

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de la producción de ésteres metílicos empleando ácidos grasos del desodo de aceite de palma africana a escala laboratorio.

Trabajo de tesis presentado por Diego Adolfo López Castillo para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química.

Guatemala,
2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de la producción de ésteres metílicos empleando ácidos grasos del desodo de aceite de palma africana a escala laboratorio.

Trabajo de tesis presentado por Diego Adolfo López Castillo para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química.

Guatemala,
2025

Vo. Bo.

(f) _____

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, MSc.

Terna examinadora

(f) _____

Ing. Luis Ernesto Núñez González

(f) _____

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M.Sc.

(f) _____

Ing. José Andrés Lam Ceballos

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de diciembre de 2025

PREFACIO

Este trabajo tuvo como finalidad evaluar, a escala de laboratorio, la producción de ésteres metílicos a partir de los ácidos grasos libres destilados de la desodorización del aceite de palma africana (PFAD), proponiendo las principales operaciones unitarias y condiciones de operación que sirvan de base para un eventual escalamiento. El objetivo principal fue evaluar la producción de ésteres metílicos a partir de PFAD, determinando la relación molar metanol:PFAD que maximiza la conversión, caracterizando el biodiésel obtenido y proponiendo las operaciones unitarias y sus condiciones de operación asociadas.

Más que valorizar un subproducto, el presente trabajo orienta la valorización del PFAD en clave de economía circular para el contexto guatemalteco: integra una etapa de esterificación que reduce la acidez y habilita la producción de un biocombustible conforme a estándares internacionales, al tiempo que sienta bases técnicas (datos de conversión, criterios de operación y esquema de proceso) útiles para un primer escalamiento en el entorno de la Universidad del Valle de Guatemala y, potencialmente, de la industria local.

Agradezco profundamente a mis padres, Franco Nery López Mejía y Lesbia Maritza Castillo Toledo, por el apoyo incondicional que me han dado durante estos cinco años de carrera. Gracias, papá, por impulsarme siempre y por darme la oportunidad de estudiar en la mejor universidad de Guatemala; gracias, por tu constancia, paciencia y confianza en cada etapa. También agradezco a Alejandra Montufar por su apoyo durante mis cinco años de carrera, siempre darme un consejo y apoyo cuando lo necesité. A mis hermanos, Sebas, Vanessa y Julio, por verme crecer profesionalmente y estar en este camino conmigo. Extiendo este agradecimiento a toda mi familia, que en los momentos clave me tendió la mano y me ayudó a seguir avanzando.

Mi sincero reconocimiento para el M.Sc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, mi asesor, por compartir conocimientos a lo largo de la carrera, en especial en biocombustibles, y por sus sugerencias profesionales y acompañamiento, que me permitieron ganar experiencia práctica al trabajar juntos en diversos proyectos. También agradezco al M.Sc. MBA. Ing. Luis Ernesto Núñez, por su guía constante en la revisión del trabajo de graduación, sus comentarios puntuales y su orientación metodológica durante el desarrollo de este trabajo de graduación. Gracias a ambos por tomarme en cuenta en oportunidades profesionales y asegurar las mejores oportunidades para nosotros los futuros ingenieros químicos.

Extiendo un agradecimiento especial a Grupo Energético Delta, S.A. (BioDelta), empresa pionera en Guatemala en la producción de biodiésel, cuyo liderazgo ha sentado bases técnicas e industriales para el sector. Su visión, rigor y compromiso con la sostenibilidad han sido un referente para vincular la investigación universitaria con necesidades reales de la industria. Agradezco, en particular, su apertura para compartir buenas prácticas, criterios de calidad y experiencias de campo, que enriquecieron la perspectiva técnica y aplicativa de este trabajo.

Finalmente, agradezco a los técnicos del Laboratorio de Operaciones Unitarias, José Coc, Cristian García y Héctor Molina, por su apoyo durante estos cuatro años de involucramiento en el Departamento de Ingeniería Química. Su disposición para enseñar, resolver dudas de distintos sectores e, incluso, apoyar fuera de horario, marcó una diferencia en mi formación y en la ejecución de este trabajo de graduación y otros proyectos a lo largo de mi carrera.

ÍNDICE

PREFACIO	IX
LISTADO DE CUADROS	XIII
LISTADO DE FIGURAS	XV
LISTADO DE CÁLCULOS	XVI
LISTADO DE ECUACIONES	XVII
RESUMEN	XVIII
ABSTRACT	XIX
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
A. GENERAL	3
B. ESPECÍFICOS	3
III. JUSTIFICACIÓN	4
IV. MARCO TEÓRICO	6
A. LAS GRASAS ANIMALES Y LA TRANSESTERIFICACIÓN.....	6
B. MERCADO DE ACEITE VEGETAL	8
C. LOS ÁCIDOS GRASOS.....	13
D. EL DESODO DEL ACEITE DE PALMA	15
E. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL PFAD	16
F. LA ESTERIFICACIÓN ÁCIDA.....	17
G. LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.....	20
H. PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE BIODIÉSEL	24
I. CALIDAD DEL BIODIÉSEL.....	28
J. RETOS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL	30
K. REGULACIÓN Y POLÍTICAS DE BIOCOMBUSTIBLES	31
L. MERCADO Y APLICACIONES DEL BIODIÉSEL	33
V. ANTECEDENTES	35
VI. METODOLOGÍA	38
A. CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁCIDOS GRASOS DESTILADOS DE PALMA (PFAD).....	38
B. PRODUCCIÓN DE ÉSTERES METÁLICOS.....	41
C. CARACTERIZACIÓN DE LOS ÉSTERES METÁLICOS.....	43
VII. RESULTADOS	49
VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
IX. CONCLUSIONES	69
X. RECOMENDACIONES	70
XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
XII. ANEXOS	76
A. DATOS ORIGINALES.....	76
B. CÁLCULOS DE MUESTRA	85
C. DATOS CALCULADOS.....	99

D. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO	111
E. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL PROCESO A ESCALA LABORATORIO.....	112
F. DATOS DE PLACA	113
G. ILUSTRACIONES	115
H. FICHAS TÉCNICAS	120
I. COPIA DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS	126
J. GLOSARIO	128
K. ECUACIONES	136

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1: Normas para la calidad del biodiésel	29
Cuadro 2: Propiedades fisicoquímicas presentes en una muestra de PFAD	49
Cuadro 3: Cantidad de metanol 99.9%(m/m) a emplear para diferentes relaciones molares para la esterificación de PFAD	49
Cuadro 4: Porcentaje de conversión de PFAD a FAME	50
Cuadro 5: Operaciones unitarias para el proceso de producción de ésteres metílicos (biodiésel) a partir de ácidos grasos libres de palma destilados y sus condiciones de operación en cada etapa a partir de las condiciones a escala laboratorio para 100kg como base.....	52
Cuadro 6: Propiedades fisicoquímicas del biodiésel que presentó la mayor conversión a partir de PFAD	54
Cuadro 7: Comparación de la caracterización fisicoquímica de los ésteres metílicos obtenidos de la relación molar con la mayor conversión.....	55
Cuadro 8: Perfil de ésteres metílicos de ácidos grasos presentes	56
Cuadro 9: Lecturas de contenido de humedad de una muestra de PFAD	76
Cuadro 10: Medición de tiempos para la viscosidad dinámica de PFAD	76
Cuadro 11: Pesos de los PFAD en un picnómetro de 25mL para determinación de la densidad	77
Cuadro 12: Pesos para la estandarización de una solución de hidróxido de sodio.....	77
Cuadro 13: Volúmenes de consumo de NaOH para la titulación de los PFAD	77
Cuadro 14: Lecturas del potencial de hidrógeno en una muestra de PFAD.....	78
Cuadro 15: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 1:1 .	78
Cuadro 16: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 2:1 .	79
Cuadro 17: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 4:1 .	79
Cuadro 18: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 6:1 .	80
Cuadro 19: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 8:1 .	80
Cuadro 20: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 10:1	81
Cuadro 21: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 12:1	81
Cuadro 22: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 14:1	82
Cuadro 23: Lecturas de contenido de humedad del biodiésel que presentó la mayor conversión a partir de PFAD.....	82
Cuadro 24: Medición de tiempos para la viscosidad dinámica del biodiésel con la mayor conversión a partir de PFAD.....	83
Cuadro 25: Pesos de los del biodiésel con la mayor conversión a partir de PFAD en un picnómetro de 25mL	83
Cuadro 26: Titulación del biodiésel con la mayor conversión a partir de PFAD.....	84
Cuadro 27: Lecturas del potencial de hidrógeno en una muestra de biodiésel con la mayor conversión a partir de PFAD.....	84
Cuadro 28: Determinación de la molaridad de la solución de hidróxido de sodio.....	99
Cuadro 29: Determinación de índice de acidez de los PFAD	99
Cuadro 30: Propiedades fisicoquímicas calculadas presentes en una muestra de PFAD	100
Cuadro 31: Porcentaje de conversión de PFAD a FAME para las diferentes relaciones molares	100

Cuadro 32: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:1 post reacción.....	101
Cuadro 33: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:2 post reacción.....	101
Cuadro 34: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:4 post reacción.....	102
Cuadro 35: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:6 post reacción.....	102
Cuadro 36: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:8 post reacción.....	103
Cuadro 37: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:10 post reacción.....	103
Cuadro 38: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:12 post reacción.....	104
Cuadro 39: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:14 post reacción.....	104
Cuadro 40: Determinación de la densidad del biodiésel que presentó la mayor conversión.....	105
Cuadro 41: Determinación de la humedad del biodiésel que presentó la mayor conversión.....	105
Cuadro 42: Determinación de la viscosidad del biodiésel que presentó la mayor conversión.....	106
Cuadro 43: Determinación del potencial de hidrógeno biodiésel que presentó la mayor conversión.....	106
Cuadro 44: Determinación del poder calorífico del biodiésel que presentó la mayor conversión.....	107
Cuadro 45: Determinación del número ácido del biodiésel que presentó la mayor conversión.....	107
Cuadro 46: Desglose de los datos del modelo cinético para la Esterificación ácida en reactor por lotes isoterma.....	108
Cuadro 47: Datos de placa de la estufa con agitador magnético BEVOR SH-3A/B.....	113
Cuadro 48: Datos de placa de la centrifuga Benchmark LC-8 Series.....	113
Cuadro 49: Datos de placa del baño de viscosidad PolyScience.....	113
Cuadro 50: Datos de placa de la balanza analítica Ohaus Pioneer PX163.....	114
Cuadro 51: Datos de placa de la balanza de humedad Ohaus MB120.....	114
Cuadro 52: Datos de placa de la balanza Ohaus de 2kg.....	114

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Reacción de transesterificación	6
Figura 2: Mapa de distribución de las plantaciones de palma de aceite y sus plantas de beneficio por región palmera.	10
Figura 3: Estructura general de un ácido graso	13
Figura 4: Tipos de ácidos grasos	14
Figura 5: Mecanismo de reacción para una esterificación ácida	18
Figura 6: Reacción de transesterificación en medio básico.....	21
Figura 7: Reacción de transesterificación en medio ácido	22
Figura 8: Hidrólisis parcial de los triglicéridos	23
Figura 9: Conversión de transesterificación de aceite vegetal, triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos intermedios a éster metílico a 50°C y 60°C.	24
Figura 10: Diagrama de bloques para la transesterificación básica del aceite vegetal usado	24
Figura 11: Avance de la reacción para la formación de ésteres metílicos.....	26
Figura 12: Comparación de las diferentes tecnologías para la producción de biodiésel. .	27
Figura 13: Conversión de PFAD a FAME según la relación molar.	51
Figura 14: Diagrama de flujo de proceso para las operaciones unitarias propuestas	53
Figura 15: Gráfica de la cinética de reacción de los ácidos grasos libres destilados en el tiempo modelada en Berkeley Madonna.....	109
Figura 16: Diagrama de flujo de proceso para las operaciones unitarias propuestas	111
Figura 17: Balance de masa y energía para la producción de biodiésel con una relación molar 6:1	112
Figura 18: Muestra de ácidos grasos libres destilados de palma a temperatura ambiente (25°C).....	115
Figura 19: Muestra de ácidos grasos libres destilados de palma (60°C)	115
Figura 20: Reacción con relación molar 1:1 luego de 30 minutos	116
Figura 21: Reacción con relación molar 1:1 luego de 2 días.....	116
Figura 22: Muestra de prueba 3/27 positiva para relación molar 1:6	117
Figura 23: Ejemplo de catálisis ácida no controlada	117
Figura 24: Diferencia entre ácidos grasos libres destilados de soya y de palma	118
Figura 25: Diagrama de proceso y condiciones de operación para recuperación de la muestra de PFAD	118
Figura 26: Diagrama de proceso para el desodo del aceite de palma africana	119
Figura 27: Diagrama de flujo de proceso para el desodo de PFAD	119
Figura 28: Ficha técnica de pellets de hidróxido de sodio al 99.9% m/m	120
Figura 29: Ficha técnica de metanol	121
Figura 30: Ficha técnica de ftalato ácido de potasio patrón primario.....	122
Figura 31: Ficha técnica de ácido sulfúrico	123
Figura 32: Ficha técnica de ácidos grasos de palma destilados	124
Figura 33: Cromatograma de gases para el biodiésel obtenido	126
Figura 34: Perfil de ácidos grasos por tiempos de retención	127

LISTADO DE CÁLCULOS

Cálculo 1: Ecuación para tamaño de muestra en la estimación de una media con población infinita.....	85
Cálculo 2: Determinación de la densidad de los ácidos grasos libres destilados de palma	85
Cálculo 3: Viscosidad dinámica de los ácidos grasos libres de palma destilados	85
Cálculo 4: Molaridad de una solución titulante de hidróxido de sodio.....	86
Cálculo 5: Cantidad de ácidos grasos libres presentes en una muestra de ácidos grasos libres destilados de palma	86
Cálculo 6: Estimación del índice de cetano	87
Cálculo 7: Determinación de la media estadística para la molaridad de la solución de hidróxido de sodio.....	87
Cálculo 8: Propagación de error la media de la densidad del biodiésel.....	87
Cálculo 9: Determinación de la desviación estándar del biodiésel	88
Cálculo 10: Determinación del intervalo de confianza para la densidad del biodiésel.....	88
Cálculo 11: Determinación del coeficiente de variación para la densidad del biodiésel ..	88
Cálculo 12: Determinación de la energía necesaria para fusionar los PFAD	89
Cálculo 13: Determinación de la velocidad de agitación escalado por potencia por volumen constante (operación ya fundida, régimen turbulento).....	90
Cálculo 14: Revisión de velocidad de punta bajo P/V constante.....	90
Cálculo 15: Reynolds del impulsor a 118 rpm (PFAD a 60 °C) con D/T=0.40	91
Cálculo 16: Modelo cinético (ley de acción de masas + exceso de MeOH).....	92
Cálculo 17: Balances en batch y “acercamiento exponencial” al equilibrio.....	93
Cálculo 18: Tiempo para alcanzar una fracción ϕ de X_{eq}	94
Cálculo 19: Verificación de 120 minutos para conversiones mayores a 0.99	95
Cálculo 20: Geometría y alturas de fase	96
Cálculo 21: Velocidad terminal no obstaculizada (Stokes)	96
Cálculo 22: Emulsión densa normal (asentamiento obstaculizado por lavado).....	97
Cálculo 23: Tiempo total decantación.....	97
Cálculo 24: Prueba t-Student para verificar compatibilidad de la densidad con un valor dentro del rango experimental.....	98

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1: Determinación de la viscosidad cinemática de PFAD.....	136
Ecuación 2: Determinación de la densidad de PFAD.....	136
Ecuación 3: Determinación de la molaridad de NaOH para solución titulante de PFAD.....	136
Ecuación 4: Determinación de la molaridad de NaOH para solución titulante de biodiésel.....	136
Ecuación 5: Determinación de la densidad de biodiésel.....	136
Ecuación 6: Número de Cetano estimado por Gopinath et al., 2009.....	137
Ecuación 7: Determinación de la media estadística.....	137
Ecuación 8: Determinación de la desviación estándar.....	137
Ecuación 9: Determinación del intervalo de confianza.....	138
Ecuación 10: Determinación del coeficiente de variación.....	138
Ecuación 11: Propagación de error para la multiplicación por una constante.....	138
Ecuación 12: Propagación de error para suma y resta de dos medidas.....	138
Ecuación 13: Propagación de error para la multiplicación de dos medidas.....	139
Ecuación 14: Propagación de error para el cociente de dos medidas.....	139
Ecuación 15: Potencia específica de agitación (ecuación de potencias).....	139
Ecuación 16: Escalamiento geométrico (diámetro de impulsor vs. volumen).....	139
Ecuación 17: Relación de diseño impulsor–tanque.....	140
Ecuación 18: Número de Reynolds en agitación.....	140
Ecuación 19: Balance diferencial simplificado de esterificación reversible (pseudo-1er orden).....	140
Ecuación 20: Conversión temporal hacia el equilibrio en sistema reversible (pseudo-1er orden).....	141
Ecuación 21: Área de sección circular.....	141
Ecuación 22: Velocidad terminal no obstaculizada (ley de Stokes).....	141
Ecuación 23: Sedimentación obstaculizada correlación de Maude-Whitmore / Richardson-Zaki:.....	142
Ecuación 24: Tiempo total decantación.....	142

RESUMEN

El trabajo se centró en evaluar, a escala de laboratorio, la producción de ésteres metílicos (FAME) a partir de ácidos grasos libres destilados del desodo de aceite de palma africana (PFAD). Se definieron objetivos para identificar la relación molar metanol:PFAD que maximiza la conversión, caracterizar el biodiésel obtenido y proponer las operaciones unitarias y condiciones de operación como base para un eventual escalamiento piloto. La metodología incluyó la caracterización de PFAD y de los FAME, la determinación del metanol empleado para la esterificación ácido-catalizada y la verificación de resultados bajo condiciones determinadas a partir de la literatura; de esta forma se está contribuyendo a la valorización del PFAD en un enfoque de economía circular aplicable al contexto guatemalteco.

En la etapa experimental se ejecutaron corridas en quintuplicado a 60 °C, 120 min y 0.978 atm, obteniendo estadística descriptiva para el análisis de conversión AGL a FAME. La conversión aumentó con el exceso de alcohol y se estabilizó alrededor de 98.77 % en el intervalo 1:6–1:10; la mayor conversión (98.7685 ± 0.0179)% se alcanzó en 1:6, mientras que relaciones superiores mostraron ligeros descensos por dilución y limitaciones de transferencia de masa. Con base en ello, se propusieron las principales operaciones unitarias y condiciones de operación: relación molar PFAD:MeOH = 6:1, H₂SO₄ al 97%(m/m) de 1 % el peso de la muestra, agitación 250 rpm, decantación a 55 °C por 60 min y lavado líquido-líquido, entre otras etapas. El biodiésel resultante cumplió parámetros clave de ASTM D6751 y EN 14214 y mostró un perfil cromatográfico dominado por metil oleato y metil palmitato, evidenciando viabilidad técnica para su uso y para un escalamiento posterior.

Palabras clave: PFAD; esterificación ácida; ésteres metílicos (FAME); relación molar; operaciones unitarias; economía circular; ASTM D6751; EN 14214; caracterización fisicoquímica; GC-MS; número de cetano.

ABSTRACT

The study focused on evaluating, at laboratory scale, the production of fatty acid methyl esters (FAME) from palm fatty acid distillate (PFAD) obtained from the deodorization step of African palm oil refining. The objectives were to identify the methanol:PFAD molar ratio that maximizes conversion, to characterize the biodiesel produced, and to propose the unit operations and operating conditions as a basis for eventual pilot-scale deployment. The methodology comprised characterization of both PFAD and FAME, determination of the methanol required for acid-catalyzed esterification, and verification of results under literature-informed conditions, thereby contributing to the valorization of PFAD within a circular-economy approach applicable to the Guatemalan context.

In the experimental phase, quintuplicate runs were performed at 60 °C, 120 min, and 0.978 atm, enabling descriptive statistical analysis of the FFA-to-FAME conversion. Conversion increased with alcohol excess and stabilized at approximately 98.77% within the 1:6–1:10 range; the highest value (98.7685 ± 0.0179) was achieved at 1:6. Higher ratios exhibited slight decreases, attributable to dilution and mass-transfer limitations. Based on these findings, the principal unit operations and conditions were proposed: MeOH:PFAD = 6:1, H₂SO₄ at 1 % w/w, agitation at 250 rpm, decantation at 55 °C for 60 min, and liquid–liquid washing, among other steps. The resulting biodiesel met key parameters of ASTM D6751 and EN 14214 and displayed a chromatographic profile dominated by methyl oleate and methyl palmitate, indicating technical feasibility for practical use and subsequent scale-up.

Keywords: PFAD: Acid-catalyzed esterification; fatty acid methyl esters (FAME); molar ratio; unit operations; circular economy; ASTM D6751; EN 14214; physicochemical characterization; GC-MS; cetane number.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente dependencia de los países a los combustibles fósiles y los efectos adversos del cambio climático ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas renovables capaces de integrarse sin mayores modificaciones a la infraestructura de transporte existente. En este contexto, el biodiésel, una mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos, se ha consolidado como una opción atractiva debido a su carácter biodegradable, su menor toxicidad y su capacidad para reducir las emisiones netas de CO₂ en comparación con el diésel de petróleo (International Energy Agency, 2023). Tradicionalmente, la materia prima para producir biodiésel proviene de aceites vegetales refinados; sin embargo, estos insumos compiten con el sector alimentario y tienden a presentar un costo elevado, lo que limita la escalabilidad económica del proceso (Demirbaş, 2009).

En Guatemala, la refinación de aceite de palma africana genera el destilado de ácidos grasos de palma (PFAD), un subproducto con un contenido de ácidos grasos libres (AGL) que varía típicamente entre el 70 % y el 95 % en peso. Al tratarse de un residuo de bajo valor comercial, el PFAD constituye un candidato ideal para un modelo de economía circular, aprovechando un flujo actualmente exportado y reduciendo tanto costos de materia prima como el impacto ambiental del vertido de residuos oleaginosos. No obstante, su elevada acidez dificulta la transesterificación básica: por encima de un 3 % de AGL, la formación de jabones inhibe significativamente la conversión en ésteres (Chongkhong, Tan, & Lee, 2007). Para disminuir este obstáculo, se aplica una esterificación ácida previa, empleando metanol y ácido sulfúrico como catalizador, que rebaja el índice de acidez y convierte los AGL en metil ésteres. Estudios han reportado rendimientos superiores al 95 % a 60 °C y con relaciones molares metanol:AGL de 6:1 a 10:1, en tiempos de reacción de 1 a 3 horas (Rofiqah, Aziz, & Ahmad, 2018; Faisal, Islam, & Masjuki, 2011). Adicionalmente, esta ruta puede reducir hasta un 80 % las emisiones netas de CO₂ frente al diésel fósil, reforzando su potencial como estrategia de mitigación climática (U.S. Department of Energy, 2024).

Además, Guatemala ha sido pionera en la región en el desarrollo de la agroindustria de palma africana. Desde la instalación de sus primeras plantaciones comerciales a mediados de la década de 1970, el país consolidó una cadena productiva integrada que abarca el cultivo, la extracción y el refinado del aceite de palma, alcanzando una producción anual superior a las 150 000 toneladas de aceite crudo (FAO, 2022). Este liderazgo histórico no solo asegura un suministro continuo de aceite para consumo, sino que también genera grandes volúmenes de destilado de ácidos grasos de palma (PFAD) a bajo costo, convirtiéndolo en la materia prima para valorizar mediante procesos de esterificación y transesterificación en la producción de biodiésel.

El presente trabajo de graduación evalúa, a escala de laboratorio, la viabilidad de producir biodiésel a partir de PFAD guatemalteco. Para ello, se realizará una caracterización del PFAD; humedad, índice de acidez, densidad y viscosidad, se evaluará las condiciones de la esterificación ácida (estrictamente la relación molar metanol:PFAD) y se cuantificará la conversión de AGL mediante cromatografía de gases–masa. Posteriormente, el biodiésel obtenido será analizado según las especificaciones de las normas ASTM D6751 y EN 14214, y se propondrá un esquema operativo preliminar destinados a orientar un posible escalamiento a planta piloto. Con ello, esta investigación aporta datos experimentales y criterios de diseño que pueden sentar las bases para proyectos industriales capaces de valorizar subproductos oleaginosos y fortalecer la transición energética de Guatemala.

II. OBJETIVOS

A. GENERAL

- Evaluar la producción de ésteres metílicos a partir de ácidos grasos libres destilados de la desodorización de aceite de palma africana.

B. ESPECÍFICOS

- Cuantificar el porcentaje de ácidos grasos libres para calcular estequiométricamente la cantidad de metanol para producir ésteres metílicos.
- Determinar la relación molar aceite/metanol que presente la mayor conversión de ácidos grasos libres destilados por medio de una esterificación ácida.
- Caracterizar fisicoquímicamente los ésteres metílicos obtenidos de la relación molar que presente la mayor conversión, comparándolos con los estándares establecidos para biodiésel internacionalmente.
- Proponer las operaciones unitarias y las condiciones de operación para la producción de ésteres metílicos a partir de ácidos grasos destilados.

III. JUSTIFICACIÓN

La producción global de biocombustibles ha mostrado un crecimiento sostenido en las últimas dos décadas, motivado por la urgencia de diversificar la matriz energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El aceite de palma representa cerca del 39 % de la producción mundial de aceites vegetales, alcanzando 77.56 millones de toneladas en la campaña 2022–2023 (USDA, 2024). Durante el mismo periodo, el destilado de ácidos grasos de palma (PFAD) se generó en una proporción aproximada del 4 % sobre el volumen total de aceite, es decir, alrededor de 3.10 millones de toneladas, las cuales son mayoritariamente destinadas a la industria jabonera y otros usos de bajo valor (Chongkhong, Wongrerkdee, & Laosiripojana, 2007; Chang, Huang, & Liaw, 2016). Esta situación revela una oportunidad para reconvertir un subproducto tan abundante en un combustible renovable de alto impacto y valor agregado.

Los ácidos grasos libres destilados (PFAD), compuesto esencialmente por ácidos grasos libres, presenta un contenido de AGL que puede oscilar entre el 70 % y el 95 % en peso, lo cual dificulta los procesos convencionales de transesterificación alcalina y exige un pretratamiento ácido (Chongkhong et al., 2007). La escasa valorización de este subproducto limita su contribución a la economía circular y a la mitigación ambiental, mientras que la sobreoferta mantiene sus precios bajos en el mercado global (Chang et al., 2016). Convertir PFAD en ésteres metílicos mediante esterificación ácida permite elevar su valor, reducir la generación de residuos y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Además, la transformación de PFAD en biodiésel contribuye a diversificar la matriz energética y a fomentar prácticas industriales más sostenibles.

En Guatemala, la palma africana ocupa más de 200 000 ha de cultivo y produjo 1 010 000 toneladas métricas de fruto en la campaña 2022/2023, con un rendimiento promedio de 5.10 t/ha (USDA, 2025). Aplicando la proporción típica de destilado (4 %), ello implica una generación anual de PFAD superior a 40 400 toneladas, actualmente subutilizadas o destinadas a usos de baja valorización. A pesar de este potencial, no existen estudios nacionales que evalúen la conversión de PFAD a biodiésel ni su caracterización físico-química en condiciones de laboratorio. Este vacío limita la formulación de estrategias de aprovechamiento local y el desarrollo de tecnologías adaptadas al contexto guatemalteco.

La ausencia de investigaciones en Guatemala sobre la esterificación de PFAD para la producción de biodiésel genera una brecha de conocimiento aplicado que impide aprovechar un residuo abundante y de bajo costo. En la literatura internacional se reportan rendimientos de conversión de ácidos grasos libres a ésteres metílicos del 75 % al 90 %, con formación de glicerina en un rango del 10 % al 25 %, dependiendo de las condiciones de reacción (Meher, Sagar, & Naik, 2006; Ma & Hanna, 1999). Sin embargo, estas condiciones no han sido adaptadas ni validadas para PFAD guatemalteco, cuya composición puede variar según la variedad de palma y el proceso de refinación local. Cerrar esta brecha es esencial para impulsar una industria de biodiésel más sostenible, rentable y resiliente en el país.

La presente investigación se propone evaluar la viabilidad técnica de producir ésteres metílicos a escala de laboratorio a partir de los ácidos grasos libres destilados de aceite de palma africana (PFAD). Se emplea la esterificación ácida con H_2SO_4 como catalizador, variando la relación molar y dejando fija la temperatura y las condiciones de agitación para obtener la conversión de PFAD a FAME (Chongkhong et al., 2007). Además, se caracterizarán las propiedades físicoquímicas del biodiésel obtenido. Con este enfoque, se establecen las bases iniciales a escala laboratorio para el aprovechamiento del PFAD en Guatemala y contribuir al desarrollo de combustibles renovables para que en siguientes investigaciones se estudie el del residuo de otros ácidos grasos generados en el país o se proponga el primer escalamiento a escala piloto de la producción de biodiésel con PFAD.

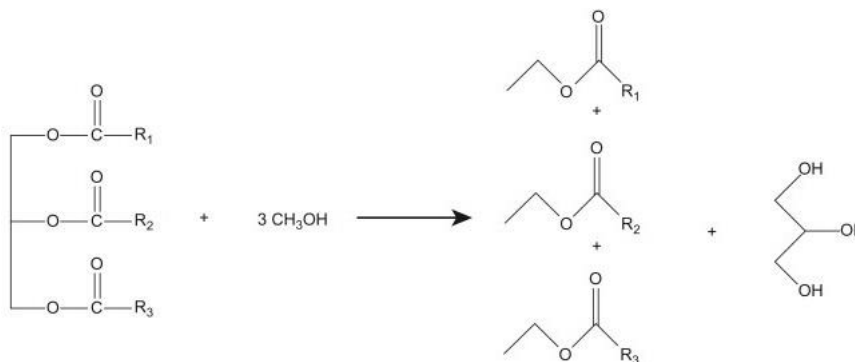
IV. MARCO TEÓRICO

A. LAS GRASAS ANIMALES Y LA TRANSESTERIFICACIÓN

Los componentes principales que existen en las grasas animales y el aceite vegetal son los triglicéridos. Estos son ésteres de ácidos grasos junto a una cadena de glicerol y los ácidos se encuentran en diferentes proporciones en cualquier rama. Dependiendo del tipo de aceite o grasa se tome una muestra se tienen diferentes propiedades físicas y químicas. Para elaborar biodiésel es necesaria una grasa animal o vegetal y someterla a una reacción de transesterificación (Sato, 1927).

En la reacción de transesterificación el triglicérido de la grasa animal o vegetal, en presencia de un catalizador, generalmente básico, y un alcohol se transforman en un éster alquílico dependiendo del alcohol empleado. Estos ésteres alquílicos se encuentran mezclados posterior a la reacción pues varían dependiendo de la fuente original. En la mayoría de los casos se encuentran ésteres de metilo o ésteres de étilo, FAME y FAEE en sus siglas en inglés respectivamente (Wang, 1988).

Figura 1: Reacción de transesterificación



(Fuente: Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005)

El biodiésel puede ser producido a partir de una gran variedad de materias primas que contengan triglicéridos o ácidos grasos. Lo más comunes son el aceite vegetal como la soja, palma, canola, girasol, coco o las grasas animales como la de cerdo; la materia prima puede ser tanto virgen como usada previamente. Para determinar cuál será la fuente destinada para la elaboración de este combustible es necesaria una larga lista de estudios como los tipos de materia prima, geografía, pretratamientos entre otros (Koo & Cheng, 1935).

Los ésteres alquílicos, conocidos como biodiésel, son miscibles en cualquier proporción con el diésel de petróleo. Muchos países elaboran mezclas de biodiésel y diésel, sin embargo, luego de realizar esta mezcla se reconoce a este combustible por su acrónimo como B “X”, donde la X representa la cantidad porcentual de los ésteres de alquilo en el diésel. Un B20, la mezcla que generalmente se usa a lo largo del mundo, representa un 20% biodiésel y 80% diésel; las mezclas dependen de la calidad del combustible, capacidad de producción y regulaciones gubernamentales (Dalal & Mehta, 1939).

El alcohol principal a lo largo del mundo empleado para la producción de biodiésel es el metanol, esto se debe a que es, generalmente, menos costoso comparado con el etanol o el isopropanol que por sus cadenas extra en la estructura, son capaces de mejorar las propiedades del combustible. El metanol es un derivado del petróleo, se elabora a partir del metano por la reacción de una oxidación catalítica. Por este motivo, varios países como Brasil están tomando medidas para la implementación de BioEtanol en las producciones de biodiésel, pues es un alcohol formado por la fermentación de la melaza y otros residuos de la industria azucarera (Bailer & de Hueber, 1991).

Existen muchas ventajas por el uso de biodiésel comparado con el diésel de petróleo, una gran ejemplo son materias primas para su elaboración son renovables y domésticas, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles; biodegradabilidad hasta 30% menor que el diésel; reducción de la mayoría de gases de efecto invernadero; mayor punto de inflamación aumentando la seguridad de almacenamiento y un gran poder de ser un lubricante en el motor en mezclas como un B2 a B5 (Physical Chemistry Research Co., 1933).

Sin embargo, algunos problemas asociados con el biodiésel, dependiendo del país, son un precio mayor al del diésel de petróleo, incremento de los óxidos de nitrógeno, la estabilidad oxidativa si no hay un control riguroso y su punto de niebla, es decir, se puede congelar en temperaturas menores o cercana a los cero grados Celsius. Vale la pena mencionar que a pesar de esto, el principal motivo de realizar una transesterificación del aceite vegetal y grasa animal usada son las propiedades tan similares con el petrodiesel, convirtiendo a estos ésteres de alquilo una gran alternativa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005).

B. MERCADO DE ACEITE VEGETAL

El aceite vegetal constituye un componente esencial en la dieta y la industria alimentaria de Guatemala, al ofrecer una fuente concentrada de ácidos grasos y energía. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), los aceites vegetales, incluida la palma, representan uno de los principales subsectores agroalimentarios del país, destacándose por su versatilidad en la cocina y en aplicaciones industriales (FAO, 2021). A nivel global, estos productos han mostrado una tendencia al alza en la demanda, lo cual impacta directamente en los mercados nacionales y en las políticas de importación y producción locales (FAO, 2025). La importancia de estos aceites radica también en su capacidad para integrarse en procesos de biocombustibles, oleoquímicos y otros usos industriales, ampliando su relevancia más allá de la alimentación. De este modo, el análisis del aceite vegetal en Guatemala comprende tanto su papel tradicional en el consumo doméstico como su creciente relevancia en la economía sostenible (FAO, 2021).

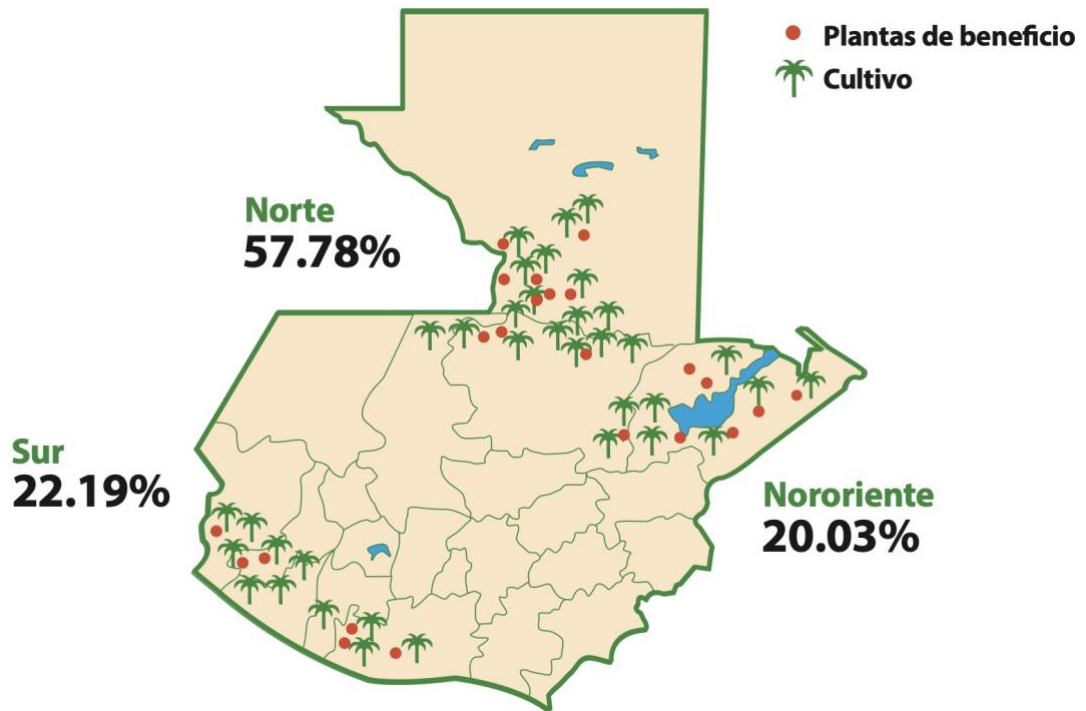
En Guatemala, los dos principales aceites vegetales comercializados son el de palma y el de soya, aunque este último se obtiene principalmente mediante importaciones. En 2023, Guatemala importó aproximadamente 288 millones de dólares en aceite de soya y otros residuos sólidos relacionados, ubicándose como el 34.º importador mundial de este producto (OEC, 2025). Esta dependencia de las importaciones contrasta con la producción local de aceite de palma, que ha cobrado gran protagonismo en las últimas décadas. Además, el precio internacional de los aceites vegetales, y en particular del aceite de palma, influye en los costos domésticos y en la competitividad de los productos guatemaltecos (FAO, 2025). Por tanto, el mercado nacional de aceites vegetales se caracteriza por una combinación de producción local para la palma y de importaciones para la soya, canola y girasol.

