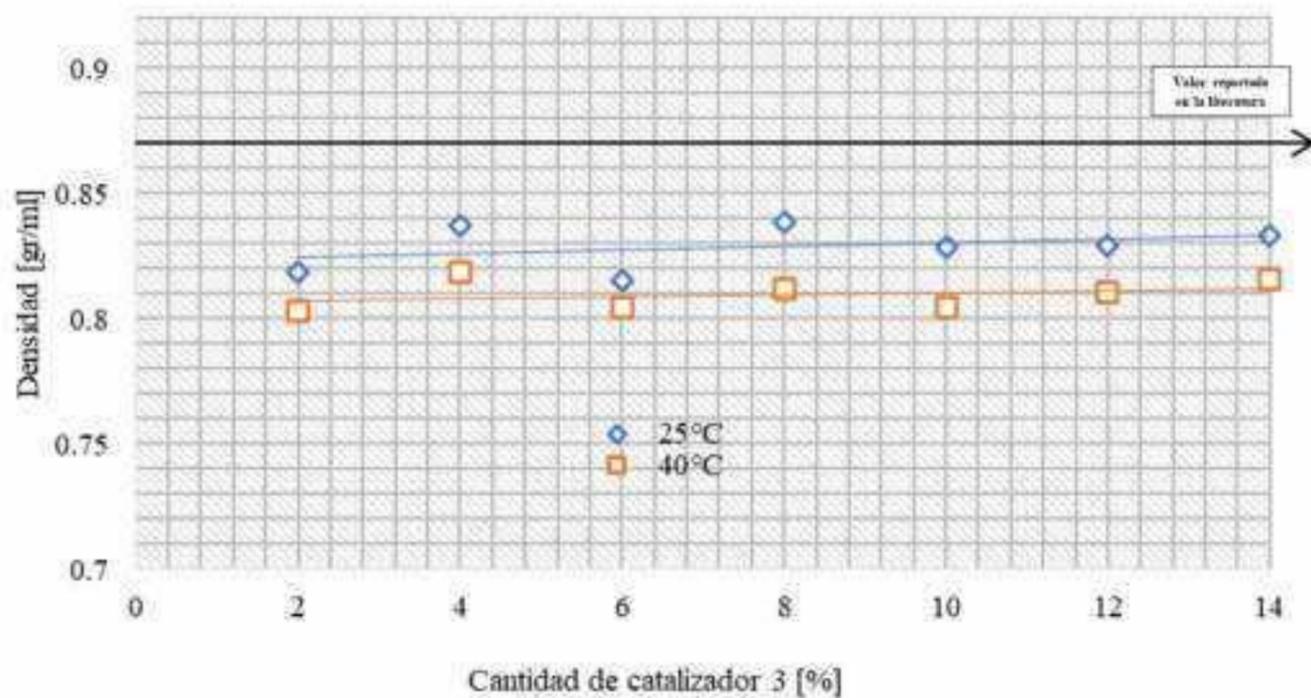


Figura 4.3.13 Densidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 60°C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.13 se muestra el comportamiento de las muestras de biodiésel producido con diferentes cantidades de catalizador 3, a la temperatura de reacción de 60 °C.

A la temperatura de medición de 25 °C se encontró que si hay influencia de la cantidad de catalizador ya que la densidad más baja se obtuvo empleando 2% de catalizador y la densidad más cercana a la esperada fue empleando 14% de catalizador, la densidad se mantiene en el rango de 0.8288 a 0.8383

gr/ml excepto empleando 2 y 4% de catalizador ya que se tuvo una densidad mínima de 0.8155 gr/ml.

A la temperatura de medición de 40 °C la densidad se mantuvo prácticamente lineal a partir de 6% de catalizador, sin embargo, empleando 4% de catalizador la densidad fue el mejor, teniendo un valor de 0.8183 gr/ml. Se observa que al incrementar la cantidad de catalizador aumenta la densidad del biodiésel.

Para las temperaturas de medición de 25 y 40 °C, la densidad promedio de las muestras fue 0.82 gr/ml a 25°C y 0.81 gr/ml a 40 °C, teniendo una desviación de 8.79% y 10% respectivamente, en comparación con los valores de densidad del biodiésel reportados en la literatura.

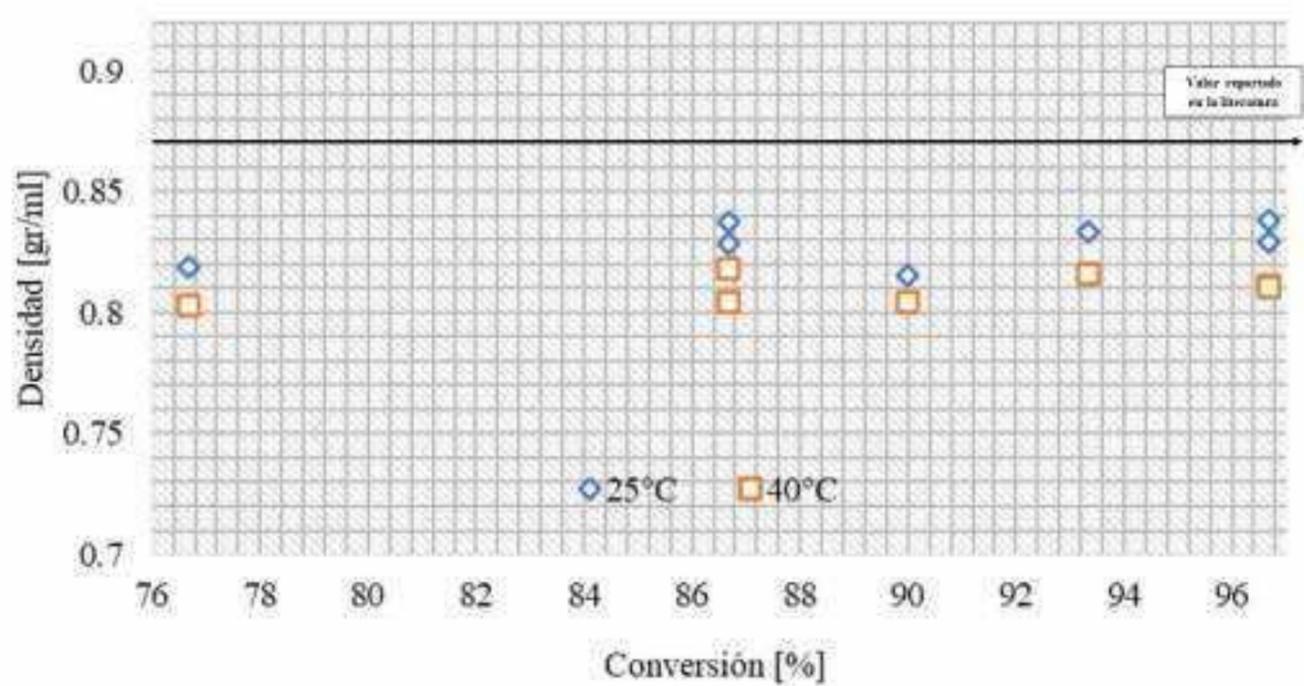


Figura 4.3.13a Densidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 60°C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.13a se muestra el comportamiento de la densidad del biodiésel producido a 60 °C, empleando el catalizador 3, en función de la conversión.

Se observa que el valor más bajo de la densidad medida a 25 °C fue de 0.8155 gr/ml con una conversión de 90% y el valor de densidad más alto fue de 0.8383 gr/ml a la conversión de 100%.

El valor más bajo de la densidad medida a 40 °C fue de 0.8033 gr/ml a la conversión de 76.66% y la densidad más alta fue de 0.8183 gr/ml a la conversión de 86.66%.

Se puede decir que, bajo estas condiciones, a menor conversión a biodiésel, la densidad es menor.

Los valores obtenidos están por debajo de la densidad esperada, sin embargo, se encuentran cercanos a los del diésel de petróleo y no se vería afectado el rendimiento del motor. Debido a que la densidad del biodiésel se ve afectada por el grado de insaturación y la longitud de la cadena, cuanto mayor sea el grado de insaturación la densidad del biodiésel aumenta y a mayor longitud de la cadena la densidad del biodiésel es menor.

Viscosidad

En la Figura 4.3.14 se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido con diferentes cantidades de catalizador 1 a 45 °C.

Se observa que la viscosidad medida a 25 °C se mantiene en el rango de 0.0034 a 0.0043 kg/ms, bajo estas condiciones se determinó que, si hay influencia de la cantidad de catalizador, ya que conforme se emplea más catalizador, la viscosidad aumenta, sin embargo, empleando 12% de catalizador se observa que hay una disminución de la viscosidad de 0.000317 kg/ms, respecto a la viscosidad obtenida empleando 10% de catalizador.

La viscosidad medida a 40 °C se encuentra en el rango de 0.0018 a 0.0025 kg/ms, en este caso al emplear 2 y 14% de catalizador se obtuvo una viscosidad de 0.0024 kg/ms, y empleando 10% de catalizador se obtuvo una viscosidad de 0.0025 kg/ms, estos valores de viscosidad fueron los más altos. Empleando 6% de catalizador se obtuvo una viscosidad de 0.0018 kg/ms, que se mantiene constante al emplear 8% de catalizador.

La viscosidad medida a 25 °C aumentó al producir biodiésel con más cantidad de catalizador, sin embargo, los valores de viscosidad son bajos, y al tener una viscosidad baja la cantidad del combustible quemado será mayor. En consecuencia, se tiene menos números de dobles enlaces.

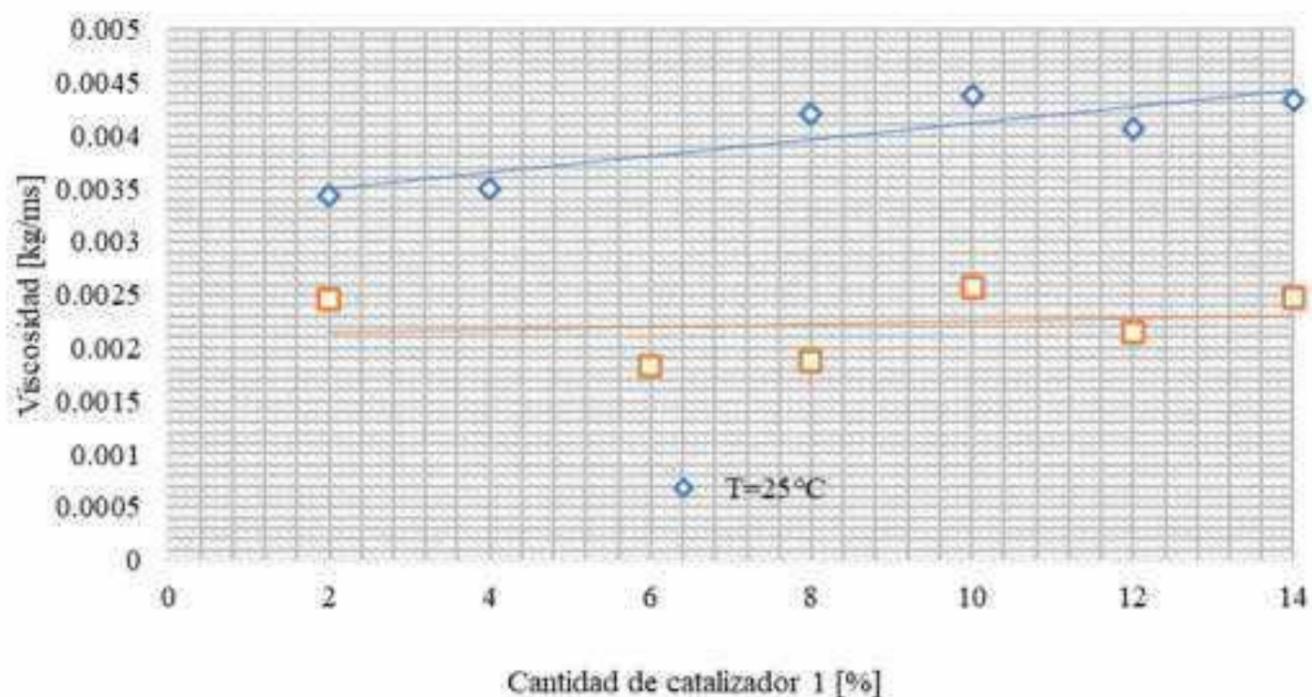


Figura 4.3.14 Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.14a se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido a 45 °C, empleando el catalizador 1, en función de la conversión. Se observa que la viscosidad mínima medida a 25 °C fue de 0.0034 kg/ms con la conversión de 90%, y la viscosidad máxima fue de

0.0043 kg/ms con la conversión de 100%. La viscosidad medida a 40 °C tuvo un valor mínimo de 0.0018 kg/ms a la conversión de 90%, y el valor máximo de 0.0025 kg/ms a la conversión de 100%.

La viscosidad medida a 25 °C muestra un comportamiento ascendente al aumentar la conversión, por lo tanto, bajo estas condiciones, se puede decir que, a mayor conversión, la viscosidad es más alta. En cambio, en la viscosidad medida a 40 °C se nota el incremento hasta que alcanzó el 100% de conversión.

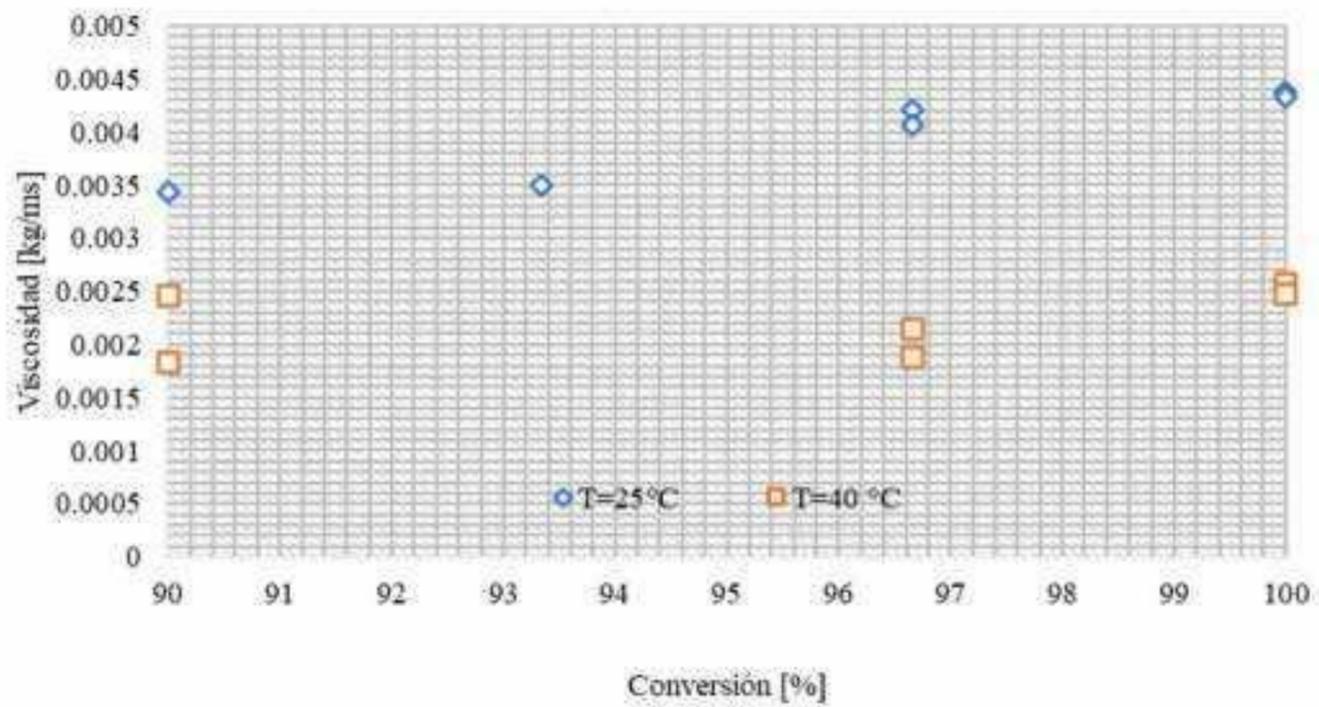


Figura 4.3.14a Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.15 se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido con diferentes cantidades de catalizador 1 a 50 °C, bajo estas condiciones se determinó que no hay influencia de la cantidad de catalizador ya que la viscosidad no incrementa al aumentar la cantidad de catalizador

Empleando 2% de catalizador se alcanzó una viscosidad de 0.0033 kg/ms, que disminuye a 0.0032 kg/ms al emplear 4% de catalizador, aumentó a 0.0042 kg/ms empleando 6% de catalizador y disminuyó a 0.0039 kg/ms empleando 8% de catalizador. La viscosidad del biodiésel máxima se obtuvo al emplear 10% de catalizador, posteriormente disminuyó a 0.004 y 0.0038 kg/ms al emplear 12 y 14% de catalizador respectivamente.

La viscosidad del biodiésel mínima medida a 25 °C es de 0.0032 kg/ms y la máxima es de 0.0048 kg/ms.

La viscosidad del biodiésel mínima medida a 40 °C es de 0.0019 kg/ms y la máxima es de 0.0029 kg/ms. Debido a que la viscosidad del biodiésel presenta valores bajos, el combustible quemado será mayor. A pesar de que los valores de la viscosidad se encuentran por debajo de los límites

establecidos en la literatura, están cercanos a él y esto significa que el biodiésel producido no presentará dificultades para fluir.

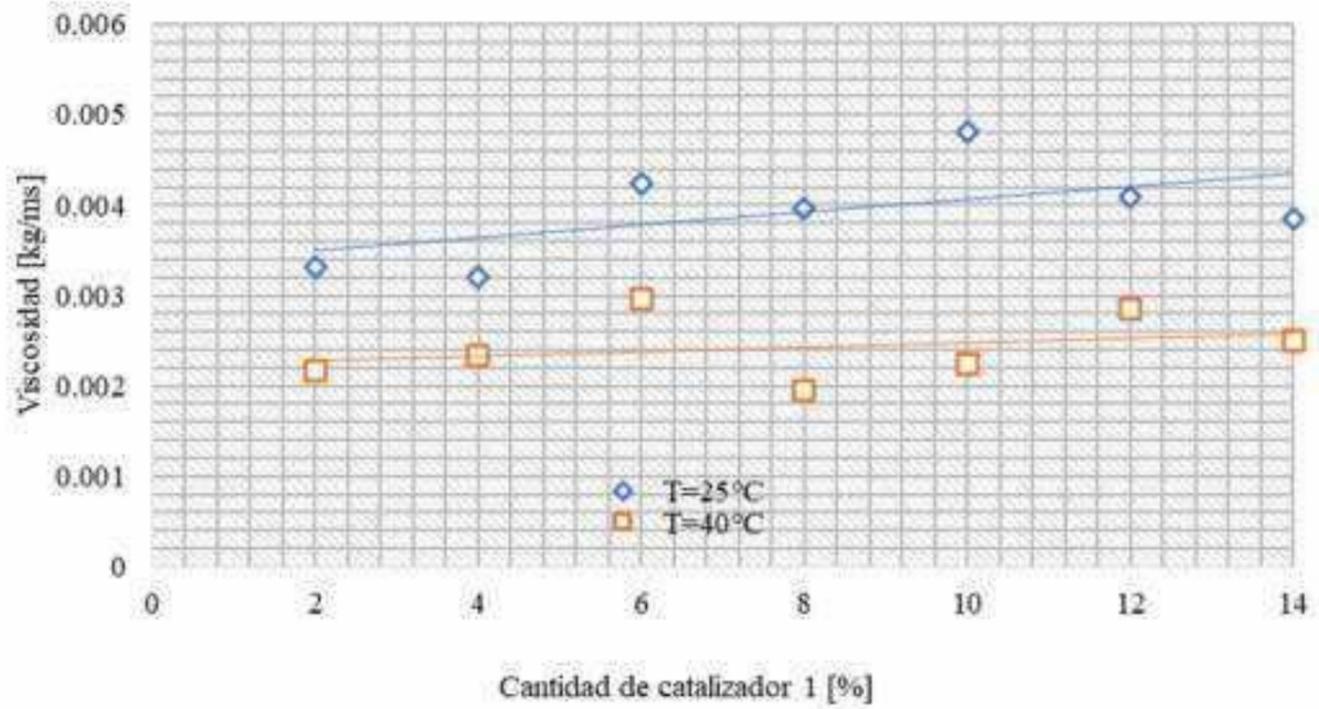


Figura 4.3.15 Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C

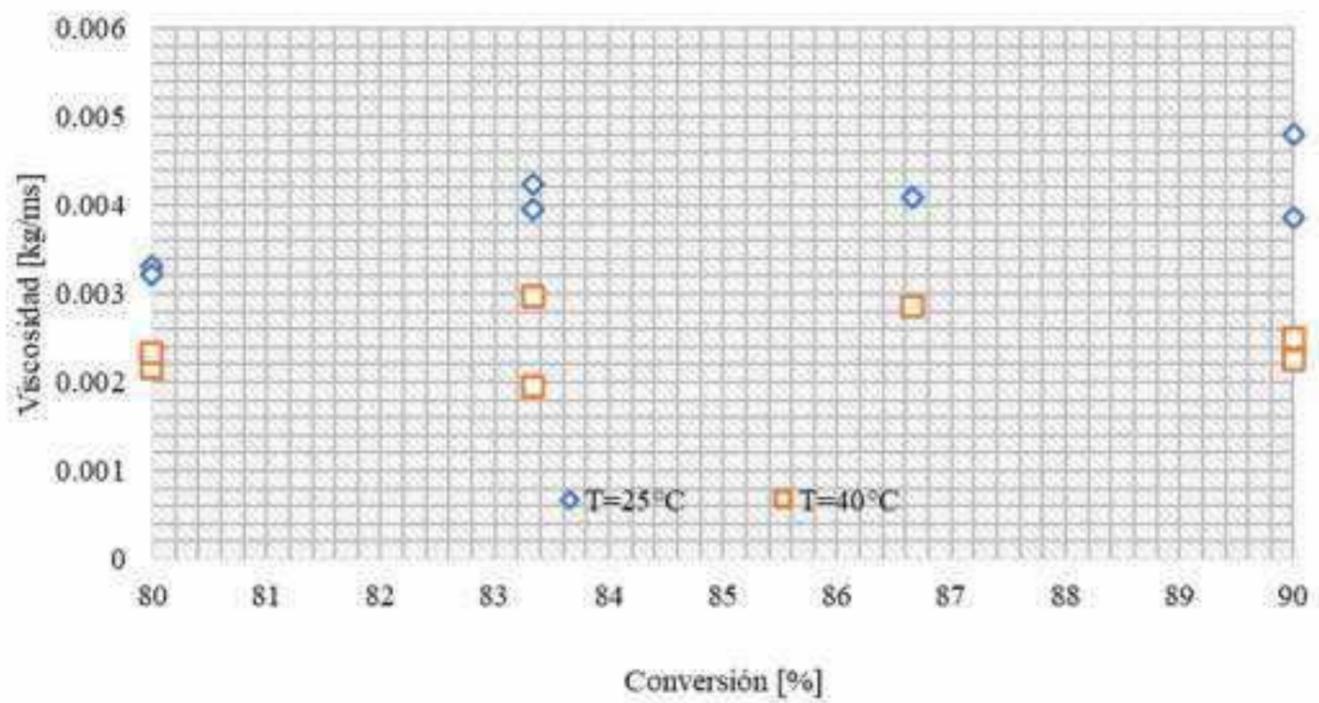


Figura 4.3.15a Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.15a se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido a 50 °C, empleando el catalizador 1, en función de la conversión.