El consumo *per cápita* de aceite vegetal en Guatemala se vincula estrechamente con patrones alimentarios tradicionales y con la demanda de la industria de alimentos procesados. De acuerdo con datos de la FAO, el índice de precios de los aceites vegetales alcanzó en junio de 2025 un promedio de 155.7 puntos, reflejando un aumento interanual impulsado por los aceites de palma, soya y colza (FAO, 2025). Estos precios más elevados se transmiten al consumidor final, afectando tanto a las familias de menores ingresos como a las grandes cadenas de alimentos. Asimismo, la industria guatemalteca ha comenzado a explorar alternativas como la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal, incorporando modelos de economía circular y reducción de residuos. En este contexto, comprender las dinámicas de consumo y precio resulta fundamental para diseñar políticas públicas y estrategias empresariales que garanticen la seguridad alimentaria y la sostenibilidad económica.

La regulación y promoción del cultivo de aceite de palma en Guatemala ha estado liderada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) y la Gremial de Palmicultores de Guatemala (GREPALMA). Desde 2016, GREPALMA publica anualmente su “Estadísticas socioeconómicas”, donde destaca el avance en certificaciones sostenibles y el fortalecimiento de la cadena productiva (GREPALMA, 2024). Estas iniciativas buscan mejorar la trazabilidad, implementar buenas prácticas agronómicas y asegurar el cumplimiento de estándares internacionales, como los Principios y Criterios de la Mesa Redonda de Aceite de Palma Sostenible (RSPO). De este modo, el marco normativo y gremial ofrece un respaldo técnico y comercial a los productores locales, fomentando la competitividad y el acceso a mercados de alto valor. Además, se promueven programas de capacitación y asistencia técnica para pequeños y medianos productores, lo que contribuye a una palmicultura más inclusiva y sostenible.

El cultivo de palma aceitera en Guatemala ha experimentado un crecimiento considerable, cubriendo alrededor de 180.614 hectáreas al cierre de 2020, distribuidas principalmente en las regiones Norte, Sur y Nororiente (Plaza Pública, 2021). La región Norte concentra el 58.62% de las plantaciones, mientras que Sur y Nororiente aportan el 21.45% y 19.93%, respectivamente (Plaza Pública, 2021). Este incremento responde tanto a la demanda internacional de aceite crudo como a las oportunidades de valor agregado en la agroindustria nacional. Asimismo, la infraestructura de plantas de beneficio se ha expandido para dar respuesta a los volúmenes crecientes de fruto de palma, optimizando procesos de extracción y refinación. El análisis espacial de estas plantaciones muestra un patrón coordinado con las condiciones edafoclimáticas favorables y la disponibilidad de mano de obra local, factores clave para la viabilidad del cultivo.

Figura 2: Mapa de distribución de las plantaciones de palma de aceite y sus plantas de beneficio por región palmera.



(Fuente: GREPALMA, 2023)

La importancia económica de la palmicultura en Guatemala se refleja en su contribución del 1.6% al Producto Interno Bruto y en la generación de 30,103 empleos directos y 150,600 indirectos durante 2023 (GREPALMA, 2023). Además, el aceite de palma aportó más de Q12,500 millones a la economía nacional ese año, consolidándose como uno de los principales rubros de exportación agrícola (GREPALMA, 2023). Estas cifras ponen de relieve el valor estratégico de la industria palmera no solo para los grandes productores, sino también para las comunidades rurales vinculadas a la cadena de suministro. La palmicultura sostenible se ha convertido en un motor de desarrollo regional, especialmente en áreas históricamente marginadas, donde la inversión en infraestructura y capacitación ha mejorado la calidad de vida de los pequeños agricultores. Sin embargo, el sector enfrenta desafíos relacionados con la volatilidad de precios internacionales y la necesidad de diversificar sus productos.

Uno de los pilares de la palmicultura guatemalteca es la certificación bajo estándares de sostenibilidad. Al cierre de 2019, el 39% de las hectáreas cultivadas estaban certificadas por RSPO o ISCC, lo que posiciona a Guatemala como líder latinoamericano en producción de aceite de palma, con 373,404 toneladas certificadas (GREPALMA, 2019). Este reconocimiento internacional impulsa la adopción de prácticas agronómicas cuidadosas con el medio ambiente, la gestión responsable del recurso hídrico y el respeto a los derechos laborales. La certificación también facilita el acceso a mercados premium, donde los consumidores demandan productos con origen y trazabilidad garantizados. No obstante, incrementar la proporción de cultivos certificados plantea retos adicionales en términos de costos y capacitación, aspectos que GREPALMA y el MAGA buscan mitigar mediante subsidios y programas de asistencia técnica.

La dinámica de expansión del cultivo de palma africana entre 2010 y 2020 evidenció una aceleración en el uso de nuevas tierras agrícolas, especialmente en la región Sur y Nororiente, con impactos variables sobre ecosistemas locales (Plaza Pública, 2021). El análisis revela que, pese a las políticas de protección forestal, se identificaron áreas de conversión de uso de suelo que requieren mayor vigilancia y planificación territorial. Asimismo, la gestión del recurso hídrico y la prevención de la contaminación por residuos de procesamiento de fruto de palma se han convertido en temas prioritarios para garantizar la sostenibilidad a largo plazo. El reto consiste en equilibrar la necesidad de crecimiento productivo con la conservación de la biodiversidad y la resiliencia climática de las comunidades rurales. Para ello, se han propuesto estrategias de zonificación y corredores ecológicos que permitan compatibilizar cultivo y conservación.

A nivel social y ambiental, recientes estudios han puesto de manifiesto la relación entre las cadenas de suministro de aceite de palma y la deforestación en zonas sensibles de Guatemala (VanderWilde, 2023). Estas investigaciones señalan que algunos conglomerados transnacionales han impulsado la expansión en áreas de alto valor ecológico, lo que ha generado tensiones con comunidades indígenas y locales. El cuestionamiento ético de estas prácticas ha llevado a fortalecer los mecanismos de certificación y a exigir transparencia en los procesos de abastecimiento. Paralelamente, organizaciones de la sociedad civil han promovido iniciativas de monitoreo ciudadano y programas de restauración de bosques degradados. Este panorama evidencia la necesidad de un enfoque multisectorial que involucre al gobierno, al sector privado y a la academia para construir una palmicultura verdaderamente sostenible.

De cara al futuro, la industria del aceite vegetal en Guatemala enfrenta el desafío de aumentar su competitividad en un mercado global cada vez más exigente en términos de sostenibilidad y valor agregado. Según BBVA Research, el aceite de palma representó en 2023 el 37.5% del consumo total de aceite vegetal a nivel mundial, tendencia que impulsa a los productores guatemaltecos a reforzar su posición en nichos de mercado de alto valor (BBVA Research, 2024). La innovación en productos derivados, como oleoquímicos y biocombustibles avanzados, constituye una vía para diversificar ingresos y reducir la dependencia de las exportaciones crudas. Adicionalmente, la adopción de tecnologías digitales y de precisión agrícola puede optimizar rendimientos y reducir costos operativos. La consolidación de alianzas público-privadas y la atracción de inversiones orientadas a la sostenibilidad serán clave para que Guatemala mantenga y fortalezca su liderazgo en el sector.

El consumo per cápita de aceites vegetales en Guatemala se sitúa alrededor de 108 g diarios, lo que equivale a aproximadamente 39.4 kg anuales por persona (FAO, 2025). Al considerar una población de 17.8 millones de habitantes, esto supone un consumo nacional cercano a las 700 000 toneladas métricas cada año, reflejando tanto el uso doméstico como la demanda de la industria de alimentos procesados (FAO, 2025). Estas cifras también ponen de relieve la creciente integración del aceite vegetal usado en la producción de biodiésel, lo cual está comenzando a modificar las tendencias de consumo y recuperación de grasas en el país.

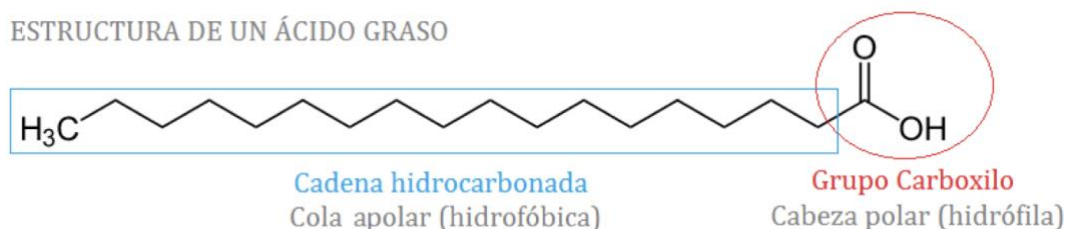
La producción nacional de aceite de palma ha mostrado un crecimiento sostenido, superando el millón de toneladas métricas en 2022, con 1 012 432 toneladas extraídas ese año (GREPALMA, 2024). En 2021, la producción alcanzó 941 964 toneladas, de las cuales el 79 % se destinó a la exportación y el 21 % al consumo interno (GREPALMA, 2024). Este aumento ha posicionado a Guatemala como uno de los principales exportadores mundiales de aceite de palma, lo que fortalece la economía rural y la balanza comercial del sector agroindustrial.

El rendimiento promedio de las plantaciones guatemaltecas es de 5.86 MT/ha, cifra superior al promedio global gracias a la adopción de prácticas agronómicas mejoradas y tecnologías de cultivo de precisión (GREPALMA, 2024). Además, el 39 % de la superficie cultivada cuenta con certificaciones de sostenibilidad RSPO o ISCC, lo que facilita el acceso a mercados de mayor valor y refuerza el compromiso ambiental del sector (GREPALMA, 2024). Estas certificaciones, junto con inversiones en infraestructura de procesamiento y transporte, son fundamentales para sostener el crecimiento y la competitividad de la palmicultura guatemalteca.

C. LOS ÁCIDOS GRASOS

Los ácidos grasos son compuestos orgánicos formados por largas cadenas de carbono que tienen un grupo metilo en un extremo y un grupo carboxilo en el otro. Se clasifican en saturados o insaturados según la presencia de dobles enlaces entre los átomos de carbono. Los ácidos grasos saturados no presentan dobles enlaces, es decir, todos los átomos de carbono están completamente unidos a átomos de hidrógeno. Los ácidos grasos (AG) son moléculas anfipáticas compuestas por una larga cadena hidrocarbonada alifática y un grupo carboxilo terminal; cuando tres de ellos se esterifican con glicerol originan los triacilglicéridos, forma predominante de almacenamiento lipídico en alimentos y organismos vivos.

Figura 3: Estructura general de un ácido graso



(Fuente: Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005)

En el metabolismo, los ácidos grasos juegan un papel fundamental. Actúan como una fuente principal de energía, los seres humanos y animales lo almacenamos en el tejido adiposo en forma de triglicéridos, como transportada en el torrente sanguíneo a través de lipoproteínas. Además, son componentes esenciales de las membranas celulares, donde forman fosfolípidos que contribuyen a la estructura de las células. También funcionan como moléculas señalizadoras que regulan la expresión de genes al unirse a ciertos factores de transcripción. Los ácidos grasos poliinsaturados, como los ácidos grasos omega-3 y omega-6, son especialmente importantes, ya que sirven como precursores de compuestos bioactivos que tienen funciones en la regulación de la inflamación y la respuesta inmunológica (Hénon et al., 1999).

Desde el punto de vista estructural se dividen en saturados, con enlaces carbono-carbono simples, e insaturados, que contienen uno (monoinsaturados) o varios (poliinsaturados) dobles enlaces. La geometría cis introduce un “codo” que impide el empaquetamiento regular, mientras que la configuración trans mantiene la cadena rectilínea y eleva el punto de fusión. Para describirlos se emplean la notación abreviada ($n^\circ C:n^\circ$ dobles enlaces), el sistema Δ , que localiza cada insaturación desde el carbono carboxílico, y el sistema ω , que indica la posición del primer doble enlace desde el extremo metilo; así, el ácido linoleico se expresa como 18:2 Δ 9,12 o 18:2 ω -6. Los mamíferos carecen de desaturasas capaces de introducir dobles enlaces más allá de Δ 9, por lo que el

ácido linoleico (ω -6) y el α -linolénico (ω -3) deben incorporarse con la dieta y se denominan esenciales.

Figura 4: Tipos de ácidos grasos

Esqueleto carbonado (nom. delta Δ)	Estructura	Nombre sistemático	Nombre común	Nomenclatura Omega ω
12:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	Ácido n-dodecanoico	Ácido láurico	
14:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	Ácido n-tetradecanoico	Ácido mirístico	
16:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	Ácido n-hexadecanoico	Ácido palmítico	
18:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	Ácido n-octadecanoico	Ácido estearico	
20:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$	Ácido n-icosanoico	Ácido araquídico	
24:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{COOH}$	Ácido n-tetracosanoico	Ácido lignocérico	
16:1 (Δ^9)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	Ácido cis-9-hexadecenoico	Ácido palmitoleico	
18:1 (Δ^9)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	Ácido cis-9-octadecenoico	Ácido oleico	18:1 ω -9 (Omega 9)
18:2 ($\Delta^{9,12}$)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	Ácido cis-, cis-9,12-octadecadienoico	Ácido linoléico	18:2 ω -6 (Omega 6)
18:3 ($\Delta^{9,12,15}$)	$\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	Ácido cis-, cis-, cis-9,12,15-octadecatrienoico	Ácido α -linolénico	18:3 ω -3 (Omega 3)
20:4 ($\Delta^{5,8,11,14}$)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$	Ácido cis-, cis-, cis-, cis-5,8,11,14-octadecatrienoico	Ácido araquidónico	20:4 ω -6 (Omega 6)

(Fuente: Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005)

Los ácidos grasos tienen una amplia gama de aplicaciones industriales. Se utilizan en la producción de formulaciones farmacéuticas, donde actúan como ingredientes inactivos en medicamentos, en particular en emulsiones grasas utilizadas para la nutrición clínica. Además, los ácidos grasos forman parte de la composición de cosméticos como jabones y emulsiones, debido a sus propiedades surfactantes que permiten la interacción entre las grasas y el agua (Hénon et al., 1999)

La estructura de los ácidos grasos influye directamente en sus propiedades físicas. Los ácidos grasos insaturados, especialmente aquellos con configuraciones en *cis*, tienen puntos de fusión más bajos debido a la torsión de sus moléculas, lo que dificulta que se empaqueten de forma ordenada. Esto explica por qué los ácidos grasos insaturados suelen ser líquidos a temperatura ambiente, mientras que los saturados suelen ser sólidos (Hénon et al., 1999)

Un aspecto importante de los ácidos grasos insaturados es su susceptibilidad a la oxidación. Los ácidos grasos con múltiples enlaces dobles, como los poliinsaturados, son particularmente propensos a oxidarse, lo que puede generar productos tóxicos que dañan las células. Por ello, es esencial que los ácidos grasos insaturados sean manipulados y almacenados de forma adecuada para evitar su degradación y los efectos negativos asociados (De Greyt & Kellens, 2019).

D. EL DESODO DEL ACEITE DE PALMA

La desodorización del aceite de palma es una etapa esencial en el proceso de refinado, cuyo objetivo principal es eliminar compuestos volátiles que causan olores y sabores indeseados. Además, este proceso reduce el contenido de ácidos grasos libres (FFA) y mejora la estabilidad oxidativa y el color del aceite. Durante la desodorización, el aceite es sometido a altas temperaturas, generalmente entre 150 °C y 270 °C, dependiendo del tipo de aceite y los efectos deseados. Este proceso también incluye la aplicación de vacío para facilitar la eliminación de compuestos no deseados, como pesticidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), y contaminantes como los ésteres de glicidilo (GE) (Paine, 2020).

En el caso del aceite de palma, se emplea vapor de agua saturado o sobrecalentado como agente de desodorización. El vapor arrastra los compuestos volátiles, que luego son eliminados del sistema. Este proceso no solo tiene como objetivo mejorar las características sensoriales del aceite, sino que también reduce los niveles de compuestos potencialmente dañinos para la salud. La presión aplicada durante la desodorización es crucial, ya que presiones más bajas permiten que la operación se realice a temperaturas más reducidas, disminuyendo así la formación de isómeros trans, los cuales son menos deseables desde el punto de vista nutricional (Paine, 2020).

Es importante destacar que la desodorización puede llevar a la formación de ciertos compuestos no deseados, como los isómeros trans de los ácidos grasos, especialmente cuando las temperaturas exceden los 230 °C. Para mitigar estos efectos, se han desarrollado técnicas de desodorización a doble temperatura. Este método implica una primera etapa a temperaturas más altas, entre 240 °C y 260 °C, para eliminar los FFA y otros contaminantes volátiles, seguida de una segunda etapa a temperaturas más bajas para completar el proceso sin afectar de manera negativa la calidad del aceite (Paine, 2020).

El tiempo de desodorización también es un factor relevante, ya que varía según el tipo de aceite. Para el aceite de palma, el tiempo suele oscilar entre 30 y 90 minutos, aunque puede ser menor si se utiliza una columna de empaque para la eliminación de ácidos grasos libres. En el caso de aceites más sensibles al calor, como los aceites de pescado, el proceso puede durar hasta 4 horas para evitar la degradación de compuestos más frágiles (Paine, 2020).

E. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL PFAD

Los ácidos grasos de palma destilados (PFAD, por sus siglas en inglés) es un subproducto de bajo valor obtenido durante la etapa de refinación física del aceite de palma crudo, específicamente en el proceso de desodorización. Está constituido principalmente por ácidos grasos libres que se separan junto con compuestos volátiles indeseables mediante destilación al vacío con vapor (Dumont & Narine, 2007). A temperatura ambiente, el PFAD se presenta como una masa semisólida de color marrón claro que, al elevar la temperatura, se funde en un líquido más oscuro (Majd, 2018). Aunque históricamente ha tenido un valor comercial reducido, en las últimas décadas ha cobrado relevancia como materia prima para industrias oleoquímicas y de biocombustibles de segunda generación. Su bajo costo y abundancia lo hacen atractivo para la producción de biodiésel, lubricantes y jabones industriales.

El origen del PFAD se remonta a la tercera etapa del refinado del aceite de palma: la desodorización. Tras la neutralización con solución alcalina (degoma y blanqueo), se introduce vapor de agua bajo vacío en el aceite para eliminar compuestos volátiles que causan olores y sabores no deseados. Durante esta etapa, los ácidos grasos libres residuales y otros compuestos se desprenden y son condensados como PFAD, representando típicamente entre el 3 % y el 5 % en peso del aceite de palma crudo procesado (Majd, 2018). El destilado obtenido se separa de los fraccionamientos principales y, tras enfriarse, constituye el PFAD con alto contenido de ácidos grasos libres.

Guatemala es hoy uno de los principales productores de aceite de palma en Latinoamérica, con una producción estimada de 958 000 toneladas métricas de aceite de palma crudo en el periodo 2020/21 (USDA FAS, 2025). Aplicando un rendimiento promedio de PFAD del 4 % sobre la producción de aceite crudo, se estima que el país genera alrededor de 38 300 toneladas métricas de PFAD al año (Majd, 2018; USDA FAS, 2025). Esta cifra sitúa a Guatemala como un actor relevante en el suministro regional de PFAD, aunque muy por detrás de los gigantes asiáticos que concentran la mayor parte de la producción mundial.

Químicamente, el PFAD está compuesto en más de un 95 % por ácidos grasos libres, entre los cuales predominan el palmítico (C16:0) y el oleico (C18:1), seguidos por cantidades menores de ácido linoleico (C18:2) y ácido esteárico (C18:0) (de Oliveira et al., 2021). Esta composición lo convierte en un candidato ideal para reacciones de desoxigenación y craqueo catalítico destinadas a producir hidrocarburos de rango diesel o gasolina, así como para la síntesis de grasas modificadas en la industria oleoquímica.

En la práctica industrial, el PFAD se destina principalmente a la producción de jabones y detergentes de calidad media, a la alimentación animal en forma de materias grasas, y como materia prima económica para la obtención de biodiésel y biolubricantes (Dumont & Narine, 2007; Salimon, 2010). Su versatilidad permite, además, la generación de productos intermedios para la industria cosmética y farmacéutica.

En cuanto al comercio exterior, Guatemala exporta el PFAD principalmente a mercados de la Unión Europea y Estados Unidos, donde se emplea como materia prima de bajo costo en procesos oleoquímicos y refinación de biocombustibles (de Oliveira et al., 2021). Las importaciones de PFAD son prácticamente nulas, dado que la oferta local cubre la demanda interna y de exportación de este subproducto.

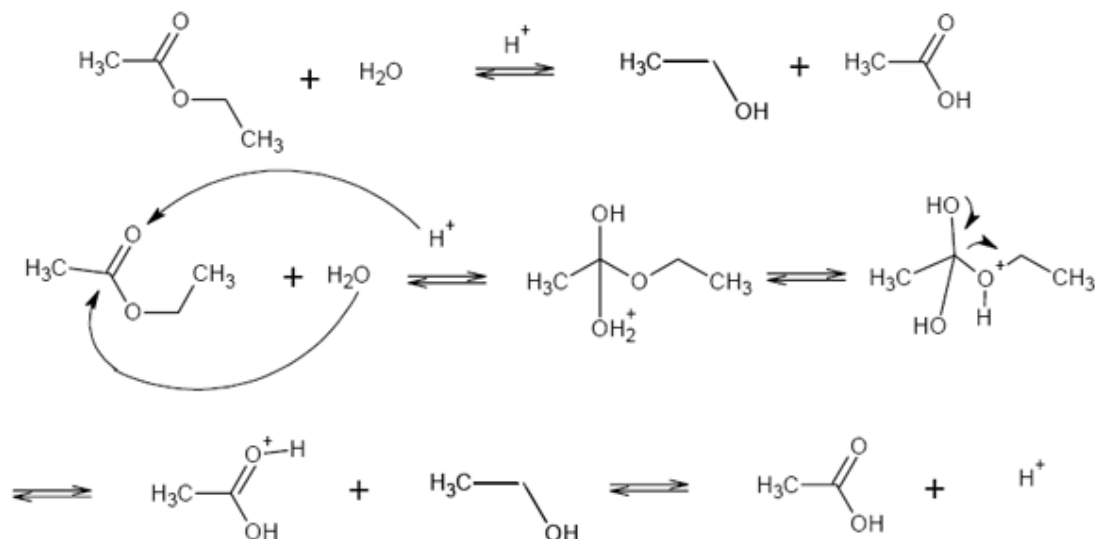
A nivel global, los mayores productores de PFAD son Malasia e Indonesia, responsables de aproximadamente el 80 % de la oferta mundial debido a su liderazgo en la producción de aceite de palma crudo (MPOB, 2019). Guatemala ocupa un lugar menor pero estratégico en Latinoamérica, especialmente por el enfoque en prácticas de producción sostenible certificadas por la RSPO y esquemas de trazabilidad ambiental.

F. LA ESTERIFICACIÓN ÁCIDA

La esterificación ácida es una reacción química fundamental en la producción de biodiésel a partir de ácidos grasos libres (AGL). Consiste en la conversión de estos ácidos grasos en ésteres mediante su reacción con un alcohol, típicamente metanol, en presencia de un catalizador ácido, como el ácido sulfúrico. Este proceso permite reducir el contenido de acidez en materias primas que presentan altos niveles de AGL, lo cual es indispensable para evitar la formación de jabones durante etapas posteriores de transesterificación alcalina (Leung et al., 2010).

A nivel de mecanismo, la reacción de esterificación implica la protonación del grupo carboxilo del ácido graso, lo que lo hace más susceptible a un ataque nucleofílico por parte del alcohol. Posteriormente, se forma un intermediario tetraédrico que pierde una molécula de agua para generar el éster. Como la reacción es reversible, es crucial remover el agua formada para desplazar el equilibrio hacia la formación del producto deseado, incrementando así el rendimiento del biodiésel (Knothe et al., 2005).

Figura 5: Mecanismo de reacción para una esterificación ácida



(Fuente: Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005)

El proceso es particularmente útil para materias primas residuales o de bajo costo que contienen elevados niveles de AGL, como aceites de cocina usados o grasas animales. Estas fuentes no pueden ser sometidas directamente a transesterificación con base, ya que formarían jabones y dificultarían la separación de fases. Por ello, la esterificación ácida es una etapa preliminar necesaria para viabilizar económicamente el uso de estas materias primas (Meher et al., 2006).

En términos operativos, la esterificación ácida se realiza generalmente a temperaturas entre 50 y 65 °C, con proporciones de metanol que pueden variar entre 6:1 y 20:1 respecto al ácido graso, dependiendo del grado de acidez de la materia prima. El catalizador más común es el ácido sulfúrico, en concentraciones que van desde 0.5 hasta 5% en peso respecto al aceite. La agitación adecuada y el control del tiempo de reacción (generalmente entre 1 a 3 horas) son claves para alcanzar conversiones superiores al 90% (Felizardo et al., 2006).

Este proceso es particularmente relevante en el contexto de los PFAD (Palm Fatty Acid Distillate), ya que estos destilados ácidos del proceso de refinación del aceite de palma presentan un contenido de AGL que puede superar el 90%. Por su alto nivel de acidez, los PFAD no pueden someterse a transesterificación directa y requieren esterificación ácida previa. Su transformación en ésteres metílicos representa una vía eficiente para valorizar este subproducto, al tiempo que se evita su descarte como residuo y se mejora su potencial energético como biocombustible (Gui et al., 2008).

Una de las ventajas de utilizar PFAD es que, además de ser abundantes y de bajo costo en países productores de aceite de palma como Guatemala, su transformación en biodiésel mediante esterificación ácida no compite con la cadena alimentaria. Esto los convierte en una materia prima ideal desde el punto de vista ambiental y social. Asimismo, su elevada concentración de AGL permite una reacción eficiente, siempre que se implementen condiciones adecuadas de temperatura, tiempo y relación molar con el metanol (Atabani et al., 2013).

Sin embargo, uno de los principales desafíos en la esterificación ácida de PFAD es el control de la corrosión en los equipos debido al uso de ácidos concentrados y las altas temperaturas de operación. Por lo tanto, es importante seleccionar materiales resistentes como acero inoxidable tipo 316L o recubrimientos especializados. Además, la eliminación eficiente del agua durante la reacción es crucial, lo que puede lograrse mediante el uso de sistemas de arrastre con nitrógeno o vacío, o integrando adsorbentes como zeolitas o tamices moleculares (Gerpen, 2005).

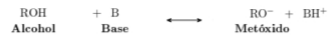
Finalmente, la implementación de la esterificación ácida como etapa previa en una planta de producción de biodiésel a partir de PFAD permite aumentar la eficiencia global del proceso, reducir el impacto ambiental y mejorar la calidad del biocombustible final. Su integración adecuada requiere un diseño cuidadoso, tanto en términos de ingeniería de procesos como de viabilidad económica, pero representa una estrategia clave para diversificar las materias primas y fomentar el aprovechamiento integral de subproductos industriales.

G. LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

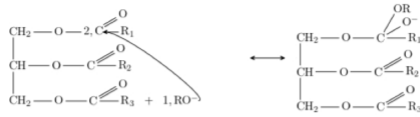
Se han investigado cuatro métodos para reducir la alta viscosidad de los aceites vegetales y avalar su uso en motores diésel comunes sin problemas operativos, como depósitos en el motor: mezcla con petrodiesel, pirolisis, micro emulsificación y transesterificación. La transesterificación es, en general, el método más común. Esta reacción conduce a los productos comúnmente conocidos como biodiesel, es decir, ésteres alquílicos de aceites y grasas como se mencionó en la Figura 1 (Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005).

Además de los aceites vegetales y las grasas animales, otros materiales como los aceites de fritura usados también pueden ser adecuados para la producción de biodiesel; sin embargo, frecuentemente se deben realizar cambios en el procedimiento de reacción debido a la presencia de agua o ácidos grasos libres (FFA) en los materiales. Se han publicado varias revisiones sobre la producción de biodiesel mediante transesterificación. En consecuencia, la producción de biodiesel por transesterificación ha sido pilar de muchos trabajos de investigación. Generalmente, la transesterificación puede llevarse a cabo mediante catálisis básica o ácida. Sin embargo, en la catálisis homogénea, alcalina con hidróxido de sodio o potasio es un proceso mucho más rápido que la catálisis ácida (Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005).

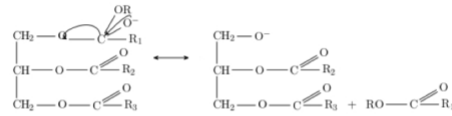
Figura 6: Reacción de transesterificación en medio básico



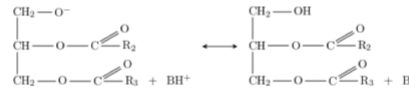
Formación de un ion metóxido y protonación de la base



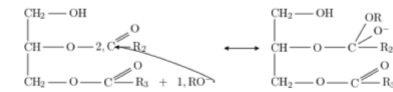
Ataque nucleofílico del metóxido al carbono carbonilo y formación de un compuesto intermediario



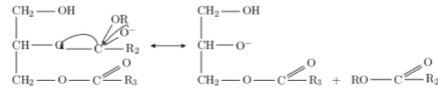
Formación de un ion diglicérido y una molécula de éster del ácido graso



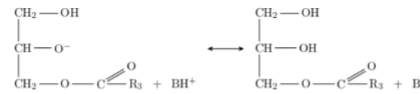
Regeneración de la base y formación de un ion diglicérido



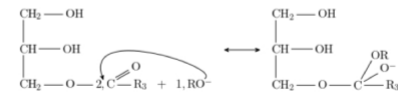
Ataque nucleofílico de un segundo ion metóxido al carbono carbonilo del diglicérido



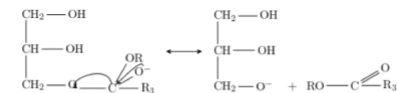
Formación de un ion monoglicérido y segunda molécula de éster del ácido graso



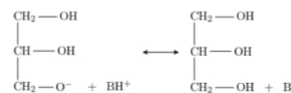
Regeneración de la base y formación de monoglicérido



Ataque nucleofílico de un tercer ion metóxido al carbono carbonilo del monoglicérido



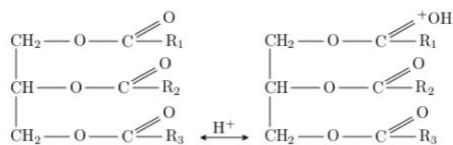
Formación del ion glicerol y tercera molécula de éster del ácido graso



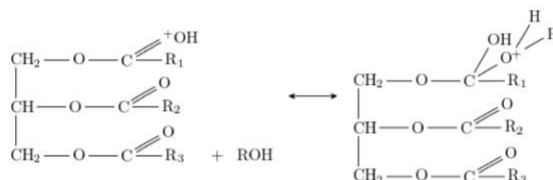
Formación de glicerina y liberación de la base

(Fuente: Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005)

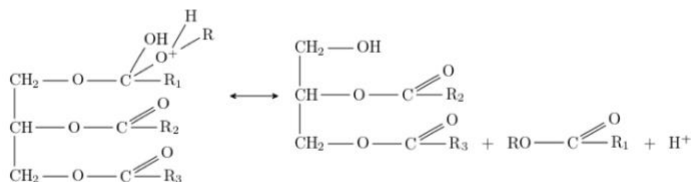
Figura 7: Reacción de transesterificación en medio ácido



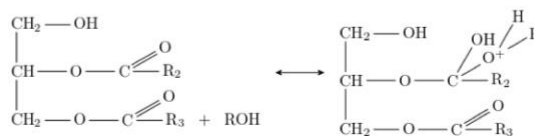
Protonación de un oxígeno de un grupo carbonilo del triglicérido



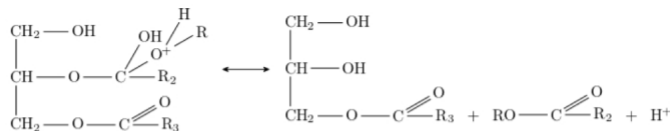
Ataque nucleofílico del alcohol



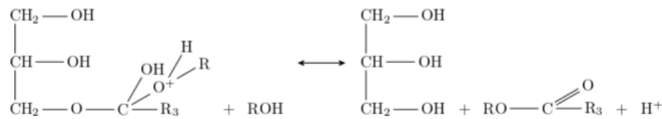
Formación de un ion diglicérido, una molécula de éster del ácido graso y liberación del protón



Protonación del oxígeno de un grupo carbonilo del diglicérido y ataque nucleofílico del alcohol



Formación de un ion monoglicérido, segunda molécula de éster del ácido graso y liberación del protón

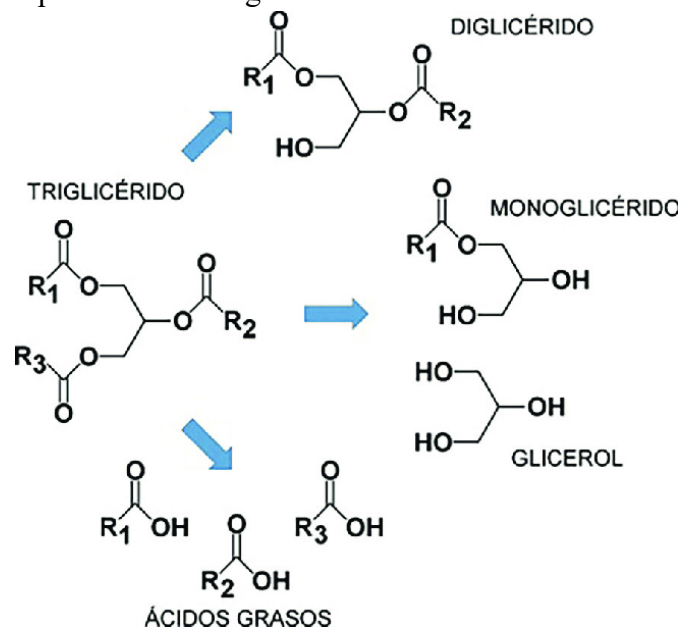


Protonación del oxígeno del grupo carbonilo del monoglicérido y ataque nucleofílico,
formación de glicerina, tercera molécula de éster del ácido graso y liberación del protón

(Fuente: Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005)

Por otro lado, el tipo de catalizador, alcalino o ácido, los parámetros de reacción de la transesterificación se han estudiado y se denota una importancia muy elevada en la relación molar de alcohol a aceite vegetal, la temperatura, el tiempo de reacción, el grado de refinamiento del aceite vegetal y el efecto de la presencia de humedad y ácidos grasos libres (FFA). Para que la transesterificación alcance el máximo rendimiento, el alcohol debe estar libre de humedad y el contenido de FFA del aceite debe ser <0.5%. La presencia de humedad en la reacción de transesterificación es importante porque, según la figura 1, puede ocurrir la hidrólisis de los ésteres alquílicos formados a ácidos grasos libres (FFA) (Dorado, Ballesteros, López y Mittelbach, 2004).