Se observa que la viscosidad del biodiésel mínima medida a 25 °C fue de 0.0033 kg/ms a la conversión de 80%, y la viscosidad máxima fue de 0.0048 kg/ms a la conversión de 90% empleando 10% de catalizador. A esa misma conversión se tuvo una viscosidad del biodiésel de 0.0038 kg/ms empleando 14% de catalizador.

La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C tuvo un valor mínimo de 0.0019 kg/ms y un valor máximo de 0.0029 kg/ms a la misma conversión de 83.33%. Se observa que la viscosidad aumenta con la conversión, pero al alcanzar 90% de conversión disminuye, la viscosidad muestra el mismo comportamiento a las dos temperaturas medidas.

En la Figura 4.3.16 se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido con diferentes cantidades del catalizador 1 a 60 °C.

La viscosidad del biodiésel medida a 25 °C incrementa al aumentar la cantidad de catalizador, bajo estas condiciones se determinó que existe una influencia de la cantidad de catalizador. La viscosidad se mantiene en el rango de 0.0034 a 0.0043 kg/ms, manteniéndose casi lineal excepto empleando 4% de catalizador donde se obtuvo la densidad más baja.

La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C amento linealmente a partir del empleo de 6 hasta 12% de catalizador, sin embargo, el valor de densidad más alto fue de 0.0026 kg/ms y se obtuvo al emplear 2% de catalizador. Se determinó que bajo estas condiciones si hay influencia de la cantidad de catalizador.

Al igual que los casos anteriores, los valores de la viscosidad son menores que el establecido en la literatura, sin embargo, al contar con viscosidades bajas se espera tener buena fluidez y menor número de enlaces dobles en comparación con otros combustibles.

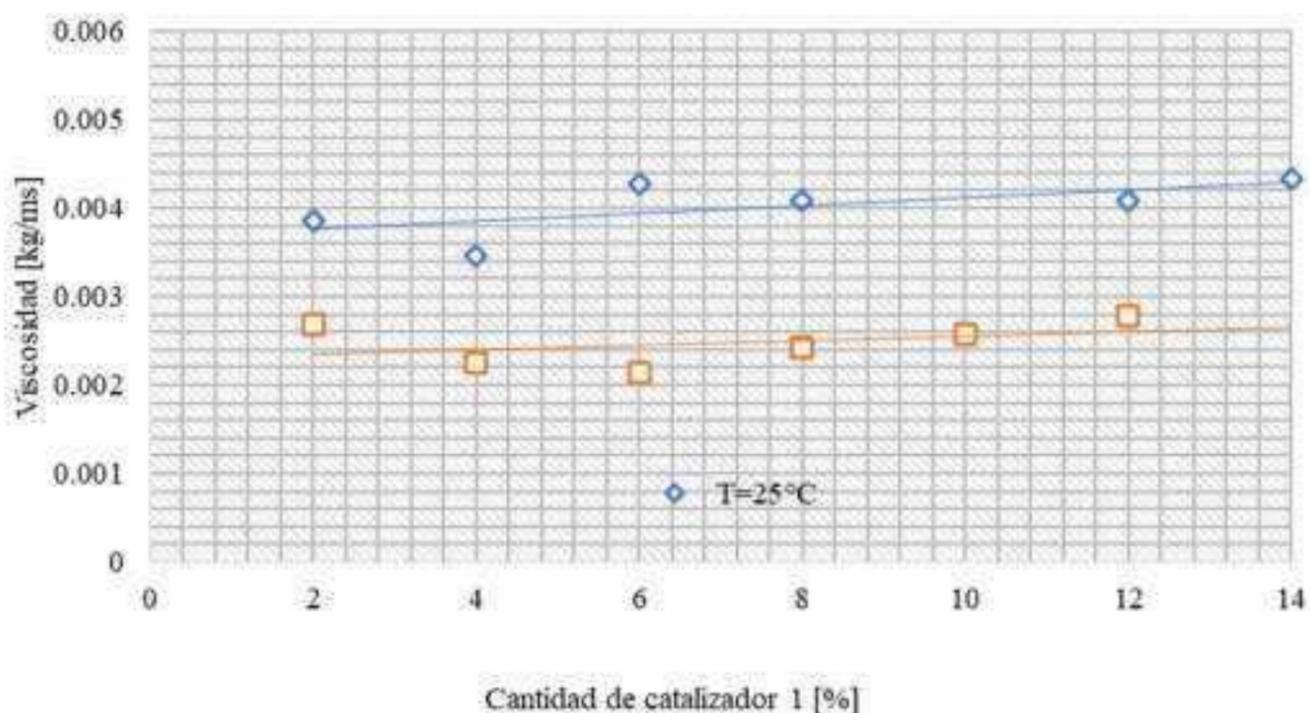


Figura 4.3.16 Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 1 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C

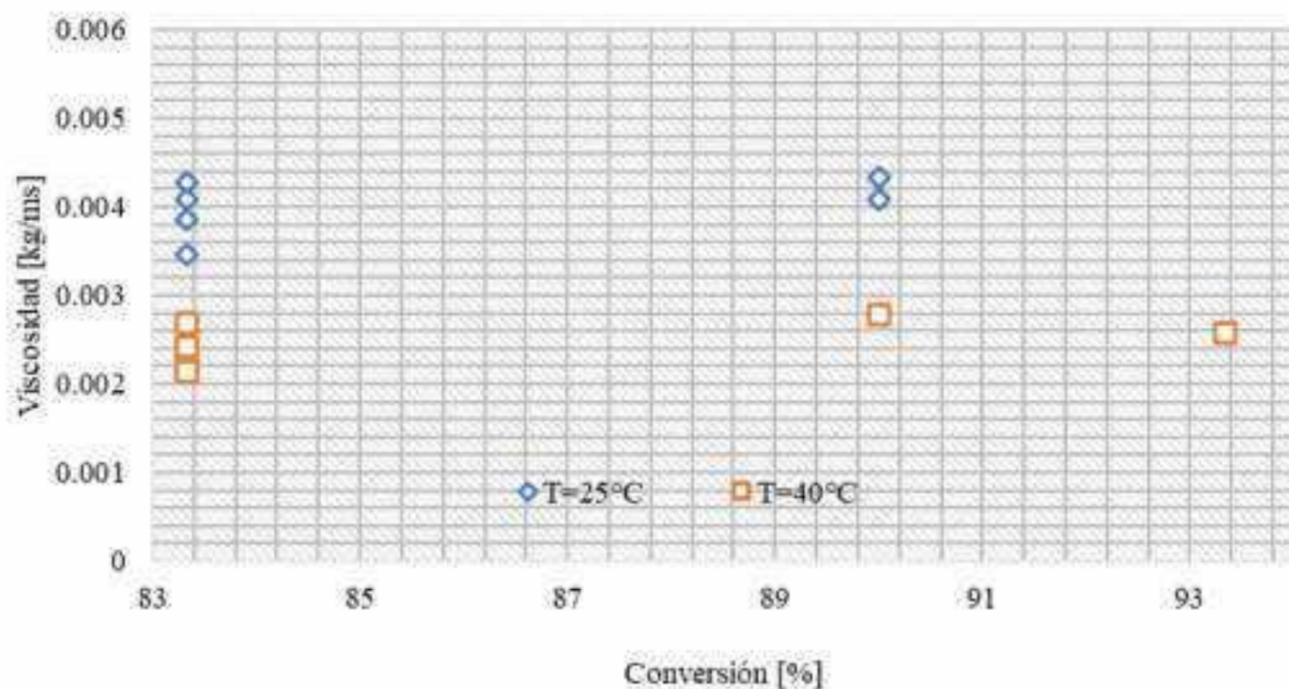


Figura 4.3.16a Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 1 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.16a se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido a 60 °C, empleando el catalizador 1, en función de la conversión.

Se observa que la viscosidad mínima medida a 25 °C fue de 0.0034 kg/ms a la conversión de 83.33%, y la viscosidad máxima fue de 0.0043 kg/ms con la conversión de 90%. La viscosidad medida a 40 °C tuvo un valor mínimo de 0.0021 kg/ms a la conversión de 83.33%, y el valor máximo de 0.0027 kg/ms a la conversión de 90%.

Se observa que a la conversión de 83.33% la conversión aumenta a las dos temperaturas estudiadas, esto se debe al aumento de la cantidad de catalizador, lo mismo sucedió a la conversión de 90%, por lo tanto, bajo estas condiciones, se puede decir que, a mayor conversión, la viscosidad es más alta.

En la Figura 4.3.17 se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido con diferentes cantidades del catalizador 2 a 45 °C.

La viscosidad del biodiésel medida a 25 °C se mantiene en el rango de 0.0033 a 0.0047 kg/ms, obteniendo el valor de la viscosidad más alto empleando 2% de catalizador. Empleando 4% de catalizador disminuyó a 0.003 kg/ms que se mantiene constante al emplear 6% de catalizador y alcanzando su valor de la viscosidad máximo empleando 8% de catalizador, empleando 10% de catalizador disminuyó a su valor mínimo de la viscosidad y empleando 12 y 14% de catalizador se mantuvo constante en 0.0046 kg/ms.

Bajo estas condiciones se determinó que, si hay influencia de la cantidad de catalizador, excepto al emplear 10% de catalizador, ya que, al emplear más cantidad de catalizador, la viscosidad aumenta.

La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C se mantiene en el rango de 0.0019 a 0.0027 kg/ms, el comportamiento de la viscosidad medida a esta temperatura es semejante que a la viscosidad medida a 25 °C, ya que se observan disminución y aumentó de la viscosidad empleando las mismas cantidades de catalizador.

El valor más cercano al que establece la literatura fue de 0.0047 kg/ms, sin embargo, este valor sigue estando por debajo, por lo cual se considera que el biodiésel producido cuanta con buena fluidez y quemado en el motor diésel.

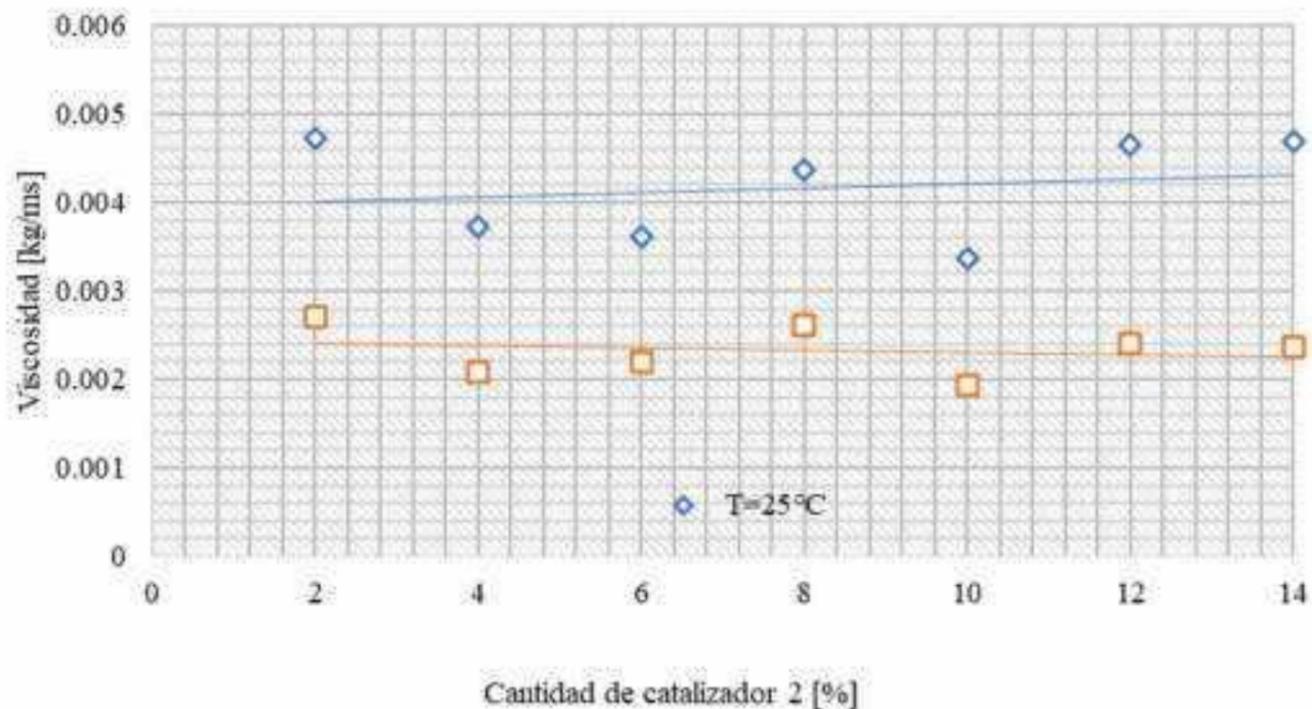


Figura 4.3.17 Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.17a se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido a 45 °C, empleando el catalizador 2, en función de la conversión.

Se observa que la viscosidad mínima medida a 25 °C fue de 0.0033 kg/ms a la conversión de 93.33%, y la viscosidad máxima fue de 0.0047 kg/ms con la conversión de 96.66%. La viscosidad medida a 40 °C tuvo un valor mínimo de 0.0019 kg/ms a la conversión de 93.33%, y el valor máximo de 0.0027 kg/ms a la conversión de 96.66%.

La viscosidad se mantuvo lineal en varios puntos, sin importar la conversión alcanzada, sin embargo, el valor de viscosidad más alto se logró a la mayor conversión que fue de 96.66%. Se observa que el biodiésel con la conversión de 90% se acerca mucho al antes mencionado, Lo cual indica que el biodiésel que alcanzo la conversión de 90% tiene características semejantes al de 96.66%

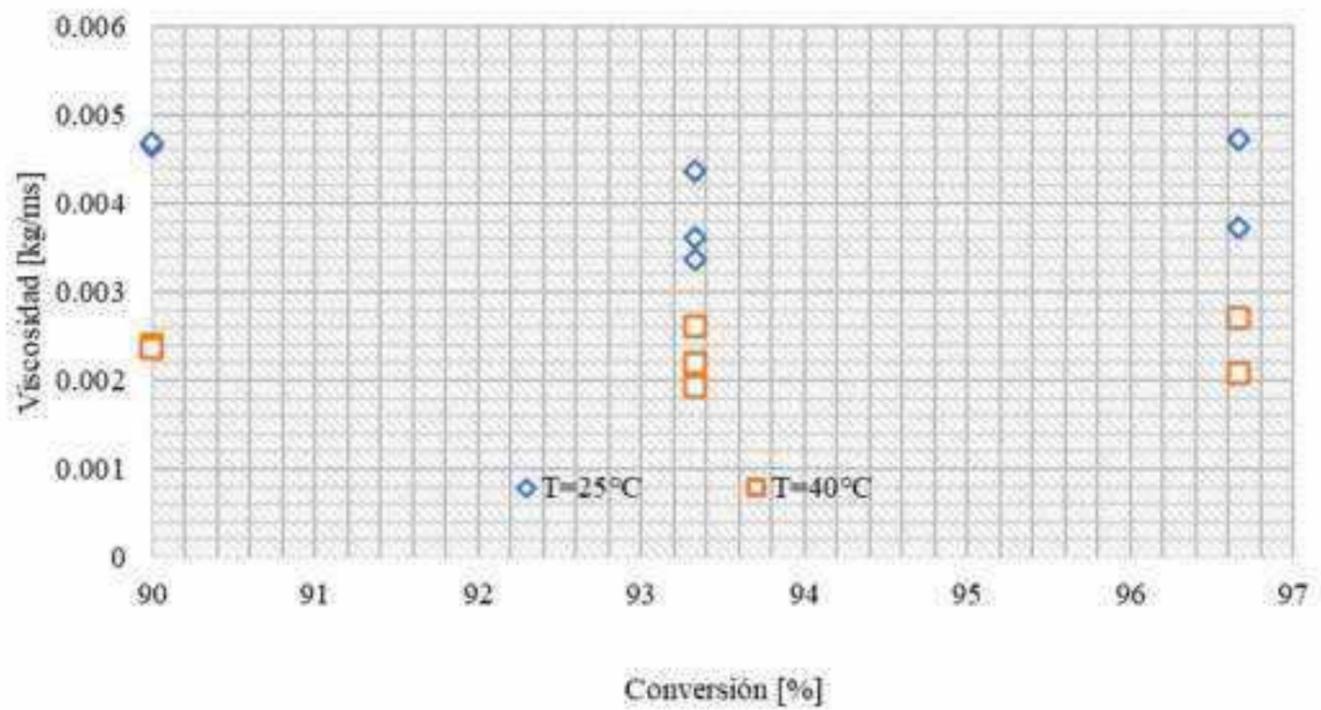


Figura 4.3.17a Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C

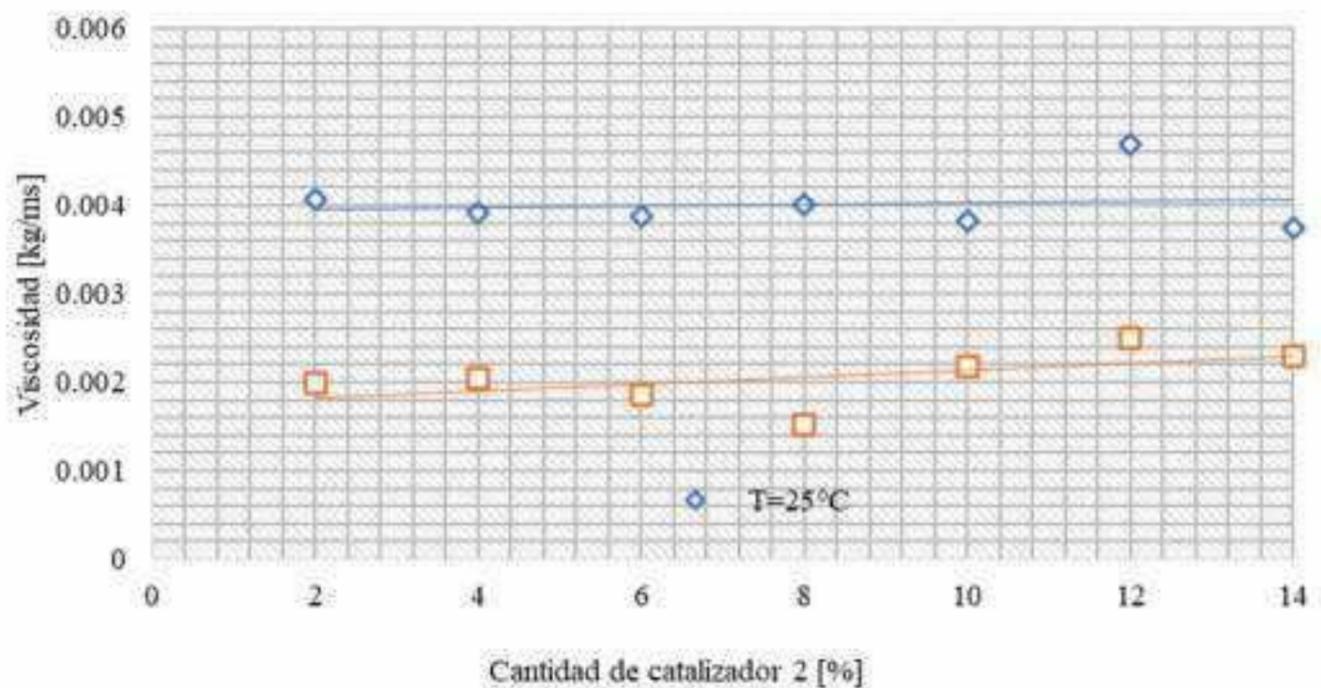


Figura 4.3.18 Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.18 se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido con diferentes cantidades de catalizador 2 a 50 °C, Bajo estas condiciones se determinó que no hay influencia de la cantidad de catalizador, ya que la viscosidad del biodiésel medida a 25 °C se mantuvo prácticamente lineal.

La viscosidad medida a 25 °C se mantuvo en el rango de 0.0037 a 0.0040 kg/ms, excepto un aumento considerable a 0.0046 kg/ms empleando 12% de catalizador.

La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C se mantiene en el rango de 0.0015 a 0.0025 kg/ms, determinando que bajo estas condiciones si hay influencia de la cantidad de catalizador ya que aumenta linealmente al emplear más cantidad de catalizador, excepto empleando 6 y 8% de catalizador que hay una disminución de la viscosidad. Debido al bajo valor de viscosidad del biodiésel producido, no afecta su fluidez al ser usado en bajas temperaturas y no es necesario la adición de aditivos para mejorar la capacidad de flujo del biocombustible.

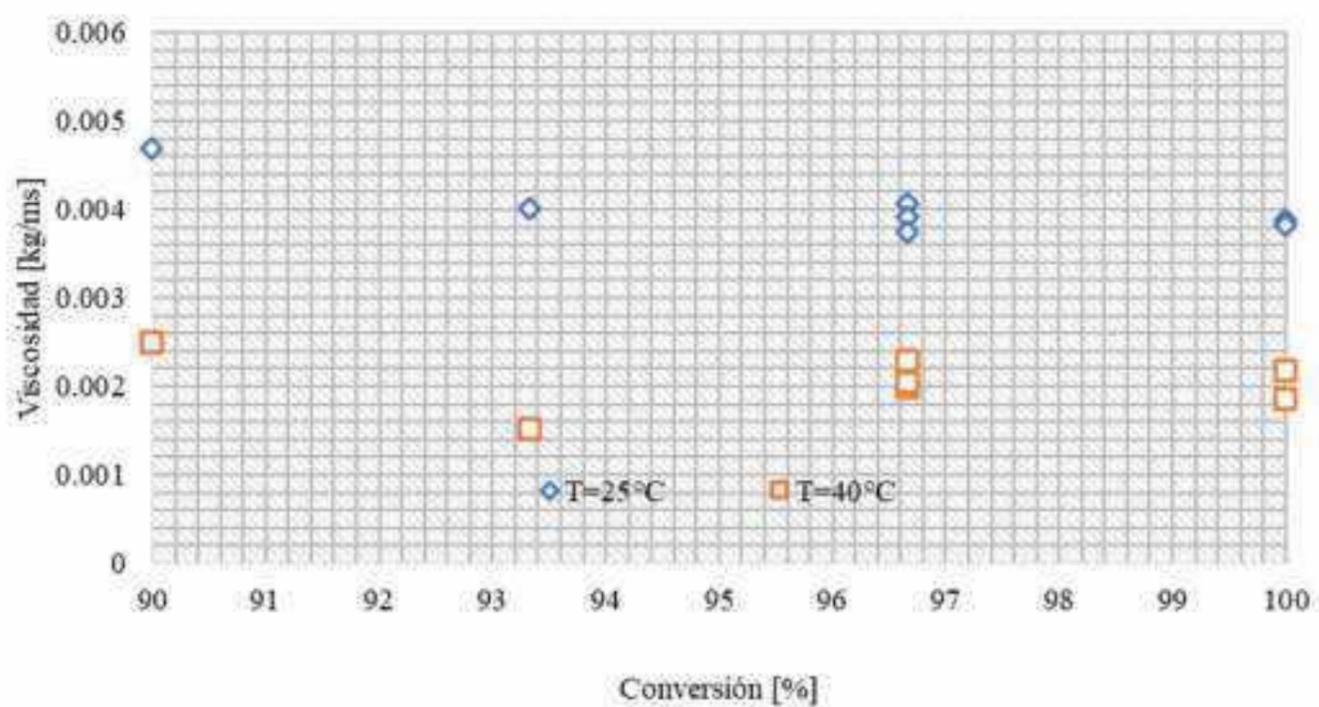


Figura 4.3.18a Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.18a se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido a 50 °C, empleando el catalizador 2, en función de la conversión.