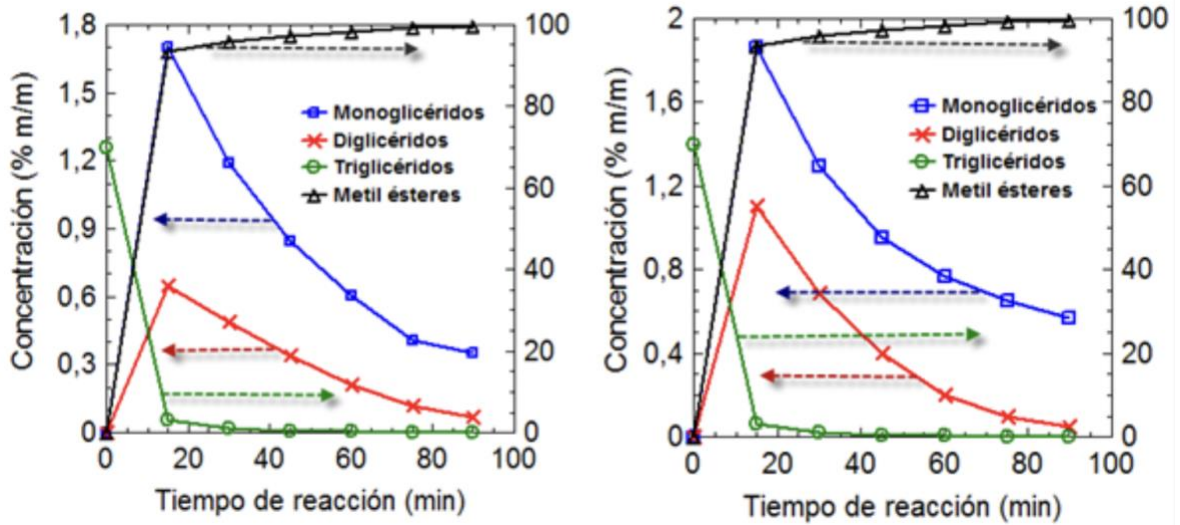
Figura 8: Hidrólisis parcial de los triglicéridos



(Fuente: Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005)

Según la Figura 2, a 32°C, la transesterificación tuvo una conversión de 99% en 4 horas utilizando un catalizador alcalino. A temperaturas mayor a 60°C, utilizando una relación molar alcohol: aceite de al menos 6:1 y aceites completamente refinados, la reacción se completó en 1 hora, produciendo ésteres metílicos, etílicos o butílicos. Aunque los aceites crudos pueden ser transesterificados, los rendimientos de ésteres se reducen por las gomas y material extraño presentes en los aceites. Estos parámetros (temperatura de reacción de 60°C y relación molar metanol: aceite de 6:1) se han convertido en un estándar para la transesterificación basada en metanol (Dorado, Ballesteros, López y Mittelbach, 2004).

Figura 9: Conversión de transesterificación de aceite vegetal, triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos intermedios a éster metílico a 50°C y 60°C.

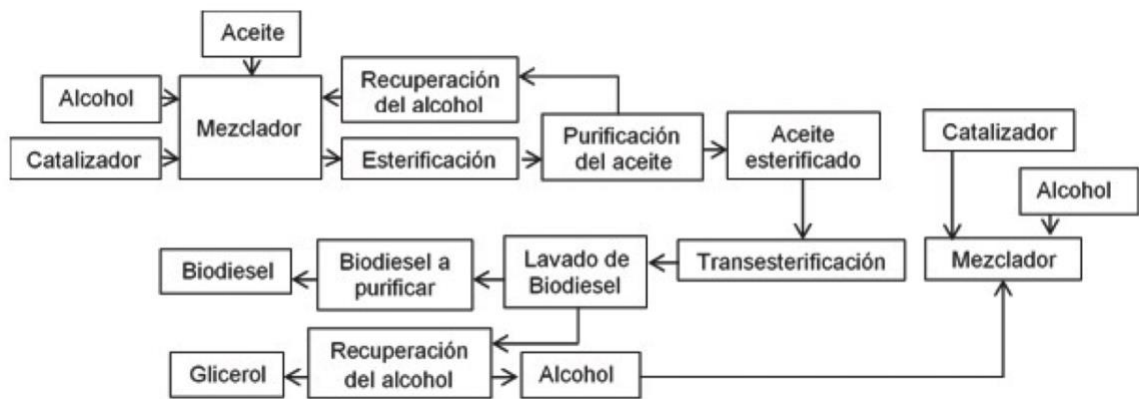


(Fuente: Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005)

H. PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE BIODIÉSEL

El procesamiento del biodiésel y su calidad están estrechamente relacionados. Los procesos utilizados para refinar la materia prima y convertirla en biodiésel determinan si el combustible cumplirá con las especificaciones aplicables. El énfasis está en el procesamiento tal como se realiza en Estados Unidos, donde la mayoría del biodiésel se produce mediante la reacción de aceite de soya o aceites de cocina usados con metanol, y la norma para la calidad del combustible es ASTM D 6751-02. Para la transesterificación catalizada por base, la Figura 3 denota un diagrama de bloques de las operaciones unitarias involucradas en la producción de biodiésel a partir de materias primas que contienen bajos niveles de ácidos grasos libres (FFA) (Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005).

Figura 10: Diagrama de bloques para la transesterificación básica del aceite vegetal usado



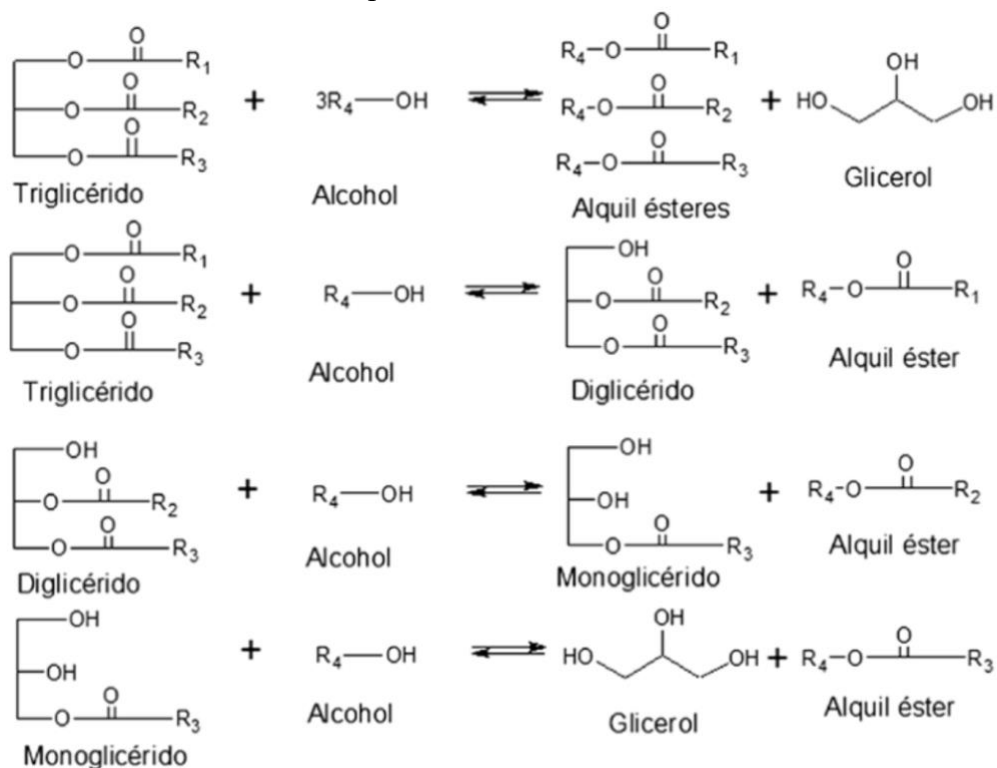
(Fuente: Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005)

Como se puede observar en la Figura 3, el alcohol, el catalizador y el aceite se combinan en un reactor y se agitan durante aproximadamente 1 hora a 60°C. Las plantas no industriales a menudo utilizan reactores por lotes, pero la mayoría de las plantas más grandes (más de 4 millones de litros por año) utilizan procesos de flujo continuo que involucran reactores de tanque agitado continuo o reactores de flujo pistón. La reacción muchas veces se realiza en dos etapas, en las que aproximadamente el 80% del alcohol y el catalizador se añade al aceite en un reactor agitado de primera etapa. Luego, el flujo de productos de este reactor pasa por una etapa de eliminación de glicerol antes del segundo reactor (Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005).

Posterior a la reacción, el glicerol se separa de los ésteres metílicos (si se usa metanol). Debido a la baja solubilidad del glicerol en los ésteres, esta separación ocurre usualmente rápido y puede llevarse en un decantador, pero si se tiene un flujo continuo se recomienda una centrifuga. El exceso de metanol puede retrasar la separación. Sin embargo, este exceso de metanol generalmente no se elimina hasta después de que el glicerol y los ésteres metílicos estén separados, pues dado que la reacción tiene un carácter reversible, al recuperar el metanol sin separar la fases se puede inducir a la formación de aceite nuevamente (Warabi, Kusdiana y Saka, 2004).

Por otro lado, es importante mencionar que los ésteres metílicos no se mezclan con la glicerina, pero cuando se emplea un alcohol con cadenas más grandes y un exceso de humedad, la glicerina y el biodiésel se obtienen en una sola fase, la cual con una extracción líquido-líquido se deben separar. Cabe mencionar que la reacción es reversible por lo que el metanol se emplea en exceso para jugar con el equilibrio, y es de tercer orden pues no se forma directamente el éster de metilo, si no que, es por fases como se ve en la Figura 4 (Warabi, Kusdiana y Saka, 2004).

Figura 11: Avance de la reacción para la formación de ésteres metílicos



(Fuente: Rodionova et al., 2017)

Después de la separación del glicerol, los ésteres metílicos son neutralizados y posteriormente se destila el metanol, este proceso se lleva a cabo al vacío o en un evaporador de película descendente, antes del lavado con agua. Se añade ácido al biodiésel para neutralizar cualquier catalizador residual y para descomponer cualquier jabón formado durante la reacción. Las sales se eliminarán durante la etapa de lavado con agua, pues el agua es soluble en estas, y los ácidos grasos libres permanecerán en el biodiésel. Lavar con agua tiene como objetivo eliminar cualquier catalizador restante, jabón, sales, metanol o glicerina libre del biodiésel (Rodionova et al., 2017).

El flujo de glicerina contiene aproximadamente entre (40-50)% de esta, metanol excedente y la mayoría del catalizador y el jabón. A pesar de que hay compradores de este glicerol sin purificar, tiene poco valor y su almacenamiento puede ser difícil dada la higroscopicidad del catalizador básico. Por otro lado, el alto contenido de metanol convierte esta glicerina como un residuo peligroso y volátil. Un tratamiento de la glicerina por medio ácido logra descomponer los jabones en ácidos grasos libres y sales. Los ácidos grasos libres pueden ser esterificados y luego reaccionados por transesterificación ácida para evitar jabones y las sales pueden tener un gran valor comercial dependiendo del tipo de ácido neutralizantes (Lin et al., 2011).

Una opción básica muy usada es el hidróxido de potasio como catalizador de la reacción y ácido fosfórico para la neutralización, de modo que la sal formada es fosfato de potasio, que puede utilizarse como fertilizante y darle un mayor valor comercial. Después de los flujos de ácidos y separación de los ácidos grasos libres, el metanol en el glicerol se elimina mediante un proceso de destello al vacío u otro tipo de evaporador. Llegado este momento el glicerol posee una pureza de aproximadamente (75-85)% y generalmente se vende a un refinador de glicerol a un precio mayor. El proceso de refinación del glicerol eleva la pureza hasta (99.5-99.7)% utilizando destilación al vacío o procesos de intercambio iónico (Lin et al., 2011).

Finalmente, se sabe que hay diversas formas de realizar la transesterificación, sin embargo, según la Figura 5, se denota porque en la industria la básica es la ideal, pues son tiempos relativamente bajos, temperaturas ideales para operar con calderas no mayores a 100HP entre otras (Lin et al., 2011).

Figura 12: Comparación de las diferentes tecnologías para la producción de biodiésel.

Variable	Base	Enzima	Supercrítico	Monolítico	Resina	Ácido
Temperatura [°C]	60-70	30-50	200-350	50-180	60-180	50-80
AGF	Jabones	Ésteres	Ésteres	Ésteres	Ésteres	Ésteres
Rendimiento de ésteres	Normal	Alto	Alto	Normal	Bueno	Normal
Pureza de la glicerina	Difícil	Simple	Simple	Simple	Simple	Difícil
Tiempo de reacción	1-2 h	8 h	4 min	6 h	Variable	4 h - 3 días
Purificación de ésteres	Difícil	Simple	Simple	Simple	Simple	Difícil
Costo	Más barato	Caro	Caro	Medio	Medio	Más barato
Cantidad de equipo	Alta	Baja	Baja	Baja	Baja	Alta

(Fuente: Rodionova et al., 2017)

I. CALIDAD DEL BIODIÉSEL

Generalmente, la calidad del biocombustible puede ser arraigada a varios factores, incluyendo factores desde la calidad de la materia prima, la composición de ácidos grasos del aceite vegetal o grasa animal original a ser convertidos en FAME, el proceso de producción y los parámetros de almacenamiento. Estos elementos son de vital importancia para asegurar que el biodiésel no solo cumpla especificaciones de normas internacionales, sino que también ofrezca un rendimiento óptimo y sea sostenible en la cadena de los biocombustibles (Bondioli, 2004).

En el momento en que el biocombustible cumple con los estancares según la región, puede utilizarse en la mayoría de los motores modernos sin modificaciones, manteniendo la durabilidad y fiabilidad del motor. Es más, cuando se emplean mezclas con el petrodiesel, se espera que el biodiésel cumpla con el estándar antes de ser mezclado. Aunque ciertas propiedades en las normas, como el índice de cetano y la densidad, reflejan las propiedades de los compuestos químicos que componen el biodiésel, otras propiedades indican o dan un indicio a la calidad del proceso de producción (Lin et al., 2011).

Por otro lado, los parámetros dados en ASTM D6751 son los que se rigen en Guatemala por alianzas en Estados Unidos, están definidos por otras normas ASTM y los de EN 14214 por otras normas europeas. Sin embargo, otros métodos de prueba, como los desarrollados por organizaciones profesionales oleoquímicas como la American Oil Chemists' Society (AOCS), también pueden ser adecuados, muchas veces más acertado porque se diseñaron específicamente para grasas y aceites, no para materiales derivados del petróleo como los que abordan las normas ASTM (Rutz y Janssen, 2007).

Cuadro 1: Normas para la calidad del biodiésel

Propiedad	Unidades	Europa (EN 14214)	EE.UU (ASTM D 6751)	Brasil (ANP N°7/08)
Contenido de éster	%(m/m), mín.	96.5		96.5
Densidad a 15 °C	g/cm ³	0.860-0.900		0.850-0.900
Viscosidad a 40 °C	cStk	3.5-5.0	1.9-6.0	3.5-6.0
Número de cetano	mín	51	47	Informar
Poder calorífico	MJ/mg (mín)	38	37	39
Contenido de agua	ppm (máx)	500		500
Agua y sedimentos	%(v/v)		0.05	
Metanol	%(m/m) máx	0.2	0.2	0.2
Glicerina libre	%(m/m) máx	0.2	0.2	0.2
Glicerina total	%(m/m) máx	0.25	0.24	0.24
Índice de acidez	mg KOH/g máx	0.5	0.5	0.5
Éster metílico ácido linoleico	%(m/m) máx	12		
Cont. monoglicérido	%(m/m) máx	0.8		Informar
Cont. diglicérido	%(m/m) máx	0.2		Informar
Cont. triglicérido	%(m/m) máx	0.2		Informar

(Fuente: Rodionova et al., 2017)

J. RETOS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

El tema más importante durante la producción de biodiésel es finalizar la reacción de transesterificación con un alto grado de conversión. El proceso químico básico que ocurre durante la reacción se indica en la Figura 4, con la reacción avanzando paso a paso desde los triglicéridos hasta el glicerol y los ésteres alquílicos, produciendo en cada paso un éster metílico de ácido graso. Incluso después de una reacción de transesterificación completamente con alto grados de conversión, pequeñas cantidades de triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos permanecerán en el producto de biodiésel (Rutz y Janssen, 2007).

Existen límites para el glicerol parcial y total suelen incluirse en las normas de biodiésel. Por ejemplo en ASTM D6751 se indica <0.24% de glicerol total en el biodiésel crudo, todo esto medido utilizando un método cromatográfico de gases masa (GC-MS) descrito en ASTM D 6584. Otros métodos también pueden utilizarse para medir el glicerol total, como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) o en procedimientos químicos como los denotados en AOCS Official Method. Sin embargo, sólo los procedimientos de GC son aceptables en las normas EN y ASTM, y se requieren certificaciones para la venta convencional (Rutz y Janssen, 2007).

Lo mismo ocurre para lavar y secar y obtener biodiésel crudo, se tienen normas para %AGL, contenido de ésteres, metanol libre y otras propiedades físicas y químicas según la Figura 6 para B100 en la ASTM D975 (Shahabuddin, Kalam, 2017).

Los ésteres de metilo y etilo derivados de aceites vegetales como sustitutos del diésel, se destaca la importancia del proceso de transesterificación. El uso de etanol, en comparación con el metanol, ha mostrado beneficios significativos debido a su menor toxicidad y su origen renovable, lo que conduce a un impacto ambiental reducido. Además, el etanol puede simplificar la fase de lavado en el proceso de producción, lo que reduce la generación de residuos y podría disminuir los costos asociados con la producción de biodiésel (Peterson et al., 1993).

Por otro lado, las propiedades de combustión y la seguridad del biodiésel también se ven afectadas por el tipo de alcohol utilizado en su síntesis. Los ésteres etílicos, al ser derivados del etanol, ofrecen un manejo más seguro y una menor toxicidad en comparación con los ésteres metílicos, lo que los hace más adecuados desde una perspectiva de seguridad y salud ambiental. Estas características son cruciales para la adopción y el uso a largo plazo del biodiésel como alternativa sostenible al diésel convencional (Peterson et al., 1993).

K. REGULACIÓN Y POLÍTICAS DE BIOCOMBUSTIBLES

La regulación de los biocombustibles a nivel mundial ha sido impulsada principalmente por la necesidad de diversificar las fuentes de energía, reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, diversas regiones han desarrollado marcos legales y normativos para fomentar su producción y consumo. Por ejemplo, la Unión Europea cuenta con una de las regulaciones más estrictas mediante la Directiva sobre Energías Renovables (RED II), que establece criterios de sostenibilidad y reducción de emisiones para los biocombustibles utilizados en el transporte (Parlamento Europeo, 2018).

Estados Unidos, uno de los mayores productores y consumidores de biocombustibles, ha implementado el Renewable Fuel Standard (RFS), un programa regulado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Este exige que una cierta cantidad de combustible renovable sea mezclado con gasolina o diésel, y establece cuotas anuales para cada tipo de biocombustible (EPA, 2023). Este marco ha incentivado principalmente la producción de etanol a partir de maíz y biodiésel de soya.

En Brasil, un país pionero en biocombustibles, la regulación se ha centrado en el uso de etanol como combustible automotriz. Desde los años setenta, el país ha impulsado el Programa Nacional del Alcohol (ProAlcool), y más recientemente la Política Nacional de Biocombustibles (RenovaBio), que busca aumentar la participación de los biocombustibles en la matriz energética a través de metas de descarbonización y certificados de eficiencia energética (ANP, 2023).

China ha introducido políticas para ampliar el uso de etanol y otros biocombustibles como parte de su estrategia para mejorar la calidad del aire y reducir las emisiones. En 2017 anunció su plan de introducir etanol al 10% (E10) en todo el país para 2020, aunque los avances han sido más lentos de lo previsto. Sin embargo, continúa desarrollando normativas y subsidios que favorecen la inversión en biodiésel y biocombustibles avanzados (IEA, 2021).

India, por su parte, ha lanzado una política nacional de biocombustibles que establece metas ambiciosas para mezclar un 20% de etanol en gasolina para 2025. El gobierno también ha aprobado incentivos para la producción de biodiésel a partir de fuentes no comestibles como la jatrofa y los aceites usados, además de programas de compra garantizada para fomentar la inversión (Ministerio de Petróleo y Gas Natural, 2023).

Sudáfrica ha trabajado en marcos regulatorios desde principios de los 2000, aunque su implementación ha sido limitada por preocupaciones sobre seguridad alimentaria y capacidad agrícola. Aun así, existe un marco regulatorio que permite la mezcla obligatoria de biodiésel y bioetanol en ciertos porcentajes, y se han desarrollado incentivos fiscales y financieros para pequeños productores (Department of Energy, 2020).

En general, las tendencias globales apuntan a una creciente integración de los biocombustibles dentro de políticas de transición energética, con énfasis en los biocombustibles avanzados producidos a partir de residuos, algas y aceites usados. Organismos internacionales como la Agencia Internacional de Energía (IEA) y la FAO promueven estándares de sostenibilidad y recomiendan evitar el uso de materias primas que compitan con la seguridad alimentaria (FAO, 2020).

En Guatemala, aunque no existe una ley específica que regule de manera integral a los biocombustibles, sí se ha promovido el uso del etanol anhidro como aditivo para la gasolina desde la década de 1990. A través de iniciativas privadas, algunas gasolineras han comercializado mezclas como E10 (10% etanol, 90% gasolina), especialmente en zonas urbanas como la Ciudad de Guatemala. Este etanol es producido a partir de la caña de azúcar, un cultivo ampliamente cultivado en el país, lo que ha permitido contar con una base productiva sólida para su implementación (CENGICANÍA, 2021).

La producción de etanol en Guatemala está liderada principalmente por ingenios azucareros, que han integrado la destilación de etanol como parte de sus procesos de cogeneración y valorización de subproductos. La Cámara del Agro y la Asociación de Azucareros de Guatemala han promovido este uso como parte de una estrategia de sostenibilidad. Sin embargo, la implementación de etanol como biocombustible no ha sido respaldada por una política pública fuerte, lo que ha limitado su expansión a nivel nacional a pesar de su posible uso en el 2026 (CIAT, 2020).

El marco legal para el uso del etanol como combustible aún es difuso. Aunque hay referencias en estudios del Ministerio de Energía y Minas y se reconoce su potencial en la matriz energética del país, no existe una normativa obligatoria que regule su mezcla, calidad o comercialización y se ha postergado desde el 2017. Esto no contrasta con países vecinos como Colombia o Brasil, donde el etanol forma parte obligatoria del combustible automotriz (MEM, 2022). Por ello, si bien Guatemala tiene el potencial agrícola, técnico e industrial para escalar el uso del etanol, hace falta una regulación específica y mecanismos de incentivo para consolidar su papel en el transporte sostenible.

L. MERCADO Y APLICACIONES DEL BIODIÉSEL

El mercado global de biodiésel alcanzó un valor estimado de USD 39.29 mil millones en 2023 y se proyecta que crezca hasta USD 79.86 mil millones para 2032, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 7.30 % entre 2024 y 2032 (Priya Nagrale, 2025). Otra estimación reciente indica que el mercado era de USD 42.43 mil millones en 2024, con perspectivas de llegar a USD 92.45 mil millones en 2034, reflejando una CAGR aproximada del 8.1 % (Precedence Research, 2025). Estas cifras muestran el sólido potencial de expansión del sector en la próxima década.

La aplicación predominante del biodiésel es como combustible para transporte (automotriz, naval, agrícola y ferroviario), representando alrededor del 79 % de los ingresos del mercado en 2024 (Precedence Research, 2025). Otras aplicaciones relevantes incluyen generación de energía eléctrica y usos industriales menores, aunque su crecimiento relativo es más lento comparado con el sector transporte (MRFR, 2025).

Desde el punto de vista técnico, las innovaciones en procesos de producción como transesterificación en estado supercrítico o refinamiento eficiente han mejorado la viabilidad del biodiésel a partir de aceites residuales y biomásas diversas (Kusdiana et al., 2005; Bunkyakiat et al., Energy and Fuels). Una revisión reciente destaca avances en métodos de purificación y pretratamientos que incrementan rendimiento y calidad (ScienceDirect review, 2024).

El biodiésel ofrece beneficios ambientales significativos: análisis de ciclo de vida indican reducciones importantes en emisiones de gases de efecto invernadero frente al diésel fósil, y estudios en el Reino Unido encontraron cortes hasta del 94 % en emisiones al sustituir diésel ultra-bajo en azufre por biodiésel (Wired, 2007). Asimismo, se han medido mejoras en lubricidad y eficiencia energética del motor.

Sin embargo, también existen riesgos ambientales y sociales. El uso extensivo de tierras agrícolas y la conversión indirecta de ecosistemas pueden generar deforestación, erosión y pérdida de biodiversidad; estos aspectos críticos han sido objeto de análisis rigurosos (Searchinger et al., 2008; Nature Conservancy, 2008). Por ello, se enfatiza la necesidad de criterios de sostenibilidad en las políticas y certificaciones del biodiésel (IRP-UNEP, 2009).

En cuanto a fuentes de materia prima, el aceite de soja, colza, palma y aceites usados de cocina dominan la producción, aunque el alimento-combustible genera controversias. En Europa se utiliza principalmente colza, mientras que en EE. UU. y Argentina predomina el aceite de soja (MarketsandMarkets, 2016–2021). La diversificación con residuos y cultivos no alimentarios busca mitigar estos impactos (MDPI review, 2024).

En el ámbito regional, Estados Unidos registró una capacidad de producción de biodiésel de unos 1.8 mil millones de galones en 2020, con importaciones significativas (National Biodiésel Board, 2020), y una capacidad instalada de producción superior a 2 mil millones de galones en años recientes (Biofuels Data Sources USDA, 2025). La adopción de mandatos estatales como B20 ha impulsado el uso en estados como Minnesota y Washington (NBB, 2008 et al.).

Desde la perspectiva de mercado, la competencia global enfrenta desafíos de precios y aranceles. Por ejemplo, productores chinos han visto restringida su exportación a la UE por aranceles antidumping de hasta el 36.4 %, lo que ha provocado una reducción del 51% en exportaciones en la primera mitad de 2024 y un desplazamiento hacia mercados asiáticos y biocombustibles como SAF (Reuters, 2024). En el Reino Unido, la planta de Greenergy está en riesgo de cierre debido a la competencia de importaciones estadounidenses subsidiadas (FT/Otros, 2025).

Finalmente, el impulso del mercado depende en gran medida de políticas y mandatos relacionados con biocombustibles. En Europa, algunos proyectos de grandes empresas han sido suspendidos debido a la volatilidad del mercado y cambios regulatorios (Financial Times, 2024). A largo plazo, el crecimiento del biodiésel está ligado a objetivos de mezcla del 14 % de combustibles renovables en transporte para 2030 en la UE, que sugiere un crecimiento sostenido si se mantiene el respaldo político (FT, 2024).

V. ANTECEDENTES

En varios estudios se ha observado que el destilado de ácidos grasos de palma (PFAD) posee un alto contenido de ácidos grasos libres (AGL), típicamente entre 70 % y 95 % en peso, lo cual dificulta la ruta convencional de transesterificación básica y exige un pretratamiento ácido para convertir dichos ácidos grasos libres en ésteres metílicos (Chongkhong et al., 2007; Chang et al., 2016). Dicho pretratamiento se realiza mediante una reacción de esterificación, comúnmente catalizada por ácido sulfúrico (H_2SO_4), que puede reducir el porcentaje de AGL hasta valores cercanos al 2 % o menos, lo que facilita la posterior conversión de los triglicéridos residuales mediante transesterificación alcalina (Chongkhong et al., 2007; Rofiqah et al., 2018).

Por otro lado, se han reportado condiciones con altos grados de conversión (>90%) de esterificación que involucran temperaturas entre 60 °C y 70 °C, con relaciones molares de metanol a PFAD de alrededor de 6:1 a 10:1, y tiempos de reacción de 30 min a 2 h, según la pureza del PFAD y el tipo de catalizador ácido (Chongkhong et al., 2007; Mohod et al., 2017). En estos estudios, la formación de agua durante la esterificación puede desplazar el equilibrio de la reacción, por lo que se recomienda un control de la relación molar y/o la separación parcial de subproductos para favorecer la conversión (Goikwad y Gogate, 2015). Asimismo, Chang et al. (2016) señalan que la composición de PFAD varía según el grado de refinación y la fuente de aceite de palma, presentando principalmente ácidos grasos como el palmítico (C16:0) y el oleico (C18:1) en concentraciones predominantes, así como contenido menor de ácidos esteárico (C18:0) y linoleico (C18:2). Estas fracciones influyen en las propiedades físicas y de oxidación del producto final de biodiésel.

Una vez concluido el paso de esterificación, la conversión del triglicérido remanente se efectúa por transesterificación básica con hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH). Numerosos trabajos reportan que, al mantener condiciones de reacción controladas (temperatura de 60 °C a 65 °C, tiempo de 30 min a 1 h y concentraciones de catalizador base de 0,5 % a 1,0 % en peso), se alcanzan altos rendimientos de ésteres metílicos (Ardi et al., 2015; Chongkhong et al., 2007). Finalmente, el biodiésel crudo requiere un proceso de purificación, ya sea mediante neutralización alcalina y posterior lavado o bien por medio de operaciones de decantación y secado, para cumplir los parámetros de calidad establecidos por normativas como ASTM D6751 y/o EN 14214 (Mohod et al., 2017).

La producción de biodiésel a partir de PFAD (Palm Fatty Acid Distillate) puede llevarse a cabo exclusivamente mediante la reacción de esterificación cuando su composición se encuentra dominada casi en su totalidad por ácidos grasos libres (AGL). En este proceso, el PFAD se mezcla con un alcohol, típicamente metanol, y un catalizador ácido. Al realizar la esterificación a temperaturas moderadas (generalmente entre 60 °C y 70 °C) y con una relación molar elevada de metanol:AGL, se logra desplazar el equilibrio hacia la formación de ésteres metílicos. Uno de los aspectos críticos de esta estrategia radica en el control de la formación de agua, subproducto que puede inhibir parcialmente la conversión. Por ello, en algunos casos, se incorpora una etapa de eliminación de agua o se realizan ajustes de la cantidad de metanol para favorecer la reacción (Chongkhong et al., 2007; Chang et al., 2016).

Al prescindir de la posterior fase de transesterificación alcalina, la esterificación directa resulta adecuada si el contenido de triglicéridos remanentes en el PFAD es bajo o prácticamente inexistente, de modo que no sea necesario convertirlos posteriormente con catalizadores básicos. La facilidad de este proceso reduce costos operativos, a la vez que simplifica la purificación del biodiésel crudo, siempre y cuando se apliquen controles adecuados sobre las variables de reacción (tiempo, temperatura, dosificación de catalizador y relación molar). Esta alternativa constituye una vía eficiente para aprovechar un subproducto de la refinación de aceite de palma, transformándolo en un biocombustible de calidad, apto para satisfacer normas internacionales como la ASTM D6751 y la EN 14214, siempre que los pasos de neutralización y purificación finales se realicen correctamente.

Varios trabajos de investigación sostienen que, en la producción de ésteres metílicos a partir de PFAD, velocidades de agitación situadas entre 300 y 600 rpm garantizan una buena dispersión de las fases y un eficiente intercambio de materia sin generar un consumo energético desproporcionado. Por ejemplo, Freedman et al. (1984) observaron que, en la reacción de transesterificación de aceites con altos niveles de ácidos grasos libres, el rendimiento mejoraba sustancialmente al pasar de 200 a 300 rpm, pero no experimentaba incrementos significativos más allá de 600 rpm. Del mismo modo, Chang et al. (2016) señalaron que por encima de cierto umbral de agitación, la formación de emulsiones finas se estabiliza, de modo que la transferencia de masa deja de ser la limitante principal y no se justifica elevar excesivamente la velocidad. En consecuencia, una agitación moderada dentro de ese rango mantiene condiciones homogéneas para la reacción, mientras evita la sobrecarga energética y el desgaste mecánico innecesario del equipo.

Por último, en la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) se ha producido biodiésel a escala piloto empleando aceites de cocina usados y aceite crudo de palma, pero aún no se ha trabajado con destilado de ácidos grasos de palma (PFAD); el protocolo empleado según un estudio publicado por la Universidad consiste en una esterificación ácida preliminar con H_2SO_4 al 1 % p/p, relación molar metanol:aceite 9:1, 65 °C y 90 min, seguida de transesterificación básica con NaOH al 0,5–1 % p/p, relación molar 6:1, 60 °C y 60 min, bajo agitación de 300–400 rpm, condiciones que en la planta piloto fija de 200 L lote⁻¹ y en una unidad móvil de 115 L han permitido conversiones superiores al 90 % y un producto que cumple los parámetros de la norma ASTM D6751 (Castillo Dávila, 2013; Robles Mijangos, 2017; Rolz, de León & Mendizábal, 2019).

VI. METODOLOGÍA

A. CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁCIDOS GRASOS DESTILADOS DE PALMA (PFAD)

1. Contenido de humedad

a. Cristalería

- i. Probeta graduada de 10mL
- ii. Pipeteador de 25mL

b. Equipo

- i. Balanza de humedad

c. Procedimiento detallado

- i. Se configuró la temperatura de secado en la balanza de humedad a una temperatura de 120°C para evitar la descomposición del material.
- ii. Se seleccionó el modo de secado A60 para registrar las pérdidas de agua cada 60 segundos en 1mg hasta el peso constante.
- iii. Se colocó un recipiente limpio y seco en la balanza de humedad, cierra la tapa y tara el peso a cero.
- iv. Se introdujo una muestra de 1g de PFAD sobre el recipiente en la balanza, asegurándose de que la muestra esté distribuida uniformemente para mejorar el secado.
- v. Se esperó hasta que la balanza detectará la pérdida de peso y se detuvo automáticamente cuando se alcanzó un peso constante, indicando que toda el agua ha sido eliminada.

2. Viscosidad

a. Cristalería

- i. Probeta de 50mL
- ii. Pipeteador de 25mL
- iii. Beaker de 25mL

b. Materiales y reactivos

- i. Probeta de 50mL

c. Equipo

- i. Viscosímetro de Ostwald marca CANNON Calibrado a 40°C

d. Procedimiento detallado

- i. Se colocó el viscosímetro en el baño de agua a 60°C, se introdujo la muestra dentro del equipo y este en un baño térmico donde se esperó a que alcanzara la temperatura del baño.
- ii. Se utilizó una pipeta para llenar el viscosímetro con la muestra de PFAD hasta el nivel de marcado, evitando introducir burbujas de aire.
- iii. Se permitió que la muestra fluyera libremente a través del tubo capilar y se inició el cronómetro cuando el nivel del biodiésel pasó por la primera marca de referencia en el viscosímetro.

- iv. Se midió el tiempo que tardaron los PFAD en desplazarse desde la primera marca hasta la segunda marca de referencia.
- v. Se detuvo el cronómetro cuando los PFAD pasó la segunda marca y se registró el tiempo en segundos.
- vi. Se repitieron los pasos d-i al d-v para agua desmineralizada.
- vii. Se calculó la viscosidad cinemática por medio de la ecuación 1.

3. Densidad

a. Cristalería

- i. Picnómetro de 25mL de borosilicato con acople a termómetro.
- ii. Beaker de 250mL

b. Materiales y Reactivos

- i. Muestra de PFAD
- ii. Ácido sulfúrico 98%(m/m)
- iii. Agua desmineralizada

c. Equipo

- i. Baño termostático de agua
- ii. Balanza de precisión analítica

d. Procedimiento detallado

- i. El picnómetro de 25 ml de capacidad, equipado con tapa y termómetro graduados en 0.1°C se limpió llenándolo por la mitad con ácido sulfúrico y dejándolo reposar durante 1 hora. Se vació el picnómetro y enjugándolo bien con agua. El ácido se neutralizó.
- ii. Se pesó el picnómetro vacío y limpio con tapa y termómetro.
- iii. Se trapazó al picnómetro una muestra de PFAD a la temperatura a que se llevará a cabo la reacción (60°C).
- iv. En el baño térmico se esperó hasta llegar a una temperatura constante de 60°C
- v. Se pesó el picnómetro lleno y se determinó la densidad por medio de:

4. Porcentaje de ácidos grasos libres

a. Cristalería

- i. 1 galón de HDPE
- ii. 1 Beaker de 100mL
- iii. 1 varilla de agitación

b. Materiales y reactivos

- i. 1 espátula analítica.
- ii. 1 balanza de precisión analítica.
- iii. 1 galón de agua desmineralizada.
- iv. Hidróxido de sodio 99% (m/m).
- v. Estandar primario de ftalato ácido de potasio (0.1 g por corrida).
- vi. Etanol 99%(v/v)

vii. Hidróxido de sodio 99%(m/m)

c. Procedimiento detallado

i. Preparación de la solución de NaOH 0.1M

- Se pesaron exactamente 14.9878 g de hidróxido de sodio sólido (NaOH) utilizando una balanza analítica, garantizando que la masa se ajustara al cuarto decimal.
- En un contenedor de HDPE de 1 galón, se adicionaron aproximadamente 2 litros de agua desmineralizada para facilitar la disolución inicial.
- Se agregó el hidróxido de sodio un Beaker con una cama de 25mL de agua.
- La mezcla se agitó con una varilla de agitación de vidrio hasta garantizar la completa disolución del soluto, posteriormente se agregó al galón.
- Se completó el volumen a 1 galón con agua desmineralizada y se homogeneizó nuevamente.

ii. Estandarización de la solución de NaOH 0.1M

- Se pesaron 0.1000 ± 0.001 g de ftalato ácido de potasio para cada corrida, utilizando una espátula analítica y una balanza de precisión.
- Cada muestra se disolvió en 50 mL de agua desmineralizada en un erlenmeyer de 100 mL.
- La solución preparada de NaOH se utilizó como titulante, y se agregó lentamente a las muestras de ftalato ácido de potasio bajo agitación constante hasta alcanzar el punto final.
- Se utilizó fenolftaleína como indicador, observando el cambio de color de incoloro a un leve rosado persistente durante 30 segundos.
- Se registraron los volúmenes de NaOH consumidos en las 5 corridas, y se calculó la molaridad exacta de la solución de NaOH utilizando la relación estequiométrica:

iii. Determinación del porcentaje de ácidos grasos libres de PFAD

- Se pesaron aproximadamente 1 g de PFAD en un vaso de precipitados.
- Se añadieron 50 mL de etanol al en un Erlenmeyer de 50m y luego se calentó la mezcla a 60 °C para disolver el PFAD.
- Fue necesario agregar unas gotas de solución de fenolftaleína al 1%(m/m) en etanol como indicador.
- La bureta de 50mL se llenó con solución de NaOH ≈ 0.1 M preparada con anterioridad
- Se tituló la mezcla mientras se agita hasta obtener un color rosado pálido estable registrando el volumen de NaOH consumido.
- Se repitió 4 veces más para calcular el porcentaje de ácidos grasos libres.