Se observa que la viscosidad mínima del biodiésel medida a 25 °C fue de 0.0037 kg/ms a la conversión de 96.66%, y la viscosidad máxima fue de 0.0046 kg/ms con la conversión de 90%. La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C tuvo un valor mínimo de 0.0015 kg/ms a la conversión de 93.33%, y el valor máximo de 0.0025 kg/ms a la conversión de 90%.

La viscosidad más alta se obtuvo al 90% de conversión, lo que indica que el biodiésel producido bajo esas condiciones es de buena calidad en comparación con el obtenido a la conversión de 100%, porque el valor se acerca más a la viscosidad del biodiésel, sin embargo, un valor bajo se asemeja al del diésel convencional, lo cual también es favorable ya que no son necesarias modificaciones en el motor.

En la Figura 4.3.19 se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido con diferentes cantidades del catalizador 2 a 60 °C.

Bajo estas condiciones se determinó que no hay influencia de la cantidad de catalizador, teniendo una gran dispersión en la viscosidad del biodiésel medida a 25 °C, afectada por problemas ambientales que no permitían mantener la temperatura deseada de las muestras de biodiésel, mientras que la viscosidad del biodiésel medida a 40 °C se mantuvo en el rango de 0.0020 a 0.0029 kg/ms.

Al obtener viscosidades tan bajas se tiene mayor cantidad de combustible quemado, y fluidez del biocombustible del tanque al motor. Además, se ve afectada por la instauración y la posición de la cadena, la cual en este caso se encuentra en la posición cis.

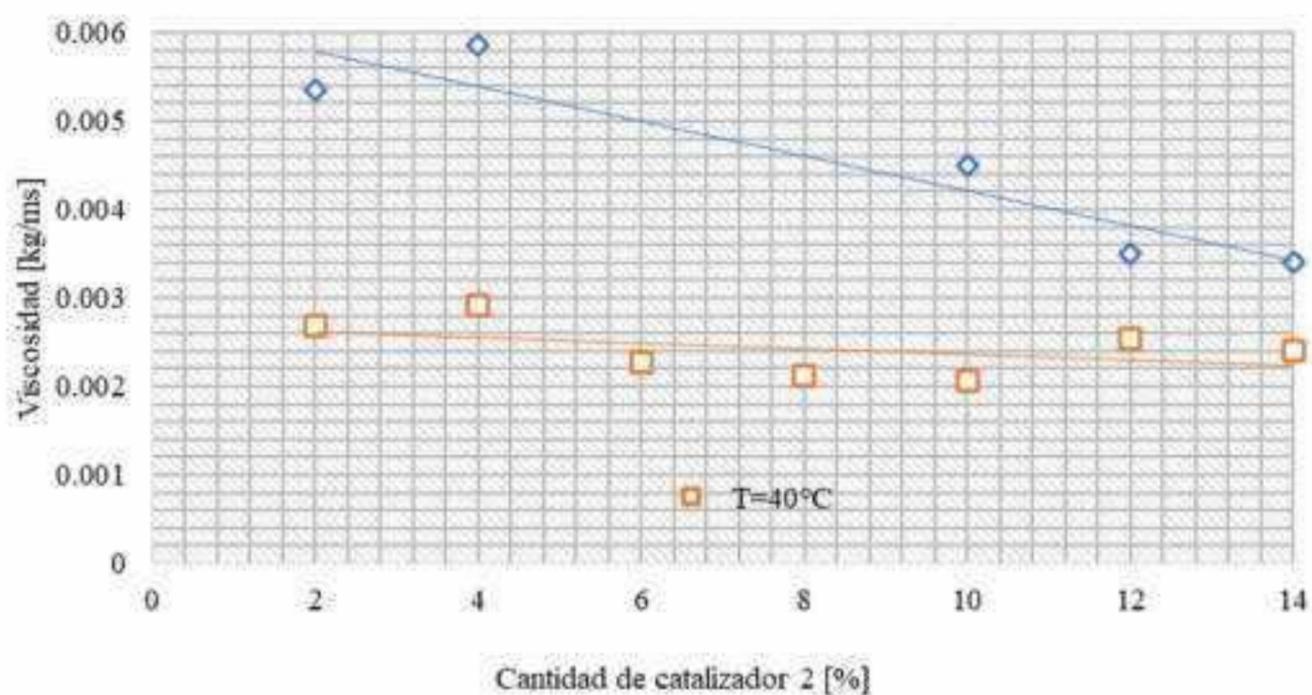


Figura 4.3.19 Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 2 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.19a se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido a 60 °C, empleando el catalizador 2, en función de la conversión.

Se observa que la viscosidad mínima del biodiésel medida a 25 °C fue de 0.0034 kg/ms a la conversión de 86.66%, y la viscosidad máxima fue de 0.0025 kg/ms con la conversión de 100%. La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C tuvo un valor mínimo de 0.0020 kg/ms a la conversión de 83.33%, y el valor máximo de 0.0029 kg/ms a la conversión de 100%.

Se observa que a la conversión de 96.66% y 100% se tienen viscosidades altas, lo cual podría ser una problemática si se trabaja a bajas temperaturas, ya que dificultaría la transferencia del combustible del tanque al motor, además de ser menor la cantidad de combustible que se quema.

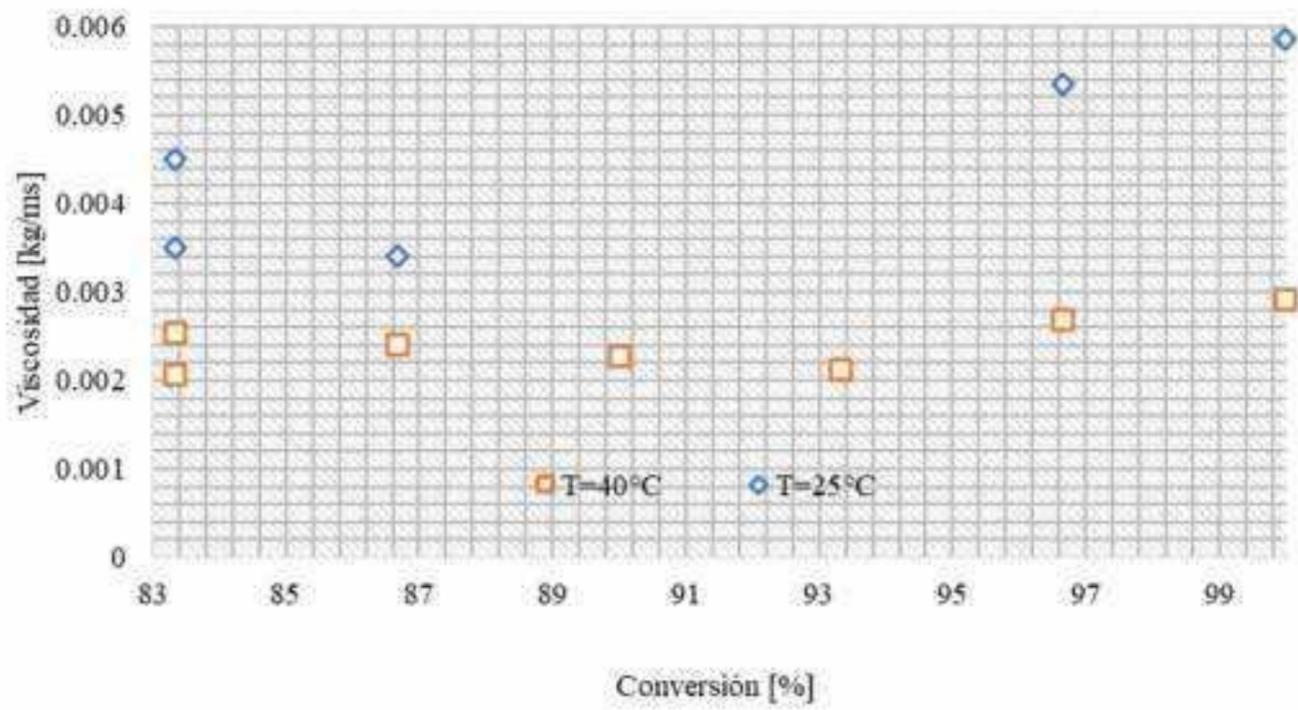


Figura 4.3.19a Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 2 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C

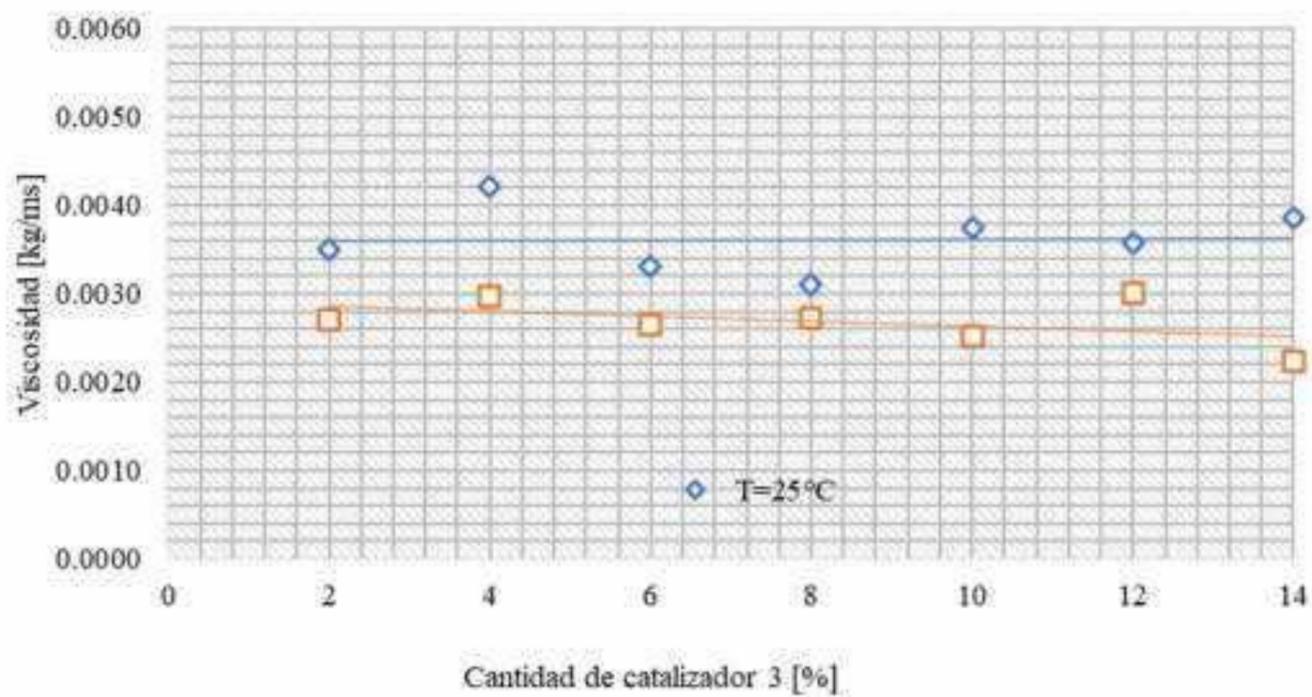


Figura 4.3.20 Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.20 se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido con diferentes cantidades del catalizador 3 a 45 °C.

Bajo estas condiciones se determinó que no hay influencia de la cantidad de catalizador, ya que los valores de la viscosidad del biodiésel medida a 25 °C se mantuvieron lineal excepto empleando 4, 6 y 8% de catalizador, estos valores se encuentran en el rango de 0.0031 a 0.0042 kg/ms.

La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C, tuvo un comportamiento prácticamente lineal excepto empleando 12% de catalizador, se observa que la viscosidad disminuye conforme aumenta la cantidad de catalizador, los valores de viscosidad se mantienen en el rango de 0.0022 a 0.0030 kg/ms.

Se reportaron valores de viscosidad por debajo de esperado, sin embargo, se espera una buena fluidez del bicomcombustible y buen quemado en el motor diésel por tener viscosidad baja muy cercana la del diésel de petróleo.

En la Figura 4.3.20a se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido a 45 °C, empleando el catalizador 3, en función de la conversión.

Se observa que la viscosidad mínima del biodiésel medida a 25 °C fue de 0.0033 kg/ms a la conversión de 90%, y la viscosidad máxima fue de 0.0042 kg/ms a la conversión de 80%. La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C tuvo un valor mínimo de 0.0022 kg/ms a la conversión de 90%, y el valor máximo de 0.0030 kg/ms a la conversión de 83.33%.

Se obtuvieron viscosidades superiores a menor conversión del biodiésel, y al ir aumentando la conversión la viscosidad disminuyó, por lo tanto, bajo estas condiciones, se puede decir que, a menor conversión, la viscosidad es más alta.

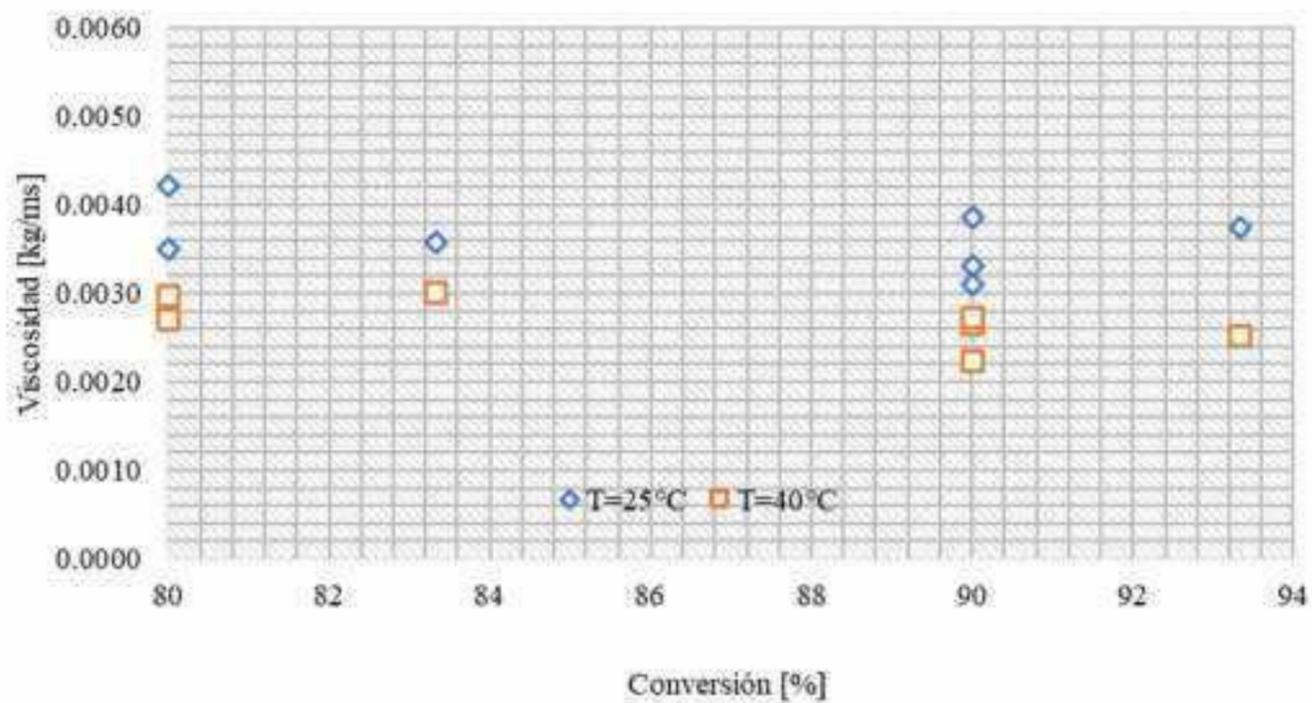


Figura 4.3.20a Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 45 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.21 se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido con diferentes cantidades del catalizador 3 a 50 °C.

La viscosidad del biodiésel medida a 25 °C se mantuvo en el rango de 0.0030 a 0.0039 kg/ms, al emplear 2% de catalizador la viscosidad es de 0.0038 kg/ms y disminuye al emplear más catalizador y con 10% de catalizador aumenta a su valor máximo de viscosidad.

La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C se encuentra en el rango de 0.0019 a 0.0027 kg/ms, bajo estas condiciones se determinó que si hay influencia de la cantidad de catalizador ya que la viscosidad aumenta conforme se emplea más catalizador, excepto con 12% de catalizador que hay una disminución de 0.0007 kg/ms con respecto al emplear 10% de catalizador. Los valores de viscosidad siguen estando por debajo del valor esperado, sin embargo, se asemeja al valor de la viscosidad del diésel convencional, esto es una ventaja ya que al tener viscosidades bajas el biocombustible puede fluir sin problema y no sería necesario agregar aditivos para mejorar el flujo del biocombustible.

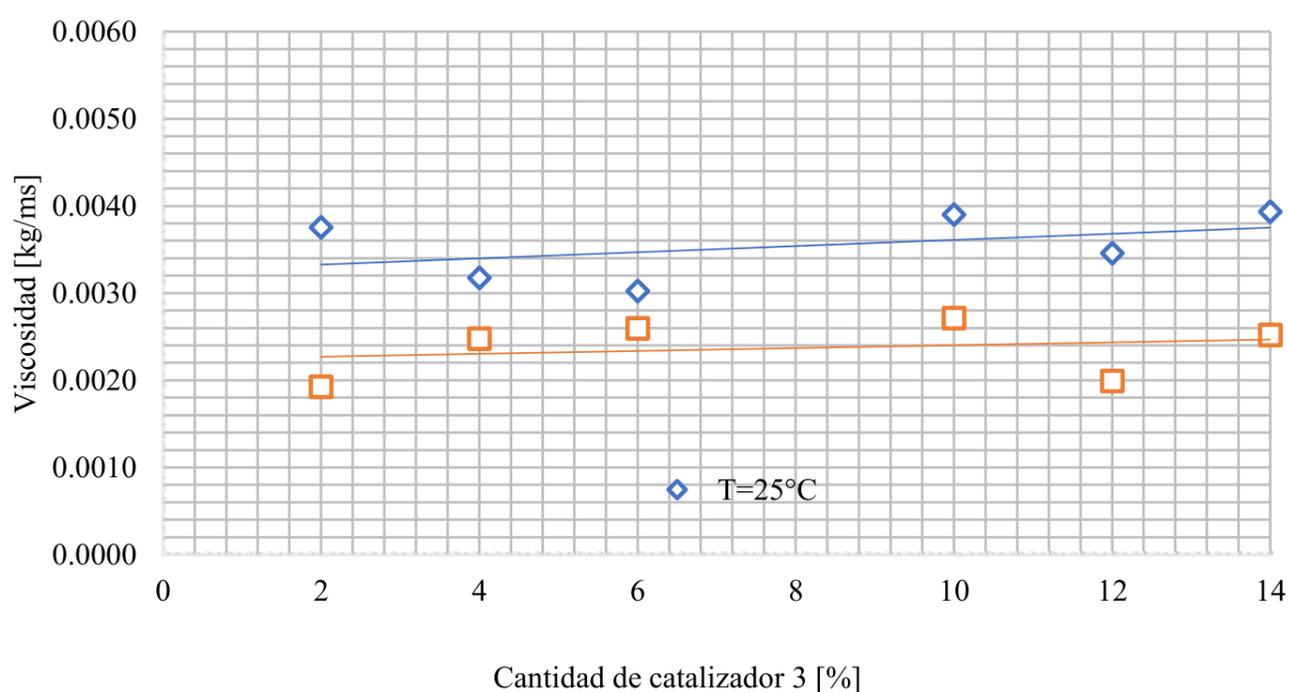


Figura 4.3.21 Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.21a se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido a 50 °C, empleando el catalizador 3, en función de la conversión.

Se observa que la viscosidad mínima del biodiésel medida a 25 °C fue de 0.0030 kg/ms a la conversión de 86.66%, y la viscosidad máxima fue de 0.0039 kg/ms a la misma conversión. La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C tuvo un valor mínimo de 0.0019 kg/ms a la conversión de 93.33%, y el valor máximo de 0.0027 kg/ms a la conversión de 86.66%.

El valor de la viscosidad disminuye al aumentar la conversión, por lo tanto, bajo estas condiciones, se puede decir que, a menor conversión, la viscosidad es más alta. La viscosidad del biodiésel es superior a la del diésel de petróleo y en este caso se observa que al obtener un biodiésel con mayor conversión su viscosidad es menor y se acerca a la viscosidad del diésel.

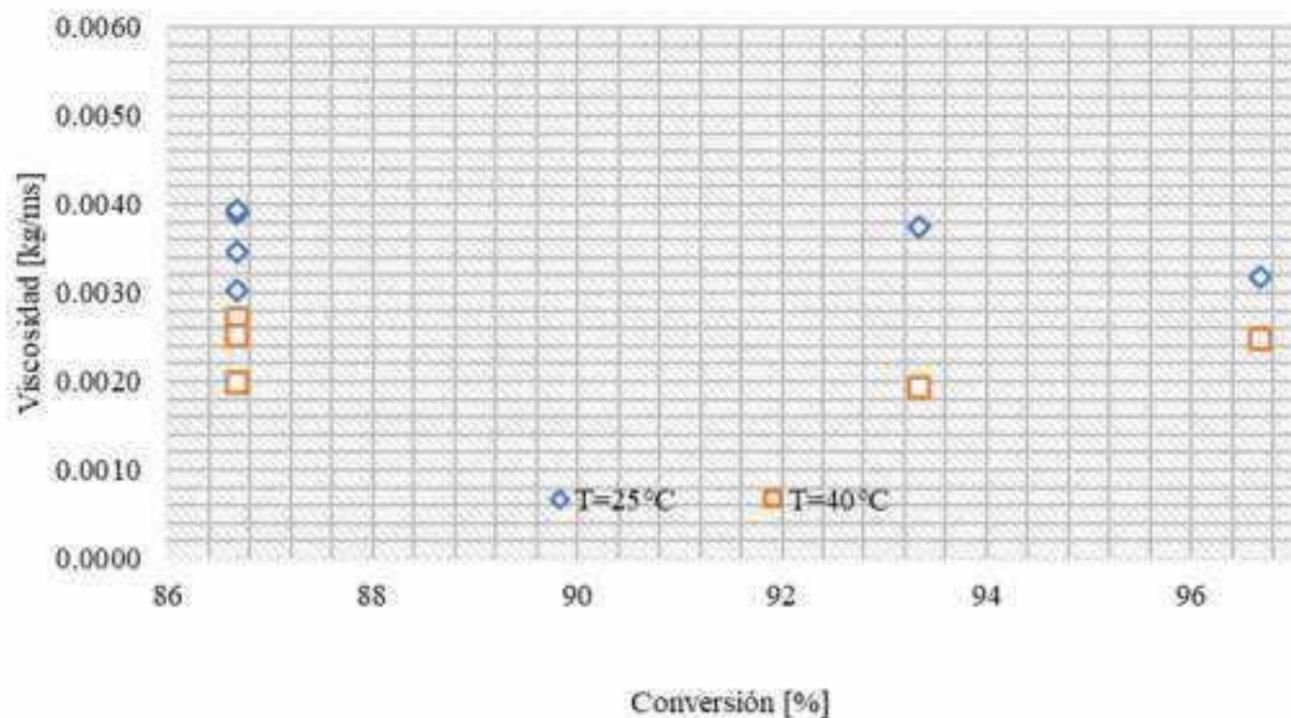


Figura 4.3.21a Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 50 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.22 se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido con diferentes cantidades del catalizador 3 a 60 °C, bajo estas condiciones se determinó que hay influencia de la cantidad de catalizador.