B. PRODUCCIÓN DE ÉSTERES METÍLICOS

1. Cristalería

- a. 3 beaker 250mL
- b. 2 beaker 100mL
- c. 1 beaker 50mL
- d. 1 ampolla de decantación 500mL
- e. 2 estufa con agitación magnética
- f. 1 espátula analítica
- g. Pipeta graduada de 25mL
- h. Pipeta graduada 10mL

2. Equipos

- a. Balanza de precisión analítica
- b. 1 agitador magnético
- c. 1 termómetro

3. Materiales y reactivos

- a. Metanol 99.8%(v/v)
- b. Ácido sulfúrico 98%(m/m)
- c. Ácidos grasos del desodo de aceite de palma africana (PFAD)
- d. Mascarilla KN-95
- e. Agua desmineralizada
- f. Hidróxido de sodio 99.8%(m/m)
- g. 2 pares de guantes de nitrilo Talla L
- h. Tiras de papel pH de 0-14

4. Armado del sistema

- a. Se tomó un beaker de 250mL y se colocó en una estufa con agitación magnética, se insertó el agitador magnético.
- b. Se introdujo una muestra de 100 gramos luego de ser pesada en una balanza de grado analítico de PFAD en el balón.
- c. Se tapó el beaker con un vidrio de reloj mediano para evitar el contacto con el ambiente.

5. Procedimiento detallado

- a. Pre calentamiento del PFAD: Se pre calentaron los ácidos grasos libres del destilado de palma (PFAD) a una temperatura de 60°C para que superara la temperatura de fusión facilitando así su manipulación y la transferencia de masa con el metanol y el catalizador.
- b. Cálculo de la relación molar: Se calculó una relación molar entre 1:1 hasta 12:1 entre el metanol y el PFAD por medio de saltos geométricos, para determinar cual genera una mayor conversión de PFAD en FAME.
- c. Preparación del catalizador: Se disolvió el ácido sulfúrico en el metanol, usando un 1% en peso de ácido sulfúrico respecto al PFAD.

- d. Adición de metanol y ácido sulfúrico al PFAD: Posteriormente, se precalentó a la misma temperatura que los 100 gramos de muestra la mezcla de ácido sulfúrico con metanol para evitar que al momento de introducir la mezcla se solidifiquen los PFAD; se añadió la mezcla de metanol y ácido sulfúrico al PFAD ya precalentado quitando el vidrio de reloj y volviéndolo a poner para evitar el escape de gases de ácido.
- e. Control de la temperatura y agitación: Se mantuvo la mezcla de reactivos a una temperatura constante de 60°C durante toda la reacción, utilizando agitación continua 550 rpm en una estufa eléctrica con agitador magnético.
- f. Duración de la reacción: Se mezcló constantemente durante 120 minutos en todas las corridas, permitiendo que los ácidos grasos libres del PFAD reaccionaran con el metanol para formar ésteres metílicos (FAME).
- g. Decantación: Al finalizar la reacción, se vertió la mezcla en un embudo de decantado y se dejó reposar 60 minutos. La fase inferior, que contenía el ácido y agua se separó y neutralizó, el biodiésel (FAME) y glicerol (en muy pocas proporciones) se recogieron en la parte de en medio, mientras que la fase superior, compuesta por metanol residual e impurezas, fue descartada.
- h. Lavado con agua: Finalmente, el biodiésel obtenido fue sometido a un proceso de purificación mediante varios lavados con agua hasta que el pH se encuentre neutro, lo que permitió eliminar los residuos de ácido sulfúrico y otras impurezas.
- i. Secado del biodiésel: El biodiésel fue secado por 60 minutos a 120°C y posteriormente se enfrió por 30 min para filtrarlo a través de un filtro de 2µm y una resina catiónica, intercambiadora de iones Amberlite, marca Dow/Rohm y Haas, modelo BD10 DRY.
- j. Determinación de la conversión de la reacción: Se pesó la muestra de biodiésel lavado y seco; se determinó la conversión mediante división del biodiésel pesado y los 100 gramos de PFAD de muestra.

C. CARACTERIZACIÓN DE LOS ÉSTERES METÁLICOS

1. Prueba de miscibilidad 3/27

a. Cristalería

- ii. Tubo de ensayo de 50mL
- iii. Pipeta graduada a 5mL
- iv. Pipeteador o bulbo
- v. Probeta de 50mL
- vi. Beaker de 50mL

a. Materiales y reactivos

- i. Metanol 99.8%(v/v)
- ii. Muestra de PFAD

b. Procedimiento detallado

- i. Se preparó una mezcla con 3mL de biodiésel usando una pipeta graduada y se introdujo en el tubo de ensayo. Se introdujeron 27mL de metanol, usando una probeta, en el tubo de ensayo.
- ii. Se debe observar si se presenta una fase separada o gotas en la parte inferior. Una buena miscibilidad se refleja que la reacción se dio en su totalidad.

2. Contenido de humedad

a. Cristalería

- i. Probeta graduada de 10mL
- ii. Pipeteador de 25mL

b. Equipo

- i. Balanza de humedad

c. Procedimiento detallado

- i. Se configuró la temperatura de secado en la balanza de humedad a una temperatura de 120°C para evitar la descomposición del material.
- ii. Se seleccionó el modo de secado A60 para registrar las pérdidas de agua cada 60 segundos en 1mg hasta el peso constante.
- iii. Se colocó un recipiente limpio y seco en la balanza de humedad, cierra la tapa y tara el peso a cero.
- iv. Se introdujo una muestra de 1g de biodiésel sobre el recipiente en la balanza, asegurándose de que la muestra esté distribuida uniformemente para mejorar el secado.
- v. Se esperó hasta que la balanza detectará la pérdida de peso y se detuvo automáticamente cuando se alcanzó un peso constante, indicando que toda el agua ha sido eliminada.

3. Determinación de ácidos grasos libres

a. Cristalería

- i. 1 galón de HDPE
- ii. 1 Beaker de 100mL
- iii. 1 Varilla de agitación

b. Materiales y reactivos

- i. 1 Espátula analítica.
- ii. 1 Balanza de precisión analítica.
- iii. 1 galón de agua desmineralizada.
- iv. Hidróxido de sodio 99% (m/m).
- v. Estandar primero de Ftalato ácido de potasio (0.1 g por corrida).
- vi. Etanol 99%(v/v)
- vii. Hidróxido de sodio 99%(m/m)

c. Procedimiento detallado

- i. Preparación de la solución de NaOH 0.1M
 - Se pesaron exactamente 14.9878 g de hidróxido de sodio sólido (NaOH) utilizando una balanza analítica, garantizando que la masa se ajustara al cuarto decimal.
 - En un contenedor de HDPE de 1 galón, se adicionaron aproximadamente 2 litros de agua desmineralizada para facilitar la disolución inicial.
 - Se agregó el hidróxido de sodio un beaker con una cama de 25mL de agua.
 - La mezcla se agitó con una varilla de agitación de vidrio hasta garantizar la completa disolución del soluto, posteriormente se agregó al galón.
 - Se completó el volumen a 1 galón con agua desmineralizada y se homogeneizó nuevamente.

ii. Estandarización de la solución de NaOH 0.1M

- Se pesaron 0.1000 ± 0.001 g de ftalato ácido de potasio para cada corrida, utilizando una espátula analítica y una balanza de precisión.
- Cada muestra se disolvió en 50 mL de agua desmineralizada en un erlenmeyer de 100 mL.
- La solución preparada de NaOH se utilizó como titulante, y se agregó lentamente a las muestras de ftalato ácido de potasio bajo agitación constante hasta alcanzar el punto final.
- Se utilizó fenolftaleína como indicador, observando el cambio de color de incoloro a un leve rosado persistente durante 30 segundos.
- Se registraron los volúmenes de NaOH consumidos en las 5 corridas, y se calculó la molaridad exacta de la solución de NaOH utilizando la relación estequiométrica:

iii. Determinación del porcentaje de ácidos grasos libres de PFAD

- Se midió 1.5mL en erlenmeyer.
- Se añadieron 50 mL de etanol al en un erlenmeyer de 50mL.
- Fue necesario agregar unas gotas de solución de fenolftaleína al 1%(m/m) en etanol como indicador.
- La bureta de 50mL se llenó con solución de NaOH ≈ 0.1 M preparada con anterioridad
- Se tituló la mezcla mientras se agita hasta obtener un color rosado pálido estable registrando el volumen de NaOH consumido.
- Se repitió 4 veces más para calcular el porcentaje de ácidos grasos libres.

4. Densidad

a. Cristalería

- i. Picnómetro de 25mL de borosilicato con acople a termómetro.
- ii. Beaker de 250mL

b. Materiales y Reactivos

- i. Muestra de biodiésel
- ii. Ácido sulfúrico 98%(m/m)
- iii. Acetona 99%(m/m)
- iv. Agua desmineralizada

c. Equipo

- i. Baño termostático de agua
- ii. Balanza de precisión analítica

d. Procedimiento detallado

- i. El picnómetro de 25 ml de capacidad, equipado con tapa y termómetro graduados en 0.1°C se limpió llenándolo con ácido sulfúrico y dejándolo reposar durante 1 hora. Se vació el picnómetro y enjugándolo bien con agua. El ácido se neutralizó.
- ii. Se pesó el picnómetro vacío y limpio con tapa y termómetro.
- iii. Se atrapó al picnómetro una muestra de biodiésel a temperatura constante de (40°C) .
- iv. En el baño térmico se esperó hasta llegar a una temperatura constante de 40°C
- v. Se pesó el picnómetro lleno y se determinó la densidad por medio de:

5. Viscosidad

a. Cristalería

- i. Probeta de 50mL
- ii. Pipeteador de 25mL
- iii. Beaker de 25mL

b. Materiales y reactivos

- i. Probeta de 50mL

c. Equipo

- i. Viscosímetro de Ostwald marca CANNON Calibrado a 40°C

d. Procedimiento detallado

- i. Se colocó el viscosímetro en el baño de agua a 40°C, se introdujo la muestra dentro del equipo y este en un baño térmico donde se esperó a que alcanzara la temperatura del baño.
- ii. Se utilizó una pipeta para llenar el viscosímetro con la muestra de biodiésel hasta el nivel de marcado, evitando introducir burbujas de aire.
- iii. Se permitió que la muestra fluyera libremente a través del tubo capilar y se inició el cronómetro cuando el nivel del biodiésel pasó por la primera marca de referencia en el viscosímetro.
- iv. Se midió el tiempo que tardó el biodiésel en desplazarse desde la primera marca hasta la segunda marca de referencia.
- v. Se detuvo el cronómetro cuando el biodiésel pasó la segunda marca y se registró el tiempo en segundos.
- vi. Se calculó la viscosidad cinemática multiplicando el tiempo de flujo por la constante del viscosímetro proporcionada por el fabricante.

6. Cromatografía de gases masa

- i. Se realizó un análisis de cromatografía de gases masa en un cromatógrafo de gases acoplado a espectrómetro de masas (GC/MS) marca Perkin Elmer en el laboratorio de análisis instrumental avanzado en la Universidad del Valle de Guatemala.

7. Sólidos y sedimentos

a. Equipo

- i. Tubos de centrífuga de HDPE de 10mL.
- ii. Centrífuga

b. Materiales y reactivos

- i. Muestra de biodiésel

c. Procedimiento detallado

- i. Se agitó la muestra de biodiésel para asegurar una distribución uniforme de posibles sólidos y sedimentos.

- ii. Se colocó una alícuota de la muestra de biodiésel en un tubo de centrifuga, llenándolo aproximadamente hasta los 5mL.
- iii. Se balanceó el tubo de muestra en la centrífuga, colocando 3 tubos con la misma cantidad de biodiésel para equilibrar el rotor.
- iv. Se configuró la centrífuga a una velocidad de aproximadamente 1500 rpm y se centrifugó la muestra durante 5 a 10 minutos, dependiendo de las especificaciones del equipo.
- v. Se retiró el tubo después del centrifugado, observando si existe la separación de fases en el fondo del tubo.

8. Poder calorífico

a. Cristalería

- i. Beaker de 10mL
- ii. Pipeta de 5mL
- iii. Crisol de cuarzo

b. Materiales y reactivos

- i. Espátula analítica
- ii. Espátula analítica
- iii. Bomba calorimétrica IKA modelo C 200
- iv. Oxígeno comprimido (99.95%, 30 bar)
- v. Fibra de algodón para encendido (IKA C 710.4)
- vi. Muestra de análisis (sólida o líquida)
- vii. Agua templada (18–25 °C, no destilada ni desionizada)
- viii. Alambre de ignición (IKA C 5010.3)
- ix. Bomba calorimétrica IKA modelo C200

c. Procedimiento detallado

- i. Preparación del equipo
 - Se verifica que la temperatura ambiente esté entre 20 °C y 25 °C.
 - Se asegura que el calorímetro esté sobre una superficie nivelada y libre de vibraciones.
 - Se conecta correctamente el equipo a la fuente de alimentación y se enciende.
 - Se llena el depósito con 2 litros de agua templada (entre 18 °C y 25 °C) utilizando un beaker.
 - Se accede al menú del sistema y se activa la opción de llenado para transferir el agua a la caldera externa.
 - Se detiene la bomba cuando el agua rebosa por el tubo de llenado.

- ii. Preparación de la muestra
 - Se pesa entre 0.5 g y 1.0 g de muestra con una precisión de ± 0.0001 g en un crisol de cuarzo.
 - Se enrolla una fibra de algodón en el alambre de ignición y se coloca sobre la muestra en el crisol.
 - Se introduce el crisol en el soporte dentro del recipiente de disgregación.
 - Se cierra el recipiente colocando la tapa y enroscando la tuerca de racor.
 - Se llena el recipiente con oxígeno comprimido (99.95%) a 15 bar mediante la estación C 248.
 - Se introduce el adaptador de encendido en el recipiente cerrado.
- iii. Configuración de la medición
 - Se selecciona “MEDICIÓN” en el menú del calorímetro.
 - Se introduce la masa de la muestra registrada.
 - Se indica el número de recipiente utilizado (por defecto “1”).
 - Se ajusta QExt1 en 50 J (fibra de algodón) y QExt2 en 0 J (sin adyuvantes).
 - Se selecciona el modo de operación “isoperibólico” o “manual”.
 - Se coloca el recipiente de disgregación dentro del calorímetro y se cierra la tapa.
 - Se inicia la medición presionando “OK”.
- iv. Finalización y limpieza
 - Se abre la tapa del calorímetro al finalizar la medición.
 - Se retira cuidadosamente el recipiente y se extrae el adaptador de encendido.
 - Se libera la presión del recipiente bajo campana de extracción.
 - Se abre el recipiente y se verifica que la combustión haya sido completa.
 - Se limpian el crisol, los contactos, el soporte y las paredes internas con un paño sin pelusa.
 - Se deja secar completamente antes de su próximo uso.

9. Índice de cetano

a. Procedimiento detallado

- i. El índice de cetano fue calculado a partir de la ecuación propuesta por *Gopinath et al. (2009)*, la cual estima el número de cetano (CN) a partir de la composición en porcentaje en masa de los principales ésteres metílicos de ácidos grasos presentes en el biodiésel.

VII.RESULTADOS

Cuadro 2: Propiedades fisicoquímicas presentes en una muestra de PFAD

Propiedad	Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza	Coefficiente de variación (%)
Porcentaje de ácidos grasos libres (% Oleico)	88.1860±0.045	0.518	[88.1715±88.2005]	0.5871
Densidad (g/mL)	0.8324±0.0245	0.0006	[0.8324-0.8324]	0.0752
Viscosidad (mPa*s)	9.8013±0.0101	0.0581	[9.7997-9.8030]	0.5924
pH	5.4580±0.0447	0.0377	[5.4569-5.4591]	0.6904
Humedad (%)	0.1280±0.0045	0.0021	[0.1275-0.1285]	0.0422

(Fuente: Elaboración propia).

Este cuadro denota las propiedades fisicoquímicas de los PFAD recuperados en una refinadora de aceite de palma en la Ciudad de Guatemala. Se realizó la medición en quintuplicado y se obtuvo la estadística descriptiva para el análisis de los datos. El análisis se realizó a una temperatura de 60 °C y una presión de 0.978 atm absolutas. El perfil de ácidos grasos presentes en la muestra se verá presentado más adelante en el Cuadro 7

Cuadro 3: Cantidad de metanol 99.9%(m/m) a emplear para diferentes relaciones molares para la esterificación de PFAD

Relación molar (Ácidos graso libre/Metanol)	Peso de metanol (g)
1:1	11.9001
1:2	23.8003
1:4	47.6007
1:6	71.4010
1:8	95.2013
1:10	119.0016
1:12	142.8020

(Fuente: Elaboración propia).

Este cuadro muestra la cantidad de metanol que se debe emplear para realizar las reacciones de esterificación de Fisher $[1AGL_{(l)} + XMeOH_{(l)} \rightleftharpoons 1BD_{(l)} + H_2O_{(l)}]$. Donde el X en el metanol lo indica la relación molar en el cuadro. Se realizó la medición en gracias al %FFA en el **Cuadro 2**

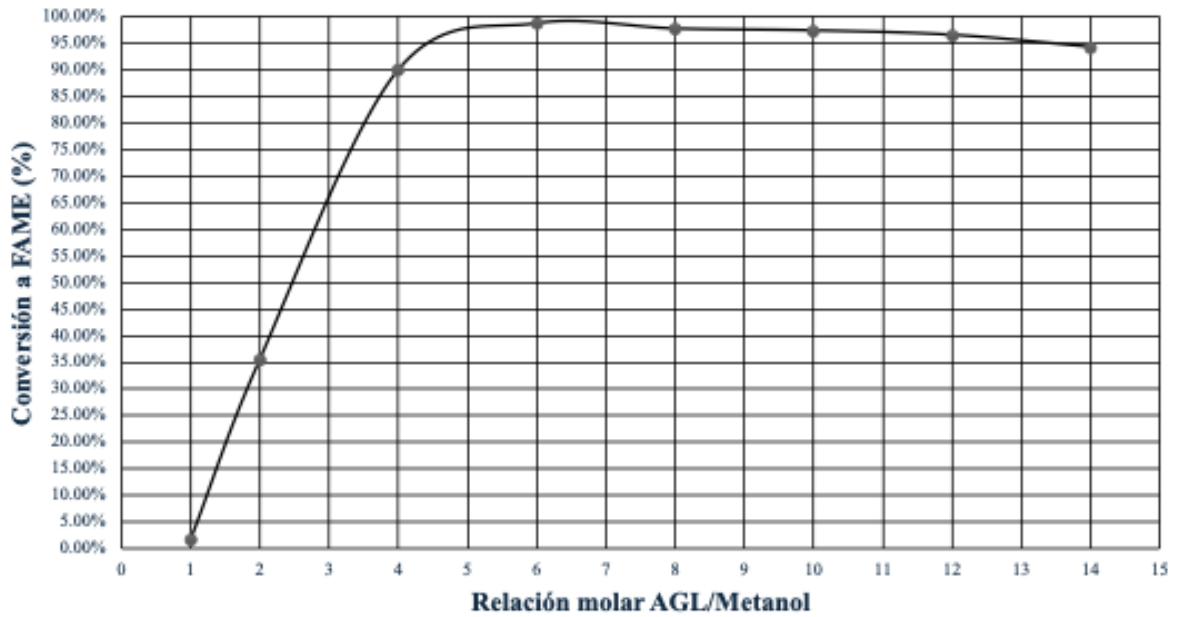
Cuadro 4: Porcentaje de conversión de PFAD a FAME

Relación molar (mol AGL/mol Metanol)	Conversión media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza	Coefficiente de variación (%)
1:1	(1.5834±0.0179)	0.0002	[1.5838-1.5829]	1.0542
1:2	(35.4660±0.0590)	0.0092	[35.4917- 35.4402]	1.5874
1:4	(89.9871±0.0179)	0.0014	[89.9911- 89.9830]	0.1608
1:6	(98.7685±0.0179)	0.0018	[98.7736- 98.7635]	0.1815
1:8	(97.7706±0.0094)	0.0038	[97.7813- 97.7600]	0.3882
1:10	(97.4202±0.0179)	0.0017	[97.4250- 97.4154]	0.1760
1:12	(96.5868±0.0179)	0.0008	[96.5891- 96.5845]	0.0853
1:14	(94.3356±0.0179)	0.0020	[94.3411- 94.3301]	0.2078

(Fuente: Elaboración propia).

Este cuadro denota el porcentaje de ácidos grasos libres que se lograron convertir en ésteres metílicos, los PFAD fueron recuperados en una refinadora de aceite de palma en la Ciudad de Guatemala. Se realizó la medición en quintuplicado y se obtuvo la estadística descriptiva para el análisis de los datos. La reacción se realizó a condiciones constantes, temperatura de 60 °C, agitación 550 rpm, tiempo de 120 minutos de reacción a 0.978 atm.

Figura 13: Conversión de PFAD a FAME según la relación molar.



(Fuente: Elaboración propia).

Esta figura muestra la dependencia del porcentaje de conversión de la relación molar (moles AGL/moles de metanol) en la reacción de esterificación. Estos puntos fueron graficados a partir de la estadística descriptiva en el **Cuadro 4**.

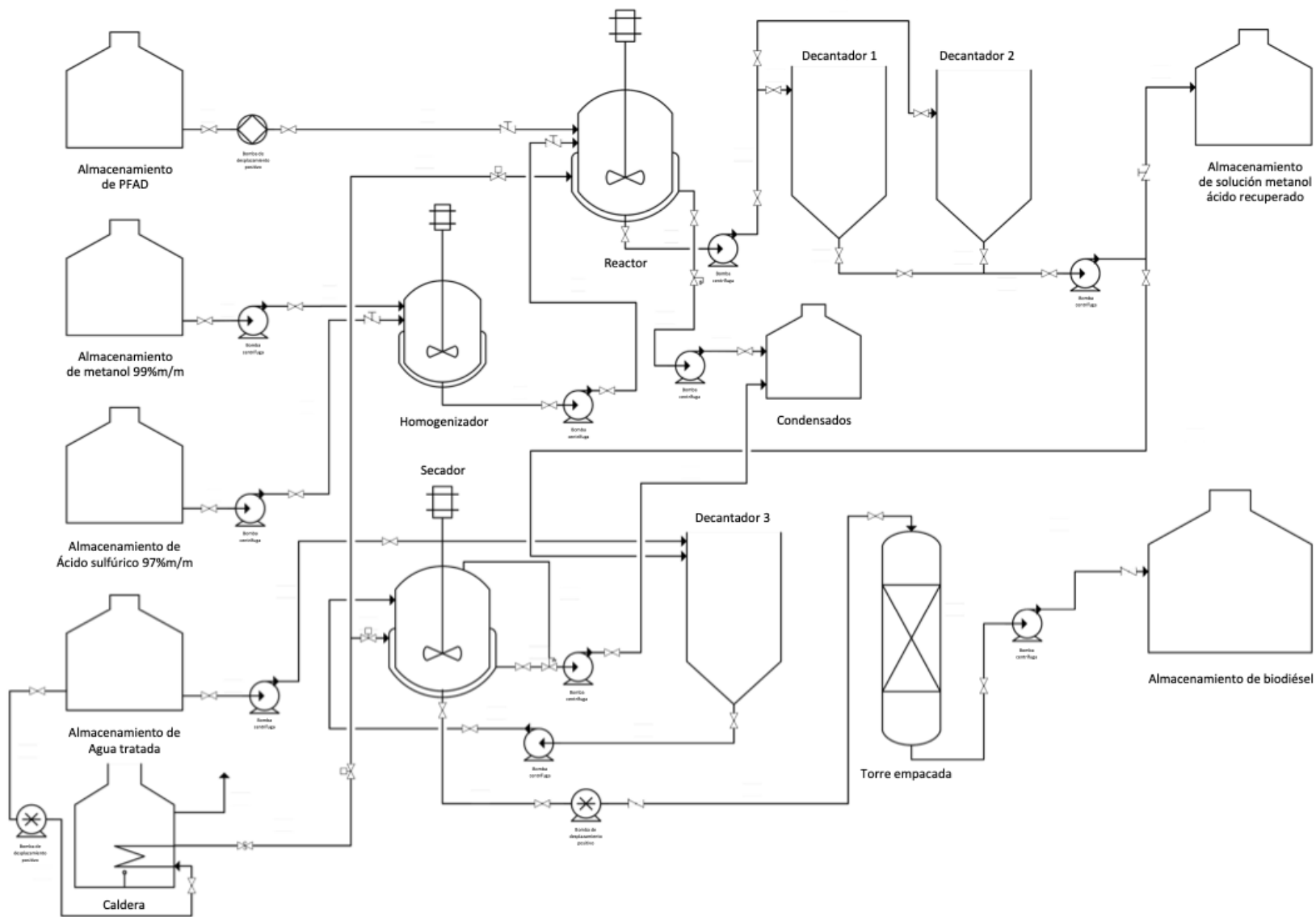
Cuadro 5: Operaciones unitarias para el proceso de producción de ésteres metílicos (biodiésel) a partir de ácidos grasos libres de palma destilados y sus condiciones de operación en cada etapa a partir de las condiciones a escala laboratorio para 100kg como base

Operación unitaria	Condición de operación	Valor
Fusión de los ácidos grasos libres de palma destilados	Carga de lote	100 kg de PFAD sólido
	Temperatura inicial	(18-25) °C
	Temperatura objetivo	60 °C
	Tiempo de calentamiento	20 min
	Agitación	119 rpm
	Presión de operación (Ciudad de Guatemala)	0.978 atm
Mezclado Líquido – Líquido	Temperatura	(18-25) °C
	Agitación	103 rpm
	Presión de operación	0.978 atm
	Relación molar para peso de metanol (PFAD:MeOH)	6:1
	Ácido sulfúrico	1%(m/m) del peso de la base
Reacción (esterificación ácido-catalizada)	Relación molar (PFAD:MeOH)	6:1
	Temperatura	60 °C
	Presión de operación	0.978 atm
	Tiempo de reacción	120 min
	Agitación	250 rpm
Decantación	Temperatura	55 °C
	Tiempo	60 min
Lavado líquido-líquido	Temperatura	40 °C
	Cantidad de agua	300kg
	pH inicial	3.5 – 4.5
	pH final	6.5 – 7.5
Decantación	Temperatura	40 °C
	Tiempo	40 min
Secado	Temperatura	120 °C
	Humedad inicial	3%
	Humedad final	<0.5%
Filtración sólido-líquido	Relación	1 kg de resina por 900 – 1600 kg de biodiésel
	Temperatura	(20 – 30) °C
	Presión de operación	Menor o igual 1 bar (15 psig)

(Fuente: Elaboración propia).

El **Cuadro 5** muestra las operaciones unitarias y las condiciones de operación a las que debe realizarse cada una, con el fin de transformar 100 kg de ácidos grasos libres de palma destilados (PFAD) en biodiésel grado ASTM D6751 mediante el sistema piloto de esterificación y purificación realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias a escala laboratorio. Se realizaron cinco corridas completas del proceso y, a partir de ellas, se determinaron las condiciones para maximizar la conversión y la pureza del biodiésel; los valores de temperatura, tiempo, relaciones molares y volúmenes reportados son promedios obtenidos tras el tratamiento estadístico de los datos, con todas las pruebas efectuadas a una temperatura ambiente controlada de 25 °C, temperatura de reacción de 60 °C y presión de operación de 0.978 atm absolutas en la ciudad de Guatemala.

Figura 14: Diagrama de flujo de proceso para las operaciones unitarias propuestas



(Fuente: Elaboración propia).

Cuadro 6: Propiedades fisicoquímicas del biodiésel que presentó la mayor conversión a partir de PFAD

Propiedad	Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza	Coefficiente de variación (%)
Índice de acidez	0.2728±0.0089	0.05747	[0.2712±0.2744]	0.1243
Densidad (g/mL)	0.8534±0.0045	0.0002	[0.8534-0.8534]	0.0290
Viscosidad (cStk)	4.9669 ± 0.0045	0.0885	[4.9644-4.9694]	1.7810
pH	7.0300 ±0.0089	0.0656	[7.082-7.0318]	0.9330
Humedad (%)	0.0460±0.0045	0.0089	[0.0457-0.0463]	0.3524
Poder calorífico (MJ/kg)	40.0400±0.0224	0.6182	[40.0227-40.0573]	1.5440

(Fuente: Elaboración propia).

Este cuadro denota las propiedades fisicoquímicas del biodiésel producido a partir de la mayor conversión de PFAD a FAME. Se realizó la medición en quintuplicado y se obtuvo la estadística descriptiva para el análisis de los datos. El análisis se llevó a cabo a una temperatura de 60 °C.

Cuadro 7: Comparación de la caracterización fisicoquímica de los ésteres metílicos obtenidos de la relación molar con la mayor conversión

Propiedad	Unidades	Europa (EN 14214)	EE.UU (ASTM D 6751)	Brasil (ANP N°7/08)	Este estudio
Contenido de éster	%(m/m), mín.	96.5		96.5	(99.82±0.10)
Densidad a 15 °C	g/cm ³	0.850-0.900		0.850-0.900	(0.8534±0.0045)
Viscosidad a 40 °C	cStk	3.5-5.0	1.9-6.0	3.5-6.0	(4.9669±0.0045)
Número de cetano	mín	51	47	Informar	63.16
Poder calorífico	MJ/mg (min)	38	37	39	(40.0400±0.0224)
Contenido de agua	ppm (máx)	500		500	(460±4.5)
Agua y sedimentos	%(v/v)		0.05		(0.0460±0.0045)
Metanol	%(m/m) máx	0.2	0.2	0.2	No detectado
Glicerina libre	%(m/m) máx	0.2	0.2	0.2	No detectado
Glicerina total	%(m/m) máx	0.25	0.24	0.24	No detectado
Índice de acidez	mg KOH/g máx	0.5	0.5	0.5	(0.2728±0.0089)
Éster metílico ácido linoleico	%(m/m) máx	12			No detectado
Cont. monoglicérido	%(m/m) máx	0.8		Informar	No detectado
Cont. diglicérido	%(m/m) máx	0.2		Informar	No detectado
Cont. triglicérido	%(m/m) máx	0.2		Informar	No detectado

(Fuente: Elaboración propia).

El cuadro anterior muestra la comparación de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel obtenido en este estudio con las normas vigentes de los países referentes en el uso de biodiésel.

Cuadro 8: Perfil de ésteres metílicos de ácidos grasos presentes

Éster metílico de ácido graso presente	Clasificación	Composición en la muestra %(m/m)
Ácido dodecanoico, éster metílico	Láurico (saturado)	0.15
Tetradecanoato de metilo	Mirístico (saturado)	1.12
Ácido 9- Hexadecanoico, éster metílico (Z) -	Palmitoleico (monoinsaturado)	0.22
Ácido hexadecanoico, éster metílico	Palmítico (saturado)	43.25
Ácido heptadecanoico, éster metílico	Margarico (saturado)	0.11
Ácido 9- Octadecanoico, éster metílico	Oleico (monoinsaturado)	49.28
Ácido octadecanoico, éster metílico	Esteárico (saturado)	4.97
Ácido 8 - octadecenoico, éster metílico (E) -	Isómero oleico (monoinsaturado)	0.20
Ácido 11- eicosenoico, éster metílico	Eicosenoico (monoinsaturado)	0.14
Ácido eicosanoico, éster metílico	Eicosanoico (saturado)	0.38

(Fuente: Elaboración propia).

El cuadro anterior muestra cada perfil de ácidos grasos en formas de en el biodiésel obtenido. Esta cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas fue posible gracias al uso del equipo GC-MSD, operado mediante el método “ÁCIDOS GRASOS HP5 SCAN BIO.M”, diseñado específicamente para la identificación de ésteres metílicos de ácidos grasos. La columna utilizada fue una HP-5MS (fase estacionaria de 5 % fenil metilsiloxano). Dado que esta es la columna instalada actualmente, no se esperan coincidencias exactas con los tiempos de retención reportados en métodos que empleen columnas de distinta polaridad o fase estacionaria. La identificación de compuestos se realizó a partir del análisis del espectro de masas de cada pico, empleando la biblioteca NIST05a.L, y seleccionando aquellos con mayor similitud espectral para su asignación cualitativa.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizó este estudio con el objetivo de evaluar la producción de ésteres metílicos a partir de ácidos grasos libres destilados de la desodorización de aceite de palma africana, determinando a escala laboratorio las operaciones unitarias requeridas y sus condiciones de operación.

Se realizó la caracterización fisicoquímica de una muestra de PFAD recuperada en una refinadora de aceite de palma en la Ciudad de Guatemala, con la finalidad de determinar su concentración de ácidos grasos libres (AGL). Para lograr esto, se midieron en quintuplicado las propiedades fisicoquímicas principales, como se ve en el **Cuadro 2**, incluyendo la cuantificación de los ácidos grasos en términos de oleico, la densidad y la viscosidad a 60°C, así como el pH y la humedad. El PFAD evaluado presenta una elevada concentración de ácidos grasos libres, con un promedio de $(88.1860 \pm 0.045)\%$ (m/m) expresado como oleico, lo que coincide con la naturaleza destilada de este subproducto. Estudios previos señalan que el PFAD se caracteriza por su alto contenido de AGL, resultado de la etapa de desodorización del proceso de refinación (Wu et al., 2014). La estrecha desviación estándar y el bajo coeficiente de variación (0.5871%) evidencian la fiabilidad estadística de los datos (Montgomery, 2017; Walpole et al., 2012).

La densidad resultante de (0.8324 ± 0.0245) g/mL, medida a 60 °C, coincide con las densidades reportadas para corrientes de origen graso sometidas a procesos de refinación y desodorización (Wu et al., 2014). El hecho de que el intervalo de confianza se mantenga prácticamente estático [0.8324–0.8324] indica una variación mínima entre réplicas, lo cual refuerza su reproducibilidad (Ott, 2018). Este valor concuerda con la literatura que describe PFAD con densidades cercanas a 0.84 g/mL en condiciones semejantes, vinculándose directamente al porcentaje de ácidos grasos libres (Gustone et al., 2019). Asimismo, la limitada presencia de otros compuestos pesados o humedad elevada suele explicar la cercanía de los datos con los valores teóricos.

El promedio de viscosidad, (9.8013 ± 0.0101) mPa·s a 60 °C, encaja en los rangos teóricos comunicados para fracciones ricas en ácidos grasos libres, según los cuales el PFAD tiende a presentar valores superiores a 9 mPa·s bajo similares condiciones (Wu et al., 2014). La desviación estándar de 0.0581 refleja la consistencia de los datos recolectados y, combinada con el coeficiente de variación de 0.5924%, indica una dispersión limitada (Walpole et al., 2012). Estudios previos sugieren que los productos de la desodorización se caracterizan por viscosidades más bajas que las de los aceites crudos, lo que colinda con el valor obtenido (Gustone et al., 2019). Además, la fluidez resultante, dada a la temperatura medida, facilita las operaciones de mezclado y bombeo, apoyándose en la coincidencia con los parámetros comúnmente observados en la industria de los biocombustibles. Este comportamiento concuerda con la composición mayoritariamente lipídica y la naturaleza destilada del PFAD.