Se determinó que en la viscosidad del biodiésel medida a 25 °C existe influencia de la cantidad de catalizador ya que el valor de la viscosidad disminuye al aumentar la cantidad de catalizador, los valores se encuentran en el rango de 0.0035 a 0.0057 kg/ms, en este caso la viscosidad es alta empleando 2, 4 y 6% de catalizador. En este caso la viscosidad es más alta que en los anteriores, acercándose al valor de viscosidad del biodiésel que establece la literatura. El tener una viscosidad alta puede afectar su fluidez en bajas temperaturas, sin embargo, este problema puede solucionarse mediante adición de aditivos que mejoren la capacidad de flujo del biocombustible.

La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C se encuentra en el rango de 0.0017 a 0.0027 kg/ms. El comportamiento de la viscosidad es prácticamente lineal excepto empleando 2 y 4% de catalizador que es donde se obtuvo el valor máximo y mínimo de viscosidad respectivamente. En este caso se observa que, de igual manera al aumentar la cantidad de catalizador, la viscosidad disminuye.

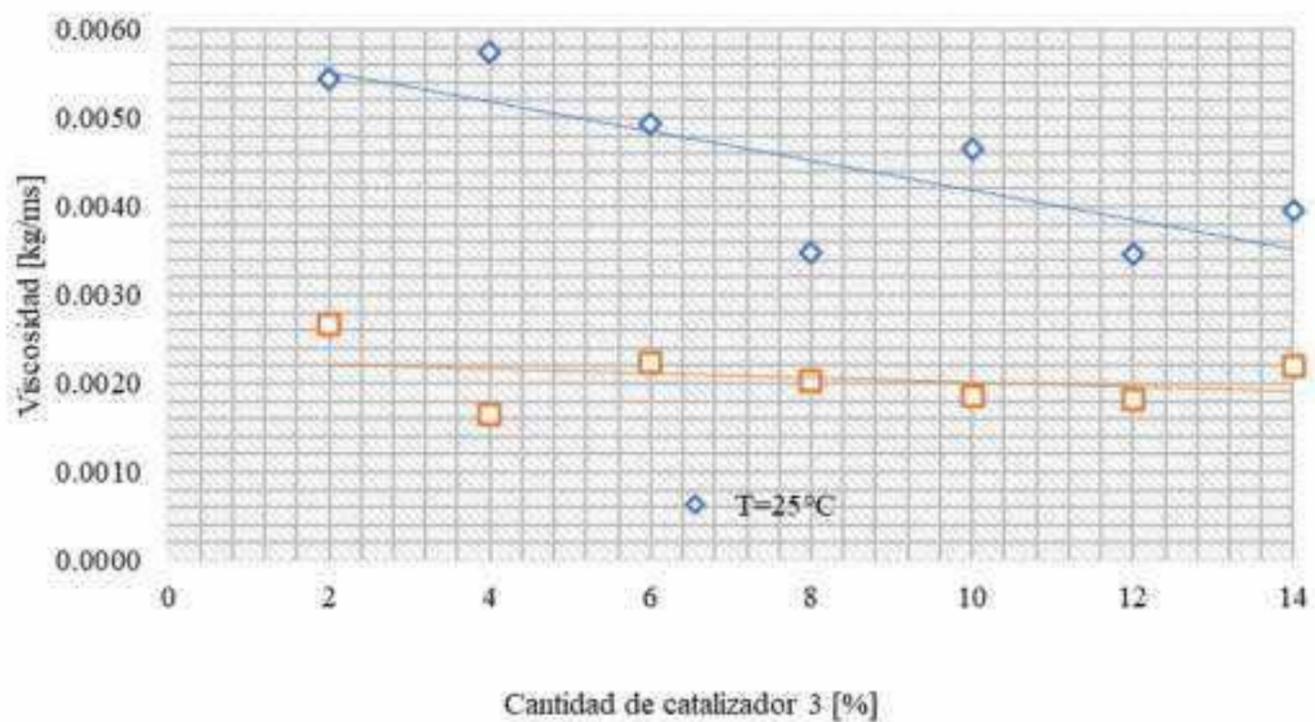


Figura 4.3.22 Viscosidad del biodiésel en función de la cantidad de catalizador, producido con el catalizador 3 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C

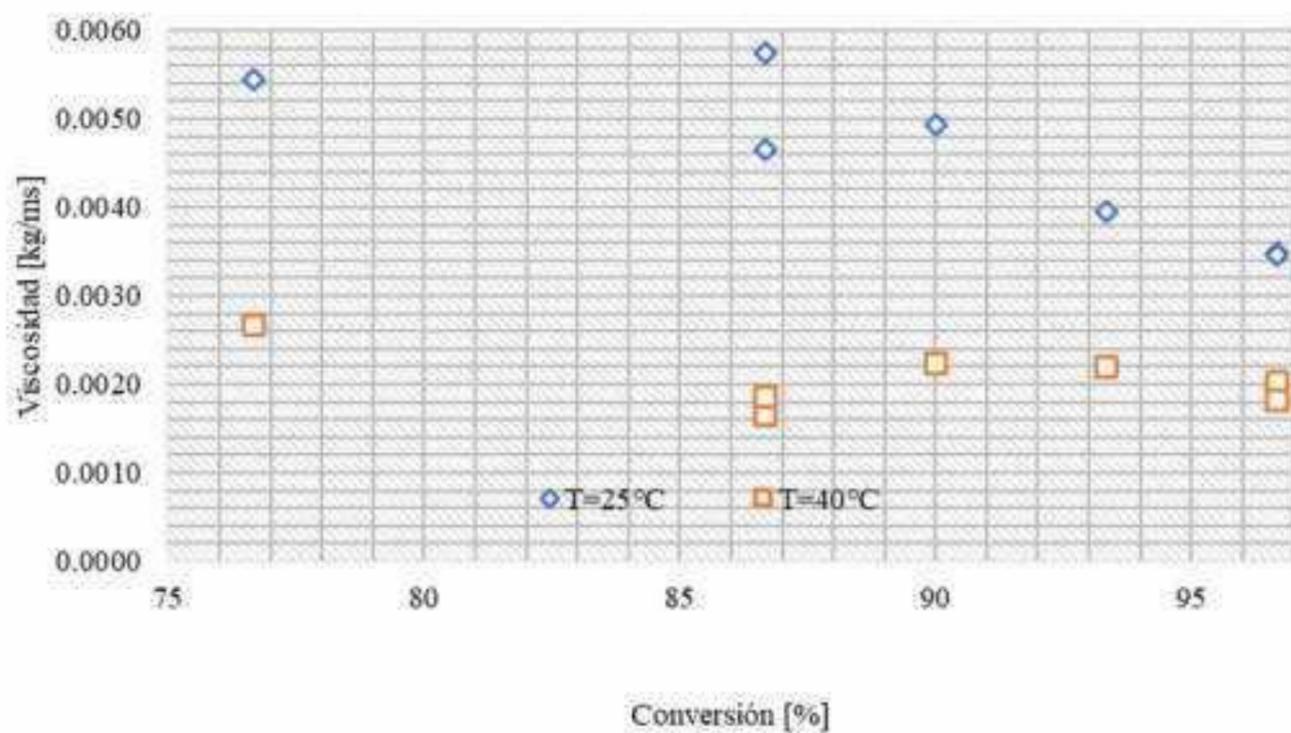


Figura 4.3.22a Viscosidad del biodiésel en función de la conversión, producido con el catalizador 3 a 60 °C, medido a 25 y 40 °C

En la Figura 4.3.22a se muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiésel producido a 60 °C, empleando el catalizador 3, en función de la conversión.

Se observa que la viscosidad mínima del biodiésel medida a 25 °C fue de 0.0035 kg/ms a la conversión de 96.66%, y la viscosidad máxima fue de 0.0057 kg/ms a la conversión de 86.66%. La

viscosidad del biodiésel disminuye al aumentar la conversión, por lo tanto, bajo estas condiciones, se puede decir que, a menor conversión, la viscosidad es más alta.

La viscosidad del biodiésel medida a 40 °C tuvo un valor mínimo de 0.0017 kg/ms a la conversión de 86.66%, y el valor máximo de 0.0027 kg/ms a la conversión de 76.66%. Se observaron viscosidades bajas debido a que la conversión es baja, provocando que predominen las propiedades del aceite en la viscosidad del biodiésel.

Índice de saponificación

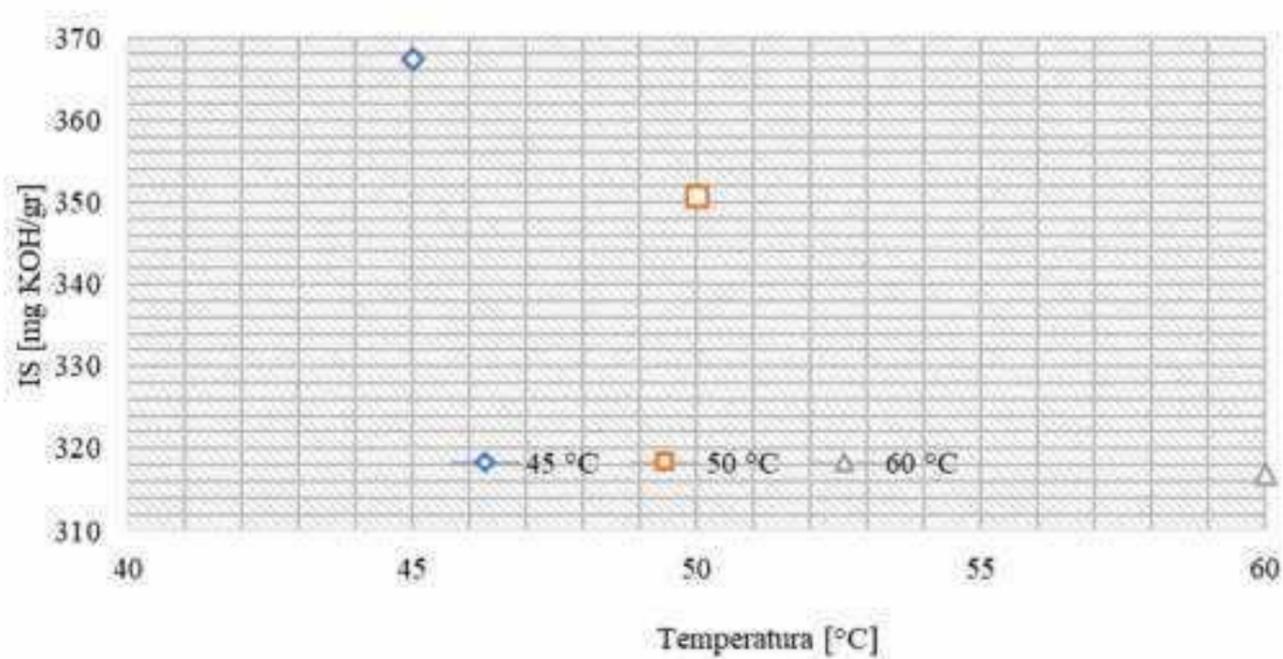


Figura 4.3.23 Índice de saponificación del biodiésel producido con 10 % de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

En la Figura 4.3.23 se muestra el índice de saponificación del biodiésel producido en la cinética de reacción, utilizando 10% de catalizador 1, a 45, 50 y 60 °C, y 3 horas de reacción.

El índice de saponificación del biodiésel para las temperaturas estudiadas a 45, 50 y 60 °C fue de 367.455 mg KOH/gr, 350.625 mg KOH/gr y 316.965 mg KOH/gr, respectivamente. El motivo de que a mayor temperatura de reacción disminuya el índice de saponificación es debido a la transformación que experimenta el aceite en la transesterificación.

Produciendo biodiésel con el catalizador 1, a la temperatura de 45 °C tiene un peso molecular mayor que a 60 °C, teniendo un peso molecular promedio del biodiésel de 162.6 gr/mol, esto indica que el biodiésel tiene cadenas entre 12-14 carbonos.

La composición tan variada del aceite de coco, donde predomina el ácido láurico y estérico provocan estas fluctuaciones y a menor temperatura las cadenas cortas de ácidos grasos participan más en la reacción que a temperatura de 60 °C

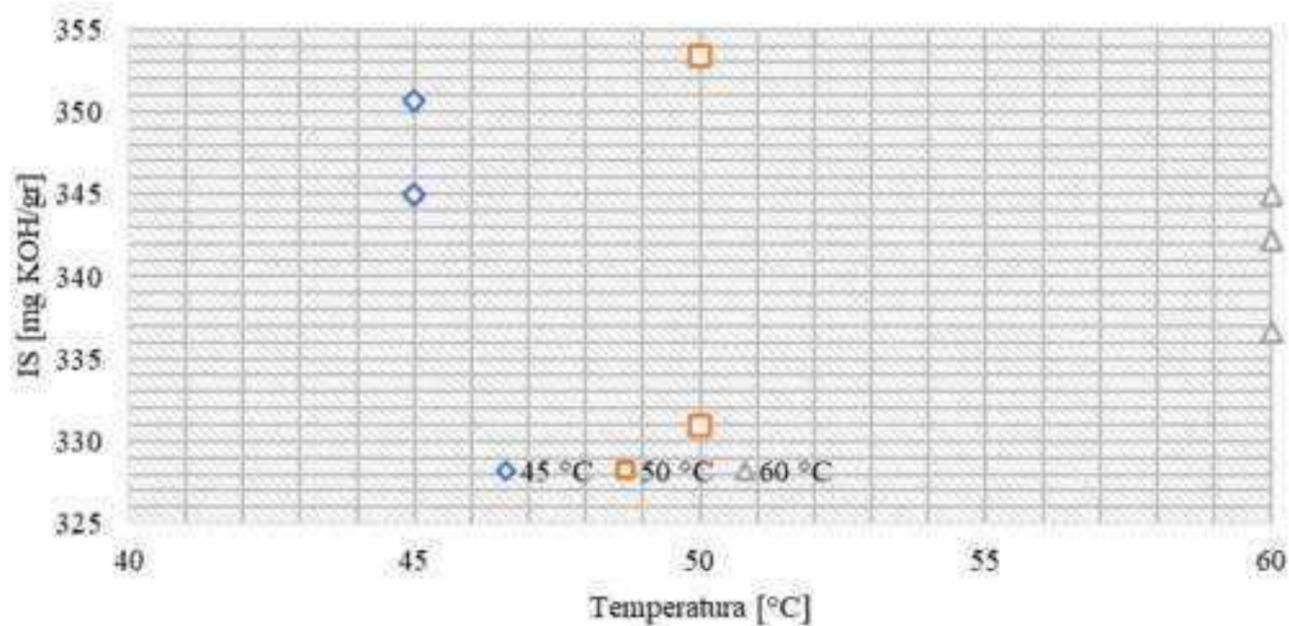


Figura 4.3.24 Índice de saponificación del biodiésel producido con 10% de los tres catalizadores a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

En la Figura 4.3.24 se muestra el índice de saponificación del biodiésel producido con 10% en peso de los tres catalizadores sintetizados, a 45, 50 y 60 °C, y 3 hrs de reacción.

El índice de saponificación del biodiésel más bajo fue de 330.99 mg KOH/gr empleando el catalizador 2 a 50 °C, y el más alto fue de 353.43 mg KOH/gr bajo las mismas condiciones.

Los valores de índice de saponificación del biodiésel son menores a 60 °C que a 45 °C.

A 45 °C se tiene un valor mínimo de 345.01 mg KOH/gr y el máximo de 350.625 mg KOH/gr, mientras que a 60 °C el valor mínimo fue de 336.6 mg KOH/gr y el máximo fue de 345.015 mg KOH/gr.

Para las temperaturas de reacción estudiadas de 45, 50 y 60 °C, se tuvo un índice de saponificación promedio de 347.82 mg KOH/gr, 342.21 mg KOH/gr y 341.275 mg KOH/gr, respectivamente.

Al obtener valores de índice de saponificación altos indica que el aceite de coco con el que se produjo el biodiésel es de alta pureza.

Índice de yodo

En la Figura 4.3.25 se muestra el índice de yodo del biodiésel producido en la cinética de reacción, utilizando 10% de catalizador 1, a 45, 50 y 60 °C, y 3 hrs de reacción.

Se observa que hay una dependencia lineal del índice de yodo con la temperatura de reacción y es inversamente proporcional, a mayor temperatura el índice de yodo es menor, obteniendo un índice de yodo de 1.103 gr I₂/100 gr a 45 °C, 0.85 gr I₂/100 gr a 50 °C y 0.24 gr I₂/100 gr a 60 °C.

Comparado con los valores que establece la literatura, los índices de yodo del biodiésel obtenidos son bajos, esto indica poca probabilidad de degradarse disminuyendo la posibilidad de que baje la calidad de lubricación del biodiésel. Cuenta con menos números de enlaces dobles, lo que significa poca insaturación.

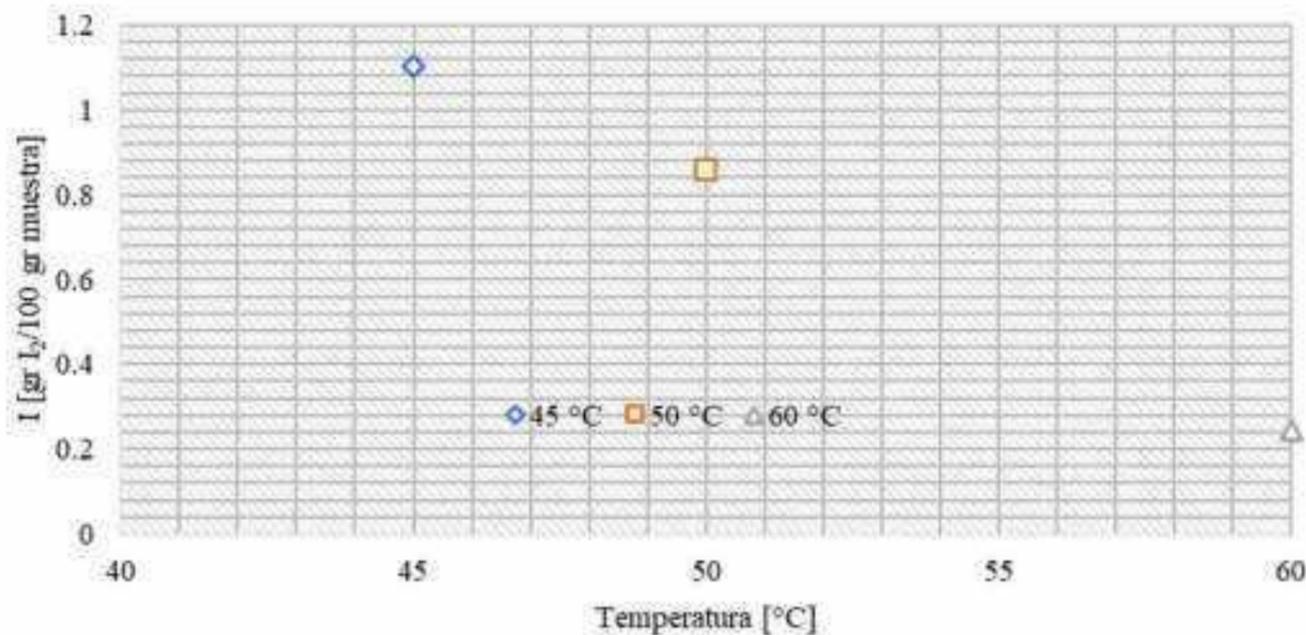


Figura 4.3.25 Índice de yodo del biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

En la Figura 4.3.26 se muestra el índice de yodo del biodiésel producido con 10% de los tres catalizadores, a 45, 50 y 60 °C, y 3 hrs de reacción.

El índice de yodo del biodiésel disminuye al incrementar la temperatura, empleando los tres catalizadores. Los valores de índice de yodo se encuentran en el rango de 0.85 a 1.26 gr I₂/100 gr a 45 °C, siendo el más bajo empleando el catalizador 2 y el más alto empleando el catalizador 3.

A 50 °C el valor de índice de yodo mínimo fue de 0.776 gr I₂/100 gr empleando el catalizador 1 y el máximo fue de 1.10 gr I₂/100 gr empleando el catalizador 2.

A 60 °C los valores de índice de yodo se encuentran en el rango de 0.122 a 0.776 gr I₂/100 gr, obteniendo el valor más bajo empleando el catalizador 1 y el valor más alto empleando el catalizador 3.

Para las temperaturas de reacción estudiadas de 45, 50 y 60 °C, se tuvo un índice de yodo promedio de 1.0762 gr I₂/100 gr, 1.879 gr I₂/100 gr y 0.4766 gr I₂/100 gr, respectivamente.

El obtener valores de índice de yodo bajos significa que el aceite de coco con el que se produjo el biodiésel es rico en ácidos grasos saturados, debido a su poca insaturación.

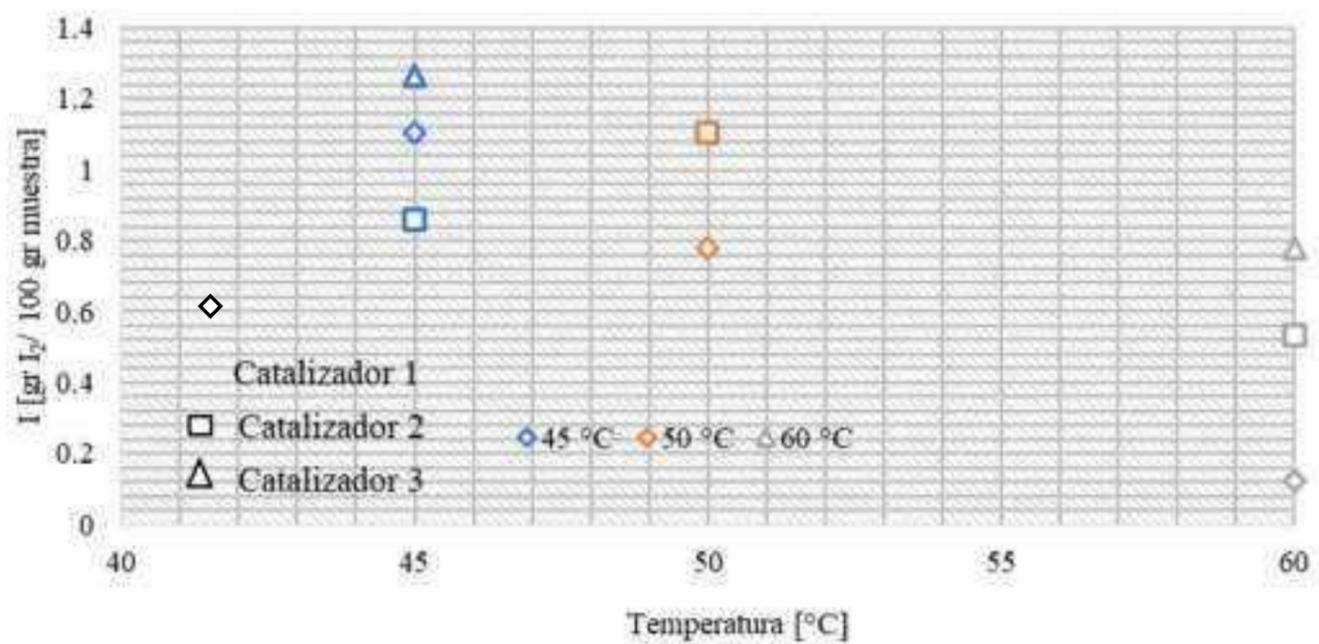


Figura 4.3.26 Índice de yodo del biodiésel producido con 10% de los tres catalizadores a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

Índice de acidez

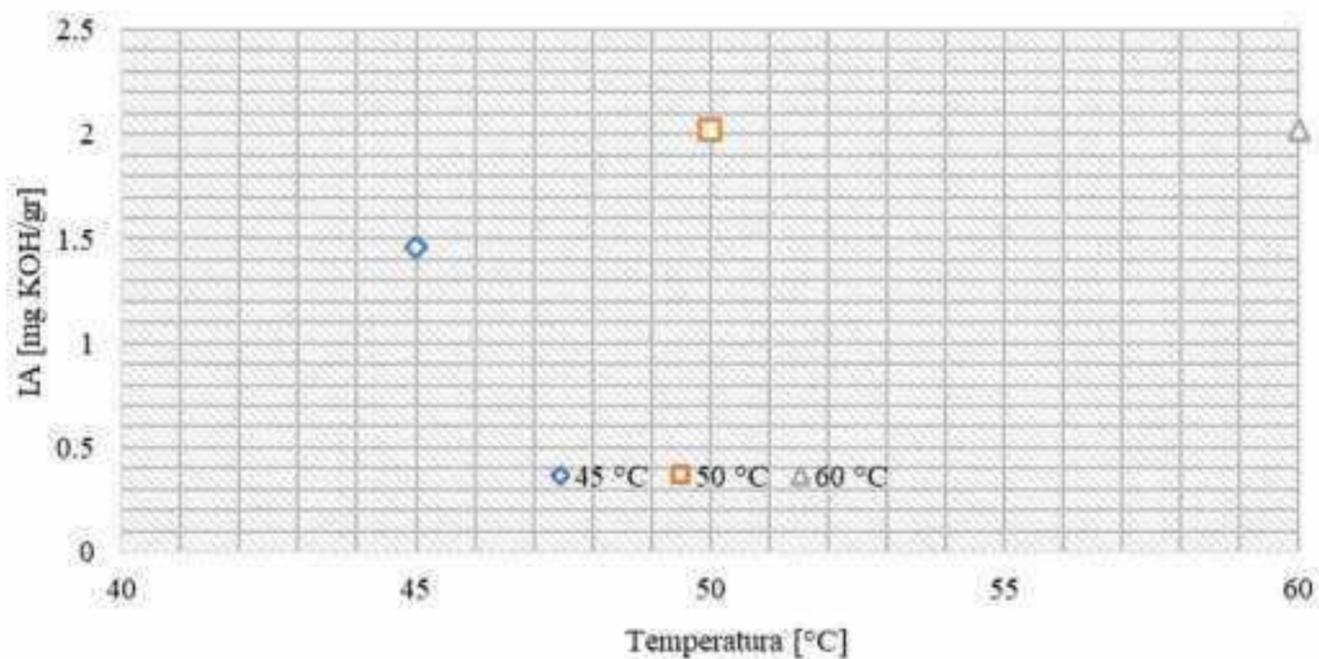


Figura 4.3.27 Índice de acidez del biodiésel producido con 10 % de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

En la Figura 4.3.27 se muestra el índice de acidez del biodiésel producido en la cinética de reacción, utilizando 10% en peso del catalizador 1, a 45, 50 y 60 °C, y 3 hrs de reacción.

Se obtuvo un índice de acidez del biodiésel de 1.45 a 45 °C y de 2.01 mg KOH/gr a 50 y 60 °C. El incremento del índice de acidez es lineal conforme aumenta la temperatura.

El valor que se acerca al que establece la literatura fue el obtenido a 45 °C, y debido a que se obtuvieron valores de índice de acidez altos, esto puede provocar el aumento en la degradación del biodiésel provocando corrosión y ataque a los inyectores.

En la Figura 4.3.28 se muestra el índice de acidez del biodiésel producido con 10% de catalizador 1, a 45, 50 y 60 °C, y 3 hrs de reacción.

Se observa que a 45 °C con una conversión del 100% se tiene un índice de acidez de 1.2342 mg KOH/gr, mientras que a 50 y 60 °C con una conversión de 90 y 93.33% respectivamente, se obtuvo un índice de acidez de 2.3562 mg KOH/gr.

El índice de acidez del biodiésel máximo se encuentra entre 0.8 mg KOH/gr, lo cual indica que a 45 °C se obtiene biodiésel de mejor calidad, ya que se obtiene un índice de acidez bajo con una mayor conversión, por lo tanto, el resultado obtenido es muy favorable indicando una transesterificación exitosa, ya que se eliminó gran parte de los ácidos grasos libres. Presenta 34% de desviación en comparación con el índice de acidez que establece la literatura.

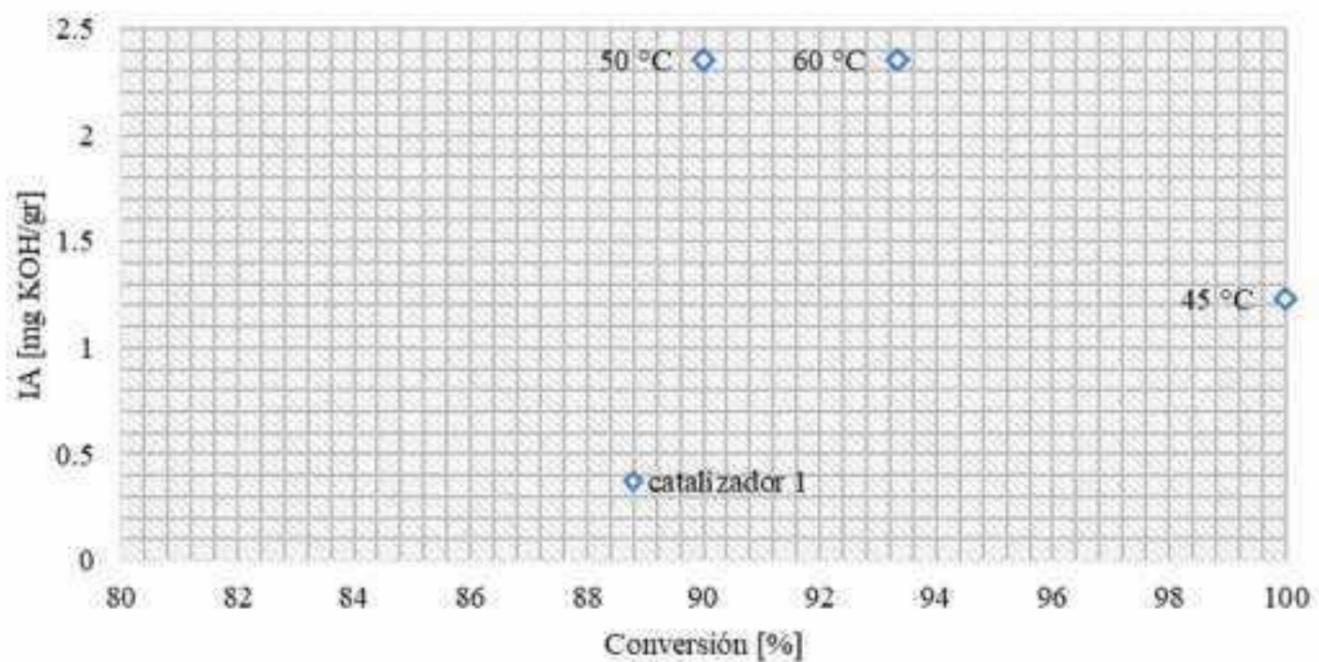


Figura 4.3.28 Índice de acidez del biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

En la Figura 4.3.29 se muestra el índice de acidez del biodiésel producido con 10% de catalizador 2, a 45, 50 y 60 °C, y 3 hrs de reacción.

Se observa que a 45 °C con una conversión del 93.33% se tiene un índice de acidez del biodiésel de 1.122 mg KOH/gr, mientras que a 50 °C con una conversión de 100% se obtuvo un índice de acidez del biodiésel de 1.3464 mg KOH/gr y a 60 °C con una conversión de 83.33% se obtuvo un índice de acidez del biodiésel de 1.4586 mg KOH/gr.

Empleando el catalizador 2 a las tres temperaturas se tuvo un índice de acidez menor que el índice de acidez del aceite de coco, sin embargo, a 45 °C se tuvo el índice de acidez más bajo, lo que indica que bajo estas condiciones se tiene un biodiésel de mejor calidad. Sin embargo, se esperaba que el índice de acidez no superara los 0.5 mg KOH/gr para evitar la degradación del biocombustible y la presencia de ácidos inorgánicos.

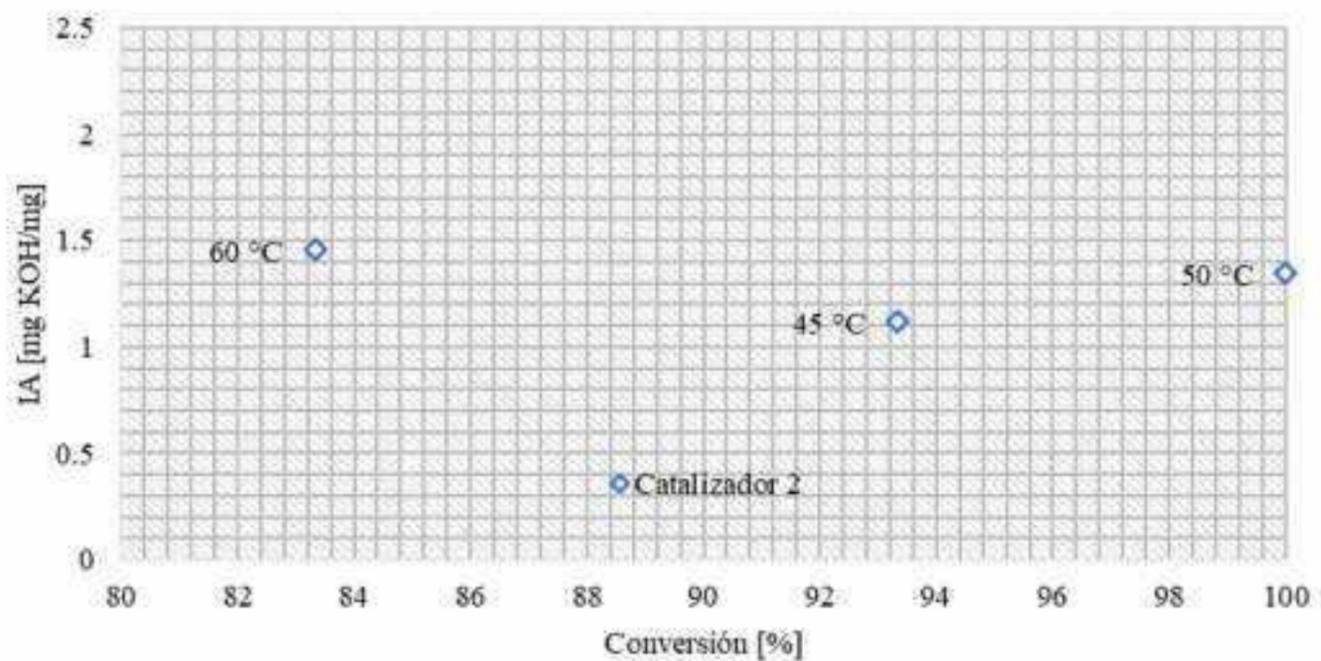


Figura 4.3.29 Índice de acidez del biodiésel producido con 10% de catalizador 2 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

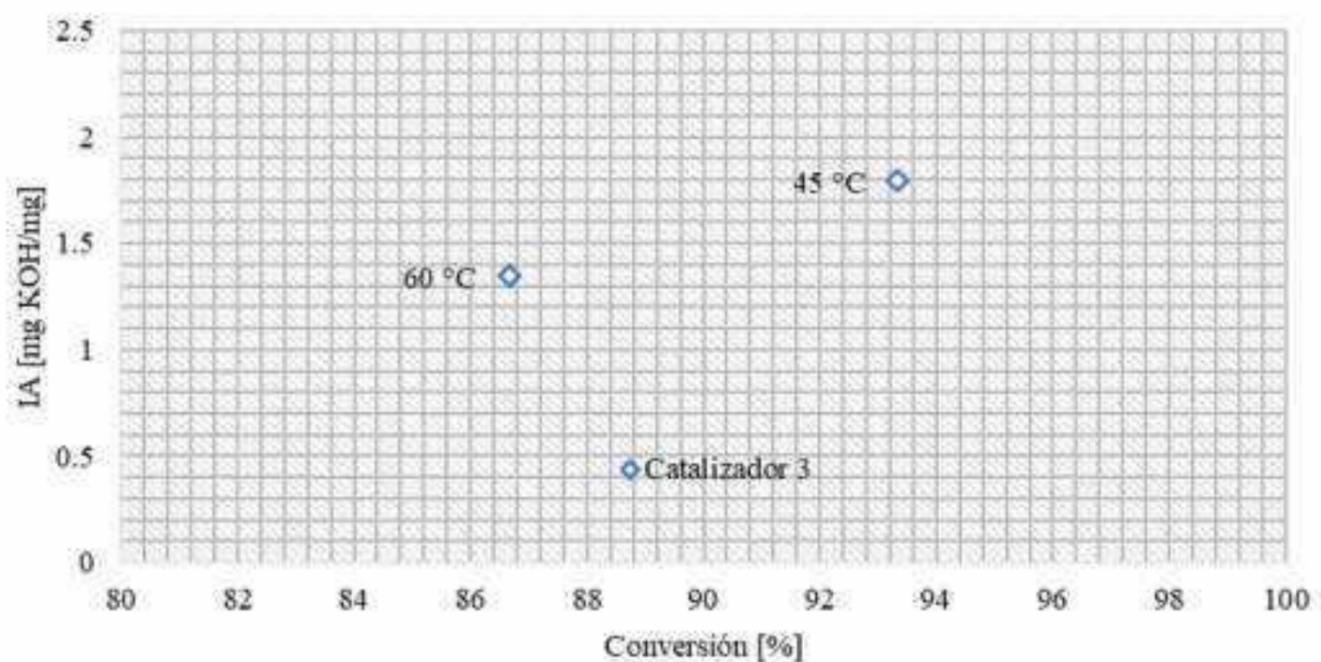


Figura 4.3.30 Índice de acidez del biodiésel producido con 10% de catalizador 3 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

En la Figura 4.3.30 se muestra el índice de acidez del biodiésel producido con 10% en peso de catalizador 3, a las temperaturas de reacción de 45, 50 y 60 °C, y un tiempo de reacción de 3 horas. Se observa que a 45 °C con una conversión del 93.33% se tiene un índice de acidez de 1.7952 mg KOH/gr, mientras que a 60 °C con una conversión de 86.66% se obtuvo un índice de acidez de 1.3464 mg KOH/gr. Empleando el catalizador 3, el mejor valor obtenido de índice de acidez fue a 60 °C ya que a 45 °C el índice de acidez es muy elevado, lo que indica que el biodiésel producido a

esa temperatura no es de buena calidad aunque tuvo mejor conversión que el biodiésel obtenido a 60 °C, el índice de acidez supera el límite del valor esperado.

Punto de nube

La Figura 4.3.31 muestra el punto de nube del biodiésel producido en la cinética de reacción, utilizando 10% en peso del catalizador 1, a las temperaturas de reacción de 45, 50 y 60 °C, y un tiempo de reacción de 3 horas.

Se tuvo un punto de nube promedio de 18.73 °C, este valor es motivado por la presencia de los ácidos grasos libres. La mejor condición fue a 50 °C ya que se tuvo el valor de 18.1 °C que fue el más bajo de punto de nube bajo estas condiciones, ya que cuanto más baja sea la temperatura, habrá mayor formación de cristales y el biodiésel se acercara más a su punto de congelación y a la temperatura en la que dejara de fluir.

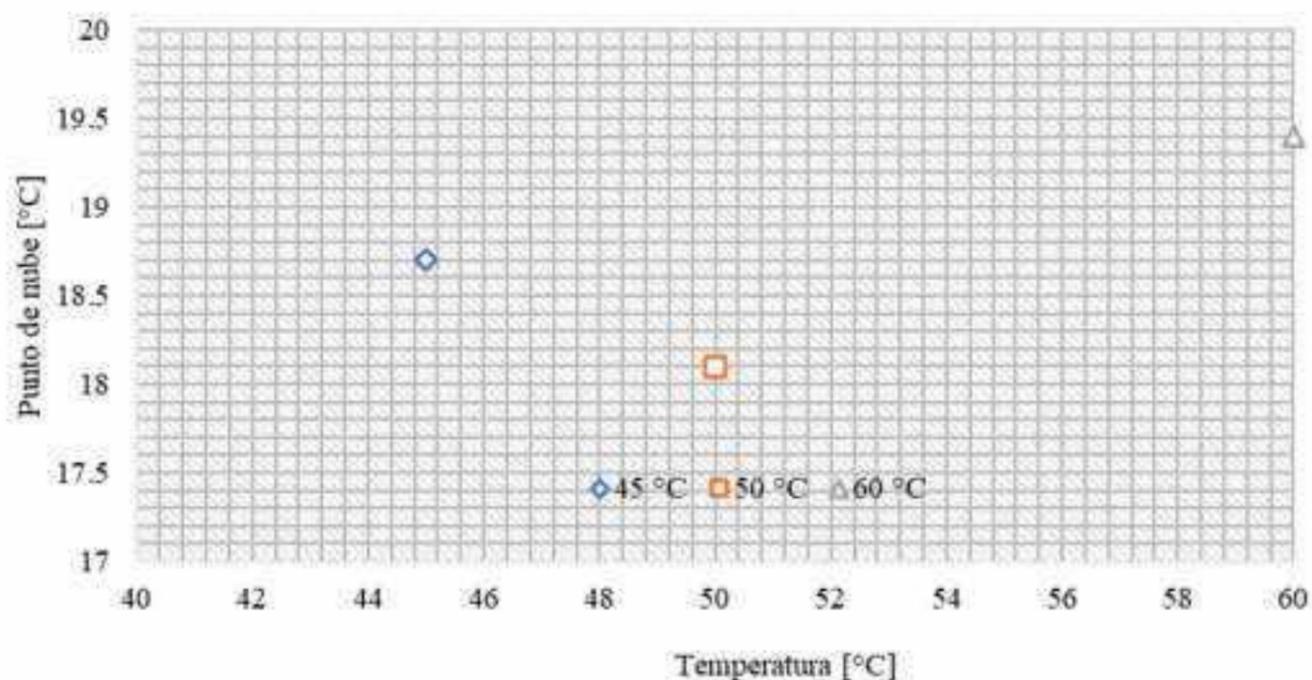


Figura 4.3.31 Punto de nube del biodiésel producido con 10 % de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

En la Figura 4.3.32 se muestra el punto de nube del biodiésel producido con 10% de catalizador 1, a 45, 50 y 60 °C, y 3 hrs de reacción.

Se observa que los puntos de nube son altos, teniendo 17.9 °C con la muestra de biodiésel producido a 45 °C, 18.2 °C con la muestra de biodiésel producido a 50 °C y 17.3 °C con la muestra de biodiésel producido a 60 °C. El punto de nube más bajo se obtuvo a 60 °C con una conversión de 93.33%, sin embargo, estos valores siguen siendo altos ya que a esa temperatura se empiezan a formar cristales provocando que el biodiésel se congele y fluya más lento de lo que debería.