El pH medido de (5.4580 ± 0.0447) se sitúa en un rango ácido, correlacionándose con la presencia de ácidos grasos libres que no han sido sometidos a una neutralización previa (Ma & Hanna, 1999). Este valor coincide con reportes donde el PFAD se describe con pH típicamente entre 4.5 y 6.0, debido a la predominancia de ácidos grasos en la fracción (Wu et al., 2014). El bajo coeficiente de variación (0.6904%) indica estabilidad en las mediciones (Montgomery, 2017). Además, la acidez concuerda con lo esperado para subproductos oleoquímicos de este tipo y refuerza la noción de que la materia prima mantiene sus características distintivas de refinación, ya que el proceso de desodorización concentra dichos ácidos. Esta coincidencia con la literatura y la consistencia estadística del valor obtenidos avalan su empleo subsecuente en procesos de esterificación u otras transformaciones químicas.

La humedad de (0.1280 ± 0.0045)%m/m corresponde a lo descrito para PFAD sometido a condiciones de desodorización a alta temperatura y vacío, que tienden a reducir el contenido de agua a valores generalmente inferiores al 0.2% (Gustone et al., 2019). El reducido margen de error y el coeficiente de variación de 0.0422% confirman la homogeneidad de las muestras (Ott, 2018). Estas mediciones se correlacionan con lo hallado en estudios previos, donde la fase acuosa residual en el PFAD suele ser mínima, manteniendo la estabilidad del producto (Wu et al., 2014). La cercanía de este porcentaje de humedad con referencias teóricas indica coherencia entre el proceso de obtención y el producto final, que preserva un bajo nivel de agua en su composición. De esta manera, se respalda la concordancia de los datos con lo expuesto en la literatura y dado que el coeficiente de variación es menor a 1% se puede indicar que hay baja dispersión estadística.

La pureza de los ácidos grasos libres destilados permite calcular la masa de metanol 99.9 % (m/m) necesaria para la esterificación, cuyo propósito es desplazar el equilibrio químico hacia la formación de ésteres metílicos (Antczak et al., 2009). En el Cuadro 3 se presentan las cantidades de metanol para relaciones molares entre 1:1 y 1:12, definidas mediante incrementos geométricos (1:1, 1:2; 1:4 hasta 1:12); con la cantidad de metanol según la relación molar calculada, se realizó en quintuplicado las reacciones correspondientes para determinar la conversión. Debido a que la fracción de ácidos grasos libres destilados en la muestra de PFAD es casi del 85%(m/m), los cálculos estequiométricos se vuelven consistentes y la incidencia de componentes minoritarios se reduce, disminuyendo la incertidumbre en el diseño de la reacción tipo Fischer (Montgomery, 2017).

Vale la pena mencionar que el 15% restante de la muestra de PFAD, compuesto por trazas de compuestos volátiles, humedad residual, pequeñas fracciones de triglicéridos o material no reaccionante, no participa de manera significativa en la esterificación y, por lo tanto, no altera la relación molar efectiva entre PFAD y metanol. Al trabajar con un exceso controlado de alcohol, especialmente en relaciones como 6:1, la reacción mantiene su eficiencia independientemente de variaciones marginales en esa fracción minoritaria, ya que el metanol disponible sigue siendo suficiente para desplazar el equilibrio hacia los productos. Incluso si esta fracción inerte aumentara moderadamente, por ejemplo hacia 20% o 25%, el sistema seguiría comportándose de manera estable, ya que el exceso de metanol compensaría la dilución de ácidos grasos; únicamente incrementos más altos, cercanos al 30–40%, empezarían a afectar la conversión al reducir la disponibilidad real de AGL, pero esto no aplica para la pureza del PFAD utilizado en este estudio. Esto permite correlacionar cada incremento en la relación molar con aumentos proporcionales en la masa de metanol, garantizando el exceso necesario para impulsar la reacción hacia la producción de biodiésel sin generar sobrecostos operativos (Antczak et al., 2009; Walpole et al., 2012).

Durante las pruebas exploratorias realizadas fuera del diseño experimental, se evaluó el efecto de agregar el ácido sulfúrico directamente sobre el PFAD sin la presencia inicial de metanol, observándose un oscurecimiento inmediato del medio hasta tornarse negro. Este comportamiento puede atribuirse a reacciones paralelas de deshidratación y carbonización ligera de compuestos orgánicos cuando el ácido fuerte actúa sobre matrices ricas en ácidos grasos sin la dilución proporcionada por el alcohol. En ausencia de metanol, el ácido sulfúrico puede protonar en exceso grupos funcionales, promoviendo reordenamientos y formación de estructuras conjugadas que incrementan la absorción de luz visible, generando el color oscuro característico. Aunque este fenómeno no formó parte del estudio principal, su observación confirma la importancia de seguir la secuencia adecuada de adición de reactivos para evitar reacciones no deseadas y preservar la integridad de la materia prima, reafirmando la necesidad de iniciar la esterificación únicamente cuando el metanol esté presente para diluir y estabilizar el sistema.

La evaluación de la producción no se limitó únicamente a la conversión química, sino que incluyó parámetros operativos esenciales para el comportamiento del sistema en condiciones reales, tales como la velocidad de sedimentación, la relación potencia-volumen (P/V) y la eficiencia de la decantación. Estos factores determinan la separación adecuada entre fases, el rompimiento de emulsiones y el tiempo requerido para obtener un biodiésel limpio y libre de impurezas. La relación P/V empleada en el reactor permitió asegurar un régimen turbulento suficiente para maximizar el contacto entre PFAD, metanol y catalizador, mientras que la caracterización de la sedimentación se fundamentó en la densidad relativa de las fases y la aplicabilidad de modelos de Stokes y Richardson–Zaki para estimar la cinética de separación. Asimismo, la evaluación de la decantación permitió inferir la estabilidad del sistema tras la reacción, verificarse la claridad de las fases y determinar cómo las condiciones de operación propuestas pueden escalarse manteniendo tiempos de residencia adecuados. De esta forma, la producción fue analizada como un proceso completo, integrando reacción, hidrodinámica y separación, lo que proporciona criterios sólidos para el diseño preliminar de un esquema operativo capaz de sostener un escalamiento posterior.

La adopción de incrementos geométricos en la relación molar AGL:Metanol se basa en la búsqueda de un punto en el cual la conversión se estabilice o empiece a decaer por factores como la formación de emulsiones, la dilución excesiva de ácidos grasos o las limitaciones en la transferencia de masa (Freedman, Butterfield, & Pryde, 1986). Diversas investigaciones han subrayado la relevancia de un exceso de metanol para desplazar el equilibrio según el principio de Le Châtelier, si bien reconocen que cantidades excesivamente grandes pueden penalizar la economía del proceso por la mayor demanda de recuperación (Ma & Hanna, 1999).

La conversión de ácidos grasos libres (AGL) a ésteres metílicos (FAME) continúa evidenciando un marcado efecto de la relación molar AGL:Metanol, tal como se muestra en el **Cuadro 4** y en la **Figura 13**. Al aumentar gradualmente la proporción de metanol desde 1:1 hasta 1:14, se aprecia un ascenso pronunciado en la conversión —iniciando en apenas $(1.5834 \pm 0.0179)\% \text{m/m}$ a 1:1 y estabilizándose alrededor de $(98.7685 \pm 0.0179)\% \text{m/m}$ entre 1:6 y 1:10— seguido por un ligero descenso en la relación 1:14, que desciende a $(94.3356 \pm 0.0179)\% \text{m/m}$. Desde una perspectiva termodinámica, este comportamiento concuerda con el principio de Le Châtelier: el exceso de metanol desplaza el equilibrio hacia la formación de FAME, impulsando mayores conversiones (Freedman, Butterfield, & Pryde, 1986).

Es importante mencionar que la conversión denota un decaimiento por arriba de 1:12 dado que la presencia de un exceso de alcohol en la reacción puede alterar el medio, diluyendo los reactivos y dificultando la colisión y adsorción de las moléculas de ácidos grasos libres, lo que ralentiza la cinética de esterificación y puede favorecer la formación de emulsiones. Esta situación no solo eleva los costes operativos al complicar la recuperación y el reciclaje del metanol, sino que también reduce la eficiencia global del proceso (Freedman, Butterfield, & Pryde, 1986). Adicionalmente, el decaimiento observado coincide con la literatura pues, un ambiente excesivamente polar puede debilitar la interacción catalítica con los ácidos grasos, mermando el rendimiento final e incrementando el impacto ambiental derivado de la gestión de residuos (Ma & Hanna, 1999).

Los resultados presentados en este estudio corroboran estudios previos donde se ha resaltado que, aunque mayores relaciones molares suelen incrementar la conversión, no existe una máxima conversión final para la reacción, debido a factores operativos, económicos y ambientales que varían según la escala y los objetivos del proceso (Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005; Ma & Hanna, 1999). Así, para una planta piloto o un laboratorio semi-industrial, podría aceptarse una relación 1:6 o 1:8 como “conveniente” por brindar conversiones elevadas sin sobrecargar los costes asociados a la recuperación de metanol. Sin embargo, es necesario realizar un análisis de costos con mayores restricciones financieras y energéticas ya que las relaciones molares entre 1:4 y 1:6 podrían ser las más beneficiosas en términos conversión – costo, asumiendo una ligera reducción en la conversión global, pero minimizando gastos y facilitando la separación y el reciclaje del exceso de metanol (Sarma et al., 2018). Por lo anterior mencionado, es posible afirmar que la relación molar adecuada depende, principalmente, de las prioridades de cada instalación y de su balance entre rendimiento, costes y eficiencia operativa.

Los resultados presentan una desviación estándar que, según lo presentado por Anderson et al (2015), al ser inferior de 0.1, se puede indicar que no existe dispersión estadística significativa en el método experimental empleado. Para estudios similares como el realizado por Chongkhong et al. (2007), reportan desviaciones estándar típicas inferiores al 0.5% en procesos de esterificación ácida con ácidos grasos destilados de palma africana (PFAD). Además, los coeficientes de variación obtenidos en este estudio fueron consistentemente menores al 2%, destacando la reproducibilidad y confiabilidad del procedimiento experimental para producir FAME en condiciones a 60 °C, 550 rpm y 120 minutos de reacción.

En la operación de fusión del **Cuadro 5**, el PFAD se lleva a una temperatura superior a su punto de fusión (40°C), de modo que toda la carga se mantenga líquida y con viscosidad reducida, condición que mejora la agitación y la dispersión del metanol en el mezclado posterior. Este acondicionamiento térmico se justificó mediante un balance de energía por lotes siguiendo el procedimiento de *Heating and Cooling of Vessels* del manual del ingeniero químico novena edición; el desarrollo completo está en el **Cálculo 12**. Finalmente, operar a presión atmosférica y en un rango térmico moderado limita el inicio de rutas termo-oxidativas y de polimerización de insaturaciones; estos procesos se vuelven relevantes bajo calentamientos prolongados a temperaturas de ácidos grasos como en este estudio.

En la activación del metóxido, el objetivo es obtener una fase reactiva homogénea disolviendo 1% p/p de H₂SO₄ en el metanol al 99%(m/m) antes de que este entre en contacto con el PFAD. La operación se realiza a 18-25 °C, 0.978 atm y 108 rpm durante 10 min. Es necesaria una agitación intensa en régimen turbulento, como se denota en la sección del **Cálculo 13**; de este modo se evita la formación de zonas localmente ácidas que podrían desestabilizar los PFAD o provocar sulfatación del material del reactor cuando el metanol catalizado se añade al PFAD fundido (Seader & Henley, 2006). Además, mantener el ácido en pH cercano a 3 evita la corrosión acelerada y minimiza la generación posterior de sulfatos, simplificando la neutralización y los lavados acuosos.

En la tercera operación unitaria (esterificación ácido-catalizada) se mantiene el sistema a 60 °C, 0.978 atm y 250 rpm durante 120 min con una relación molar PFAD:MeOH = 6:1 y H₂SO₄ al 1% m/m en PFAD. A 60 °C se favorece el desplazamiento del equilibrio hacia los ésteres metílicos sin promover significativamente reacciones secundarias indeseables reportadas a temperaturas más altas en medios ricos en alcohol (formación de éteres, deshidratación), lo que es consistente con la práctica usual para esterificación con H₂SO₄ en biodiésel (Knothe et al., 2010; Canakci & Van Gerpen, 2001). Preparar el ácido en metanol y dosificar esa solución sobre el PFAD fundido asegura acidez homogénea en el contacto alcohol-AGL y reduce resistencias interfaciales; con agitación de 250 rpm se obtiene una dispersión fina alcohol-aceite que lleva la operación a un régimen controlado por reacción más que por transferencia de masa, de acuerdo con criterios de mezclado líquido-líquido en reactores por lotes (Paul et al., 2004; Green & Southard, 2019).

Cinemáticamente, el exceso de metanol permite formular la velocidad por ley de acción de masas como pseudo-primer orden en AGL: $r = k_1 C_{FFA} - k_{-1} C_{BD}$. Con el balance en batch a volumen constante, denotado en el **Cálculo 16** y la definición del equilibrio **Cálculo 17**, la solución predice un acercamiento exponencial al estado de equilibrio. El **Cálculo 18** liga el tiempo requerido con la fracción de acercamiento $\phi = X/X_{eq}$ y el parámetro cinético global $k_{\Sigma} = k_1 - k_{-1}$. Con los parámetros identificados para este sistema, el **Cálculo 19** y la **Figura 15** muestran que 120 min son suficientes para alcanzar conversiones mayores al 99% y, por la relación molar 6:1, lograr $\geq 99\%$ de conversión absoluta bajo las condiciones de operación del estudio. Este enfoque, en donde hay un exceso de alcohol de 6 veces los moles de cada ácido graso y mezclado en régimen turbulento, coincide con los lineamientos de diseño de reactor por lotes para reacciones reversibles de orden efectivo uno y con la práctica reportada para la pre-esterificación de AGL en materias primas tipo PFAD o aceites con alto FFA (Green & Southard, 2019; Zhang et al., 2003).

En la decantación trifásica (FAME–metanol–fase acuosa ácida) el sistema se deja en reposo a 55 °C durante 60 min para permitir la ruptura de la dispersión y la separación gravitacional de capas. La elección de 55 °C mantiene baja la viscosidad del FAME y del metanol, lo que acelera la coalescencia y aumenta la velocidad terminal de gotas bajo régimen viscoso; además, evita incrementos innecesarios en la volatilidad del alcohol. El tiempo de residencia se fundamenta en la metodología clásica de sedimentación libre de gotas (ley de Stokes para gota aislada) y balance geométrico altura de capa/velocidad en operación por lotes: con los supuestos de tamaño característico de gota y propiedades físicas adoptados para este sistema, los Cálculos 21–23 entregan un tiempo de referencia del orden de decenas de minutos, por lo que se fija 60 min como margen operativo para asegurar separación completa ante variaciones razonables de distribución de tamaños y carga. Tras la decantación, la extracción secuencial —retirar primero la fase superior rica en metanol para recobro, luego drenar la fase inferior acuosa ácida, y finalmente transferir la fase orgánica (FAME) a lavado— minimiza arrastres cruzados, reduce el volumen a tratar con agua y facilita el reciclaje del alcohol casi anhidro al siguiente lote, de acuerdo con prácticas estándar en separación líquido–líquido para biodiésel. (Green & Southard, 2019; Seader, Henley, & Roper, 2011; NREL, 2004).

En el lavado líquido–líquido se pone en contacto el FAME con agua a 40 °C en una proporción de tres veces el volumen del PFAD inicial, realizando enjuagues hasta que el extracto acuoso pase de pH 3.5–4.5 a pH 6.5–7.5. Trabajar a 40 °C disminuye la viscosidad del biodiésel y del metanol residual, favoreciendo la coalescencia y la separación de fases, y mejora la extracción de metanol, sales y trazas de H₂SO₄ hacia la fase acuosa (Knothe & Steidley, 2005; Verduzco et al., 2013; Van Gerpen, 2004). Las pérdidas de FAME por disolución en agua son muy bajas (del orden de decenas de ppm), por lo que el arrastre principal corresponde a alcohol y sales (CONCAWE, 2015; Thomas et al., 2017). Finalmente, el combustible lavado debe secarse hasta cumplir ASTM D2709 (agua y sedimentos) como verificación de calidad (Van Gerpen, 2004; ASTM, 2019).

En la segunda decantación agua–biodiésel (40 °C, 40 min) se observó una separación de dos fases con interfaz estable dentro del periodo de residencia establecido. El tiempo requerido fue consistente con la predicción obtenida a partir de la geometría del decantador a escala laboratorio y de la velocidad terminal en régimen viscoso (ley de Stokes con corrección por interacción de gotas), es decir, del orden de decenas de minutos, tal como se deduce en los Cálculos 20–23 (Green & Southard, 2019; Seader, Henley, & Roper, 2011). El desempeño a 40 °C se explica por la disminución de la viscosidad del FAME en ese rango y por el contraste de densidades agua/FAME, factores que favorecen la coalescencia y la separación por gravedad sin necesidad de centrifugación, en concordancia con el comportamiento reportado para biodiésel (Knothe & Steidley, 2005; Verduzco et al., 2013).

Tras el lavado, el biodiésel no cumplió el criterio de agua y sedimentos aplicable en ASTM D6751, por lo que se realizó secado a 120 °C. Posteriormente, el combustible alcanzó el límite exigido sin evidencias de degradación térmica (cambio de color/olor), consistente con la estabilidad térmica de los FAME en tiempos cortos y con las prácticas de operación reportadas (Knothe et al., 2010; Van Gerpen, 2004; ASTM, 2019). Posteriormente, la filtración sólido–líquido a 25 °C con resina adsorbente (dosificación de 1 kg por 900–1600 kg de biodiésel) produjo un efluente claro, con reducción de color y de impurezas polares (trazas de gomas, jabones/sales y metales), y permitió que el combustible cumpliera el índice de acidez ≤ 0.50 mg KOH g⁻¹.

Se determinó un índice de acidez de 0.2728 mg KOH/g; la desviación estándar fue 0.05747, el intervalo de confianza quedó entre 0.2712 y 0.2744 mg KOH/g y el coeficiente de variación fue 0.124%, lo que evidencia muy baja dispersión y, por tanto, buena precisión. La exactitud se infiere por estar claramente por debajo del límite normativo de 0.5 mg KOH/g, por lo que cumple con holgura. Al compararse con biodiésel de aceites vegetales y usados, cuyos valores típicos tras purificación oscilan ~0.20–0.50 mg KOH/g, se ubica en la parte baja del rango, coherente con un biodiésel bien lavado (Knothe, 2005; Demirbas, 2008).

La densidad a 40°C fue 0.8534 g/mL; la desviación estándar fue 0.0002, el intervalo de confianza fue 0.8534–0.8534 y el coeficiente de variación fue 0.029 %, reflejando una alta precisión de medición. Frente a norma, cumple con ANP (0.850–0.900 g/cm³) y queda apenas por debajo del mínimo de EN 14214 (0.860 g/cm³). En comparación con biodiésel de soya o canola (0.86–0.88 g/cm³) y de palma/PFAD (0.85–0.88 g/cm³), el valor se sitúa en el extremo inferior pero aún representativo de FAME comerciales (Knothe, 2005; Lapuerta, Armas, & Rodríguez-Fernández, 2008).

La viscosidad cinemática a 40°C fue 4.9669cSt; la desviación estándar fue 0.0885, el intervalo de confianza 4.9644–4.9694 cSt y el coeficiente de variación 1.781 %, lo que indica repetibilidad adecuada. El valor cae dentro de todos los marcos normativos comparados y se ubica cerca del límite superior europeo, consistente con FAME más saturados como los derivados de palma/PFAD, que tienden a viscosidades más altas que los de soya o canola (4.1–4.5 cSt) (Knothe & Steidley, 2005; Demirbas, 2008).

El pH fue 7.030; la desviación estándar fue 0.0656, el intervalo de confianza 7.031–7.082 y el coeficiente de variación 0.933 %, mostrando lecturas consistentes y buena precisión. Aunque el pH no es criterio en las normas, un valor cercano a la neutralidad es el esperado para biodiésel bien lavado y minimiza riesgos de corrosión e hidrólisis, en línea con reportes de FAME de diversas materias primas cuando la purificación es adecuada (Atadashi, Aroua, & Aziz, 2010).

El contenido de humedad fue 0.0460% (460 ppm); la desviación estándar fue 0.0089, el intervalo de confianza 0.0457–0.0463 % y el coeficiente de variación 0.3524 %, lo que evidencia control del secado y buena precisión. Este nivel está por debajo del límite de 500 ppm, y se alinea con los rangos recomendados para prevenir crecimiento microbiano, corrosión y formación de sedimentos, comparables a biodiésel de soya y palma bien acondicionados (Ma & Hanna, 1999; Atadashi et al., 2010).

El poder calorífico fue 40.040 MJ/kg; la desviación estándar fue 0.6182, el intervalo de confianza 40.0227–40.0573 MJ/kg y el coeficiente de variación 1.544 %, apoyando una medición estable. Este valor se sitúa en el extremo alto para FAME y por encima de mínimos de referencia (37–39 MJ/kg), siendo coherente con biodiésel de materias primas saturadas como PFAD y por debajo del diésel de petróleo (42–43 MJ/kg) (Demirbas, 2008; Gaur & Reed, 2012).

Respecto de las propiedades en el Cuadro 6, pero comparadas en el Cuadro 7, se observó un contenido de éster de 99.82 % m/m (superior al mínimo de 96.5 %), lo que indica conversión favorable para alcanzar las propiedades fisicoquímicas denotadas en las normas de USA y la UE; el número de cetano fue 63.16, por encima de valores típicos de FAME de soya/canola (50–58) y en línea con FAME de palma/PFAD (60–65), favorable para la calidad de ignición y la reducción de retraso al encendido (Knothe, 2005; Lapuerta et al., 2008). Además, no se detectaron metanol, glicerina libre/total ni mono-/di-/triglicéridos y el éster metílico del ácido linoleico fue no detectado frente a su umbral, lo que respalda la pureza del combustible y anticipa menor propensión a depósitos y mejor estabilidad oxidativa al haber menor fracción poliinsaturada (Atadashi et al., 2010; Demirbas, 2008).

El perfil cromatográfico mostró que los dos ésteres mayoritarios fueron metil oleato (C18:1) con 49.28 % y metil palmitato (C16:0) con 43.25 %, seguidos a distancia por metil estearato (C18:0) con 4.97 % y trazas de láurico, mirístico, margárico, eicosanoico y monoinsaturados menores; esta dominancia oleato–palmitato es típica de biodiésel de PFAD y concuerda con la literatura (Knothe, 2005; Lapuerta, Armas, & Rodríguez-Fernández, 2008). Para un desempeño integral se prefiere que el metil oleato sea el componente más abundante (50–70 %), pues los monoinsaturados proporcionan mejor flujo en frío y aún mantienen buena estabilidad oxidativa, mientras que fracciones altas de saturados elevan el punto de enturbiamiento, pero incrementan el número de cetano (Moser, 2009; Ramos et al., 2009).

En este caso, la relación oleato/palmitato cercano a la unidad y con ligero predominio del oleato es favorable: respalda el número de cetano observado y, al mismo tiempo, reduce posibles altos puntos de congelamiento y propiedades a baja temperatura típicas de palmitato/estearatos elevados (Knothe, 2005; Dunn, 2005). La casi ausencia de poliinsaturados (linoleato no detectado en la muestra) reduce la susceptibilidad a oxidación y formación de gomas, contribuyendo a la estabilidad durante almacenamiento (Hoekman et al., 2012). En conjunto, el perfil obtenido es coherente con un FAME de palma bien procesado: alto en oleato para balance operativo y con saturados moderados que explican el buen encendido medido, pero aconsejan vigilar el comportamiento en frío mediante aditivos o cortes adecuados (Lapuerta et al., 2008; Moser, 2009).

Para fortalecer la interpretación de los resultados obtenidos en la caracterización del biodiésel, se aplicó la prueba t-Student a cada una de las propiedades reportadas en el Cuadro 6, densidad, viscosidad cinemática, poder calorífico, contenido de agua e índice de acidez, comparando las medias experimentales con los valores de referencia establecidos en la norma EN 14214. En el caso de parámetros definidos por rangos, como la densidad (0.850–0.900 g/mL) y la viscosidad (3.5–5.0 cSt), la prueba estadística permitió evaluar la compatibilidad de las medias con dichos intervalos normativos. La densidad obtenida (0.8534 g/mL) presentó un intervalo de confianza completamente contenido dentro del rango admitido, lo cual confirma que el combustible se apega adecuadamente a la especificación europea. De forma similar, la viscosidad (4.9669 cSt) se ubicó muy cerca del límite superior, pero permaneciendo dentro del rango; esta proximidad denota una fluidez característica de biocombustibles derivados de materias primas ricas en palmitina y oleína, lo que puede resultar favorable para mejorar la lubricidad sin comprometer el desempeño operacional del combustible en motores diésel modernos.

Para los parámetros definidos respecto a valores mínimos o máximos, la prueba t-Student permitió evaluar con mayor precisión si las medias experimentales diferían significativamente de dichos límites. El poder calorífico del biodiésel (40.04 MJ/kg) se comparó con el valor mínimo exigido por EN 14214 (38 MJ/kg), y la t-Student confirmó que el valor experimental es estadísticamente superior, lo que indica un desempeño energético robusto. En el caso del contenido de agua, la media obtenida (0.046 %) se contrastó con el límite máximo de 0.05 %, mostrando conformidad con la norma y una holgura positiva que evidencia un buen proceso de secado posterior a la reacción. Finalmente, el índice de acidez (0.2728 mg KOH/g) se evaluó frente al máximo permitido de 0.50 mg KOH/g; la prueba estadística determinó que la media es significativamente menor que el límite, reflejando una esterificación eficiente y un combustible con estabilidad química adecuada. En conjunto, estas comparaciones demuestran que todos los parámetros evaluados mediante la prueba t-Student se apegan satisfactoriamente a los estándares de calidad, y aquellos cercanos a un extremo del rango normativo lo hacen de forma consistente, manteniendo características favorables para la operación del biocombustible.

En Guatemala, las condiciones experimentales obtenidas a escala de laboratorio ofrecen un punto de partida para diseñar plantas piloto. La disponibilidad de subproductos como el PFAD y la existencia de redes industriales vinculadas al aceite de palma permiten integrar el esquema propuesto en instalaciones ya operativas, reduciendo la inversión inicial. Asimismo, el diseño de procesos puede orientarse hacia equipos modulares y consumo energético económicamente viable, compatibles con la escala productiva de pequeñas y medianas empresas locales. Esta flexibilidad de diseño no solo facilita la adopción tecnológica, sino que también abre la posibilidad de crear modelos descentralizados de producción de biodiésel, cercanos a los puntos de generación de residuos, reduciendo costos logísticos y reduciendo el impacto ambiental.

Las condiciones iniciales de operación (60 °C, velocidad de agitación fija y tiempo de reacción constante) se seleccionaron a partir de la experiencia acumulada en la Universidad del Valle de Guatemala, donde se ha trabajado previamente con ésteres metílicos y aceites residuales bajo rangos de 55–65 °C y regímenes de agitación que aseguran mezcla completa sin formación excesiva de emulsiones, validando estos valores y se colina con cinética de primer orden presentada en este estudios. Desde el punto de vista termodinámico, una temperatura de 60 °C se mantiene por debajo del punto de ebullición del metanol, pero es suficiente para reducir la viscosidad del PFAD, mejorar la difusión entre fases y aumentar la velocidad de la esterificación ácida, evitando pérdidas significativas de metanol por evaporación y sobrecostos energéticos.

Los estudios realizados en Tailandia y otros países, empleando PFAD o materias primas con alto contenido de ácidos grasos libres, reportan temperaturas en torno a 60 °C y tiempos de reacción del orden de 60-200 min como condiciones óptimas o robustas para maximizar la conversión de ácidos grasos y reducir el contenido de FFA por debajo de 1% (Tapanwong & Punsuvon, 2011; Chongkhong et al., 2009; Akinfalabi et al., 2019; Thein et al., 2019), lo que respalda la elección de estos parámetros en el presente estudio. En este contexto, se decidió fijar la temperatura, la agitación y el tiempo de residencia, y concentrar el análisis en la variación de la relación molar PFAD:metanol, considerada el parámetro más crítico para desplazar el equilibrio de la reacción de esterificación hacia los ésteres metílicos y, al mismo tiempo, optimizar el consumo de alcohol y las etapas de recuperación aguas abajo.

Finalmente, los datos obtenidos permiten visualizar oportunidades de diseño dentro de Guatemala, especialmente en esquemas piloto que puedan aprovechar el PFAD de manera local. La definición de operaciones unitarias como la esterificación, decantación y lavado, bajo condiciones experimentales reproducibles, puede facilitar el planteamiento de equipos a pequeña escala que sirvan como referencia para la industria del país. Estas configuraciones podrían integrarse en espacios universitarios o en instalaciones industriales ya existentes, reduciendo barreras de entrada y generando aprendizajes prácticos para el desarrollo de futuras plantas. De este modo, el objetivo de este trabajo no se limita a validar la viabilidad técnica en laboratorio, sino que también sienta bases para propuestas de diseño adaptadas a la realidad productiva y económica de Guatemala.

IX. CONCLUSIONES

- La caracterización fisicoquímica del PFAD recuperado evidenció un contenido de ácidos grasos libres de (88.19 % m/m como oleico), baja humedad (0.128 %) según otras materias primas ácidas, pH ácido al estar por debajo de cinco y propiedades coherentes con la literatura, confirmando su uso como materia prima para la producción de ésteres metílicos. Esto se confirma gracias a las réplicas en quintuplicado, desviaciones estándar menores a tres veces la media, coeficientes de variación menores al 2% e intervalos de confianza del 95 % contruidos con la distribución t de Student, se evidenció baja dispersión y reproducibilidad interna.
- El cálculo estequiométrico de metanol, basado en la pureza de los ácidos grasos libres, permitió establecer relaciones molares de 1:1 a 1:14 y evidenció que el mayor grado de conversión (98.7685 ± 0.0179) se alcanzó en la relación molar 1:6. A partir de relaciones superiores a 1:10, la conversión comenzó a disminuir, atribuido a la dilución excesiva de reactivos y limitaciones en la transferencia de masa. Si bien el exceso moderado de metanol favorece el desplazamiento del equilibrio hacia la formación de FAME, se recomienda emplear la relación 1:6, ya que presentó la conversión más alta y estable dentro del rango evaluado.
- La caracterización del biodiésel obtenido mostró cumplimiento de parámetros de las normas ASTM D6751 y EN 14214, incluyendo índice de acidez (0.2728 mg KOH/g), viscosidad, humedad, contenido de éster y número de cetano (63.16). Aunque la densidad quedó ligeramente por debajo del mínimo europeo, los resultados generales evidencian un producto apto para su uso como biocombustible. Esto se confirma con el perfil cromatográfico el cual reveló dominancia para el metil oleato (49.28 %) y metil palmitato (43.25 %), con mínima presencia de poliinsaturados, lo que favorece la estabilidad oxidativa. De esta forma se puede indicar que existe viabilidad técnica de producir biodiésel a partir de PFAD a escala laboratorio, identificando las condiciones y operaciones para su implementación en escala piloto.

X. RECOMENDACIONES

- Dado que los resultados de este estudio muestran que las conversiones más altas se concentraron en el rango 1:6 a 1:10, se establece la relación molar 1:6 (alcohol:PFAD) como punto de partida para trabajos posteriores. A partir de esta base, corresponde explorar relaciones entre 1:5 y 1:10 en incrementos geométricos de 0.2, manteniendo las condiciones definidas en este trabajo (60 °C, 120 min y 1 % m/m de H₂SO₄ respecto a la muestra). El criterio de avance queda fijado en conservar conversiones superiores al 98%. En caso de identificarse un valor superior dentro de estos rangos, dicho resultado constituirá la referencia a implementar en un escalamiento piloto.
- A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se propone que en el escalamiento a planta piloto se conserve 60 °C como temperatura base de reacción, verificando que la mezcla alcohol-PFAD mantenga su efectividad en dichas condiciones. Para asegurar la continuidad del régimen de flujo, se recomienda reproducir la relación potencia/volumen y las proporciones geométricas del impulsor empleadas en laboratorio (diámetro de impulsor/diámetro de tanque y altura líquida). Además, describir el tipo de impulsor y la disposición de deflectores permitirá documentar que no se introducen nuevas limitaciones asociadas a la transferencia de masa durante el escalamiento.
- A partir de que este estudio fija bases operativas con PFAD, se recomienda aplicar estas condiciones a ácidos grasos libres destilados de otros aceites como la soya y girasol: 60 °C, 120 min, H₂SO₄ 1 % m/m respecto a la muestra, y relación AGL:MeOH 1:6. Registrar conversión de AGL a FAME. Identificar si se logra conversión mayor o igual al 98.0% reportada en este estudio. En caso de que compuestos externos (tocoferoles, esteroides) dificulten la separación, dejar documentada la necesidad de un pretratamiento antes de la esterificación.
- A partir de las condiciones base identificadas en este estudio (relación molar 1:6, 60 °C, 120 min y H₂SO₄ 1 % m/m), se propone ajustar un modelo cinético operativo mediante muestreos a 0, 30, 60, 90 y 120 minutos, incorporando una variación de temperatura entre 50 y 60 °C. Con ello, será posible estimar los parámetros cinéticos (constante aparente y energía de activación) y comprobar la validez del modelo de pseudo-primer orden bajo exceso de alcohol. El modelo obtenido permitirá predecir los tiempos mínimos de reacción necesarios para mantener conversiones superiores al 98%, constituyendo así una base sólida para etapas posteriores de optimización y escalamiento.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Nacional del Petróleo (ANP). (2023). *RenovaBio*.
- AOCS. (2017). *Official methods and recommended practices of the AOCS* (7th ed.). AOCS Press.
- Ardi, M., Aroua, M. K., & Ampon, K. (2015). Techniques for purification of glycerine generated from biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1164–1173.
- ASTM International. (2016). *ASTM D2709–16: Standard test method for water and sediment in middle distillate fuels by centrifuge*.
- ASTM International. (2017). *ASTM D6584–17: Standard test method for determination of total monoglycerides, total diglycerides, total triglycerides, and free and total glycerin in B-100 biodiesel methyl esters by gas chromatography*.
- ASTM International. (2017b). *ASTM D97–17b: Standard test method for pour point of petroleum products*.
- ASTM International. (2018). *ASTM D4052–18a: Standard test method for density, relative density, and API gravity of liquids by digital density meter*.
- ASTM International. (2019). *ASTM D664–18e2: Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration*.
- ASTM International. (2020). *ASTM D2500–17a(2020): Standard test method for cloud point of petroleum products*.
- ASTM International. (2021). *ASTM D975–21: Standard specification for diesel fuel oils*.
- ASTM International. (2021b). *ASTM D93–20: Standard test methods for flash point by Pensky-Martens closed cup tester*.
- ASTM International. (2021c). *ASTM D613–18a(2021): Standard test method for cetane number of diesel fuel oil*.
- ASTM International. (2022). *ASTM D6751–22a: Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels*.
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., Abdul Aziz, A., & Sulaiman, N. M. N. (2012). High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1999–2008.
- Atkins, P., & de Paula, J. (2010). *Physical chemistry* (9th ed.). Oxford University Press.

- Bailer, J., & de Hueber, K. (1991). Determinación de glicerol saponificable en biodiesel. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 340, 186.
- Bondioli, P. (2004). La preparación de ésteres de ácidos grasos mediante reacciones catalíticas. *Topics in Catalysis*, 27(1–4), 77–82.
- Cámara de Industria de Guatemala. (2023). *Foro energético: Transición energética y sostenibilidad*.
- Canakci, M., & Van Gerpen, J. (2001). Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1429–1436.
- CEN. (2015). *EN 116:2015—Diesel and domestic heating fuels—Determination of cold filter plugging point (CFPP)*.
- CEN. (2019). *EN 14214:2019—Liquid petroleum products—Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications—Requirements and test methods*.
- Chang, A. S., Sherazi, S. T. H., Kandhro, A. A., Mahesar, S. A., Chang, F., Shah, S. N., & Panhwar, T. (2016). Characterization of palm fatty acid distillate of different oil processing industries of Pakistan. *Journal of Oleo Science*, 65(11), 897–901.
- Chang, C. H., Shiah, C. D., & Chan, C. W. (1941). Effect of lime addition on vegetable oil cracking. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 8, 100–107.
- Chong, C. H. (2007). Transesterification using free fatty acids from palm fatty acid distillate for biodiesel production. *Journal of Biotechnology*, 130(2), 277–281.
- Chongkhong, S., Tan, S. N., & Lee, K. T. (2007). Transesterification of palm fatty acid distillate for biodiesel production. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 84(8), 789–793.
- Chongkhong, S., Tongurai, C., Chetpattananondh, P., & Bunyakan, C. (2007). Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. *Biomass and Bioenergy*, 31(8), 563–568.
- Congreso de la República de Guatemala. (2003). *Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable* (Decreto 52-2003).
- Dalal, N. M., & Mehta, T. N. (1939). Cracking of vegetable oils. *Journal of the Indian Chemical Society*, 2, 213–245.
- de Greyt, W., & Kellens, M. (2006). Refining practices. En F. Shahidi (Ed.), *Bailey's industrial oil and fat products* (6th ed.). Wiley.
- De Greyt, W., & Kellens, M. (2019). Oil deodorization: New technologies and solutions to improve final edible oil quality. *Desmet Ballestra Group*.

- De Greyt, W., & Kellens, M. (2019). Advanced refining processes for palm oil: Valorization of by-products. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 96(3), 245–256.
- Demirbaş, A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*, 50(1), 14–34.
- Diasakou, M., Louloudi, A., & Papayannakos, N. (1998). Kinetics of non-catalytic transesterification of soybean oil. *Fuel*, 77(12), 1297–1302.
- Dorado, M. P., Ballesteros, E., López, F. J., & Mittelbach, M. (2004). Optimization of alkali-catalyzed transesterification of *Brassica carinata* oil. *Energy & Fuels*, 18(1), 77–83.
- Dumont, M.-J., & Narine, S. S. (2007). Characterization of palm fatty acid distillate. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 84(4), 375–380.
- Environmental Protection Agency. (2023). *Renewable Fuel Standard (RFS)*.
- FAO. (2020). *Biofuels and food security: Guidelines for biofuels policy and sustainability*.
- FAO. (2021). *Perfil de sistemas alimentarios – Guatemala*.
- FAO. (2025). *Índice de precios de los alimentos de la FAO: junio 2025*.
- Felder, R. M., Rousseau, R. W., & Bullard, L. G. (2016). *Elementary principles of chemical processes* (4th ed.). Wiley.
- Freedman, B., Pryde, E. H., & Mounts, T. L. (1984). Variables affecting the yields of fatty esters. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 61(10), 1638–1643.
- Geankoplis, C. J. (2003). *Transport processes and separation process* (4th ed.). Prentice Hall.
- Gopinath, A., Puhan, S., & Nagarajan, G. (2009). Cetane number of biodiesel fuels. *Energy & Fuels*, 23(9), 4486–4490.
- Goikwad, R., & Gogate, P. (2015). Process intensification of biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing*, 93, 33–42.
- Green, D. W., & Southard, M. Z. (Eds.). (2019). *Perry's chemical engineers' handbook* (9th ed.). McGraw-Hill.
- GREPALMA. (2020). *Contributions of Guatemala's palm oil agroindustry to the country's sustainable development*.
- GREPALMA. (2023). *Aceite de palma aportó más de Q12,500 millones de quetzales a la economía de Guatemala durante el 2023*.

- GREPALMA. (2024). *Estadísticas socioeconómicas al año 2023 – Agroindustria sostenible de aceite de palma en Guatemala*.
- Gunstone, F. D., Harwood, J. L., & Dijkstra, A. J. (2007). *The lipid handbook* (3rd ed.). CRC Press.
- Harris, D. C. (2016). *Quantitative chemical analysis* (9th ed.). W. H. Freeman.
- Helfferich, F. (1962). *Ion exchange*. McGraw-Hill.
- Hénon, G., Kemény, Z., Recseg, K., Zwobada, F., & Kovari, K. (1999). Deodorization of vegetable oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(1), 73–81.
- International Energy Agency. (2023). *Renewables 2023: Analysis and outlook*.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7th ed.). Wiley.
- IUPAC. (2014). *Compendium of chemical terminology: The Gold Book* (2nd ed.). IUPAC.
- Jumaah, M. A., Yusoff, M. F. M., & Salimon, J. (2018). Physicochemical properties of Malaysian PFAD. *AIP Conference Proceedings*, 1940(1).
- Knothe, G., Van Gerpen, J., & Krahl, J. (2005). *The biodiesel handbook*. AOCS Press.
- Knothe, G., Van Gerpen, J., & Krahl, J. (2015). *The biodiesel handbook* (2nd ed.). AOCS Press.
- Lam, M. K., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. (2010). PFAD as feedstock for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(6), 1935–1941.
- Levenspiel, O. (1999). *Chemical reaction engineering* (3rd ed.). Wiley.
- Lin, L., Cunshan, Z., Vittayapadung, S., Xiangqian, S., & Mingdong, D. (2011). Opportunities and challenges for biodiesel fuel. *Applied Energy*, 88(4), 1020–1031.
- Ma, F., & Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: A review. *Bioresource Technology*, 70(1), 1–15.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). *Unit operations of chemical engineering* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Política energética 2021–2050*.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2014). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (8th ed.). Wiley.
- Paine, A. R. (2020). *Deodorization myths explained*. AOCS Processing Division.

- Peterson, C. L., Brown, J., Guerra, D., Crown, D. C., & Withers, R. V. (1993). Rapeseed oil as diesel fuel. *University of Idaho*.
- Physical Chemistry Research Co. (1933). *Distillation of vegetable oil materials* (French Patent No. 756,544).
- Plaza Pública. (2021). *Análisis de la dinámica de expansión del cultivo de palma africana en Guatemala (2010–2020)*.
- Rodionova, M. V., et al. (2017). Biofuel production: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12), 8450–8461.
- Rofiqah, S., Aziz, M., & Ahmad, A. (2018). Acid-catalyzed esterification of PFAD. *Fuel*, 226, 734–741.
- Ruthven, D. M. (1984). *Principles of adsorption and adsorption processes*. Wiley.
- Rutz, D., & Janssen, R. (2007). *Biofuel technology handbook*. WIP Renewable Energies.
- Salimon, J. (2010). Oxidative stability of PFAD. *Journal of Oleo Science*, 59(11), 579–585.
- Sato, M. (1927). Preparation of fuel oil from calcium soap. *Journal of the Society of Chemical Industry (Japan)*, 30, 242–245.
- Schwab, A. W., Bagby, M. O., & Freedman, B. (1987). Properties of diesel fuels from vegetable oils. *Fuel*, 66(11), 1372–1378.
- Shahabuddin, M., et al. (2017). ASTM D6751 and EN 14214 standards. *Energy & Fuels*.
- Snyder, L. R., Kirkland, J. J., & Dolan, J. W. (2010). *Introduction to modern liquid chromatography* (3rd ed.). Wiley.
- Trucillo, P. (2020). Adsorption processes for water treatment. *Applied Sciences*, 10(9), 3567.
- U.S. Department of Energy. (2024). *Greenhouse gas emissions from biodiesel compared to petroleum diesel*.
- USDA Foreign Agricultural Service. (2025). *Guatemala palm oil area, yield, and production*.
- Van Gerpen, J. (2004). Biodiesel production technology. *USDA/NCAUR*.
- VanderWilde, C. (2023). *Palm oil and deforestation in Guatemala*. University of Michigan.
- Wang, R. (1988). Development of biodiesel fuel. *Taiyangneng Xuebao*, 9, 434–436.
- Wankat, P. (2012). *Separation process engineering* (3rd ed.). Prentice Hall.

XII.ANEXOS

A. DATOS ORIGINALES

Cuadro 9: Lecturas de contenido de humedad de una muestra de PFAD

Corrida No.	Lectura de porcentaje de humedad ($\pm 0.01\%$)
1	0.10
2	0.14
3	0.15
4	0.13
5	0.12

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 mediciones de la humedad de los PFAD, obtenidos después del desodo del aceite de palma africana en una refinadora de aceite en Guatemala. El procedimiento empleado para la medición de esta característica de los PFAD se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 10: Medición de tiempos para la viscosidad dinámica de PFAD

Tiempo de agua desmineralizada		Tiempo para PFAD	
Minutos (± 0.1 min)	Segundos (± 1 s)	Minutos (± 0.1 min)	Segundos (± 1 s)
0	7	2	55
0	7	2	54
0	7	2	55
0	7	2	55
0	7	2	54

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 mediciones de los tiempos de los PFAD, obtenidos después del desodo del aceite de palma africana en una refinadora de aceite en Guatemala a 60°C . El procedimiento empleado para la medición de esta característica de los PFAD se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 11: Pesos de los PFAD en un picnómetro de 25mL para determinación de la densidad

Peso picnómetro vacío ($\pm 0.0001\text{g}$)	Peso picnómetro lleno ($\pm 0.0001\text{g}$)
30.0575	50.8628
	50.8632
	50.8631
	50.8630
	50.8629

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 mediciones del picnómetro lleno de los PFAD, obtenidos después del desodo del aceite de palma africana en una refinadora de aceite en Guatemala a 60°C. El procedimiento empleado para la medición de esta característica de los PFAD se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 12: Pesos para la estandarización de una solución de hidróxido de sodio

Peso del ftalato ácido de potasio ($\pm 0.0001\text{g}$)	Agua agregada ($\pm 0.1\text{mL}$)	Volumen NaOH ($\pm 0.01\text{mL}$)
0.101	50	5.2
0.158		8.3
0.084		4.3
0.114		5.9
0.101		5.2

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 mediciones para estandarización de una solución de NaOH que se empleará para titular PDFA obtenidos después del desodo del aceite de palma africana en una refinadora de aceite en Guatemala a 60°C. Se denota el procedimiento en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 13: Volúmenes de consumo de NaOH para la titulación de los PFAD

Peso de PFAD ($\pm 0.0001\text{g}$)	Etanol agregado ($\pm 0.1\text{mL}$)	Volumen NaOH ($\pm 0.1\text{mL}$)
1.023	50.0	33.9
1.023		33.9
1.056		34.8
1.051		34.5
1.101		36.0

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 titulaciones de los PFAD con la solución estandarizada. El procedimiento empleado para la medición de esta característica de los PFAD se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 14: Lecturas del potencial de hidrógeno en una muestra de PFAD

Corrida No.	Lectura de pH (± 0.01)
1	5.50
2	5.40
3	5.45
4	5.46
5	5.48

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 mediciones de la humedad de los PFAD, obtenidos después del desodo del aceite de palma africana en una refinadora de aceite en Guatemala. El procedimiento empleado para la medición de esta característica de los PFAD se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 15: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 1:1

Ensayo (No.)	Peso biodiésel obtenido (± 0.0001)g	Peso metanol ingresado (± 0.1)g	Peso de muestra ingresado (± 0.1)g	Peso de ácido sulfúrico ingresado (± 0.1)g
1	1.4136	11.9	100	1
2	1.3826			
3	1.3921			
4	1.3832			
5	1.4101			

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 1:1 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 16: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 2:1

Ensayo (No.)	Peso biodiésel obtenido (± 0.0001)g	Peso metanol ingresado (± 0.1)g	Peso muestra de ingresado (± 0.1)g	Peso de ácido sulfúrico ingresado (± 0.1)g
1	31.20	23.8	100	1
2	30.20			
3	31.60			
4	30.98			
5	32.40			

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 2:1 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 17: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 4:1

Ensayo (No.)	Peso biodiésel obtenido (± 0.0001)g	Peso metanol ingresado (± 0.1)g	Peso muestra de ingresado (± 0.1)g	Peso de ácido sulfúrico ingresado (± 0.1)g
1	79.31	47.6	100	1
2	79.56			
3	79.23			
4	79.29			
5	79.39			

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 4:1 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 18: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 6:1

Ensayo (No.)	Peso biodiésel obtenido (± 0.0001)g	Peso metanol ingresado (± 0.1)g	Peso muestra de ingresado (± 0.1)g	Peso de ácido sulfúrico ingresado (± 0.1)g
1	87.3	71.4	100	1
2	87.1			
3	87.2			
4	86.9			
5	87.0			

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 6:1 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 19: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 8:1

Ensayo (No.)	Peso biodiésel obtenido (± 0.0001)g	Peso metanol ingresado (± 0.1)g	Peso muestra de ingresado (± 0.1)g	Peso de ácido sulfúrico ingresado (± 0.1)g
1	86.8	95.2	100	1
2	86.1			
3	86.2			
4	86.0			
5	86.0			

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 8:1 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 20: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 10:1

Ensayo (No.)	Peso biodiésel obtenido (± 0.0001)g	Peso metanol ingresado (± 0.1)g	Peso muestra de ingresado (± 0.1)g	Peso de ácido sulfúrico ingresado (± 0.1)g
1	86.8	119	100	1
2	86.1			
3	86.2			
4	86			
5	86			

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 10:1 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 21: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 12:1

Ensayo (No.)	Peso biodiésel obtenido (± 0.0001)g	Peso metanol ingresado (± 0.1)g	Peso muestra de ingresado (± 0.1)g	Peso de ácido sulfúrico ingresado (± 0.1)g
1	85.1	142.8	100	1
2	85.22			
3	85.2			
4	85.1			
5	85.26			

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 12:1 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 22: Cantidad de reactivos empleados en la producción de la esterificación 14:1

Ensayo (No.)	Peso biodiésel obtenido (± 0.0001)g	Peso metanol ingresado (± 0.1)g	Peso de muestra de ácido sulfúrico ingresado (± 0.1)g
1	83.23	166.6	100
2	83.32		
3	83.32		
4	83.15		
5	82.90		

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 14:1 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 23: Lecturas de contenido de humedad del biodiésel que presentó la mayor conversión a partir de PFAD

Corrida No.	Lectura de porcentaje de humedad ($\pm 0.01\%$)
1	0.07
2	0.04
3	0.10
4	0.08
5	0.07

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 mediciones de la humedad del biodiésel que se produjo a partir de la relación molar que obtuvo la mayor conversión. El procedimiento empleado para la medición de esta característica se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 24: Medición de tiempos para la viscosidad dinámica del biodiésel con la mayor conversión a partir de PFAD

Tiempo de agua desmineralizada		Tiempo para FAME	
Minutos (±0.1 min)	Segundos (±1 s)	Minutos (±0.1 min)	Segundos (±1 s)
0	7	1	12
0	7	1	14
0	7	1	12
0	7	1	13
0	7	1	15

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 mediciones de los tiempos del biodiésel que se produjo a partir de la relación molar que obtuvo la mayor conversión. El procedimiento empleado para la medición de esta característica de los FAME's se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 25: Pesos de los del biodiésel con la mayor conversión a partir de PFAD en un picnómetro de 25mL

Peso picnómetro vacío (±0.0001g)	Peso picnómetro lleno (±0.0001g)
30.0575	51.3829
	51.3934
	51.4001
	51.3900
	51.3910

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 mediciones del picnómetro lleno del biodiésel que se produjo a partir de la relación molar que obtuvo la mayor conversión. El procedimiento empleado para la medición de esta característica de los PFAD se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

Cuadro 26: Titulación del biodiésel con la mayor conversión a partir de PFAD

Peso de PFAD ($\pm 0.0001\text{g}$)	Etanol agregado ($\pm 0.1\text{mL}$)	Volumen solución estandarizada de NaOH ($\pm 0.1\text{mL}$)
1.0131	50.0	0.06
1.0241		0.06
1.0451		0.06
1.0235		0.04
1.0562		0.04

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 titulaciones a 60°C . El procedimiento empleado para la medición de esta característica del biodiésel se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. La solución de hidróxido de sodio es la misma que la estandarizada en el **Cuadro 12**.

Cuadro 27: Lecturas del potencial de hidrógeno en una muestra de biodiésel con la mayor conversión a partir de PFAD

Corrida No.	Lectura de pH (± 0.01)
1	6.94
2	7.10
3	6.99
4	7.04
5	7.08

(Fuente: Propia)

Se realizaron 5 mediciones del pH del biodiésel. El procedimiento empleado para la medición de esta característica se denota en el inciso 0 de la sección de metodología.

B. CÁLCULOS DE MUESTRA

Cálculo 1: Ecuación para tamaño de muestra en la estimación de una media con población infinita

$$n = \frac{Z^2 \sigma^2}{e^2} = \frac{(1.96)^2 (0.025)^2}{0.05^2} = 0.9604 \approx 1$$

[Considerando que la planta refinadora de aceite de palma opera bajo condiciones constantes las 24 horas del día, los parámetros fisicoquímicos del aceite procesado presentan una variabilidad muy baja y estable en el tiempo. Por lo tanto, se tomó como referencia la desviación estándar típica reportada por los productores siendo esta aproximadamente $\sigma = 2.5\%$. Para asegurar un alto nivel de confianza estadística se utilizó un nivel del 95%, correspondiente a un valor crítico $Z = 1.96$. Asimismo, se definió como aceptable un error máximo permisible (e) de 5%, que resulta suficientemente bajo para garantizar la representatividad precisa del proceso.]

Cálculo 2: Determinación de la densidad de los ácidos grasos libres destilados de palma

$$\rho_{PFAD} = \frac{m_f - m_o}{V_p} = \frac{(50.8677 - 30.0575)g}{25mL} = \frac{0.8324g}{mL}$$

[Se empleó un picnómetro graduado a 25mL para determinar la masa de los ácidos grasos libres de palma destilados. De esta manera, se pesó el picnómetro vacío y posteriormente lleno de glicerina, asimismo, se conocía el volumen del picnómetro, por lo que fue posible determinar la densidad de la muestra. Este cálculo se hizo de la misma forma para el biodiésel producido en quintuplicado a escala laboratorio como se muestra en la sección A. Los resultados se muestran en los cuadros de la sección de datos calculados. Los datos se extrajeron de la sección A]

Cálculo 3: Viscosidad dinámica de los ácidos grasos libres de palma destilados

$$\eta_2 = \frac{(\eta_1)(\rho_2 t_2)}{(\rho_1 t_1)} = \frac{(0.467mPa * s) \left(\frac{0.8324g}{mL} \right) (175s)}{\left(\frac{0.9832g}{mL} \right) (7s)} = 9.8844mPa * s$$

[El cálculo fue realizado para determinar la viscosidad dinámica presente en la muestra de ácidos grasos libres destilados como se detalla en la sección A. Este cálculo se repitió en quintuplicado para tener estadística descriptiva y se siguió el mismo procedimiento para calcular la viscosidad del biodiésel resultante. Los datos se extrajeron de la sección A]

Cálculo 4: Molaridad de una solución titulante de hidróxido de sodio

$$[NaOH] = \frac{m_{ftalato}}{V_{titulado} * M_{Masa\ molar\ ftalato}}$$

$$[NaOH] = \frac{0.101g}{(5.2mL) \left(\frac{1L}{1000mL}\right) \left(\frac{204.22g}{mol}\right)} = \frac{0.0951mol}{L}$$

[El cálculo anterior fue empleado para saber la concentración final de una solución titulante, para calcular los ácidos grasos libres, de hidróxido de sodio por medio de un patrón primario, el ftalato ácido de potasio. La determinación de la molaridad se realizó en quintuplicado y esta solución se realizó siguiendo los pasos de la sección A.4. Se empleó para determinar tanto la cantidad de AGL de la muestra como del biodiésel resultante. Los datos se extrajeron de la sección A]

Cálculo 5: Cantidad de ácidos grasos libres presentes en una muestra de ácidos grasos libres destilados de palma

$$\%FFA_{oleico} = \frac{(33.9mL) \left(\frac{0.1mol\ NaOH}{L\ solución}\right) \left(\frac{282.46g}{mol}\right)}{(10)(1.023g\ PFAD)} = 88.69\%_{en\ terminos\ de\ oleico}$$

[El cálculo determina el porcentaje de ácidos grasos libres (% FFA) expresado como ácido oleico en una muestra de PFAD mediante titulación ácido-base. Para ello se empleó una solución de hidróxido de sodio, el promedio de la molaridad del **Cálculo 4**, que consumió 33.9 mL al neutralizar 1.023 g de muestra. El resultado se obtuvo con la ecuación estándar de AOCS Ca 5a-40 donde la masa molar de ácido oleico=282.46g/mol y el factor 10 ajusta las unidades para reportar en porcentaje p/p. Se eligió el ácido oleico porque los métodos de referencia ASTM D5555 y AOCS Ca 5a-40 establecen expresamente esta base, garantizando comparabilidad directa con la literatura y las especificaciones internacionales de aceites y grasas]

Cálculo 6: Estimación del índice de cetano

$$\begin{aligned} \text{CN} &= 62.2 + 0.017(0.15) + 0.074(1.12) + 0.115(43.25 + 0.22) + 0.177(4.97) \\ &\quad - 0.103(49.28) - 0.279(0) - 0.366(0) \\ \text{CN} &= 63.16 \end{aligned}$$

[El cálculo anterior se elaboró a partir del perfil de ácidos grasos determinado previamente por cromatografía de gases. La ecuación empleada fue la **Ecuación 6** y ha demostrado una alta confiabilidad con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.953$ y un error estándar de 2.271. El CN representa el número de cetano estimado, L = % de ácido láurico (C12:0), M = % de ácido mirístico (C14:0), P = % de ácido palmítico (C16:0), S = % de ácido esteárico (C18:0), O = % de ácido oleico (C18:1), LI = % de ácido linoleico (C18:2) y LL = % de ácido linolénico (C18:3) cada uno recuperado como se menciona del CG-MS. Los datos se extrajeron de la sección A]

Cálculo 7: Determinación de la media estadística para la molaridad de la solución de hidróxido de sodio

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{[(0.8530 + 0.8534 + 0.8537 + 0.8533 + 0.8533) \pm 0.01] \frac{g}{mL}}{5} \\ &= (0.8534 \pm 0.0045) \frac{g}{mL} \end{aligned}$$

[El cálculo anterior se emplea como muestra de la determinación de la media para la densidad del biodiésel obtenido de la relación molar que presentó la mayor conversión a partir del PFAD. Este cálculo se repitió para las demás medias estadísticas calculadas, fue posible gracias a la **Ecuación 7**]

Cálculo 8: Propagación de error la media de la densidad del biodiésel

$$f = \frac{1}{5} \sqrt{(0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2} = \pm 0.0045 \frac{g}{mL}$$

[El cálculo anterior se emplea como muestra de la determinación de la propagación de error para media para la densidad del biodiésel obtenido de la relación molar que presentó la mayor conversión a partir del PFAD. Este cálculo se repitió para las demás propagaciones de error calculadas, fue posible gracias los datos se extraídos de la sección A]

Cálculo 9: Determinación de la desviación estándar del biodiésel

$$\sigma = \sqrt{\frac{(0.8530 - 0.8534)^2 + (0.8534 - 0.8534)^2 + \dots}{5 - 1}} = 0.0002 \frac{g}{mL}$$

[El cálculo anterior se emplea como muestra de la determinación de la desviación estándar para la densidad del biodiésel obtenido de la relación molar que presentó la mayor conversión a partir del PFAD. Este cálculo se repitió para las demás medias desviaciones estándar calculadas, fue posible gracias a la **Ecuación 7**]

Cálculo 10: Determinación del intervalo de confianza para la densidad del biodiésel

$$I.C = 0.8534 \pm 2.776 \frac{0.0002}{\sqrt{5}} = [0.8534 - 0.8534] \frac{g}{mL}$$

[El cálculo anterior se emplea como muestra de la determinación de la desviación del intervalo de confianza para la densidad del biodiésel obtenido de la relación molar que presentó la mayor conversión a partir del PFAD. El valor de t de Student utilizado para el cálculo del intervalo de confianza al 95 % con 5 muestras (n = 5) fue de 2.776, el cual se extrajo de la tabla de distribución t de Student para una cola bilateral con 4 grados de libertad (n - 1), según lo reportado en bibliografía estadística estándar (Montgomery & Runger, 2014). Este cálculo se repitió para intervalos de confianza calculados, fue posible gracias a la **Ecuación 9** y la **Ecuación 7**]

Cálculo 11: Determinación del coeficiente de variación para la densidad del biodiésel

$$C.V = \frac{0.0002}{0.8534} * 100\% = 0.0291\%$$

[El cálculo anterior se emplea como muestra de la determinación del coeficiente de variación para la densidad del biodiésel obtenido de la relación molar que presentó la mayor conversión a partir del PFAD. Este cálculo se repitió para las demás medias desviaciones estándar calculadas, fue posible gracias a la **Ecuación 10** y **Ecuación 7**]

Cálculo 12: Determinación de la energía necesaria para fusionar los PFAD

$$q_{esp} = C_{p-PFAD} * \Delta T + \Delta H_{fusión} = \left(\frac{1.92kJ}{kg * K} \right) (60 - 22)K + \left(\frac{163.93kJ}{kg} \right) = \frac{236.89kJ}{kg}$$

$$Q = m q_{esp} = (100kg) \left(\frac{236.89kJ}{kg} \right) = 23690kJ$$

* Se se proponen 20 minutos para fusionar los PFAD

$$P_{tot} = \frac{Q_{Total}}{t_{propuesto}} = \frac{23690kJ}{20 \text{ min} \left(\frac{60s}{1min} \right)} = 19.7kW$$

[El calculo anterior resume un balance de energía por lotes para estimar la potencia necesaria a fin de fundir y calentar 100 kg de PFAD desde 22 °C hasta 60 °C en un tiempo objetivo de 20 min: primero se calcula la energía específica como suma de la sensible (usando la capacidad calorífica promedio de aceites grasos de la Tabla 2-93, con los coeficientes “fatty oils A=0.450 y B=0.0007) y la latente de fusión (tomando como compuesto representativo el ácido palmítico de la Tabla 2-68), lo que da aproximadamente, luego se multiplica por la masa para obtener la carga total del lote y, finalmente, se divide por el tiempo propuesto para obtener la potencia requerida.

El tiempo objetivo de 20 min se propone porque, en las pruebas de laboratorio con 100 g, el intervalo observado para fusionar completamente el PFAD y llevarlo a 60 °C estuvo entre 10 y 20 min; por tanto, al escalar con buena agitación y una fuente de calor distribuida, 20 min es una meta conservadora y alcanzable. Las expresiones utilizadas corresponden al método de “Heating with Internal Coil from Initial Temperature for Specified Time” (Cap. 11 del Manual de Ingeniero Química novena edición) aplicada en forma de potencia sobre tiempo), y, si fuese necesario considerar pérdidas al ambiente, Perry indica ajustarlas añadiendo un término de pérdida externo al balance de energía (Ec. 11-35p). El calor específico de extrajo de la Tabla 2-68 para calores de fusión (entrada de ácido palmítico) y subsección “Batch Operations: Heating and Cooling of Vessels” donde se presenta el balance energético de calentamiento en tiempo especificado y el ajuste por pérdidas]

Cálculo 13: Determinación de la velocidad de agitación escalado por potencia por volumen constante (operación ya fundida, régimen turbulento)

$$\frac{P}{V} \propto \frac{\rho N^3 D^5}{V}$$

$$\text{Semejanza de geometría } N \propto V^{-\frac{2}{9}}$$

$$\text{Y suponiendo que } \frac{V_1}{V_2} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{(0.1kg)_{\text{masa experimental}}}{(100kg)_{\text{base de cálculo}}} = 0.001$$

$$N_2 = N_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{2}{9}} = (550rpm)(0.001)^{\frac{2}{9}} = 118.5rpm$$

[Se mantuvo constante la potencia específica de mezclado (P/V), criterio recomendado por el manual de ingeniero químico en régimen turbulento con tanques geoméricamente semejantes y mismo tipo de impulsor, ya que en turbulento el número de potencia es aproximadamente constante y la potencia escala. La relación general de escala para n=2/3 (P/V constante) se presenta explícita en el Cap. 18 (ec. 18-18), y su deducción y uso también se muestran en el Cap. 15 (ec. 15-163) Green & Southard, 2019).]

Cálculo 14: Revisión de velocidad de punta bajo P/V constante

$$\frac{D_2}{D_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{100kg}{0.1kg} \right)^{\frac{1}{3}} = 10$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.46416$$

$$\frac{U_{tip,2}}{U_{tip,1}} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \left(\frac{D_2}{D_1} \right) = 0.46416 * 10 = 2.154$$

[El cálculo anterior denota que, tomando como supuesto la semejanza geométrica y en régimen turbulento, conservar la potencia por unidad de volumen implica que la velocidad de punta del impulsor en el equipo de mayor tamaño debe aumentar con la raíz cúbica del cambio de diámetro. En términos prácticos, escalar el volumen casi 1000 veces conduce a que la velocidad de punta del equipo grande sea casi 2.2 mayor; este incremento moderado de cizallamiento es el esperado cuando se mantiene la misma intensidad de mezclado por unidad de volumen, y por ello respalda que la reducción de 550 rpm a 118 rpm sea coherente con el criterio adoptado (Green & Southard, 2019).

Cálculo 15: Reynolds del impulsor a 118 rpm (PFAD a 60 °C) con D/T=0.40

Suponiendo $H \approx T$

$$D = 0.4T \rightarrow T = \left(\frac{4V}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{4\left(\frac{100kg}{853.4kg}\right)}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = 0.53037m$$

$$D = 0.4T \rightarrow D = (0.4)(0.53037m) = 0.21215m$$

$$N = 118rpm = \frac{118}{60} = \frac{1.9667}{s}$$

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu} = \frac{\left(\frac{853.4kg}{m^3}\right)\left(\frac{1.9667}{s}\right)(0.21215m)^2}{\left(\frac{0.0042388m^2}{s}\right)} = 1.7821 \times 10^4$$

Donde:

N = velocidad de rotación del impulsor, expresada en revoluciones por unidad de tiempo (puede reportarse en rpm o en s^{-1}).

D = diámetro del impulsor, longitud característica del mezclado mecánico (m) (Green & Southard, 2019, Cap. 18)

T = diámetro interno del tanque (m). Forma parte de la nomenclatura estándar de equipos agitados (Green & Southard, 2019, Cap. 18).

H = nivel de líquido en el tanque (m). También es parte de la nomenclatura estándar; con frecuencia $H = T$ (Green & Southard, 2019, Cap. 18).

D/T = razón geométrica entre el diámetro del impulsor y el diámetro del tanque; guía de diseño típica: 0.25–0.50, con recomendados de 0.30–0.40 según el tipo de impulsor y servicio (Green & Southard, 2019, Cap. 18).

H/T = razón entre el nivel de líquido y el diámetro del tanque; se usa para describir la geometría (Green & Southard, 2019, Cap. 18)

[Se propuso D/T=0.40 por ubicarse en el intervalo adecuado según el manual de ingeniero químico para tanques agitados con turbina de palas inclinadas (usualmente entre 30–40 % del diámetro del tanque), y se asumió nivel de líquido H era casi T, una configuración típica presentada en el capítulo de mezclado. Con esa geometría y a N=118 rpm, el número de Reynolds del impulsor fue calculado. El valor obtenido, cumple el criterio de “plenamente turbulento en todo el tanque” del Cap. 6 (1×10^4). Frente al umbral más conservador del Cap. 18 para la región del impulsor (2×10^4), queda apenas por debajo; si se deseara superar explícitamente ese umbral sin cambiar rpm, aumentar levemente D/T dentro del rango permitido (p. ej., D/T=0.45) eleva manteniéndose en valores usuales de diseño. Todo ello es consistente con los criterios y rangos que el manual establece para el escalado y la clasificación de régimen en tanques agitados (Green & Southard, 2019).