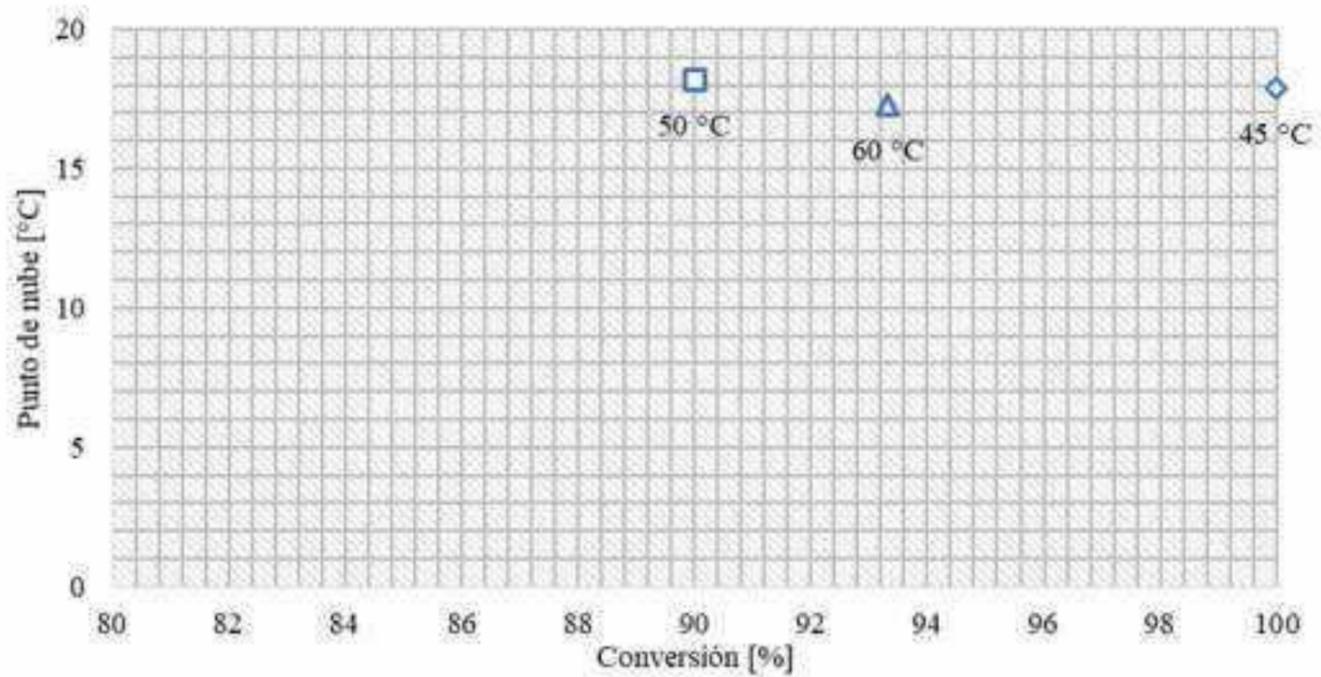


Figura 4.3.32 Punto de nube del biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

En la Figura 4.3.33 se muestra el punto de nube del biodiésel producido con 10% de catalizador 2, a 45, 50 y 60 °C, y 3 hrs de reacción. Se observa que las muestras de biodiésel producido a 45 y 60 °C tienen un punto de nube alto de 18.4 y 18.6 °C respectivamente, en cambio el punto de nube del biodiésel producido a 50 °C fue de 7.7 °C a la conversión de 100%, este valor fue el mejor de todos los experimentos ya que entre más bajo sea el punto de nube el motor puede trabajar con el bicomcombustible a temperaturas bajas evitando que fluya más lento, sin embargo, el punto de nube del biodiésel es mucho más alto que el del petrodiesel

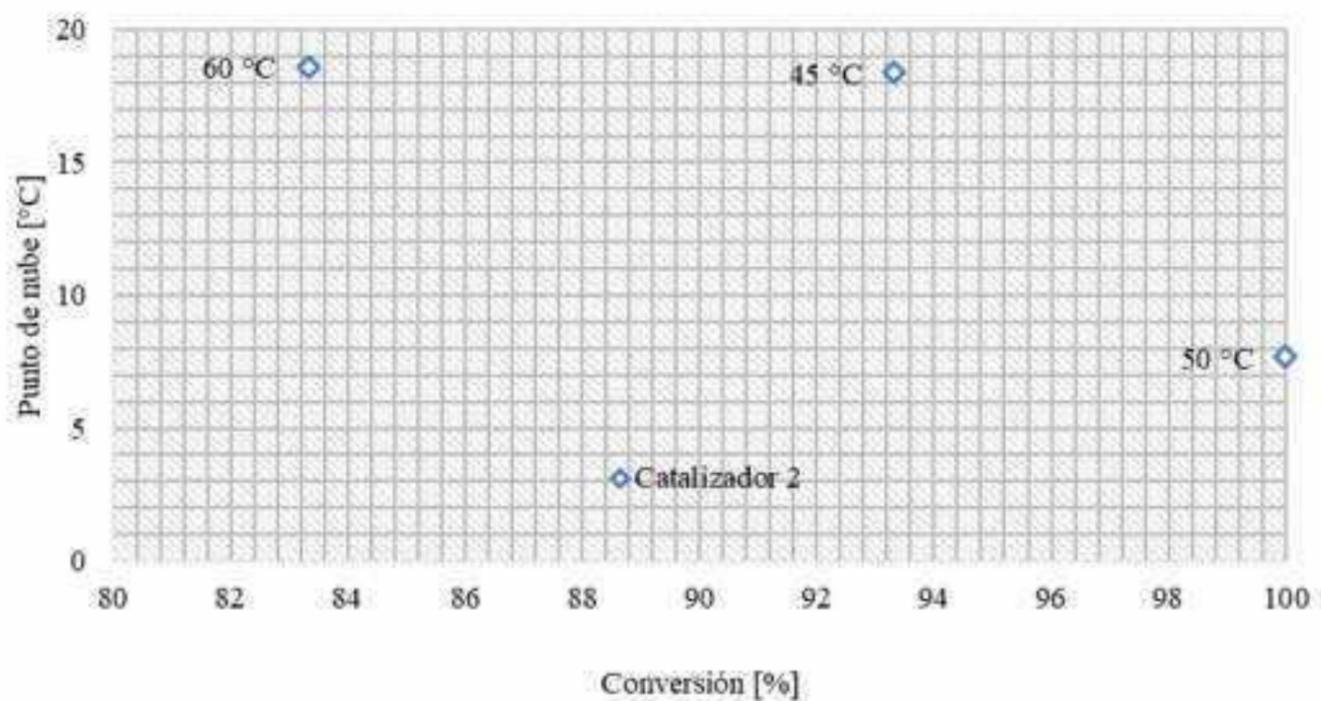


Figura 4.3.33 Punto de nube del biodiésel producido con 10% de catalizador 2 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

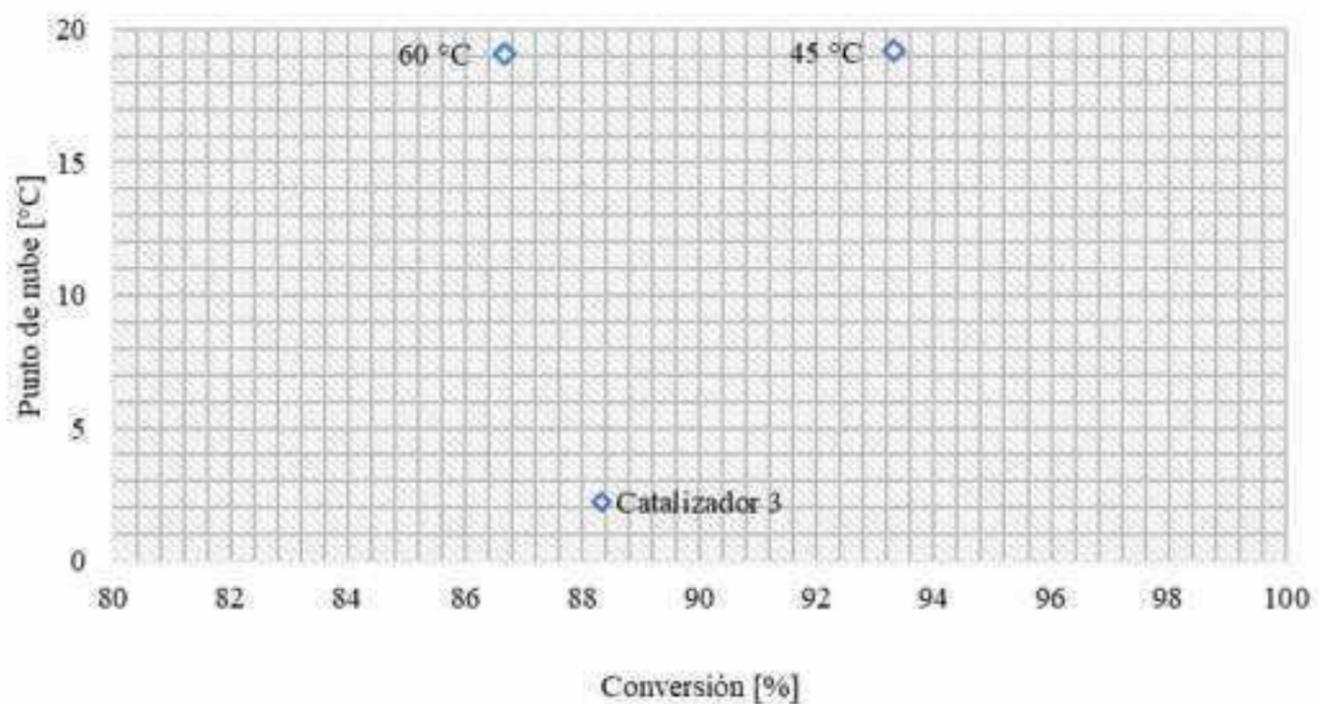


Figura 4.3.34 Punto de nube del biodiésel producido con 10% de catalizador 3 a 45, 50 y 60 °C y 3 hrs de reacción

En la Figura 4.3.34 se muestra el punto de nube del biodiésel producido con 10% de catalizador 3, a 45, 50 y 60 °C, y 3 hrs de reacción. Se observa que el punto de nube del biodiésel producido a 45 y 60 °C es prácticamente el mismo, teniendo un punto de nube de 19.2 y 19.1 °C respectivamente. Se obtuvo un punto de nube más bajo a menor conversión, el valor sigue siendo alto y con posibilidad de que el biocombustible se congele y deje de fluir,

4.4 Cinética de reacción

En la Figura 4.4.1 se muestra la evolución de la conversión en el tiempo para la reacción, empleando 10% en peso de catalizador 1 a las temperaturas de reacción de 45, 50 y 60°C. En el tiempo de 0.5 hrs a 45 y 50°C se observa un incremento de 83.33% y a 60°C un incremento de 90%. Después de 1 hr de reacción a 45°C y 60°C se mantuvo constante, mientras que a 50 °C incrementó 3%. En 1.5 hrs de reacción a 50°C la conversión se mantiene constante y a 60 °C incrementó 3%. Después de 2 hrs de reacción a 45 y 60 °C la conversión se mantuvo constante, a 50 °C incrementó 7%. En 2.5 hrs de reacción a 45 °C incrementó 04%, a 50 °C se mantuvo constante y a 60 °C incrementó 3%. Al transcurrir el tiempo el comportamiento es lineal hasta las 3 hrs de reacción, se tuvo una conversión final de 93.33% a 45 °C y de 96.66% a 50 y 60 °C.

Se observa que conforme transcurre el tiempo de reacción, la conversión aumenta, sin embargo, el cambio se empieza a notar después de una hora de haber iniciado la reacción. La conversión a biodiésel que muestra un comportamiento más lineal fue el producido a 45 °C. Después de 2 horas de reacción se alcanzó la conversión de 93.33% a 50 y 60 °C, para lo cual se recomienda parar ahí la reacción para tener un ahorro en el consumo energético ya que terminada la reacción se tiene solo una diferencia máxima de 3% en la conversión.

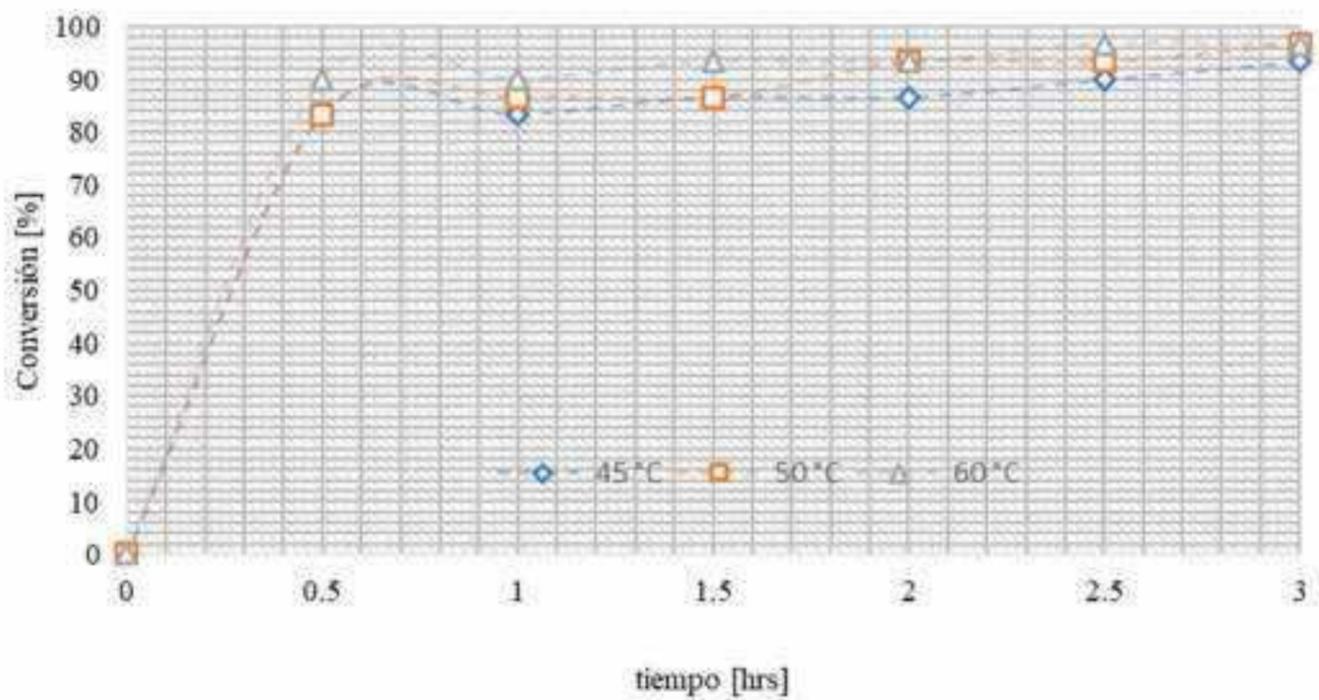


Figura 4.4.1 Evolución de la conversión en el tiempo para la reacción, empleando 10% en peso de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C

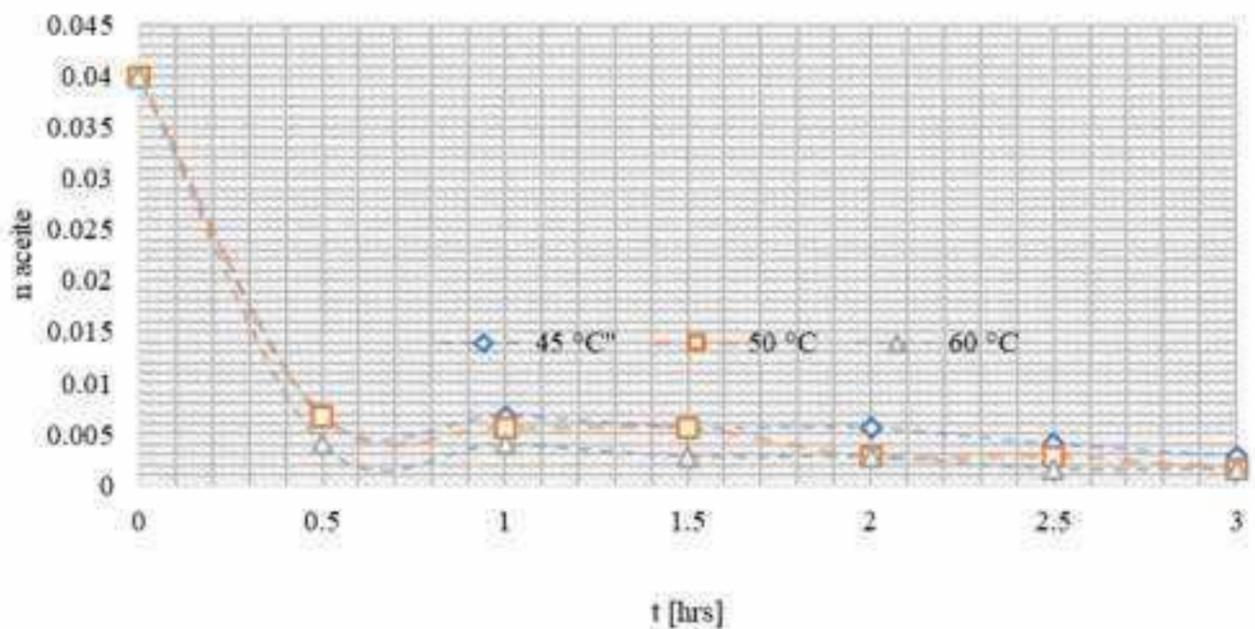


Figura 4.4.2 Evolución de moles aceite en el tiempo a 45, 50 y 60 °C empleando el catalizador 1

En la Figura 4.4.2 se observa la evolución de moles de aceite en el tiempo a 45, 50 y 60°C empleando el catalizador 1. Al inicio de la reacción en el tiempo cero se tienen 0.039 moles de aceite a 45, 50 y 60 °C. Transcurridas 0.5 hrs de reacción a 45 y 50 °C se tiene una disminución de 0.033 moles de aceite y a 60 °C disminuyó 0.035 moles de aceite. A 45 °C los moles de aceite disminuyen linealmente a 0.036 después de 3 hrs de reacción. A 50 °C los moles de aceite permanecen constantes

hasta alcanzar 2 hrs de reacción se tuvo una disminución de 0.04 moles que permanecen constantes en 2.5 hrs de reacción, a 3 hrs tuvo una disminución de 0.036 moles de aceite. A 60 °C la disminución de moles de aceite permanece constante a 1.5 y 2 hrs de reacción, en el intervalo de 2.5 a 3 horas se mantiene constante 0.037 moles de aceite.

Se observa que a 60 °C la disminución de moles de aceite es mayor que a 45 y 50 °C en el mismo tiempo de reacción y conforme aumenta el tiempo de reacción la disminución de moles de aceite es más grande.

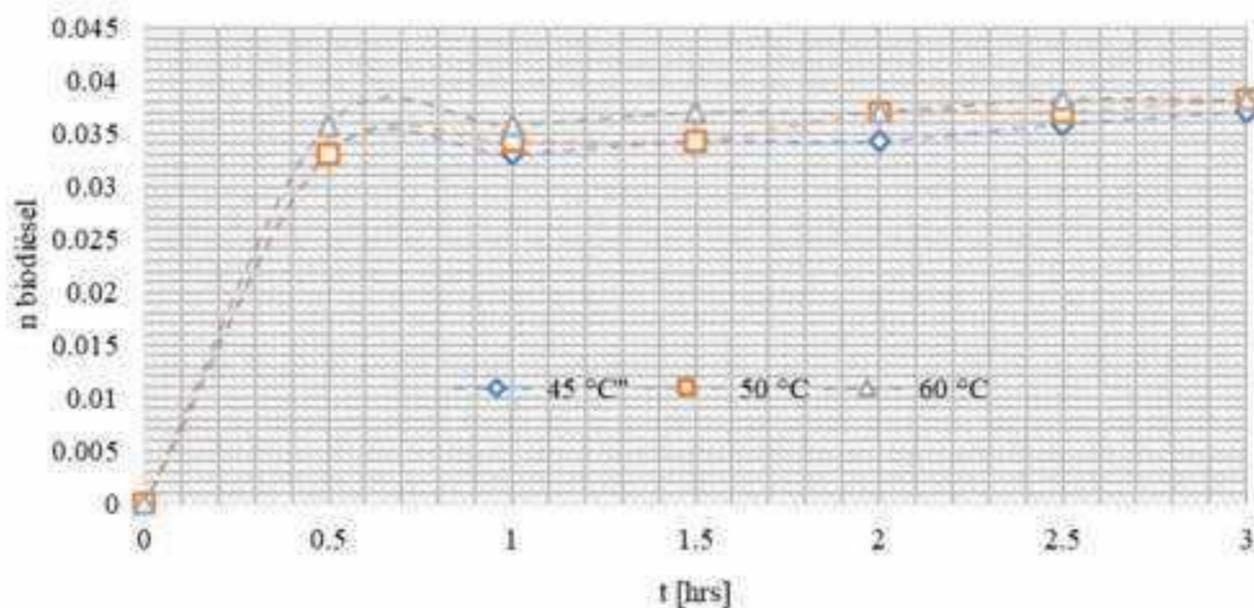


Figura 4.4.3 Evolución de moles de biodiésel en el tiempo a 45, 50 y 60 °C empleando el catalizador 1

En la Figura 4.4.3 se muestra la evolución de moles de biodiésel en el tiempo a 45, 50 y 60 °C empleando el catalizador 1. En el tiempo cero se tienen cero moles de biodiésel a 45, 50 y 60 °C, después de 0.5 hrs de reacción los moles de biodiésel aumentaron 0.33 a 45 y 50 °C, mientras que a 60 °C hubo un aumento de 0.35 moles de biodiésel. En 1 hr de reacción a 45 y 60 °C los moles de biodiésel permanecen constantes. A 50 °C aumentó a 0.34 moles. En 1.5 hrs de reacción los moles de biodiésel se mantienen en 0.34 moles a 45 y 50 °C. En 2 hrs de reacción a 45 °C se mantuvo el número de moles de biodiésel, mientras que a 50 °C aumentó a 0.037 moles de biodiésel. Después de las 3 hrs de reacción se tuvo 0.037 y 0.038 moles de biodiésel a 45 y 50 °C respectivamente. A 60 °C se mantiene constante el incremento de moles de biodiésel de 0.5 a 1 hr con 0.035 moles, de 1.5 a 2 hrs con 0.037 moles y de 2.5 a 3 hrs con 0.038 moles de biodiésel. Se observa que a 60 °C aumentaron los moles de biodiésel más que a 45 y 50 °C al mismo tiempo de reacción, lo que indica que entre más alta sea la temperatura de reacción, la conversión a biodiésel sucede en menor tiempo.

En la Figura 4.4.4 se muestra la comparación de moles de aceite y de biodiésel a los diferentes tiempos de reacción a 45 °C. Al inicio de la reacción se tienen cero moles de biodiésel y 0.039 moles de aceite, conforme pasa el tiempo en la reacción los moles de biodiésel aumentan y los moles de aceite disminuyen. En el rango de 0.5 a 1 hrs de reacción los moles permanecen constantes, se tienen 0.006 moles de aceite y 0.033 moles de biodiésel. En el rango de 1.5 a 2 hrs de reacción los moles se mantienen en 0.005 moles de aceite y 0.034 moles de biodiésel. A 2.5 hrs de reacción se obtuvieron 0.003 moles de aceite y 0.035 moles de biodiésel. Alcanzando las 3 hrs de reacción, se tuvieron 0.002 moles de aceite y 0.037 moles de biodiésel. Los moles de aceite disminuyen y los moles de biodiésel aumentan al aumentar el tiempo de reacción, esto significa que conforme transcurre el tiempo la conversión a biodiésel es mayor.

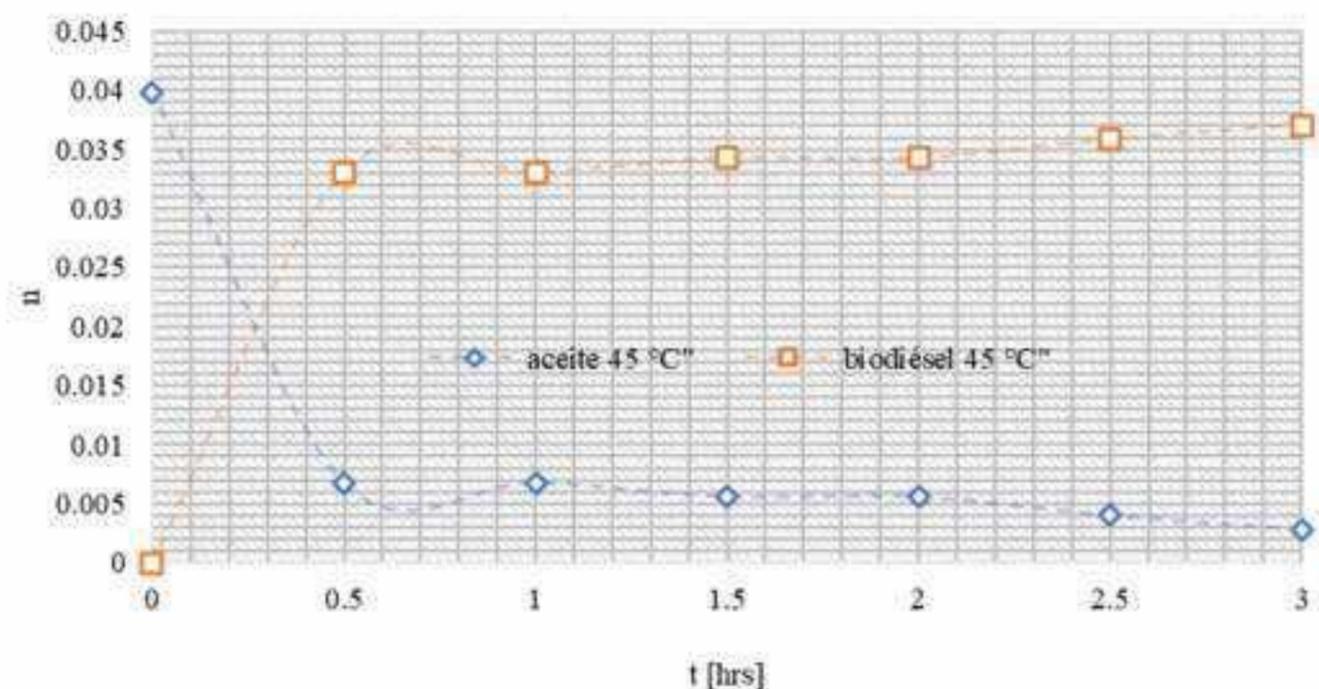


Figura 4.4.4 Número de moles de aceite y de biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 45 °C

En la Figura 4.4.5 se muestra la comparación de moles de aceite y de biodiésel a los diferentes tiempos de reacción a 50 °C. Al inicio de la reacción se tienen cero moles de biodiésel y 0.039 moles de aceite, conforme pasa el tiempo en la reacción los moles de biodiésel aumentan y los moles de aceite disminuyen. En 0.5 hrs de reacción se tienen 0.006 moles de aceite y 0.033 moles de biodiésel. En el rango de 1 a 1.5 hrs de reacción los moles se mantienen en 0.005 moles de aceite y 0.034 moles de biodiésel. En el rango de 2 a 2.5 hrs de reacción los moles permanecen constantes, se obtuvieron 0.002 moles de aceite y 0.037 moles de biodiésel. Pasadas las 3 hrs de reacción, se tuvieron 0.001 moles de aceite y 0.038 moles de biodiésel. Los moles de biodiésel aumentaron al disminuir los moles de aceite conforme aumenta el tiempo de la reacción.