Cálculo 16: Modelo cinético (ley de acción de masas + exceso de MeOH)

$$r_f = k_f C_{FFA} C_{MeOH} \quad r_r = k_r C_{BD} C_{H_2O}$$

$$k_1 \equiv k_f C_{MeOH} \text{ (Dado que Metanol está casi 6 veces molar en exceso = Cte)}$$

$$\frac{dC_{FFA}}{dt} = -r_f + r_r \rightarrow \frac{dC_{FFA}}{dt} = -k_1 C_{FFA} + k_{-1} C_{BD}$$

(k_{-1} efectivo si el término de agua se mantiene casi constante en operación controlada)

Donde:

FFA = ácido graso libre

MeOH = metanol

BD = éster metílico formado

H₂O = agua formada

r_f = velocidad de reacción directa

r_r = velocidad de reacción inversa

k_f = constante de velocidad directa

k_r = constante de velocidad inversa

C_{FFA} (o C_A) = concentración de FFA

C_{MeOH} = concentración de metanol

$C_{\text{Éster}}$ (o C_{BD}) = concentración de éster (biodiésel)

C_{H_2O} = concentración de agua

k_1 = constante pseudo–primer orden directa ($k_f \cdot C_{MeOH}$)

k_{-1} = constante pseudo–primer orden inversa (efectiva)

t = tiempo de reacción

[Se parte de la ley de acción de masas: el ritmo depende del producto de concentraciones según el cap. 7, “Law of Mass Action” del manual de ingeniero químico. Para reacciones elementales, la forma de ley de acción queda explícita en (7-6)–(7-7) (Green & Southard, 2019). Para reacciones reversibles, Perry escribe la forma general y el concepto de equilibrio químico donde $r_f = r_r$ (7-12 a 7-14) (Green & Southard, 2019). El exceso de un reactivo, en este caso el metanol, permite reducir el orden aparente: el propio Perry muestra un caso isoterma donde, con gran exceso de B, el comportamiento en A es de primer orden efectivo, específicamente el ejemplo semibatch, “large excess B” (Green & Southard, 2019) . Con ese mismo razonamiento en batch (volumen ~constante), tomamos $k_1 \equiv k_f C_{MeOH}$ } constante]

Cálculo 17: Balances en batch y “acercamiento exponencial” al equilibrio

$$\text{Batch; } V = \text{cte}, \quad \frac{dC_{FFA}}{dt} = -k_1 C_{FFA} + k_{-1} C_{BD}, \quad \frac{dC_{BD}}{dt} = k_1 C_{FFA} - k_{-1} C_{BD}$$

$$C_{FFA}(t) + C_{BD}(t) = C_{FFA}(t) + C_{BD}(0) = C_T = 0$$

$$\text{En equilibrio } t \rightarrow \infty; \quad k_1 C_{FFA-eq} = k_{-1} C_{BD-eq} \rightarrow K \equiv \frac{k_1}{k_{-1}} = \frac{C_{BD-eq}}{C_{FFA-eq}}$$

$$\frac{d}{dt} (C_{FFA} - C_{FFA-eq}) = -(k_1 + k_{-1})(C_{FFA} - C_{FFA-eq}) \dots$$

$$\dots C_{FFA}(t) - C_{FFA-eq} = (C_{FFA} - C_{FFA-eq}) e^{-(k_1+k_{-1})t}$$

$$\text{Sabiendo que: } X(t) = \frac{C_{FFA,o} - C_{FFA}(t)}{C_{FFA,o}} \text{ y } X_{eq} = \frac{C_{FFA,o} - C_{FFA-eq}(t)}{C_{FFA,o}}$$

$$\frac{X(t)}{X_{eq}} = 1 - e^{-(k_1+k_{-1})t}$$

[Usando el balance de masa en batch a volumen constante y su solución exponencial para primer orden donde X es la conversión de FFA a BD (ecuación y solución tipo $C=C_0e^{-kt}$ como base del tratamiento (Green & Southard, 2019). La relación de equilibrio viene de la sección de equilibrio químico (7-12 a 7-14) (Green & Southard, 2019). Integrando la ODE lineal para la desviación respecto al equilibrio se obtiene la aproximación exponencial al equilibrio, análoga a los perfiles de primer orden que el propio Perry lista para sistemas simples con soluciones cerradas en BR/PFR (Tabla 7-2) (Green & Southard, 2019)

Cálculo 18: Tiempo para alcanzar una fracción ϕ de X_{eq}

$$\frac{X(t)}{X_{eq}} = \phi \rightarrow 1 - e^{-(k_1+k_{-1})t} = \phi$$

$$t(\phi) = \frac{1}{k_1 + k_{-1}} \ln\left(\frac{1}{1 - \phi}\right)$$

Proponiendo conversiones $> \phi = 0.99$ y proponiendo $k_1 + k_{-1} = k_{\Sigma}$

$$t(0.99) = \frac{1}{k_1 + k_{-1}} \ln\left(\frac{1}{1 - 0.99}\right) = \ln\left(\frac{100}{k_{\Sigma}}\right) = \frac{4.6052}{k_{\Sigma}} = 4.6052\tau$$

Donde:

ϕ = fracción de acercamiento al equilibrio (X/X_{eq})

k_{Σ} = suma de constantes efectivas ($k_1 + k_{-1}$)

τ = constante de tiempo cinética ($1/k_{\Sigma}$)

[El cálculo anterior demuestra que el tiempo requerido para alcanzar una fracción deseada de la conversión de equilibrio se obtiene porque, en un reactor batch isoterma con metanol en exceso, la esterificación reversible se comporta como una reacción de “primer orden efectivo” que se aproxima al equilibrio de manera exponencial en el tiempo; esto se apoya en el Cap. 19 del Perry (Green & Southard, 2019), donde se presenta el balance de masa en batch y la solución exponencial para reacciones de primer orden en reactores por lotes. A su vez, el Cap. 7 (Green & Southard, 2019) proporciona la ley de acción de masas para formular la velocidad de reacción y el esquema de análisis de datos en batch que relaciona concentración y tiempo, permitiendo estimar una constante global de aproximación al equilibrio a partir de datos experimentales y, con ella, transformar un objetivo de “fracción del equilibrio” en un “tiempo mínimo” de reacción; ese es justamente la razón demostrativa del cálculo. Por lo tanto, una vez estimada esta constante global a las condiciones del proceso, comparar su “constante de tiempo” con 120 minutos permite demostrar si dos horas ya colocan al sistema suficientemente cerca del equilibrio, que es el criterio de “buena conversión” que se documenta en este trabajo]

Cálculo 19: Verificación de 120 minutos para conversiones mayores a 0.99

$$t = \frac{4.6052}{k_{\Sigma}}$$
$$120 = \frac{4.6052}{k_{\Sigma}}$$
$$k_{\Sigma} = \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\phi}\right)}{120\text{min}}$$
$$k_{\Sigma} \geq 0.03838 \text{ min}^{-1}$$

[El cálculo 4 demuestra que, fijado un tiempo de operación de 120 minutos, puede verificarse si la reacción ya alcanzó el 99% de su conversión porque, en un batch isotermico, una esterificación reversible formulada por ley de acción de masas y su condición de equilibrio se denota en una aproximación exponencial hacia ese estado; así que el “objetivo de fracción” (en este caso 0.99) se convierte directamente en un requisito mínimo sobre la constante global de acercamiento al equilibrio que se obtiene de datos de concentración-tiempo en batch (Cap. 7 de Perry, Green & Southard, 2019). Entonces, 120 minutos permite comparar el valor medido de la constante global lo que garantiza estar al 99 % de conversión, lo que significa que extender más el tiempo daría ganancias poco representativas, por tanto, dos horas son suficientes para “buena conversión” bajo las condiciones del proceso de este estudio. En este contexto, “llegar a 0.99” se entiende explícitamente como “alcanzar el 99 % de la conversión” definida por el constante de equilibrio de la reacción reversible; la propia definición de conversión respalda esta interpretación (Green & Southard, 2019), como la relación molar es 6:1 el $X_{\text{eq}} > 0.99$ y por lo tanto se habla de una conversión absoluta y no de equilibrio]

Cálculo 20: Geometría y alturas de fase

Propuesta: Diámetro cilindro $D = 0.8m$; Altura cilíndrica $H_c = 1m$; Fondo cónico $H_c = 0.5m$

$$\text{Área cilíndrica } A = \frac{\pi D^2}{4} = 0.5027m^2$$

[Volúmenes a 40°C]

$$V_{BD} = \frac{m_{BD}}{\rho_{BD}} = \frac{100kg}{\frac{853.4kg}{m^3}} = 0.1173m^3$$

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} = \frac{200kg}{\frac{992kg}{m^3}} = 0.2016m^3$$

[Volumen del cono]

$$V_c = \frac{AH_c}{3} = 0.084m^3$$

[Altura de agua que ocupa todo el cono y sube en cilindro]

$$H_{H_2O-cilindro} = \frac{V_{H_2O} - V_c}{A} = 0.2344m$$

$$H_{H_2O} = H_c - H_{H_2O-cilindro} = 0.7344m$$

[Altura de biodiésel en el cilindro]

$$H_{BD} = \frac{V_{BD}}{A} = 0.2331m$$

[Se eligen dimensiones generales de diseño para que toda la capa de biodiésel quede en la parte cilíndrica (área constante). La distancia de caída de la última gota de agua es H_{BD} . El método de tiempo por decantación se fundamenta en la velocidad terminal de gotas (ley de Stokes) y su corrección por emulsión (asentamiento obstaculizado) tomadas de Perry (cap. 15 para Stokes L-L; cap. 6 para hindered settling). En este mismo capítulo se menciona que el tamaño mínimo de gota típico $200\mu m$ para cálculos siguientes]

Cálculo 21: Velocidad terminal no obstaculizada (Stokes)

$$\text{Sabido que: } g = \frac{9.81m}{s^2}, d = 2 \times 10^{-4}m, \Delta\rho = \frac{138.6kg}{m^3}, u_c = \frac{4.2329 \times 10^{-3}m^2}{s}$$

$$u_{t0} = \frac{\Delta\rho g d^2}{18u_c} = \frac{7.1357 \times 10^{-4}m}{s}$$

[El cálculo anterior se hace tomando en cuenta como se menciona en el capítulo 15 la “Gota aislada” ($d=200 \mu m$) en régimen viscoso de Stokes; ecuación (15-167) y validez por Re bajo (dado que no hay agitación). Perry cap. 15 (Stokes L-L) y remisión a cap. 6 para velocidad terminal]

Cálculo 22: Emulsión densa normal (asentamiento obstaculizado por lavado)

Según la Correlación de Maude – Whitmore / Richardson – Zaki (Perry, Eq. 6 – 254):

$$u_t = u_{t0}(1 - c)^n, \quad n \approx 4.65 \text{ (stokes)}$$

Tomando una condición real de emulsión densa: fracción volumétrica de gotas $c = 0.35$.

$$u_t = \left(\frac{7.1357 \times 10^{-4} \text{ m}}{s} \right) (1 - 0.35)^{4.65} = \frac{9.6269 \times 10^{-5} \text{ m}}{s}$$

[Para mezclas con banda de dispersión apreciable, la interacción entre gotas reduce la velocidad terminal; en región de Stokes, Perry recomienda $n=4.65$. Se fija $c=0.35$ como “denso normal” acorde a los parámetros a escala laboratorio cuando hay emulsión visible pero no gelificada. Perry cap. 6 (hindered settling): Nota de diseño: cuando coalescencia es lenta, el tiempo ya no se guía solo por residencia; cap. 15 lo advierte]

Cálculo 23: Tiempo total decantación

$$t_{total} = \frac{H_{BD}}{u_t} = \frac{0.2331 \text{ m}}{\frac{9.6269 \times 10^{-5} \text{ m}}{s}} = 2.4215 \times 10^3 \text{ s} = 40.36 \text{ min}$$

[Este cálculo denota la velocidad de decantación y se repite para todos aquellos cálculos de decantación en lote, el “fin” lo marca la gota que parte desde la cota final de la fase continua; por eso H_{BD}/u_t . Si durante la alimentación entra agua en flujo, se inicia el cronómetro una vez completado el bache y estabilizada la dispersión; el cálculo usa los cálculos anteriores]

Cálculo 24: Prueba t-Student para verificar compatibilidad de la densidad con un valor dentro del rango experimental

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= \frac{0.8534g}{mL} \\ s &= \frac{0.0002g}{mL} \\ n &= 5 \\ \mu_0 &= \frac{0.8530g}{mL} \\ H_0: \mu &= \frac{0.8530g}{mL} \quad H_1: \mu \neq \frac{0.8530g}{mL} \\ SE &= \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.0002}{\sqrt{5}} = \frac{0.0000894g}{mL} \\ t &= \frac{\tilde{x} - \mu_0}{SE} = 4.47; gl = 4 \\ t_{critico} &= \pm 2.776 \\ |t_{cal}| &= 4.47 > 2.776 \rightarrow \text{No se rechaza}\end{aligned}$$

La media experimental de la densidad (0.8534 g/mL) es estadísticamente compatible con el valor evaluado (0.8530 g/mL), lo cual confirma la consistencia interna de las mediciones y la estabilidad del comportamiento del biodiésel dentro del rango permitido por la norma [Este cálculo emplea la prueba t-Student comparando la densidad medida con un valor ubicado dentro del intervalo de confianza de la muestra (0.8530 g/mL). Esto permite demostrar la estabilidad y precisión del método experimental, ya que la densidad obtenida es estadísticamente consistente con un valor esperado dentro del comportamiento natural del biodiésel. Además, este tipo de comparación es útil cuando las normas establecen rangos y no valores puntuales, permitiendo validar si los datos son coherentes y suficientemente reproducibles para asegurar conformidad con las normas]

C. DATOS CALCULADOS

Cuadro 28: Determinación de la molaridad de la solución de hidróxido de sodio

Peso ftalato ácido de potasio (± 0.0001 g)	Volumen titulante (± 0.01)mL	Molaridad (± 0.0085)M
0.1010	5.2000	0.0951
0.1580	8.3000	0.0932
0.0840	4.3000	0.0957
0.1140	5.9000	0.0946
0.1010	5.2000	0.0951

[El cuadro anterior muestra los resultados de la titulación realizada con un patrón primario, el ftalato ácido de potasio para estandarizar una solución de hidróxido de sodio cercana a 0.1M esto fue posible gracias al procedimiento denotado en la sección A]

Cuadro 29: Determinación de índice de acidez de los PFAD

Peso PFAD (± 0.0001 g)	Volumen titulante (± 0.01)mL	(± 0.01)mg KOH/g muestra	Ácidos grasos libres (%)
1.0230	33.9000	176.1427	88.6867
1.0230	33.9000	176.1427	88.6867
1.0560	34.8000	175.1684	88.1962
1.0510	34.5000	174.4845	87.8519
1.1010	36.0000	173.8024	87.5084

[El cuadro anterior muestra los resultados de la titulación realizada con la solución estandarizada en el **Cuadro 28** y esto fue posible gracias al procedimiento denotado en la sección A]

Cuadro 30: Propiedades fisicoquímicas calculadas presentes en una muestra de PFAD

Propiedad	Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza	Coficiente de variación (%)
Porcentaje de ácidos grasos libres (% Oleico)	88.1860±0.045	0.518	[88.1715±88.2005]	0.5871
Densidad (g/mL)	0.8324±0.0245	0.0006	[0.8324-0.8324]	0.0752
Viscosidad (mPa*s)	9.8013±0.0101	0.0581	[9.7997-9.8030]	0.5924
pH	5.4580±0.0447	0.0377	[5.4569-5.4591]	0.6904
Humedad (%)	0.1280±0.0045	0.0021	[0.1275-0.1285]	0.0422

(Fuente: Elaboración propia)

Este cuadro denota las propiedades fisicoquímicas de los PFAD recuperados en una refinadora de aceite de palma en la Ciudad de Guatemala. Se realizó la medición en quintuplicado y se obtuvo la estadística descriptiva para el análisis de los datos. El análisis se realizó a una temperatura de 60 °C.

Cuadro 31: Porcentaje de conversión de PFAD a FAME para las diferentes relaciones molares

Relación molar (mol AGL/mol Metanol)	Conversión media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza	Coficiente de variación (%)
1:1	1.5834±0.0179	0.0002	[1.5838-1.5829]	1.0542
1:2	35.4660±0.0590	0.0092	[35.4917-35.4402]	1.5874
1:4	89.9871±0.0179	0.0014	[89.9911-89.9830]	0.1608
1:6	98.7685±0.0179	0.0018	[98.7736-98.7635]	0.1815
1:8	97.7706±0.0094	0.0038	[97.7813-97.7600]	0.3882
1:10	97.4202±0.0179	0.0017	[97.4250-97.4154]	0.1760
1:12	96.5868±0.0179	0.0008	[96.5891-96.5845]	0.0853
1:14	94.3356±0.0179	0.0020	[94.3411-94.3301]	0.2078

(Fuente: Elaboración propia)

Este cuadro denota el porcentaje de ácidos grasos libres que se lograron convertir en ésteres metílicos, los PFAD fueron recuperados en una refinadora de aceite de palma en la Ciudad de Guatemala. Se realizó la medición en quintuplicado y se obtuvo la estadística descriptiva para el análisis de los datos. La reacción se realizó a condiciones constantes, temperatura de 60 °C, agitación 550 rpm, tiempo de 120 minutos de reacción a 0.978 atm.

Cuadro 32: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:1 post reacción

Peso de FAME ($\pm 0.0001\text{g}$)	Peso Metanol 99.8% (m/m) ($\pm 0.0001\text{g}$)	Peso Ácido Sulfúrico (± 0.0001)	Peso PFAD ($\pm 0.0001\text{g}$)	Masa de ácidos grasos	Masa de agua formada	Rendimiento (%)
1.4136	11.9000	1.0000	100.0000	88.1860	6.0287	1.6030
1.3826	11.9000	1.0000	100.0000	88.1860	6.0287	1.5678
1.3921	11.9000	1.0000	100.0000	88.1860	6.0287	1.5786
1.3832	11.9000	1.0000	100.0000	88.1860	6.0287	1.5685
1.4101	11.9000	1.0000	100.0000	88.1860	6.0287	1.5990

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 1:1 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 33: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:2 post reacción

Peso de FAME ($\pm 0.0001\text{g}$)	Peso Metanol 99.8% (m/m) ($\pm 0.0001\text{g}$)	Peso Ácido Sulfúrico (± 0.0001)	Peso PFAD ($\pm 0.0001\text{g}$)	Masa de ácidos grasos	Masa de agua formada	Rendimiento (%)
31.2000	23.8000	1.0000	100.0000	88.1860	6.0287	35.3798
30.2000	23.8000	1.0000	100.0000	88.1860	6.0287	34.2458
31.6000	23.8000	1.0000	100.0000	88.1860	6.0287	35.8334
30.9800	23.8000	1.0000	100.0000	88.1860	6.0287	35.1303
32.4000	23.8000	1.0000	100.0000	88.1860	6.0287	36.7405

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 1:2 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 34: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:4 post reacción

Peso de FAME ($\pm 0.0001\text{g}$)	Peso Metanol 99.8% (m/m) ($\pm 0.0001\text{g}$)	Peso Ácido Sulfúrico (± 0.0001)	Peso PFAD ($\pm 0.0001\text{g}$)	Masa de ácidos grasos	Masa de agua formada	Rendimiento (%)
79.3100	47.6000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	89.9349
79.5600	47.6000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	90.2184
79.2300	47.6000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	89.8442
79.2900	47.6000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	89.9122
79.3900	47.6000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	90.0256

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 1:4 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 35: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:6 post reacción

Peso de FAME ($\pm 0.0001\text{g}$)	Peso Metanol 99.8% (m/m) ($\pm 0.0001\text{g}$)	Peso Ácido Sulfúrico (± 0.0001)	Peso PFAD ($\pm 0.0001\text{g}$)	Masa de ácidos grasos	Masa de agua formada	Rendimiento (%)
87.3000	71.4000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	98.9953
87.1000	71.4000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	98.7685
87.2000	71.4000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	98.8819
86.9000	71.4000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	98.5417
87.0000	71.4000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	98.6551

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 1:6 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 36: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:8 post reacción

Peso de FAME (± 0.0001 g)	Peso Metanol 99.8% (m/m) (± 0.0001 g)	Peso Ácido Sulfúrico (± 0.0001)	Peso PFAD (± 0.0001 g)	Masa de ácidos grasos	Masa de agua formada	Rendimiento (%)
86.8000	95.2000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	98.4283
86.1000	95.2000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	97.6346
86.2000	95.2000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	97.7480
86.0000	95.2000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	97.5212
86.0000	95.2000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	97.5212

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 1:8 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 37: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:10 post reacción

Peso de FAME (± 0.0001 g)	Peso Metanol 99.8% (m/m) (± 0.0001 g)	Peso Ácido Sulfúrico (± 0.0001)	Peso PFAD (± 0.0001 g)	Masa de ácidos grasos	Masa de agua formada	Rendimiento (%)
86.1000	119.0000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	97.6346
86.0000	119.0000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	97.5212
85.9000	119.0000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	97.4078
85.8550	119.0000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	97.3567
85.7000	119.0000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	97.1810

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 1:10 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 38: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:12 post reacción

Peso de FAME (± 0.0001 g)	Peso Metanol 99.8% (m/m) (± 0.0001 g)	Peso Ácido Sulfúrico (± 0.0001)	Peso PFAD (± 0.0001 g)	Masa de ácidos grasos	Masa de agua formada	Rendimiento (%)
85.1000	142.8000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	96.5006
85.2200	142.8000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	96.6367
85.2000	142.8000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	96.6140
85.1000	142.8000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	96.5006
85.2600	142.8000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	96.6820

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 1:12 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 39: Determinación del porcentaje de conversión de PFAD a FAME para la esterificación 1:14 post reacción

Peso de FAME (± 0.0001 g)	Peso Metanol 99.8% (m/m) (± 0.0001 g)	Peso Ácido Sulfúrico (± 0.0001)	Peso PFAD (± 0.0001 g)	Masa de ácidos grasos	Masa de agua formada	Rendimiento (%)
83.2300	166.6000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	94.3801
83.3200	166.6000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	94.4821
83.3200	166.6000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	94.4821
83.1840	166.6000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	94.3279
82.9000	166.6000	1.0000	100.0000	88.1860	5.9007	94.0059

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 reacciones en medio ácido con una relación molar 1:14 (moles de metanol/moles de los PFAD). El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 40: Determinación de la densidad del biodiésel que presentó la mayor conversión

Mediciones (g/mL)	Media (g/mL)	Incertidumbre	Desviación estándar	Intervalo de confianza 95%		Coeficiente de variación (%)
				Máximo	Mínimo	
0.8530	0.8534	±0.0045	0.0002	0.8534	0.8534	0.0291
0.8534						
0.8537						
0.8533						
0.8533						

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 mediciones para determinar la densidad, a partir de la resta del densímetro lleno y vacío sabiendo la temperatura y el volumen graduado fue posible determinar la densidad. El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 41: Determinación de la humedad del biodiésel que presentó la mayor conversión

Mediciones (%)	Media (%)	Incertidumbre	Desviación estándar	Intervalo de confianza 95%		Coeficiente de variación (%)
				Máximo	Mínimo	
0.0400	0.0460	0.0045	0.0089	0.0457	0.0463	0.1944
0.0400						
0.0400						
0.0500						
0.0600						

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 mediciones para determinar la humedad, a partir una balanza de humedad. El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 42: Determinación de la viscosidad del biodiésel que presentó la mayor conversión

Mediciones (cStk)	Media (cStk)	Incertidumbre	Desviación estándar	Intervalo de confianza 95%		Coeficiente de variación (%)
				Máximo	Mínimo	
4.8855	4.9669	0.0045	0.0885	4.9644	4.9694	1.781
5.0212						
4.8855						
4.9534						
5.0891						

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 mediciones para determinar la viscosidad empleado el viscosímetro de Ostwald. El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 43: Determinación del potencial de hidrógeno biodiésel que presentó la mayor conversión

Mediciones (cStk)	Media (cStk)	Incertidumbre	Desviación estándar	Intervalo de confianza 95%		Coeficiente de variación (%)
				Máximo	Mínimo	
6.9400	7.0300	0.0089	0.0656	7.0282	7.0318	0.933
7.1000						
6.9900						
7.0400						
7.0800						

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 mediciones para determinar el pH. El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 44: Determinación del poder calorífico del biodiésel que presentó la mayor conversión

Mediciones (MJ/kg)	Media (MJ/kg)	Incertidumbre	Desviación estándar	Intervalo de confianza 95%		Coeficiente de variación (%)
				Máximo	Mínimo	
39.7800	40.0400	0.0224	0.6182	40.0227	40.0573	1.544
40.2100						
40.9000						
39.2100						
40.1000						

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 5 mediciones para determinar el poder calorífico del biodiésel empleando la bomba calorimétrica IKA C200. El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 45: Determinación del número ácido del biodiésel que presentó la mayor conversión

Mediciones (MJ/kg)	Media (MJ/kg)	Incertidumbre	Desviación estándar	Intervalo de confianza 95%		Coeficiente de variación (%)
				Máximo	Mínimo	
0.3148	0.2728	0.0089	0.05747	0.2712	0.2744	0.2107
0.3148						
0.3148						
0.2099						
0.2099						

(Fuente: Elaboración propia)

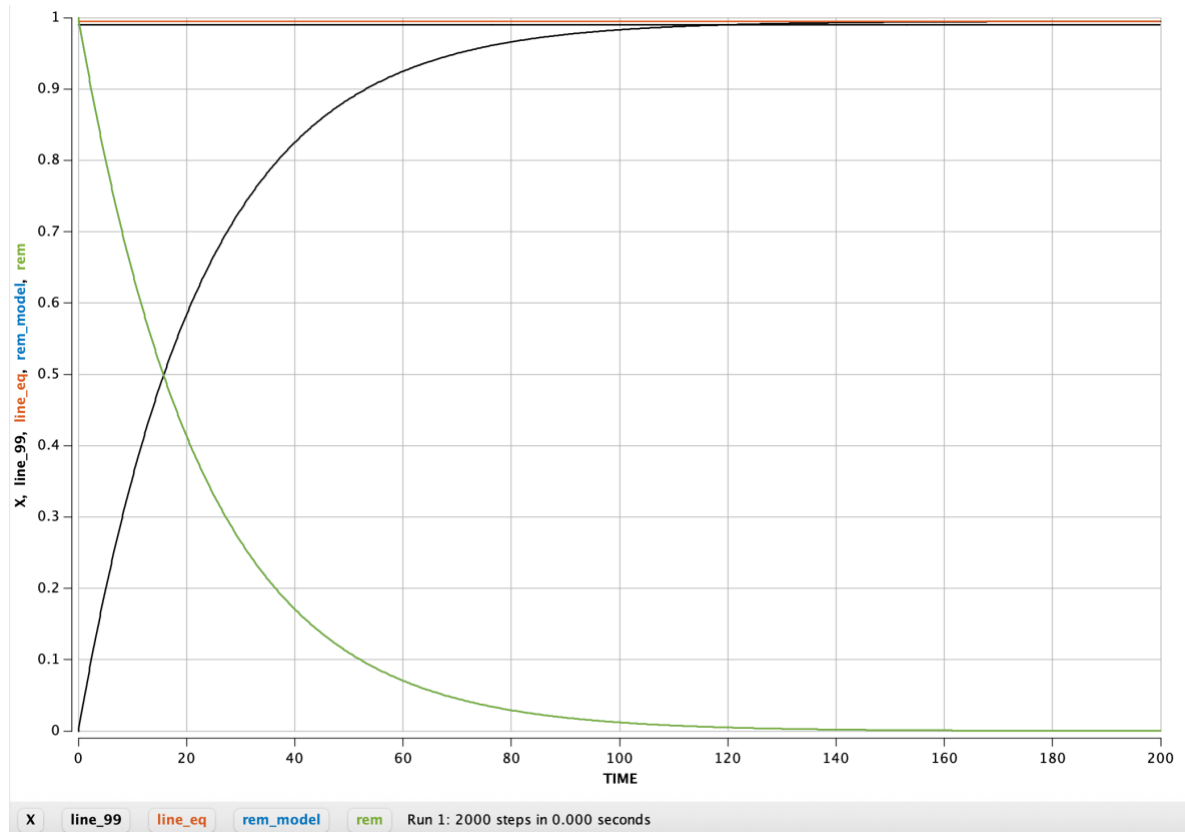
Se realizaron 5 mediciones para determinar el número ácido a partir de la solución estandarizada preparada en etanol a 50-60°C. El procedimiento empleado para la reacción se denota en el inciso 0 de la sección de metodología. El cuadro denota el peso de ácidos grasos libres destilados presentes en la muestra luego de la reacción, la cantidad de agua formada y el rendimiento respectivo.

Cuadro 46: Desglose de los datos del modelo cinético para la Esterificación ácida en reactor por lotes isoterma

TIME	X:1	Conv120:1	phi120:1	tau:1	t95:1	t98:1	t99:1	OK_99eq:1	OK_99abs:1
119.0	0.9898	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
119.1	0.9899	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
119.2	0.9899	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
119.3	0.9899	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
119.4	0.9899	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
119.5	0.9899	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
119.6	0.9900	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
119.7	0.9900	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
119.8	0.9900	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
119.9	0.9900	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
120.0	0.9901	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
120.1	0.9901	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
120.2	0.9901	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
120.3	0.9901	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
120.4	0.9901	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
120.5	0.9902	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
120.6	0.9902	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
120.7	0.9902	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
120.8	0.9902	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
120.9	0.9902	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1
121.0	0.9903	0.9901	0.9950	22.6244	67.8733	90.4977	104.1894	1	1

[Se modeló la esterificación ácida en reactor por lotes isoterma como reacción reversible de primer orden efectivo bajo exceso de metanol. El balance en batch y la solución exponencial para primer orden (acercamiento al equilibrio) se tomaron del Perry's Chemical Engineers' Handbook (Green & Southard, 2019, cap. 19), mientras que la ley de acción de masas, la definición de conversión y el empuje del equilibrio por exceso de reactivo/remoción de agua se sustentan en el cap. 7. Con el diseño propuesto ($X_{eq} = 0.995$) y ajustando la constante global de aproximación al equilibrio a $k_{\Sigma} = 0.0442 \text{ min}^{-1}$ ($\tau = 22.6 \text{ min}$), a $t = 120 \text{ min}$ se predice $X(120) = 0.990$ ($\approx 99.5 \%$ del equilibrio), demostrando que dos horas son suficientes para alcanzar el objetivo de $X \geq 0.99$ en las condiciones establecidas (Green & Southard, 2019, caps. 7 y 19, el modelo en Berkeley madona fue:

Figura 15: Gráfica de la cinética de reacción de los ácidos grasos libres destilados en el tiempo modelada en Berkeley Madonna



[Se modeló la esterificación ácida en batch isoterma como reacción reversible de primer orden efectivo bajo exceso de metanol. Con $k_{\Sigma} = 0.0442 \text{ min}^{-1}$ ($\tau = 22.62 \text{ min}$) y $X_{\text{eq}} = 0.995$, el modelo predice $X(120) = 0.9901$ ($\approx 99.5\%$ del equilibrio), por lo que 120 min son suficientes para lograr $\geq 99\%$ de conversión absoluta. Fundamento: ley de acción de masas y análisis cinético (cap. 7 del Perry) y ecuación/solución de reactor batch (cap. 19) del Perry's Chemical Engineers' Handbook (Green & Southard, 2019). La ecuación propuesta fue:

METHOD RK4

DT = 0.1

STARTTIME = 0

STOPTIME = 200

$k_{\Sigma} = 0.0442$

$X_{\text{eq}} = 0.995$

$t_{\text{target}} = 120$

$k_{\Sigma_{\text{min}_{99}}} = 0.038376418$

```

INIT X = 0
d/dt(X) = kSigma*(Xeq - X)

tau = 1/kSigma
t95 = 3*tau
t98 = 4*tau
t99 = 4.605170186*tau

Conv120 = Xeq*(1 - EXP(-kSigma*t_target))
phi120 = Conv120 / Xeq

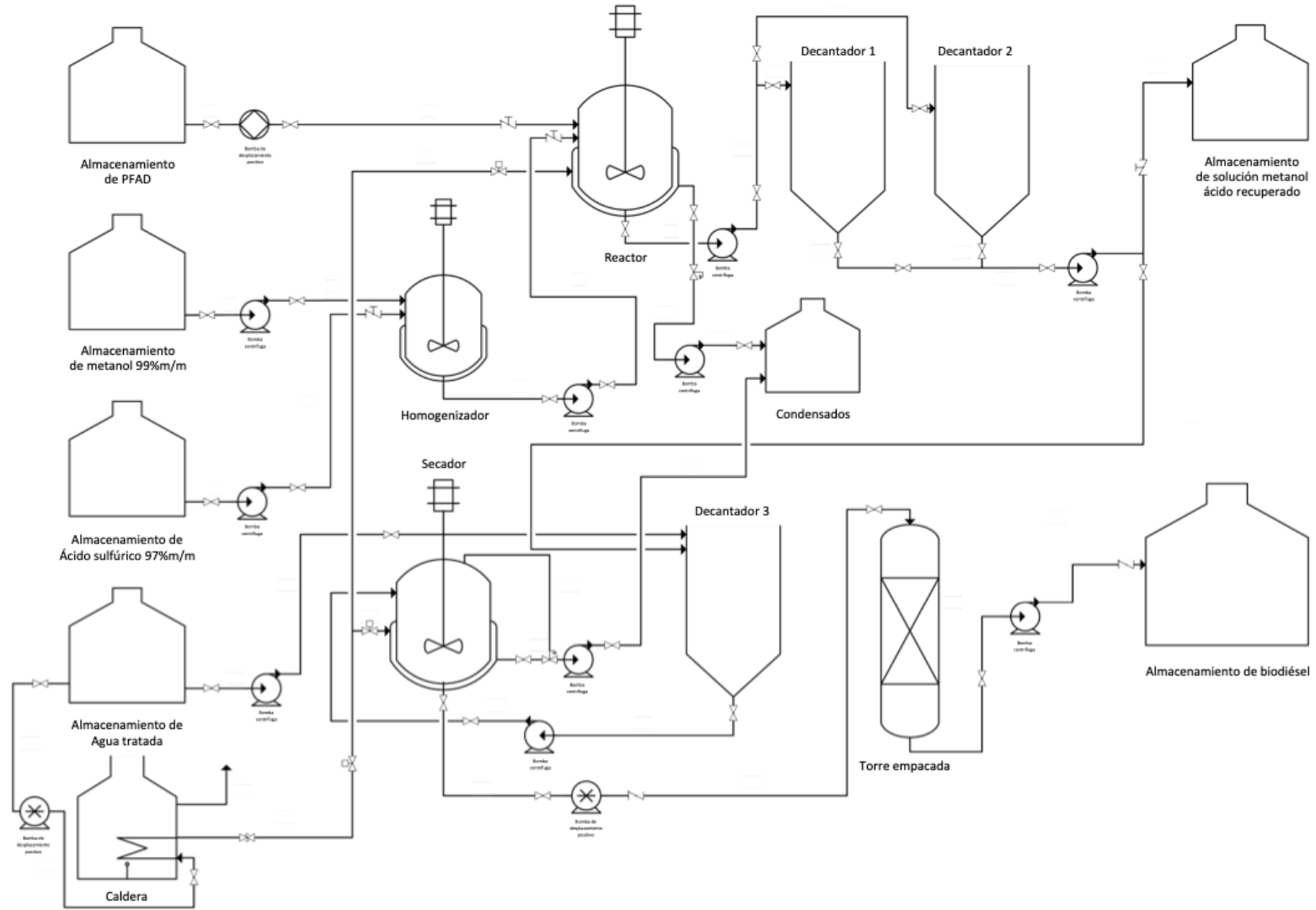
OK_99eq = IF (kSigma >= kSigma_min_99) THEN 1 ELSE 0
OK_99abs = IF ((kSigma >= kSigma_min_99) AND (Xeq >= 0.99)) THEN 1 ELSE 0

rem      = (Xeq - X)/Xeq
residline = -kSigma*TIME
rem_model = EXP(residline)
Fin]

```

D. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

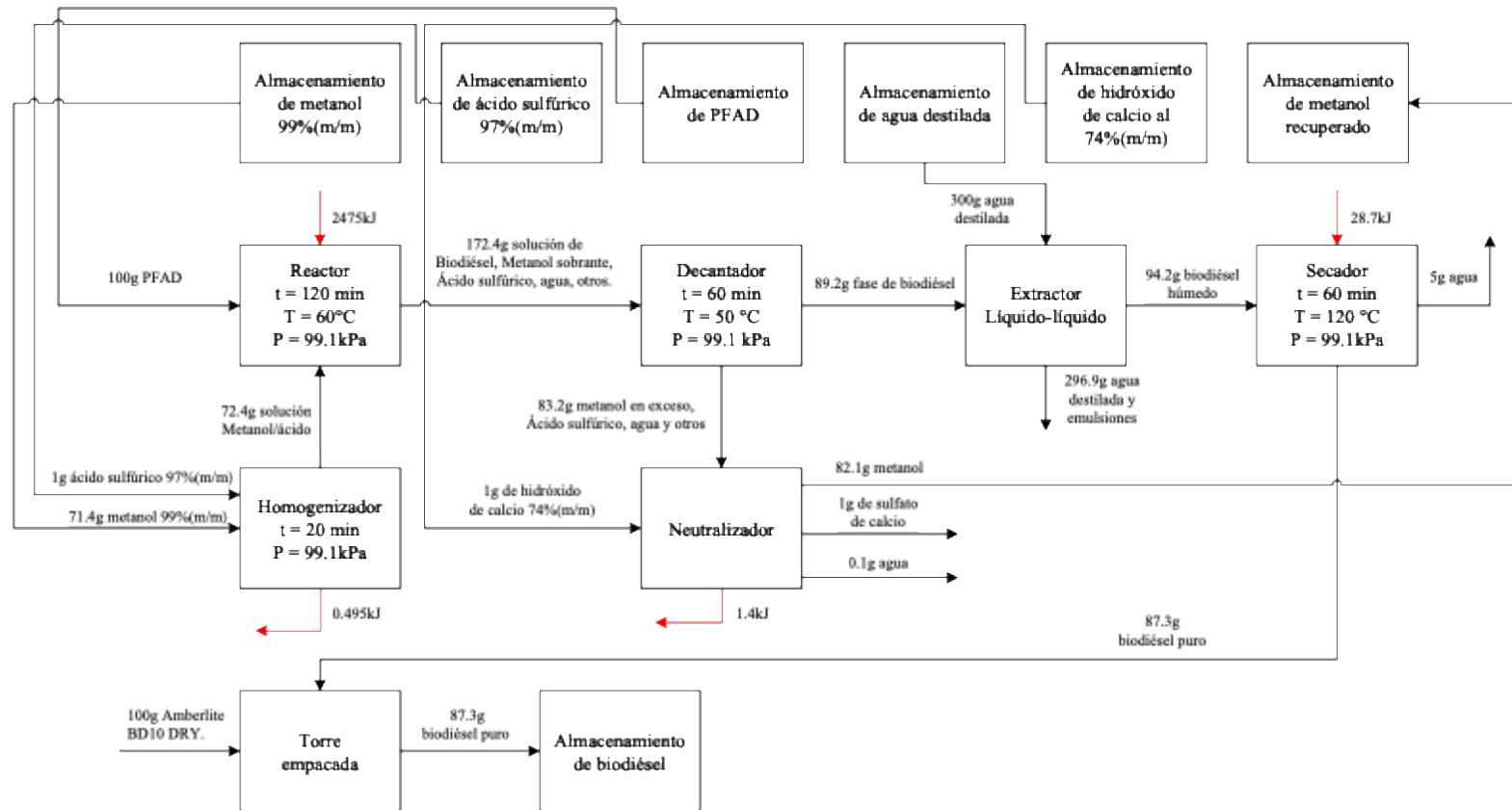
Figura 16: Diagrama de flujo de proceso para las operaciones unitarias propuestas



(Fuente: Elaboración propia)

E. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL PROCESO A ESCALA LABORATORIO

Figura 17: Balance de masa y energía para la producción de biodiésel con una relación molar 6:1



(Fuente: Propia)

F. DATOS DE PLACA

Cuadro 47: Datos de placa de la estufa con agitador magnético BEVOR SH-3A/B

Característica	Especificación
Voltaje de funcionamiento	110 V, 50/60 Hz
Potencia calefacción	500 W
Potencia del motor	20 W
Temperatura máxima	380 °C
Velocidad de agitación	0–2000 rpm
Capacidad de agitación	Hasta 3000 ml
Dimensiones de placa	170 × 170 mm
Peso	3.6 kg

(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

Cuadro 48: Datos de placa de la centrífuga Benchmark LC-8 Series

Característica	Especificación
Voltaje / Frecuencia	115 V o 230 V, 50/60 Hz
Potencia	150 W
Velocidad	400–3500 rpm (hasta 5000 rpm en modelo Plus)
Fuerza centrífuga máxima	1500–3070 × g
Capacidad	8 × 15 ml
Aceleración / Desaceleración	19 s / 39 s
Temporizador	20 s–99 min o continuo
Peso	6.8 kg

(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

Cuadro 49: Datos de placa del baño de viscosidad PolyScience

Característica	Especificación
Voltaje	120 V / 240 V
Potencia	≈1100 W
Capacidad	17 L
Rango de temperatura	Amb+10 °C a 135 °C
Estabilidad	±0.07 °C
Medio de trabajo	Agua destilada