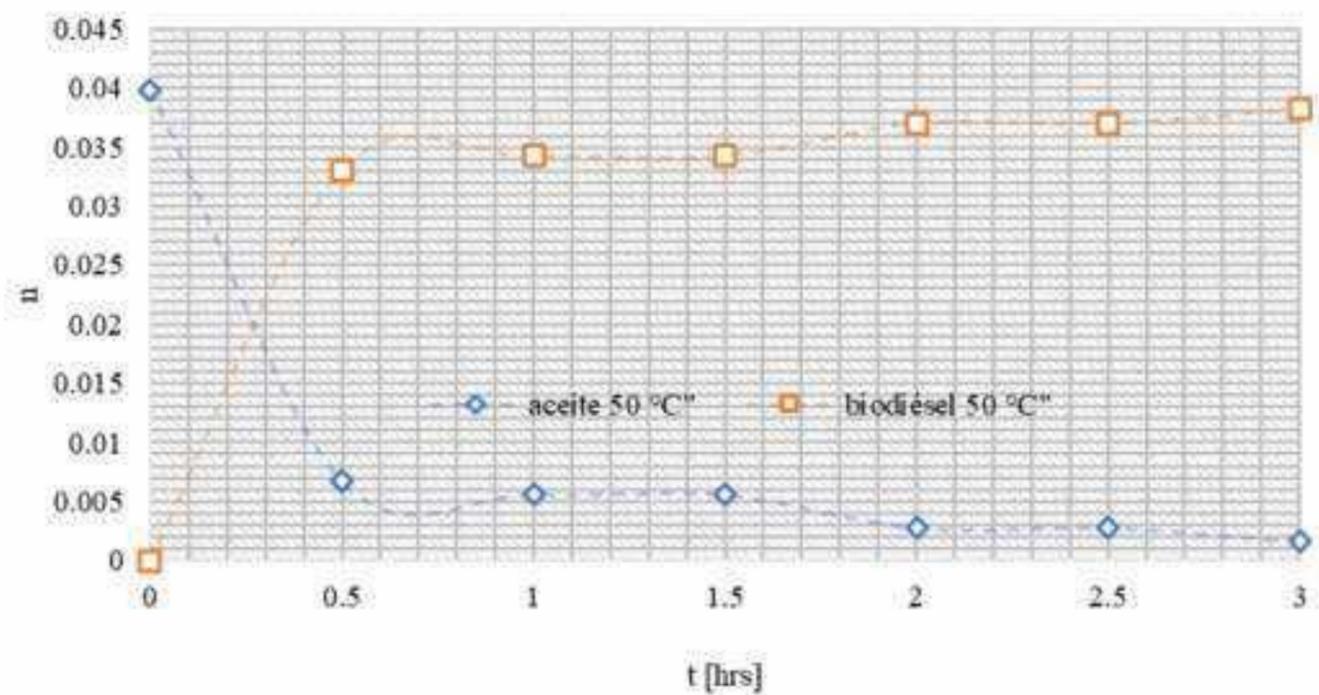


Figura 4.4.5 Número de moles de aceite y de biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 50 °C

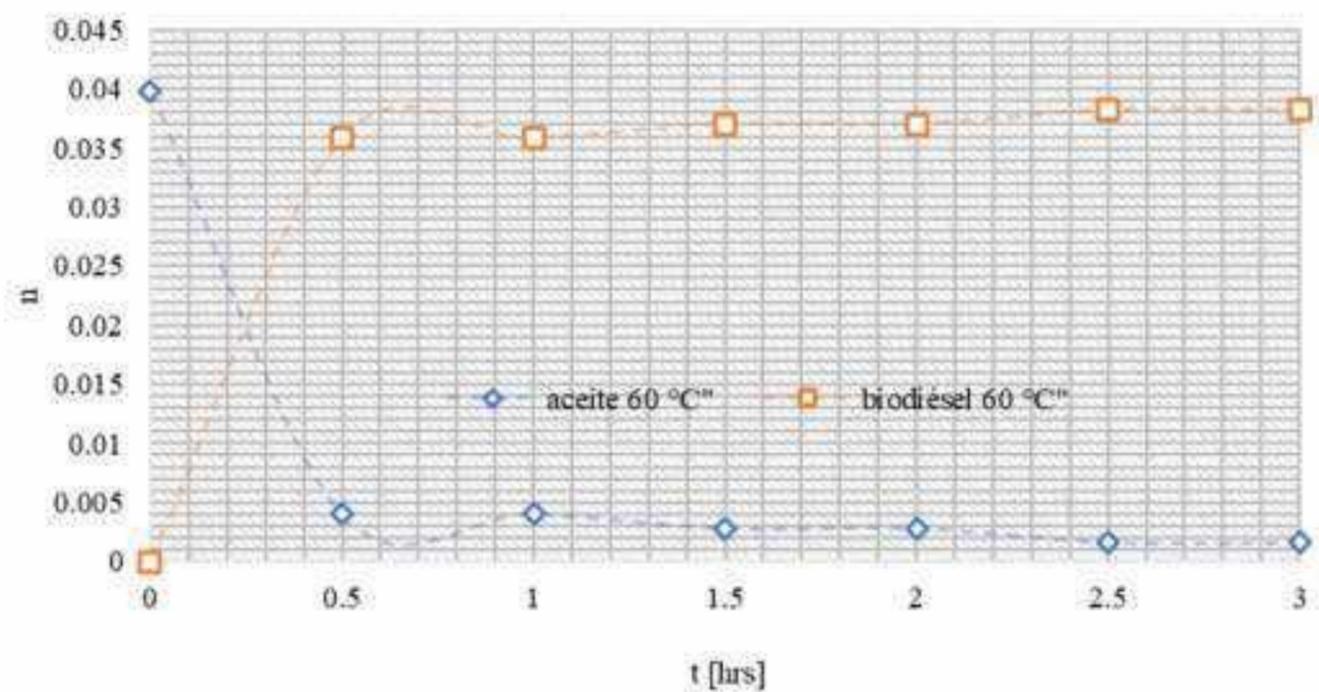


Figura 4.4.6 Número de moles de aceite y de biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 60 °C

En la Figura 4.4.6 se muestra la comparación de moles de aceite y de biodiésel a los diferentes tiempos de reacción a 60 °C. Al inicio de la reacción se tienen cero moles de biodiésel y 0.039 moles de aceite, conforme pasa el tiempo en la reacción los moles de biodiésel aumentan y los moles de aceite disminuyen. En el rango de 0.5 a 1 hrs de reacción los moles permanecen constantes, se tienen 0.003 moles de aceite y 0.035 moles de biodiésel. En el rango de 1.5 a 2 hrs de reacción los moles

se mantienen en 0.002 moles de aceite y 0.037 moles de biodiésel. En el rango de 2.5 a 3 hrs de reacción se mantuvieron 0.001 moles de aceite y 0.038 moles de biodiésel. Conforme aumenta el tiempo de reacción los moles de aceite disminuyen y los moles de biodiésel aumentan.

Conclusiones

Síntesis y caracterización de catalizadores heterogéneos

El volumen de poros determinado de la alúmina desgasificada fue de 7 ml, el área superficial obtenida por el método BET fue de 260 m²/g, el diámetro de las partículas de soporte fue 6.35 mm, el diámetro medio de poro fue 19 Å, el tipo de poro del soporte es mesoporoso y la geometría de los poros es cilíndrica.

Reacción de transesterificación

El biodiésel producido con el catalizador 1 presentó una conversión máxima de 100% con 10% de catalizador y 14% respecto al peso del aceite a la temperatura de reacción de 45, 50 y 60°C. La conversión mostró un incremento proporcional a la cantidad de catalizador del 2 al 10%.

El biodiésel producido con el catalizador 2, presentó conversiones de 100% empleando 6 y 10% de catalizador a 50 °C. La conversión se reducía a 83.33% empleando 10 y 12% de catalizador a 60 °C.

El biodiésel producido con el catalizador 3, presentó una conversión máxima de 96.66% empleando 4% de catalizador a 50 °C, y 95% empleando 8 y 12% de catalizador a 60 °C. Las mejores condiciones de reacción se obtuvieron empleando el catalizador 1 a 45 °C y 3 hrs de reacción.

Caracterización del biodiésel

El índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 1 más cercano al que establece la literatura fue de 1.4545, empleando 6% de catalizador a 50 °C y 3 hrs de reacción, este índice de refracción presenta 0.2% de desviación de acuerdo con lo establecido en la literatura.

El índice de refracción del biodiésel que alcanzó la conversión de 100% fue de 1.4547 que presenta el 0.4% de desviación de acuerdo con lo que establece la literatura.

Los valores de índice de refracción de biodiésel que se obtuvieron empleando el catalizador 2 se mantuvieron en el rango de 1.455 a 1.4566 que presenta 1.7% de desviación máxima.

La densidad del biodiésel producido con 10% de catalizador 1 a 45 °C y 3 hrs de reacción fue de 0.8316 gr/ml que presenta 3.3% de desviación respecto a la literatura. Bajo estas condiciones de operación fue que se alcanzó la conversión de 100%.

El valor de la densidad más bajo fue de 0.8033 gr/ml medida a 40 °C, se obtuvo con la muestra de biodiésel que alcanzó la conversión mínima de 76.66% empleando 2% de catalizador 3 a 60 °C y 3 hrs de reacción. Esta densidad presenta el 6.5% de desviación con respecto a lo que establece la literatura.

La literatura establece un rango de índice de saponificación del aceite de coco de 248-265 mg KOH/gr y experimentalmente se determinó un índice de saponificación del aceite de coco utilizado para producir el biodiésel de 266.47 mg KOH/gr.

El índice de saponificación del biodiésel producido con 10 % de catalizador 1 a 45, 50 y 60 °C y tiempo de reacción de 3 horas, se encuentra en el rango de 316.9 a 367.4 mg KOH/gr.

Hay una dependencia lineal del índice de saponificación con la temperatura de reacción y es inversamente proporcional, a mayor temperatura menor índice de saponificación.

El biodiésel producido con 10 % de catalizador 1, a 45 °C obtuvo un peso molecular de 162.6 gr/mol, esto indica que el biodiésel tiene cadenas entre 12-14 carbonos.

El índice de yodo del biodiésel producido con 10% de catalizador 1 fue de 1.10 gr I₂/100 gr a 45 °C, 0.85 gr I₂/100 gr a 50 °C y 0.24 gr I₂/100 gr a 60 °C. Estos valores de índice de yodo bajos indican que el aceite de coco usado para la reacción de transesterificación es nuevo y de buena calidad, ya que no hay oxidación de la grasa.

El índice de acidez del biodiésel producido con 10% de catalizador 1 se encuentra en el intervalo de 1.45 a 2.01 mg KOH/gr, el cual es un valor alto debido a que en promedio el aceite de coco presenta los valores de acidez mayores en comparación a los otros aceites, indicando la presencia de acidificación alta de ácidos grasos libres.

El mejor valor del punto de nube fue de 7.1°C para el biodiésel obtenido empleando 10% de catalizador 2, a 50 °C y 3 hrs de reacción.

El biodiésel producido se ajusta a las Normas Oficiales Mexicanas, debido que los parámetros obtenidos en la caracterización están dentro de los intervalos especificados.

Referencias

- Aldeen Khurshid, S. N. (2014). Biodiesel production by using heterogeneous catalyst. *Tesis Maestría*. Royal Institute of Technology (KTH), Estocolmo. Recuperado el 17 de Noviembre de 2022
- Avila, A. J. (2020). Síntesis de triglicéridos estructurados por catálisis heterogénea. *Tesis Doctoral en Ciencia y Tecnología de los Materiales*. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. Recuperado el 25 de Abril de 2023
- Bakkali, B. E. (2015). Catalizadores heterogéneos basados en polioxometalatos: aplicaciones en reacciones de interés industrial y medioambiental. *Tesis Doctoral en Química*. Universidad de Alicante, Alicante. Recuperado el 20 de Diciembre de 2022
- Becerra Ortega, M., Centeno Hurtado, A., & Giraldo Duarte, S. A. (2011). Transesterificación de triglicéridos en el sistema de reacción heterogénea con óxido de calcio como catalizador. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 7-13. doi:<http://doi.org/10.175333/udea.redin.14638>
- Benedicto, G. P. (2019). Producción de biodiésel por catálisis heterogénea. Diseño y aplicación de catalizadores, orientados a su aplicación industrial en plantas modulares. *Tesis Doctoral en Ingeniería, Mención Materiales*. Universidad Tecnológica Nacional. Recuperado el 16 de Junio de 2023, de <http://hdl.handle.net/20.500.12272/4149>
- Benjumea H, P. N., Agudelo S, J. R., & Cano, G. J. (2004). Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiésel. *Scientia et Technica*, 1(4), 169-174. Recuperado el 18 de Julio de 2023, de <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7323>
- Benjumea Hernández, P. N., Agudelo Santamaría, J. R., & Ríos, L. A. (2009). *Biodiésel: Producción, calidad y caracterización*. Antioquia: Editorial Universidad de Antioquia. Recuperado el 25 de Marzo de 2023
- Braga, C. F., & Braga, L. V. (2012). Desafíos energéticos en Brasil: panorama regulatorio de la producción y comercialización de biodiésel. *CADERNOS EBAPE.BR*, 10(3), 751-762. Recuperado el 13 de Noviembre de 2022
- Briones Báez, M. F. (2019). Preparación de catalizadores ácidos y/o básicos heterogéneos para la producción de biodiésel a partir de aceite jatropha curcas. *Tesis de Maestría en Ingeniería Química*. Instituto Tecnológico de Ciudad de Madero, Madero, Tamaulipas. Recuperado el 12 de Enero de 2023
- Cabello, C., Rincón, S., & Zepeda, A. (2017). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. *Afinidad: Revista de química teórica y aplicada*, 74(577), 51-59. Recuperado el 25 de Enero de 2023, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6139314>
- Castañeda Lozano, F. J. (2017). Puesta en marcha de instalación para síntesis de biodiésel. Síntesis y caracterización de biodiésel obtenido a partir de aceites vegetales. *Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Recuperado el 15 de Febrero de 2023
- Castellar Ortega, G. C., Angulo Mercado, E. R., & Cardozo Arrieta, B. M. (2014). Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. *Prospectiva*, 12(2), 90-104. Recuperado el 17 de Octubre de 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496250640010>
- Castro Martínez, C., Beltrán Arre, L. I., & Ortiz Ojeda, J. C. (2012). Producción de biodiésel y bioetanol: ¿una alternativa sustentable a la crisis energética? *Ra Ximhai*, 8(3b), 93-100.

- Recuperado el 25 de Octubre de 2022, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46125177010>
- Cortés Sánchez, M. D., Gata Montero, E. M., Pipió Ternero, A., Rodríguez Rivas, Á., & Sánchez Santos, J. M. (2019). Biocombustibles: tipos y estrategias de producción. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*(35), 20-25. Recuperado el 15 de Diciembre de 2022, de dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7094734
- Fajardo Hernández, F. J. (2015). Técnicas de Caracterización para el Biodiésel basadas en la Normatividad Internacional ASTM. *Tesis de Maestría en Fuentes Renovables de Energía y Eficiencia Energética*. UACM, Ciudad de México. Recuperado el 2 de Septiembre de 2023
- Fernández Villascán, C., Caltzontzin Rabell, V., Martínez Guido, S. I., Romero Izquierdo, A. G., & Gutiérrez Antonio, C. (2022). Conversión de residuos orgánicos en biodiésel: un enfoque sustentable. *Emprennova*, 2(4), 41-55. Recuperado el 18 de Septiembre de 2023, de <https://www.researchgate.net/publication/367463306>
- García Camús, J. M., & García Laborda, J. Á. (2006). *Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol*. Madrid, España: vt mi+d. Recuperado el 28 de Enero de 2022
- Gil Martín, R. (2017). Producción de biodiésel a partir de aceite de girasol en una planta piloto de reacción por cavitación. *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química*. Universidad de Valladolid, Valladolid. Recuperado el 16 de Enero de 2023
- Gómez, R., & Murillo, R. (2006). *Espectroscopía infrarroja*. Recuperado el 16 de Abril de 2024, de FCIENCIAS: <https://sistemas.fcencias.unam.mx/~fam/Infrarroja.pdf>
- Guareñas M., A., & Chirinos, A. (2007). Producción de Biodiesel de aceite de coco artesanal de una población del Estado de Falcón. *Prospectiva*, 5(2), 16-23. Recuperado el 5 de Junio de 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496251110004>
- Herrera Restrepo, J. A., & Vélez, J. A. (2008). Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible (biodiésel). *Tesis de Tecnólogo Químico*. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira. Recuperado el 16 de Octubre de 2022
- Iermanó, M. J. (2007). Análisis de la producción de biodiésel como combustible alternativo a los combustibles fósiles. *Tesis de Licenciatura de Ingeniería Agrónoma*. Universidad Nacional de la Plata, República Argentina. Recuperado el 28 de Julio de 2023
- Islam, A., Taufiq-Yap, Y., Chu, C.-M., Chan, E.-S., & Ravindra, P. (2013). Studies on design of heterogeneous catalysts for biodiesel production. *ELSEVIER*, 91, 131-144. Recuperado el 25 de Junio de 2022, de <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.01.002>
- Loaiza Romero, F. E. (2003). Cinética de la reacción de transesterificación del aceite de hilguerilla en la obtención de biodiésel. *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Recuperado el 25 de Enero de 2023
- López, G. D. (2015). Biodiésel: perfiles de negocio. *ResearchGate*. Recuperado el 25 de Abril de 2023, de <http://www.researchgate.net/publication/265117060>
- Mardhiah, H., Ong, H. C., Masjuki, H., Lim, S., & Lee, H. (2017). A review on latest developments and future prospects of heterogeneous catalyst in biodiesel production from non-edible oils. *ELSEVIER*, 67, 1225-1236. Recuperado el 15 de Abril de 2023, de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.036>
- Marquínez Marquínez, A. N., Lood Molina, N. S., Guamán Marquínez, C. W., Vélez Vélez, J. A., Solórzano Párraga, K. M., Rodríguez Cabeña, J. K., & Riera, M. A. (2020). Obtención de biodiesel a partir de aceite de coco (Cocos nucifera L.). *Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí*, 6(1), 9-14. Recuperado el 12 de Febrero de 2023, de <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v6.1.2605>

- Medina Ramírez, I. E., Chávez Vela, N. A., & Jáuregui Rincón, J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia*, 20(55), 62-70. Recuperado el 25 de Octubre de 2022, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67424409008>
- Molero, H., Moyano, K., & Arias Toro, D. (2022). Evaluación de las propiedades catalíticas de diversos materiales en la producción de biodiésel. *Journal of Science and Research*, 7(2), 151-178. Recuperado el 13 de Junio de 2023, de <https://doi.org/10.5281/zenodo.7262003>
- Morales, W. G., Sequeira, A., Chamorro, E., Braga, M., Sobral, A., De Sousa, H., & Herrero, E. R. (2012). Catálisis heterogénea en la obtención de biodiésel. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 14-22. Recuperado el 7 de Febrero de 2023, de <https://www.researchgate.net/publication/270903690>
- Mukhtar, A., Saqib b, S., Lin, H., Hassan Shah, M. U., Ullah, S., Younas, M., . . . Bokhari, A. (2022). Current status and challenges in the heterogeneous catalysis for biodiesel production. *ELSEVIER*, 157, 1-16. Recuperado el 19 de Noviembre de 2023, de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112012>
- Oliva Montes, J., Flores Rodríguez, J., López Medina, R., Santos Camacho, J., Contreras Ruíz, J., & Vaca Mier, M. (2015). Producción de biodiesel a partir de grasa animal utilizando catálisis heterogénea. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(5), 93-102. Recuperado el 2 de Septiembre de 2023, de <http://www.reibci.org/publicados/2015/septiembre/1200103>
- Pan, H., Xia, Q., Wang, Y., Shen, Z., Huang, H., Ge, Z., . . . Wang, Y. (2022). Avances recientes en la producción de biodiésel utilizando materiales funcionales de carbono como catalizadores ácido/base. *ELSEVIER*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2023
- Paulino Pérez, V. (2016). Producción de biodiésel aplicando la activación mecano química. *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química Industrial*. Instituto Politécnico Nacional. Recuperado el 16 de Octubre de 2022, de <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/24388>
- Piqué, T. M., & Vázquez, A. (2012). Uso de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. *Investigación y Desarrollo*, 3(2), 62-71. Recuperado el 14 de Enero de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112012000100004&lng=es&tlng=es
- Pisarello, M. L. (2010). Producción de biodiesel: equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes. *Tesis Doctoral en Ingeniería Química*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL, Litoral. Recuperado el 13 de Mayo de 2023
- Ramos, F. D., Díaz, M. S., & Villar, M. A. (2016). Biocombustibles. *Ciencia Hoy*, 25(147), 69-73. Recuperado el 15 de Diciembre de 2022, de <http://cienciahoy.org.ar/2016/01/biocombustibles/>
- Reyes Aguilera, E. A. (2016). Producción de biogas a partir de Biomasa. *Revista Científica De FAREM-Esteli*(17), 11-22. doi:10.5377/farem.v0i17.2610
- Rivas, C., Rondón, J., Meléndez, H., Lugo, C., Belandría, L., Uzcátegui, Á., . . . González Cortes, S. (2017). Transesterificación de aceite de palma en biodiésel utilizando como catalizador un óxido mixto proveniente de hidrotalcita (Mg/Al). *Ciencia e Ingeniería*, 38(3), 214-227. Recuperado el 22 de Agosto de 2022, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507555085002>
- Sahu, G., Gupta, N. K., Saha, S., Datta, S., Chavan, P., Kumari, N., & Dutta, P. (2018). A Review on Biodiesel Production through Heterogeneous Catalysis Route. *ChemBioEng*(4), 1-23. doi:10.1002/cben.201700014

- Salinas Callejas, E., & Gasca Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, 74-82. Recuperado el 28 de Julio de 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32512739009>
- Sánchez Domínguez, S. M., Laredo Herrera, G. C., Torres Aldaco, A., Lugo Leyte, R., & Cervantes Ruiz, J. (2016). Producción y caracterización de biodiésel a partir de aceite de coco orgánico. *AMIDIQ*, 85-90. Recuperado el 22 de Septiembre de 2023, de <http://www.academia.edu/31664420>
- Sánchez Faba, E. M., Ferrero, G. O., & Eimer, G. A. (2021). Producción de biodiésel a partir de diferentes aceites utilizando un catalizador mesoporoso bimetálico. *Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN*, (págs. 274-280). San Francisco UTN. doi:<https://doi.org/10.33414/ajea.1.871.2021>
- Santori, G., Nicola, G. D., Moglie, M., & Polonara, F. (2012). A review analyzing the industrial biodiesel production practice starting from vegetable oil refining. *ELSEVIER*, 92, 109-132. doi:10.1016/j.apenergy.2011.10.031
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *BioTecnología*, 16(2), 14-38. Recuperado el 19 de Junio de 2023, de https://www.academia.edu/23775116/Aprovechamiento_de_Residuos_Agroindustriales_Pasado_Presente_y_Futuro
- Serna, F., Barrera, L., & Montiel, H. (2011). Impacto Social y Económico en el uso de Biocombustibles. *Journal of Technology Management & Innovation*, 6(1), 100-114. Recuperado el 13 de Diciembre de 2022, de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27242011000100009>
- Serrano Martínez, J. L. (2012). Espectroscopía Infrarroja. *Posgrado en Ingeniería del agua y del terreno*. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena. Recuperado el 15 de Abril de 2024, de https://www.upct.es/~minaees/espectroscopia_infrarroja.pdf
- Suárez Hernández, J., Sosa Cáceres, R., Martínez-Labrada, Y., Curbelo Alonso, A., Figueredo Rodríguez, T., & Cepero Casas, L. (2018). Evaluación del potencial de producción del biogás en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 41(2), 85-92. Recuperado el 26 de Noviembre de 2022, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942018000200001&lng=es&tlng=es
- Tejada, C. N., Tejada, L. P., Villabona, A., Monroy, L., Alvear, M. R., Castillo, C. R., . . . Marimon, W. (2009). Alternativas para la obtención Alternativas para la obtención de biodiésel a partir de aceites vegetales-coco, almendras, ajonjolí y marañón. *SIQUIA*(32), 1-8. Recuperado el 28 de Noviembre de 2022, de <http://www.csic.es/wi/VisualizarDocumento.jsp?id=object>
- 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*(3), 43-49. Recuperado el 28 de Marzo de 2023, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2082917>
- Vargas Hernández, J. G. (2018). Panorama del emprendimiento de empresas de biodiésel en México, perspectiva basada en instituciones. *Revista Brasileira de direito do petroleo, gas e energia*, 5(1), 162-170. Recuperado el 14 de Diciembre de 2022, de <https://www.academia.edu/48948805>
- Vázquez Castillo, D. N. (2020). Síntesis y caracterización de catalizadores heterogéneos para su uso en la producción de biodiésel. *Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Química*. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Cd. Madero, Tamaulipas. Recuperado el 29 de Agosto de 2023

- Villavicencio Cevallos, J. G. (2016). Obtención de alúmina activada y su aplicación como soporte de catalizador. *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química*. Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 22 de Noviembre de 2023, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/14482>
- Zelaya Madrid, E. O. (2016). Producción de biodiésel a partir de aceite de coco . *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química*. Universidad de Costa Rica, San Jose. Recuperado el 22 de Agosto de 2023
- Zuleta Suárez, E. C., Bonet Oballe, J. D., & Díaz Muegue, L. C. (2008). Optimización del proceso de obtención de biodiesel a partir de aceite de palma y etanol, mediante el metodo de la superficie de respuesta. *Prospectiva*, 6(1), 75-80. Recuperado el 17 de Julio de 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496250973013>

ANEXO 1

Cálculos

Cálculos estequiométricos para conocer la cantidad de Ag a ocupar para las soluciones metálicas de diferentes porcentajes de metal.

Impregnar 30 gr de soporte
PM Ag = 107.87 gr/mol
PM AgNO₃ = 169.87 gr/mol

Catalizador 1=10% de Ag

30 gr * (0.1) = 3 gr
moles de Ag = $\frac{m \text{ Ag}}{\text{PM Ag}} = \frac{3 \text{ gr}}{107.87 \text{ gr/mol}} = 0.0278 \text{ mol}$
moles de Ag * PM AgNO₃ = (0.0278 mol) * (169.87 gr/mol) = **4.7223 gr AgNO₃**

Catalizador 2=15% de Ag

30 gr * (0.15) = 4.5 gr
moles de Ag = $\frac{m \text{ Ag}}{\text{PM Ag}} = \frac{4.5 \text{ gr}}{107.87 \text{ gr/mol}} = 0.0417 \text{ mol}$
moles de Ag * PM AgNO₃ = (0.0417 mol) * (169.87 gr/mol) = **7.083 gr AgNO₃**

Catalizador 3=20% de Ag

30 gr * (0.2) = 6 gr
moles de Ag = $\frac{m \text{ Ag}}{\text{PM Ag}} = \frac{6 \text{ gr}}{107.87 \text{ gr/mol}} = 0.0556 \text{ mol}$
moles de Ag * PM AgNO₃ = (0.0556 mol) * (169.87 gr/mol) = **9.44 gr AgNO₃**

Se calculó la masa de 30 ml de aceite de coco y posteriormente la cantidad de alcohol para una relación molar alcohol: aceite de 12:1

Una de las variables más importantes que afecta los rendimientos de los ésteres es la relación molar alcohol-triglicérido. La proporción estequiométrica requerida es de tres moles de alcohol por cada mol de triglicérido para producir tres moles del éster del ácido graso y un mol de glicerol. Sin embargo, debido a la reversibilidad del proceso, se requiere un exceso de alcohol para favorecer la reacción a la producción de ésteres.

PM aceite = 228.36gr/mol
PM triglicérido = (228.36gr/mol) * (3) = 685.06 gr/mol
PM metanol = 32.04 gr/mol
ρ ac = 0.91 gr/ml
ρ metanol = 0.792 gr/ml

$$m_{ac} = \rho_{ac} * V_{ac} = (0.91 \text{ gr/ml}) * (30 \text{ ml}) = \underline{\underline{27.3 \text{ gr}}}$$

$$n_{trig} = \frac{m_{ac}}{PM_{trig}} = \frac{27.3 \text{ gr}}{685.06 \text{ gr/mol}} = 0.0398 \text{ mol}$$

$$n_{metanol} = 12 * n_{trig} = 12 * 0.0398 \text{ mol} = 0.4776 \text{ mol}$$

$$m_{metanol} = n_{metanol} * PM_{metanol} = (0.4776 \text{ mol}) * (32.04 \text{ gr/mol}) = 15.30 \text{ gr}$$

$$V_{metanol} = \frac{m_{metanol}}{\rho_{metanol}} = \frac{15.30 \text{ gr}}{0.792 \text{ gr/ml}} = \underline{\underline{19.32 \text{ ml}}}$$

Anexo 2

**Reacción de
transesterificación**

Tabla A2.1 Conversión del biodiésel producido con el catalizador 1, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	Vol. final (ml)	Conversión (%)
2	0.54	45	3	27	90
4	1.09	45	3	28	93.33
6	1.63	45	3	27	90
8	2.18	45	3	29	96.66
10	2.73	45	3	30	100
12	3.27	45	3	29	96.66
14	3.82	45	3	30	100
2	0.54	50	3	24	80
4	1.09	50	3	24	80
6	1.63	50	3	25	83.33
8	2.18	50	3	25	83.33
10	2.73	50	3	27	90
12	3.27	50	3	26	86.66
14	3.82	50	3	27	90
2	0.54	60	3	25	83.33
4	1.09	60	3	25	83.33
6	1.63	60	3	25	83.33
8	2.18	60	3	25	83.33
10	2.73	60	3	28	93.33
12	3.27	60	3	27	90
14	3.82	60	3	27	90

Tabla A2.2 Conversión del biodiésel producido con el catalizador 2, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	Vol. final (ml)	Conversión (%)
2	0.54	45	3	29	96.66
4	1.09	45	3	29	96.66
6	1.63	45	3	28	93.33
8	2.18	45	3	28	93.33
10	2.73	45	3	28	93.33
12	3.27	45	3	27	90
14	3.82	45	3	27	90
2	0.54	50	3	29	96.66
4	1.09	50	3	29	96.66
6	1.63	50	3	30	100
8	2.18	50	3	28	93.33
10	2.73	50	3	30	100
12	3.27	50	3	27	90
14	3.82	50	3	29	96.66
2	0.54	60	3	29	96.66
4	1.09	60	3	30	100
6	1.63	60	3	27	90
8	2.18	60	3	28	93.33
10	2.73	60	3	25	83.33
12	3.27	60	3	25	83.33
14	3.82	60	3	26	86.66

Tabla A2.3 Conversión del biodiésel producido con el catalizador 3, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	Vol. final (ml)	Conversión (%)
2	0.54	45	3	24	80
4	1.09	45	3	24	80
6	1.63	45	3	27	90
8	2.18	45	3	27	90
10	2.73	45	3	28	93.33
12	3.27	45	3	25	83.33
14	3.82	45	3	27	90
2	0.54	50	3	28	93.33
4	1.09	50	3	29	96.66
6	1.63	50	3	26	86.66
8	2.18	50	3	27	90
10	2.73	50	3	26	86.66
12	3.27	50	3	26	86.66
14	3.82	50	3	26	86.66
2	0.54	60	3	23	76.66
4	1.09	60	3	26	86.66
6	1.63	60	3	27	90
8	2.18	60	3	29	96.66
10	2.73	60	3	26	86.66
12	3.27	60	3	29	96.66
14	3.82	60	3	28	93.33

Anexo 3
Caracterización
del biodiésel

Tabla A3.1 Índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 1, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	IR
2	0.54	45	3	1.4558
4	1.09	45	3	1.4554
6	1.63	45	3	1.4555
8	2.18	45	3	1.4552
10	2.73	45	3	1.4547
12	3.27	45	3	1.4553
14	3.82	45	3	1.4549
2	0.54	50	3	1.456
4	1.09	50	3	1.4565
6	1.63	50	3	1.4545
8	2.18	50	3	1.4562
10	2.73	50	3	1.456
12	3.27	50	3	1.4557
14	3.82	50	3	1.455
2	0.54	60	3	1.4563
4	1.09	60	3	1.4561
6	1.63	60	3	1.4549
8	2.18	60	3	1.4559
10	2.73	60	3	1.4551
12	3.27	60	3	1.4558
14	3.82	60	3	1.4561

Tabla A3.2 Índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 2, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	IR
2	0.54	45	3	1.4552
4	1.09	45	3	1.4553
6	1.63	45	3	1.4559
8	2.18	45	3	1.4558
10	2.73	45	3	1.4556
12	3.27	45	3	1.455
14	3.82	45	3	1.4555
2	0.54	50	3	1.4557
4	1.09	50	3	1.4564
6	1.63	50	3	1.456
8	2.18	50	3	1.4561
10	2.73	50	3	1.4559
12	3.27	50	3	1.4566
14	3.82	50	3	1.456
2	0.54	60	3	1.4562
4	1.09	60	3	1.4566
6	1.63	60	3	1.4559
8	2.18	60	3	1.4563
10	2.73	60	3	1.4555
12	3.27	60	3	1.4556
14	3.82	60	3	1.4563

Tabla A3.3 Índice de refracción del biodiésel producido con el catalizador 3, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	IR
2	0.54	45	3	1.4559
4	1.09	45	3	1.4546
6	1.63	45	3	1.4551
8	2.18	45	3	1.4552
10	2.73	45	3	1.4549
12	3.27	45	3	1.455
14	3.82	45	3	1.455
2	0.54	50	3	1.4564
4	1.09	50	3	1.4562
6	1.63	50	3	1.4565
8	2.18	50	3	1.4556
10	2.73	50	3	1.4561
12	3.27	50	3	1.4559
14	3.82	50	3	1.4561
2	0.54	60	3	1.4563
4	1.09	60	3	1.4565
6	1.63	60	3	1.4567
8	2.18	60	3	1.4559
10	2.73	60	3	1.4565
12	3.27	60	3	1.4561
14	3.82	60	3	1.4564

Tabla A3.4 Densidad del biodiésel producido con el catalizador 1, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	masa 25°C (gr)	masa 40°C (gr)	ρ 25°C (gr/ml)	ρ 40°C (gr7ml)
2	0.54	45	3	39.53	39.33	0.8338	0.8227
4	1.09	45	3	39.47	39.22	0.8305	0.8166
6	1.63	45	3	39.62	39.26	0.8388	0.8188
8	2.18	45	3	39.41	39.02	0.8272	0.8055
10	2.73	45	3	39.49	39.25	0.8316	0.8183
12	3.27	45	3	39.29	39.06	0.8205	0.8077
14	3.82	45	3	39.29	39.01	0.8205	0.805
2	0.54	50	3	39.46	39.29	0.83	0.8205
4	1.09	50	3	39.47	39.31	0.8305	0.8216
6	1.63	50	3	39.75	39.42	0.8461	0.8277
8	2.18	50	3	39.55	39.24	0.835	0.8177
10	2.73	50	3	39.49	39.15	0.8316	0.8127
12	3.27	50	3	39.26	39.05	0.8188	0.8072
14	3.82	50	3	39.53	39.25	0.8338	0.8183
2	0.54	60	3	39.55	39.28	0.835	0.82
4	1.09	60	3	39.41	39.09	0.8272	0.8094
6	1.63	60	3	39.16	38.93	0.8133	0.8005
8	2.18	60	3	39.47	39.02	0.8305	0.8055
10	2.73	60	3	39.49	39.12	0.8316	0.8111
12	3.27	60	3	39.58	39.35	0.8366	0.8238
14	3.82	60	3	39.41	39.17	0.8272	0.8138

Tabla A3.5 Densidad del biodiésel producido con el catalizador 2, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	masa 25°C (gr)	masa 40°C (gr)	ρ 25°C (gr/ml)	ρ 40°C (gr7ml)
2	0.54	45	3	39.3	39.12	0.8211	0.8111
4	1.09	45	3	39.23	39.05	0.8172	0.8072
6	1.63	45	3	39.24	39.06	0.8177	0.8077
8	2.18	45	3	39.46	39.39	0.83	0.8261
10	2.73	45	3	39.53	39.47	0.8338	0.8305
12	3.27	45	3	39.33	38.97	0.8227	0.8027
14	3.82	45	3	39.07	38.86	0.8083	0.7966
2	0.54	50	3	39.07	38.83	0.8083	0.795
4	1.09	50	3	39.54	39.41	0.8344	0.8272
6	1.63	50	3	39.29	39.18	0.8205	0.8144
8	2.18	50	3	39.36	39.22	0.8244	0.8166
10	2.73	50	3	39.23	39.05	0.8172	0.8072
12	3.27	50	3	39.39	39.3	0.8261	0.8211
14	3.82	50	3	39.12	39.05	0.8111	0.8072
2	0.54	60	3	39.56	39.29	0.8355	0.8205
4	1.09	60	3	39.54	39.17	0.8344	0.8138
6	1.63	60	3	39.74	39.32	0.8455	0.8222
8	2.18	60	3	39.62	39.38	0.8388	0.8255
10	2.73	60	3	39.64	39.47	0.84	0.8305
12	3.27	60	3	39.57	39.25	0.8361	0.8183
14	3.82	60	3	39.8	39.44	0.8488	0.8288

Tabla A3.6 Densidad del biodiésel producido con el catalizador 3, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	masa 25°C (gr)	masa 40°C (gr)	ρ 25°C (gr/ml)	ρ 40°C (gr/ml)
2	0.54	45	3	39.56	39.32	0.8355	0.8222
4	1.09	45	3	39.88	39.49	0.8533	0.8316
6	1.63	45	3	39.54	39.11	0.8344	0.8105
8	2.18	45	3	39.42	39.21	0.8277	0.8161
10	2.73	45	3	39.27	39.18	0.8194	0.8144
12	3.27	45	3	39.29	39.02	0.8205	0.8055
14	3.82	45	3	39.66	39.15	0.8411	0.8127
2	0.54	50	3	39.88	39.47	0.8533	0.8305
4	1.09	50	3	39.91	39.64	0.855	0.84
6	1.63	50	3	39.39	39.1	0.8261	0.81
8	2.18	50	3	39.62	39.26	0.8388	0.8188
10	2.73	50	3	39.42	39.09	0.8277	0.8094
12	3.27	50	3	39.36	39.21	0.8244	0.8161
14	3.82	50	3	39.28	39.11	0.82	0.8105
2	0.54	60	3	39.26	38.98	0.8188	0.8033
4	1.09	60	3	39.59	39.25	0.8372	0.8183
6	1.63	60	3	39.2	39	0.8155	0.8044
8	2.18	60	3	39.61	39.13	0.8383	0.8116
10	2.73	60	3	39.44	39	0.8288	0.8044
12	3.27	60	3	39.45	39.11	0.8294	0.8105
14	3.82	60	3	39.52	39.21	0.8333	0.8161

Tabla A3.7 Datos de calibración de los viscosímetros utilizados

Viscosímetro	Tiempo (s) 25 °C	Tiempo (s) 40 °C
1	72	66
2	90	78
3	82	75

Tabla A3.8 Viscosidad del biodiésel producido con el catalizador 1, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	t 25°C (seg)	t 40°C (seg)	Viscosidad 25°C	Viscosidad 40°C
2	0.54	45	3	3437	2708	0.0341	0.0246
4	1.09	45	3	3503	3733	0.0347	0.0340
6	1.63	45	3	5280	2003	0.0524	0.0182
8	2.18	45	3	4200	2067	0.0417	0.0188
10	2.73	45	3	4380	2821	0.0434	0.0257
12	3.27	45	3	4063	2364	0.0403	0.0215
14	3.82	45	3	4330	2713	0.0429	0.0247
2	0.54	50	3	3308	2376	0.0328	0.0216
4	1.09	50	3	3209	2557	0.0318	0.0232
6	1.63	50	3	4243	3257	0.0421	0.0296
8	2.18	50	3	3961	2141	0.0393	0.0195
10	2.73	50	3	4810	2472	0.0477	0.0225
12	3.27	50	3	4083	3132	0.0405	0.0285
14	3.82	50	3	3859	2737	0.0383	0.0249
2	0.54	60	3	3859	2956	0.0383	0.0269
4	1.09	60	3	3456	2484	0.0343	0.0226
6	1.63	60	3	4268	2345	0.0423	0.0213
8	2.18	60	3	4090	2660	0.0406	0.0242
10	2.73	60	3	3142	2823	0.0312	0.0257
12	3.27	60	3	4080	3065	0.0405	0.0279
14	3.82	60	3	4332	2029	0.0430	0.0184

Tabla A3.9 Viscosidad del biodiésel producido con el catalizador 2, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	t 25°C (seg)	t 40°C (seg)	Viscosidad 25°C	Viscosidad 40°C
2	0.54	45	3	4761	2979	0.0472	0.0271
4	1.09	45	3	3752	2284	0.0372	0.0208
6	1.63	45	3	3629	2420	0.0360	0.0220
8	2.18	45	3	4401	2865	0.0437	0.0261
10	2.73	45	3	3387	2127	0.0336	0.0193
12	3.27	45	3	4683	2640	0.0465	0.0240
14	3.82	45	3	4712	2607	0.0467	0.0237
2	0.54	50	3	4093	2181	0.0406	0.0198
4	1.09	50	3	3934	2245	0.0390	0.0204
6	1.63	50	3	3898	2048	0.0387	0.0186
8	2.18	50	3	4043	1676	0.0401	0.0152
10	2.73	50	3	3849	2395	0.0382	0.0218
12	3.27	50	3	4723	2751	0.0468	0.0250
14	3.82	50	3	3768	2523	0.0374	0.0229
2	0.54	60	3	5388	2943	0.0535	0.0268
4	1.09	60	3	5897	3202	0.0585	0.0291
6	1.63	60	3	2515	2487	0.0249	0.0226
8	2.18	60	3	3015	2334	0.0299	0.0212
10	2.73	60	3	4533	2265	0.0450	0.0206
12	3.27	60	3	3524	2777	0.0349	0.0253
14	3.82	60	3	3425	2644	0.0340	0.0240

Tabla A3.10 Viscosidad del biodiésel producido con el catalizador 3, a las 3 temperaturas de reacción, con diferentes cantidades de catalizador

% peso	Catalizador (gr)	T (°C)	t (hrs)	t 25°C (seg)	t 40°C (seg)	Viscosidad 25°C	Viscosidad 40°C
2	0.54	45	3	3503	2978	0.0348	0.0271
4	1.09	45	3	4217	3269	0.0419	0.0298
6	1.63	45	3	3313	2913	0.0329	0.0265
8	2.18	45	3	3102	2994	0.0308	0.0273
10	2.73	45	3	3741	2769	0.0371	0.0252
12	3.27	45	3	3567	3299	0.0354	0.0301
14	3.82	45	3	3853	2447	0.0383	0.0223
2	0.54	50	3	3753	2114	0.0373	0.0193
4	1.09	50	3	3174	2716	0.0315	0.0247
6	1.63	50	3	3022	2849	0.0300	0.0260
8	2.18	50	3	4330	1805	0.0430	0.0164
10	2.73	50	3	3900	2975	0.0387	0.0271
12	3.27	50	3	3454	2182	0.0343	0.0199
14	3.82	50	3	3933	2764	0.0391	0.0252
2	0.54	60	3	5434	2934	0.0540	0.0267
4	1.09	60	3	5738	1822	0.0570	0.0166
6	1.63	60	3	4930	2455	0.0490	0.0224
8	2.18	60	3	3484	2231	0.0346	0.0203
10	2.73	60	3	4654	2047	0.0462	0.0187
12	3.27	60	3	3457	1997	0.0343	0.0182
14	3.82	60	3	3948	2417	0.0392	0.0220

Anexo 4
Cinética de
reacción

Tabla A4.1 Conversión del biodiésel producido con 10% en peso con respecto al peso del aceite del catalizador 1, en la cinética de reacción, a las 3 temperaturas y diferentes tiempos de reacción

% peso	T (°C)	t (hrs)	Vol. final (ml)	Conversión (%)
10	45	3	28	93.33
10	45	2.5	27	90.00
10	45	2	26	86.67
10	45	1.5	26	86.67
10	45	1	25	83.33
10	45	0.5	25	83.33
10	50	3	29	96.67
10	50	2.5	28	93.33
10	50	2	28	93.33
10	50	1.5	26	86.67
10	50	1	26	86.67
10	50	0.5	25	83.33
10	60	3	29	96.67
10	60	2.5	29	96.67
10	60	2	28	93.33
10	60	1.5	28	93.33
10	60	1	27	90
10	60	0.5	27	90

Tabla A4.2 Índice de refracción del biodiésel producido con 10% en peso con respecto al peso del aceite del catalizador 1, en la cinética de reacción, a las 3 temperaturas y diferentes tiempos de reacción

% peso	T (°C)	t (hrs)	Conversión %	IR
10	45	3	93.33	1.456
10	45	2.5	90	1.4565
10	45	2	86.66	1.4569
10	45	1.5	86.66	1.4566
10	45	1	83.33	1.4568
10	45	0.5	83.33	1.4567
10	50	3	96.66	1.4553
10	50	2.5	93.33	1.4562
10	50	2	93.33	1.4562
10	50	1.5	86.66	1.4564
10	50	1	86.66	1.4564
10	50	0.5	83.33	1.4567
10	60	3	96.66	1.456
10	60	2.5	96.66	1.4565
10	60	2	93.33	1.4558
10	60	1.5	93.33	1.4561
10	60	1	90	1.4561
10	60	0.5	90	1.456