(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

Cuadro 50: Datos de placa de la balanza analítica Ohaus Pioneer PX163

Característica	Especificación
Voltaje / Alimentación	Adaptador AC (110–240 V)
Capacidad máxima	160 g
Resolución	0.001 g (1 mg)
Linealidad	±0.002 g
Repetibilidad	0.001 g
Tiempo de estabilización	2 s
Platillo	Ø 120 mm
Peso	4.5 kg

(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

Cuadro 51: Datos de placa de la balanza de humedad Ohaus MB120

Característica	Especificación
Voltaje de funcionamiento	100–120 V
Potencia / Calentamiento	Lámpara halógena
Capacidad máxima	120 g
Resolución	0.001 g / 0.01 %
Rango de temperatura	40 °C–200 °C
Pantalla	Pantalla táctil color (4.3")
Memoria	100 métodos / 1000 resultados
Peso	5.2 kg

(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

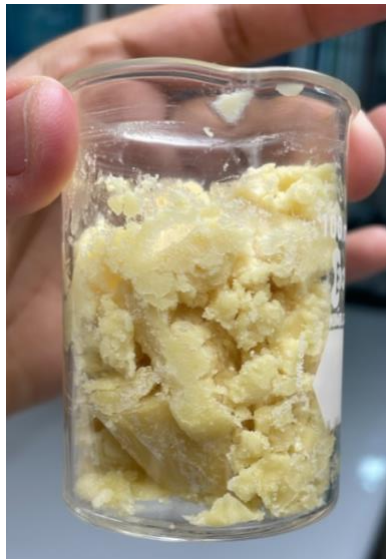
Cuadro 52: Datos de placa de la balanza Ohaus de 2kg

Característica	Especificación
Voltaje / Alimentación	Adaptador AC (100–240 V) o batería recargable
Capacidad máxima	2000 g (2 kg)
Resolución	0.1 g
Tiempo de estabilización	1 s aprox.
Platillo	Acero inoxidable, Ø ~ 133 mm
Pantalla	LED brillante, visible en cualquier ángulo
Funciones	Pesaje, acumulación, tara múltiple, cuenta piezas
Protección	IP65 (contra agua y polvo)

(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

G. ILUSTRACIONES

Figura 18: Muestra de ácidos grasos libres destilados de palma a temperatura ambiente (25°C)



(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

Figura 19: Muestra de ácidos grasos libres destilados de palma (60°C)



(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

Figura 20: Reacción con relación molar 1:1 luego de 30 minutos



(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

Figura 21: Reacción con relación molar 1:1 luego de 2 días



(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

Figura 22: Muestra de prueba 3/27 positiva para relación molar 1:6



(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

Figura 23: Ejemplo de catálisis ácida no controlada



(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

Figura 24: Diferencia entre ácidos grasos libres destilados de soja y de palma



(Fuente: Propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala)

[Palma a la izquierda y soja a la derecha]

Figura 25: Diagrama de proceso y condiciones de operación para recuperación de la muestra de PFAD



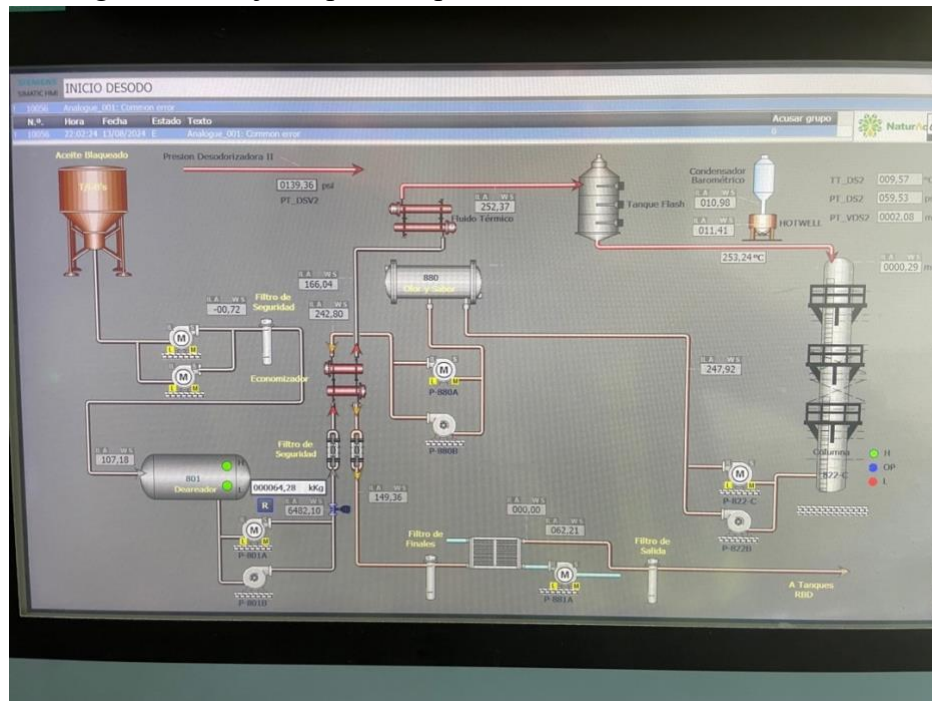
(Fuente: Naturaceites, Guatemala)

Figura 26: Diagrama de proceso para el desodo del aceite de palma africana



(Fuente: Naturaceites, Guatemala)

Figura 27: Diagrama de flujo de proceso para el desodo de PFAD



(Fuente: Naturaceites, Guatemala)

H. FICHAS TÉCNICAS

Figura 28: Ficha técnica de pellets de hidróxido de sodio al 99.9% m/m



Especificación

1.37020.6025 Pellets de hidróxido de sodio EMSURE® EXPERT Ph Eur, BP, ChP, JP, NF

Especificación		
Ensayo (acidimetría, NaOH)	≥ 98.0	%
Ensayo (alcalinidad total cal, como NaOH)	98.0 - 100.5	%
Ensayo (Na)	54.0 - 59.8	%
Identificación	pasó prueba	
Apariencia de solución	pasó prueba	
Sustancias insolubles y orgánicas de interés	pasó prueba	
Carbonato (como Na ₂ CO ₃)	≤ 0.5	%
Cloruros libres (Cl)	≤ 0.015	%
Fosfato (PO ₄)	≤ 0.001	%
Silicato (SiO ₂)	≤ 0.01	%
Sulfato (SO ₄)	≤ 0.010	%
Nitrógeno Total (N)	≤ 0.0005	%
Metales pesados (como Ag)	≤ 0.002	%
Metales pesados (como Pb)	≤ 0.0005	%
Al (Aluminio)	≤ 0.001	%
As (Arsénico)	≤ 0.0003	%
Ca (Calcio)	≤ 0.005	%
Cu (Cobre)	≤ 0.0005	%
Fe (Hierro)	≤ 0.0010	%
Hg (Mercurio)	≤ 0.00001	%
K (Potasio)	≤ 0.05	%
Mg (Magnesio)	≤ 0.002	%
Ni (Níquel)	≤ 0.001	%
Pb (Plomo)	≤ 0.00005	%
Zn (Zinc)	≤ 0.0025	%
Solventes residuales (ICH Q3C)	excluded by manufacturing process	
Endotoxinas	≤ 2.5	I.U./g

Las especificaciones de impurezas elementales se han establecido teniendo en cuenta la ICH Q3D (Directriz para impurezas elementales). No es probable que los elementos de clase 1 a 3 estén presentes por encima del límite de la opción 1 de ICH Q3D, a menos que se especifique e indique (*). Cumple con Ph Eur, BP, ChP, JP, FN

Dr. Dimitrij Ryvlin
Responsable del laboratorio de control de calidad

Este documento se ha producido electrónicamente y es válido sin firma

Merck KGaA
Corporation with General Partners
Frankfurter Straße 250
64293 Darmstadt, Germany

The life science business of Merck KGaA, Darmstadt,
Germany operates as MilliporeSigma in the U.S. and
Canada.

Page 1 of 1

SALSA Version 1417549/000000000000// Date: 06.07.2024

(Fuente: Merck, 2024)

Figura 29: Ficha técnica de metanol

CERTIFICADO DE ANÁLISIS
CERTIFICATE OF ANALYSIS

Ref: CA-15515

Información del Cliente			
Cliente: DISTRIBUIDORA MARIO BATHEN		Fecha de emisión:	12/04/2024
Orden de Compras: OC-48758		Número de SAP:	
Información del Producto			
Nombre Producto: METANOL		Código de Producto:	METHAN2
Numero de Lote: 240430		Cantidad Despachada:	328.00 KGS
Fecha Fabricación: 13/01/2024		Fecha de Vencimiento:	13/01/2026

Análisis			
ENSAYO	ESPECIFICACIONES	RESULTADOS	METODO
ACETONE (ppm)	30.0 (max)	5	IMPCA 001
Acidity, As Acetic Acid (ppm)	30 (max)	8	D1613
ALKALINITY AS NH3 (Wt %)	0.0003 (max)	0.0001	D1614
APPEARANCE		CLEAR AND FREE FROM SUSPENDED MATTER	IMPCA 003
Boiling range (°C)	1 (max)	0.3	D4052
CARBONIZABLES SUBSTANCES (Pt-Co unit)		5	E346
CHLORIDES (mg/Kg)	0.5 (max)	0.25	IMPCA 002
COLOR (Pt-Co unit)	5 (max)	5	D1209
Ethanol (ppm)	50.0 (max)	5	IMPCA 001
FBP 760 MMHG (°C)	64.5 (min)	64.8	D1078
Hydrocarbon %		PASS	D1722
iBP 760 MMHG (°C)	64.7 (max)	64.5	D1078
IRON CONTENT (ppm)	0.1 (max)	0.01	E394
NON-VOLATILE MATTER (mg/1000 mL)	8 (max)	1	D1353
Odor		Characteristic	D1296
POTASSIUM PERMANGANATE TIME (minute, 25°C) (Minutes)	60 (min)	60	D1363
PURITY (Wt %)	99.85 (min)	99.99	IMPCA 001
Specific gravity (20/20°C)	0.791 --- 0.793	0.792	D4052
TOTAL SULFUR (ppm)	0.5 (max)	0.5	D5453
WATER CONTENT (Wt %)	0.1 (max)	0.011	E1064

OBSERVACION:

DATOS TRANSCRITOS DEL CERTIFICADO ORIGINAL DEL PROVEEDOR

Este es un reporte generado electrónicamente y es válido sin firma.

(Fuente: Mario Bathen, 2024)

Figura 30: Ficha técnica de ftalato ácido de potasio patrón primario



Especificación

1.04874.0250 Ftalato de potasio hidrogenado EMSURE® Reag. Ph Eur

	Valores Espe.	
Ensayo (Valoración de ácido perclórico a partir de sustancia secada)	≥ 99.5	%
Identificación (Espectro IR)	pasó prueba	
En material insoluble en agua	≤ 0.005	%
Cloruro (Cl)	≤ 0.002	%
Compuesto sulfuro (como SO ₂)	≤ 0.005	%
Metales pesados (como Pb)	≤ 0.0005	%
Cu (Cobre)	≤ 0.0002	%
Fe (Hierro)	≤ 0.0005	%
Na (Sodio)	≤ 0.01	%
Pb (Plomo)	≤ 0.0005	%
Perdida en secado (105 °C)	≤ 0.2	%

Corresponde a Reag. Ph Eur

Kristin Haufschildt
Responsable del laboratorio de control de calidad

Este documento se ha producido electrónicamente y es válido sin firma

(Fuente: Merck, 2025)

Figura 31: Ficha técnica de ácido sulfúrico



Especificación

1.01833.2500 Ácido sulfúrico 95-97% para análisis EMPARTA® ACS

	Especificación	
Ensayo (alcalimetría)	95.0 - 97.0	%
Identificación	pasó prueba	
Apariencia	pasó prueba	
Color	≤ 10	Hazen
Cloruro (Cl)	≤ 0.2	ppm
Nitrato (NO ₃)	≤ 0.5	ppm
Metales pesados (como Pb)	≤ 1	ppm
As (Arsenico)	≤ 0.01	ppm
Fe (Hierro)	≤ 0.2	ppm
Mg (Mercurio)	≤ 0.005	ppm
NH (Amonio)	≤ 2	ppm
Sustancias reduciendo permanganato potasio (como SO ₂)	≤ 2	ppm
Residuo por ignición	≤ 5	ppm

Dr. Nina Hegmann
Responsable del laboratorio de control de calidad

Este documento se ha producido electrónicamente y es válido sin firma

(Fuente: Merck, 2025)

Figura 32: Ficha técnica de ácidos grasos de palma destilados

	FICHA TÉCNICA	
	Código	E-NAT-ID-600
	Versión	02
	Vigente	27/02/2024

ACIDOS GRASOS A GRANEL

SKU NaturAceites
GRA 00009

Descripción

Mezcla de ésteres de ácidos grasos los cuales se han obtenido mediante el proceso de refinación de los aceites vegetales en la etapa de destilación. Consistencia semisólida a temperatura ambiente, de color amarillo - marrón, Olor característico

Características físicas, químicas y biológicas

Físicas: color amarillo oscuro con textura grumosa y pegajosa

Químicas: N/A

Biológicas: N/A

Ingredientes

Ácidos grasos libres, aceite vegetal y agua

Usos

Es usado en industrias jaboneras

Empaque

A granel en pipas

Contenido nutricional

Porción	14 g
Energía total	530 kl
Energía total	130 kcal
Grasa total	14 g

Vida útil

Hasta 1 año a partir de la fecha de producción, bajo condiciones de atmósfera controlada y tanques de acero inoxidable o material similar y bajo condiciones adecuadas de almacenamiento

Almacenamiento

En tanques de almacenamiento de material adecuado, que no contengan humedad

Transporte

En transporte previamente inspeccionado

Método de distribución

En pipas y flexi tanques

NATURACEITES S.A.
Boulevard Los Próceres Torre 4, Nivel 16, Edificio Zona Pradera 24-69
zona 10. Guatemala, Guatemala, 01010

Teléfonos: (502) 2328-5200 (PBX)
Fax: (502) 2328-5214
Planta: (502) 7828-4000

	FICHA TÉCNICA	Código	E-NAT-ID-600
		Versión	02
		Vigente	27/02/2024

País de origen

Guatemala

Alergenos

N/A

Especificaciones Fisicoquímicas

Análisis	Parámetros	Método AOCS
Ácidos grasos libres (% de Ácido Oleico)	Mínimo 70	Ca 5a-40
Humedad (%)	Máximo 2.00	Ca 2c-25
Impurezas (%)	Máximo 2.00	In House
Índice de yodo Wijs (Cg I ₂ /g Muestra)	50 – 58	Cd 1-25
Color	Amarillo - marrón	Sensorial
Valor ácido	Mínimo 140	In house
Punto de fusión capilar	42-46	Cc 2 - 38
Apariencia	Amarillo/marrón	Sensorial
Olor	característico	Sensorial

Riesgos químicos

De acuerdo con normativa vigente este producto no cuenta con riesgos químicos aplicables.

Riesgos biológicos

De acuerdo con normativa vigente este producto no cuenta con riesgos biológicos aplicables

Riesgos físicos

Libre de impurezas, objetos punzocortantes mayores de 7 mm

Regulaciones legales

N/A

NATURACEITES S.A.
 Boulevard Los Próceres Torre 4, Nivel 16, Edificio Zona Pradera 24-69
 zona 10. Guatemala, Guatemala, 01010

Teléfonos: (502) 2328-5200 (PBX)
Fax: (502) 2328-5214
Planta: (502) 7828-4000

(Fuente: Naturaceites, 2025)

I. COPIA DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

Figura 33: Cromatograma de gases para el biodiésel obtenido

Instrument : GC-MSD
Sample Name: Biodiesel negro
Misc Info : tesis
Vial Number: 1

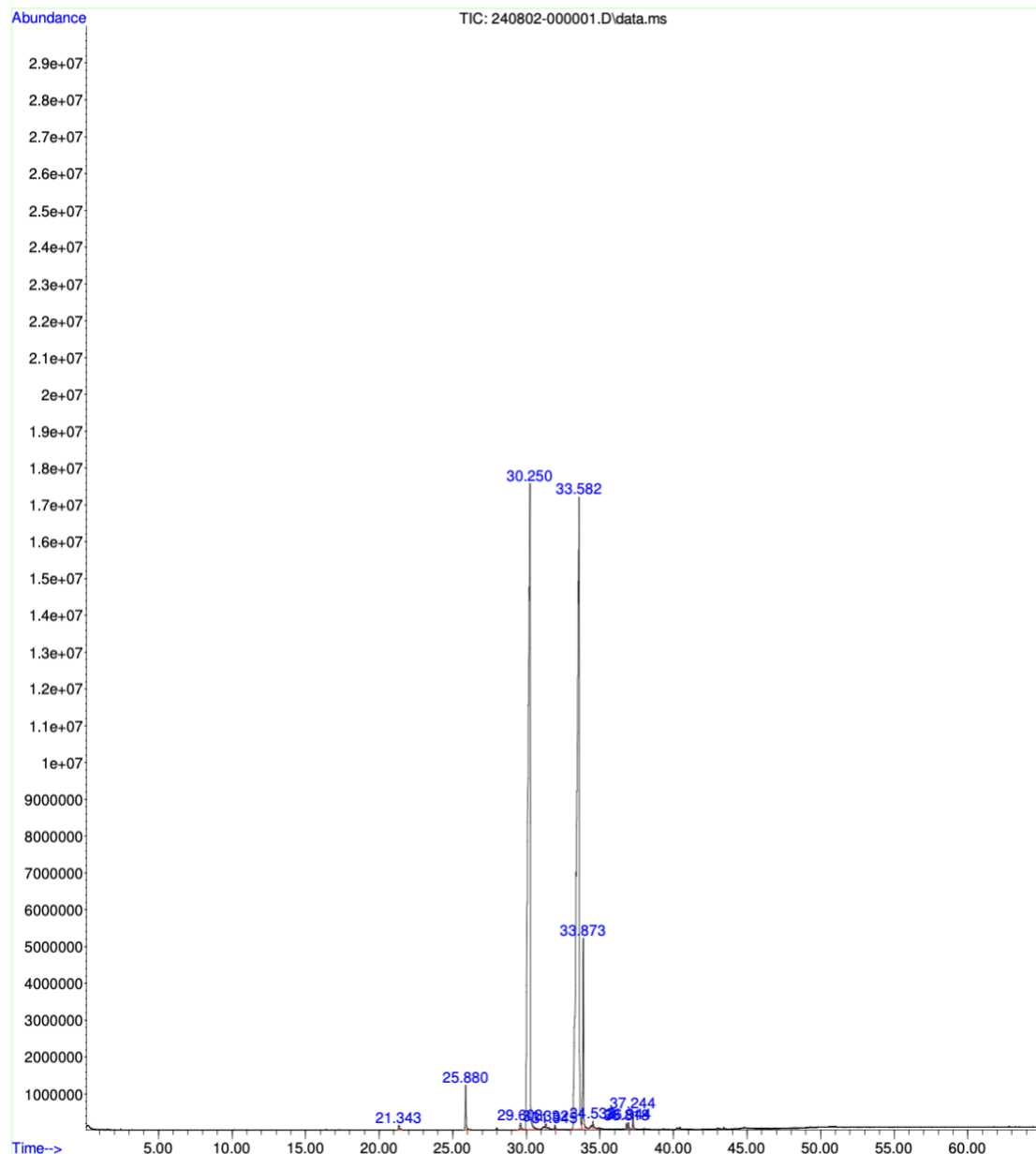


Figura 34: Perfil de ácidos grasos por tiempos de retención

Operator : AdeM
Sample : Biodiesel negro
Misc : tesis
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	21.343	0.15	C:\Database\NIST05a.L Dodecanoic acid, methyl ester	67169	000111-82-0	96
			Dodecanoic acid, methyl ester	67167	000111-82-0	95
			Dodecanoic acid, methyl ester	67163	000111-82-0	87
2	25.878	1.12	C:\Database\NIST05a.L Methyl tetradecanoate	86753	000124-10-7	96
			Methyl tetradecanoate	86752	000124-10-7	95
			Methyl tetradecanoate	86751	000124-10-7	95
3	29.603	0.22	C:\Database\NIST05a.L 9-Hexadecenoic acid, methyl ester, (Z)-	104156	001120-25-8	96
			9-Hexadecenoic acid, methyl ester, (Z)-	104152	001120-25-8	95
			7-Hexadecenoic acid, methyl ester, (Z)-	104151	056875-67-3	95
4	30.249	43.11	C:\Database\NIST05a.L Hexadecanoic acid, methyl ester	105639	000112-39-0	99
			Pentadecanoic acid, 14-methyl-, methyl ester	105662	005129-60-2	98
			Hexadecanoic acid, methyl ester	105644	000112-39-0	98
5	31.332	0.14	C:\Database\NIST05a.L Hexadecanoic acid, ethyl ester	114844	000628-97-7	98
			Hexadecanoic acid, ethyl ester	114846	000628-97-7	96
			Hexadecanoic acid, ethyl ester	114847	000628-97-7	87
6	31.946	0.11	C:\Database\NIST05a.L Heptadecanoic acid, methyl ester	114854	001731-92-6	99
			Heptadecanoic acid, methyl ester	114853	001731-92-6	98
			Heptadecanoic acid, methyl ester	114851	001731-92-6	98
7	33.583	49.28	C:\Database\NIST05a.L 7-Octadecenoic acid, methyl ester	122298	057396-98-2	99
			9-Octadecenoic acid, methyl ester	122299	002462-84-2	99
			9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	122326	001937-62-8	99
8	33.875	4.97	C:\Database\NIST05a.L Octadecanoic acid, methyl ester	123709	000112-61-8	99
			Octadecanoic acid, methyl ester	123708	000112-61-8	99
			Octadecanoic acid, methyl ester	123700	000112-61-8	98
9	34.530	0.20	C:\Database\NIST05a.L Ethyl Oleate	131053	000111-62-6	68
			8-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	122325	026528-50-7	64
			9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester	122323	000112-62-9	64
10	36.817	0.14	C:\Database\NIST05a.L 11-Eicosenoic acid, methyl ester	139171	003946-08-5	99
			Cyclopropaneoctanoic acid, 2-hexyl-, methyl ester	113415	010152-61-1	81
			9-Hexadecenoic acid, methyl ester	104156	001120-25-8	49

ACIDOS GRAS...5 SCAN bio.M Mon Aug 05 06:57:50 2024

Operator : AdeM
Sample : Biodiesel negro
Misc : tesis
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			(Z)-			
11	36.945	0.18	C:\Database\NIST05a.L Octadecanoic acid, 10-oxo-, methyl ester	132211	000870-10-0	43
			Cyclopentadecanone	74465	000502-72-7	22
			4,5,6-Pyrimidinotriamine	10410	000118-70-7	14
12	37.245	0.38	C:\Database\NIST05a.L Eicosanoic acid, methyl ester	140314	001120-28-1	99
			Eicosanoic acid, methyl ester	140312	001120-28-1	99
			Eicosanoic acid, methyl ester	140313	001120-28-1	98

J. GLOSARIO

Absorción (en procesos de separación): transferencia de uno o más componentes de una fase gaseosa a una fase líquida por solubilización selectiva. (Green & Southard, 2019)

Ácido (número de ácido, TAN): mg de KOH necesarios para neutralizar los ácidos en 1 g de muestra; parámetro clave de calidad en biodiésel. (ASTM, 2019)

Ácidos grasos (AG): ácidos carboxílicos de cadena larga (\approx C12–C22) presentes en aceites y grasas, saturados o insaturados. (Gunstone et al., 2007)

Ácidos grasos libres (AGL, FFA): fracción de ácidos grasos no esterificados en aceites/grasas; en materias primas “ácidas” como PFAD puede ser elevada. (Atadashi et al., 2012)

Adsorción (purificación): retención selectiva de impurezas (jabones, color, compuestos polares) sobre sólidos porosos (tierras, resinas, zeolitas). (Ruthven, 1984)

AOCS (American Oil Chemists’ Society): organismo que publica métodos oficiales para análisis de aceites, grasas y biodiésel (p. ej., acidez, índice de yodo, saponificación). (AOCS, 2017)

Amberlite (resinas de intercambio iónico): familia de resinas poliméricas para pulido de biodiésel (remoción de jabones/metales) por intercambio/adsorción. (Helfferich, 1962)

Arrhenius (ecuación de): relación $k=Ae^{-E_a/RT}$ entre constante de velocidad y temperatura; base para estimar cinética con la temperatura. (Laidler, 1997)

ASTM D93: método Pensky–Martens para punto de inflamación en combustibles (incluye biodiésel). (ASTM, 2021b)

ASTM D97: método para punto de escurrimiento (pour point) en productos petrolíferos y FAME. (ASTM, 2017b)

ASTM D2500: método para punto de enturbiamiento (cloud point). (ASTM, 2020)

ASTM D2709: método por centrifugación para agua y sedimento en destilados medios. (ASTM, 2016)

ASTM D4052: método de densidad por densímetro digital (biodiésel y mezclas a 15 °C). (ASTM, 2018)

ASTM D445: método para viscosidad cinemática a 40 °C. (ASTM, 2018)

ASTM D4951: método ICP-OES para fósforo total; relevante para límite de P en B100. (ASTM, 2022)

ASTM D5453: método por fluorescencia ultravioleta para azufre total en combustibles. (ASTM, 2021)

ASTM D613: método para determinar número de cetano. (ASTM, 2021c)

ASTM D6304: método Karl Fischer (volumétrico/coulombimétrico) para agua en líquidos. (ASTM, 2018; Harris, 2016)

ASTM D6584: GC-FID para monoglicéridos, diglicéridos, triglicéridos y glicerina libre/total en B100. (ASTM, 2017)

ASTM D6751: especificación de calidad para biodiésel (B100) usado en mezclas con diésel. (ASTM, 2022)

ASTM D7467: especificación para mezclas diésel–biodiésel B6–B20. (ASTM, 2021)

ASTM D975: especificación para combustibles diésel de petróleo (compatibilidad de mezclas Bxx). (ASTM, 2021)

B10 / B20 / B100: nomenclatura de mezclas diésel–biodiésel; B10 contiene 10 % v/v FAME y B100 es biodiésel puro. (ASTM, 2022)

Bailey's (aceites y grasas): obra de referencia sobre refinación (desgomado, blanqueo, desodorización) y propiedades de aceites. (de Greyt & Kellens, 2006)

Balance de materia y energía: contabilidad cuantitativa de corrientes de masa y energía para describir procesos y equipos. (Felder et al., 2016)

Blanqueo (bleaching) de aceites: etapa de refinación que remueve pigmentos y trazas con tierras decolorantes. (de Greyt & Kellens, 2006)

Catalizador ácido homogéneo (p. ej., H_2SO_4): acelera la esterificación de AGL con alcoholes; tolera altos AGL pero requiere remoción del ácido y agua. (Ma & Hanna, 1999)

Catalizador básico homogéneo (p. ej., NaOH, metóxido de sodio): acelera transesterificación de triglicéridos; sensible a AGL y agua (saponificación). (Freedman et al., 1984; Ma & Hanna, 1999)

Catalizador heterogéneo (ácido/básico sólido): cataliza esterificación/transesterificación con separación física del catalizador (resinas sulfonadas, óxidos). (Knothe et al., 2015)

CEN EN 116: método europeo para CFPP (punto de taponamiento de filtro en frío). (CEN, 2015)

CEN EN 14214: especificación europea de calidad para FAME en motores diésel y calefacción. (CEN, 2019)

Centrifugación: separación mecánica por diferencia de densidad en campo centrífugo. (Geankoplis, 2003)

CFPP (Cold Filter Plugging Point): temperatura a la cual el combustible deja de pasar por un filtro estándar a baja T. (CEN, 2015)

Cinética de reacción: estudio de la velocidad de las reacciones y su dependencia de concentración, temperatura y catalizador. (Levenspiel, 1999)

Cloud point (punto de enturbiamiento): temperatura a la cual aparecen los primeros cristales sólidos en el combustible. (ASTM, 2020)

Coalescencia (separación líquido-líquido): crecimiento de gotas dispersas para acelerar separación de fases. (Geankoplis, 2003)

Co-solvente (en biodiésel): componente que mejora la miscibilidad alcohol-aceite y acelera esterificación/transesterificación. (Knothe et al., 2015)

Constante de velocidad (k): parámetro que cuantifica la rapidez de una reacción para un orden dado. (Levenspiel, 1999)

Conversión (X): fracción del reactivo transformado; clave para rendimiento y dimensionamiento de reactores. (Levenspiel, 1999)

Cromatografía de gases (GC/GC-MS): técnica para separar y cuantificar FAME, glicerina y acilglicéridos; referencia en D6584. (ASTM, 2017; Harris, 2016)

Decantación: separación por gravedad de dos fases inmiscibles (fase orgánica de biodiésel y fase acuosa de lavado). (Geankoplis, 2003)

Degomado (degumming): remoción de fosfolípidos y gomas en aceites crudos antes de refinar. (de Greyt & Kellens, 2006)

Densidad (a 15 °C): propiedad intensiva medida típicamente por D4052 en biodiésel y mezclas. (ASTM, 2018)

Desodorización: arrastre con vapor a alta T y vacío para retirar compuestos volátiles (olores/sabores) en refinación de aceites. (de Greyt & Kellens, 2006)

Destilación/evaporación de alcohol: remoción y recuperación de metanol/etanol por volatilidad diferencial. (McCabe et al., 2005)

Diésel ULS (ULSD): diésel de ultra bajo azufre conforme a D975. (ASTM, 2021)

Emulsión (en lavado): dispersión estable de agua en biodiésel (o viceversa) estabilizada por jabones; reduce eficiencia de separación. (Knothe et al., 2015)

Ester: producto de la reacción entre ácido carboxílico y alcohol (p. ej., FAME/FAEE). (IUPAC, 2014)

Esterificación (ácida): reacción $AGL + alcohol \rightarrow \acute{e}ster + agua$; en PFAD reduce acidez previa a una posible transesterificación. (Ma & Hanna, 1999)

Estabilidad oxidativa (Rancimat): tiempo de inducción a oxidación de FAME por EN 14112; parámetro de durabilidad. (CEN, 2019)

Etanol (C_2H_5OH): alcohol usado como reactivo o co-reactivo; menos tóxico que metanol, pero menos reactivo en base. (Knothe et al., 2015)

FAEE (Fatty Acid Ethyl Esters): ésteres etílicos de ácidos grasos; alternativa a FAME cuando se usa etanol como alcohol. (Knothe et al., 2015)

FAME (Fatty Acid Methyl Esters): ésteres metílicos de ácidos grasos que constituyen el biodiésel B100. (ASTM, 2022; Knothe et al., 2015)

Fases (orgánica/acuosa): en purificación, biodiésel forma fase orgánica; agua de lavado, jabones y sales conforman fase acuosa. (Geankoplis, 2003)

Flash point (punto de inflamación): temperatura mínima a la que vapores se inflaman; método Pensky–Martens. (ASTM, 2021b)

Glicerina (glicerol): subproducto principal de la transesterificación; alcohol trihidroxilado miscible en agua. (Knothe et al., 2015)

Glicerina libre y total (FNA): fracciones cuantificadas por GC (D6584) con límites en D6751/EN 14214. (ASTM, 2017; ASTM, 2022; CEN, 2019)

Gunstone (The Lipid Handbook): referencia en química de lípidos, triglicéridos y propiedades. (Gunstone et al., 2007)

Hidratación (agua en biodiésel): traza de agua que afecta corrosión y estabilidad; se mide por Karl Fischer. (ASTM, 2018; Harris, 2016)

HPLC: cromatografía líquida de alta eficiencia para compuestos polares/termolábiles en matrices de proceso. (Snyder et al., 2010)

Índice de cetano (CN): indicador de calidad de ignición en motores diésel, relacionado con el retardo de encendido. (ASTM, 2021c)

Índice de saponificación: mg KOH necesarios para saponificar 1 g de aceite; correlaciona con longitud de cadena media. (AOCS, 2017)

Índice de yodo: medida de insaturación (g I₂/100 g); caracteriza aceites y FAME. (AOCS, 2017; CEN, 2019)

IUPAC (Gold Book): compendio de definiciones y nomenclatura química estándar. (IUPAC, 2014)

Jabones (en biodiésel): sales de ácidos grasos (Na⁺/K⁺) formadas por saponificación; promueven emulsiones y pérdidas. (Knothe et al., 2015)

Karl Fischer (agua): técnica volumétrica/coulombimétrica para determinar agua en líquidos (método D6304). (ASTM, 2018; Harris, 2016)

KOH (hidróxido de potasio): base usada para titulación de acidez y como catalizador básico en transesterificación. (Ma & Hanna, 1999)

Lavado (purificación acuosa): remoción de jabones, catalizador, glicerina y sales por contacto con agua y decantación/centrifugación. (Knothe et al., 2015)

Le Chatelier (principio de): un equilibrio se desplaza para minimizar perturbaciones; retirar agua en esterificación favorece productos. (Atkins & de Paula, 2010)

LHV (poder calorífico inferior): energía liberada en combustión sin recuperar calor de condensación del agua; en FAME es menor que en diésel fósil. (Moran et al., 2014)

LMTD (diferencia media logarítmica): herramienta para calcular transferencia de calor en intercambiadores. (Incropera et al., 2011)

MAG / DAG / TAG: mono-, di- y triglicéridos; impurezas/intermedios cuantificados por GC (D6584). (ASTM, 2017; Gunstone et al., 2007)

Metales alcalinos y alcalinotérreos (Na, K, Ca, Mg): contaminantes que deben estar en niveles traza según especificaciones de biodiésel. (CEN, 2019; ASTM, 2022)

Metanol (CH_3OH): alcohol más utilizado por reactividad y costo; más tóxico y volátil que etanol. (Knothe et al., 2015)

Microemulsiones (en biodiésel): sistemas isotrópicos estabilizados por surfactantes para mejorar miscibilidad y propiedades de flujo; uso limitado por estabilidad y normativas. (Knothe et al., 2015)

Microondas (asistencia de reacción): calentamiento dieléctrico que acelera trans/esterificación; alternativa de intensificación de procesos. (Knothe et al., 2015)

NTU (Number of Transfer Units): parámetro de diseño en intercambiadores y torres para dimensionar área/altura. (Incropera et al., 2011; Wankat, 2012)

Neutralización (post-reacción): etapa para retirar catalizador básico y jabones con ácido diluido, seguida de separación de fases. (Knothe et al., 2015)

Número de cetano calculado (CCI): estimación del comportamiento de ignición basada en propiedades del combustible. (ASTM, 2021c)

Oxidación (en FAME): autooxidación de dobles enlaces que reduce estabilidad e incrementa acidez y gomas. (Knothe et al., 2015)

PFAD (Palm Fatty Acid Distillate): destilado de ácidos grasos de palma obtenido en la desodorización; mezcla rica en AGL (palmítico/oleico) útil para esterificación. (de Greyt & Kellens, 2006; Atadashi et al., 2012)

pH (en aguas de proceso): medida de acidez/basicidad en fase acuosa durante lavado/neutralización. (Harris, 2016)

Poder calorífico (PCS/PCI): energía por unidad de masa/volumen liberada por combustión, con (PCS) o sin (PCI) condensación del agua. (Moran et al., 2014)

Pour point (punto de escurrimiento): temperatura mínima a la que el combustible fluye en condiciones estándar. (ASTM, 2017b)

Principio de operación de reactor batch: recipiente agitado sin flujo continuo; apropiado para esterificación/transesterificación a escala laboratorio. (Levenspiel, 1999)

Reactor CSTR: tanque agitado continuo a estado estacionario con mezcla ideal; útil en procesos líquidos. (Levenspiel, 1999)

Reactor PFR (plug flow): reactor tubular con gradientes axiales mínimos; útil para reacciones líquidas rápidas. (Levenspiel, 1999)

Recuperación de alcohol: operación de evaporación/condensación para reducir alcohol residual y cumplir límites normativos. (McCabe et al., 2005)

Resistencia al frío (cold flow): conjunto de propiedades (cloud, pour, CFPP) que definen operabilidad a baja temperatura. (CEN, 2015; ASTM, 2020)

Resinas sulfonadas (ácido sólido): catalizadores/adsorbentes poliméricos para esterificación/pulido de biodiésel. (Knothe et al., 2015)

Rendimiento (yield): masa de producto útil por masa de alimentación o reactivo, usualmente en %. (Felder et al., 2016)

Rancidez (oxidativa/hidrolítica): deterioro por oxidación o hidrólisis que eleva acidez y genera olores. (Gunstone et al., 2007)

Saponificación (formación de jabón): reacción de AGL con base (Na^+/K^+) que produce jabones; indeseable en transesterificación básica. (Ma & Hanna, 1999)

Secado (del biodiésel): remoción de trazas de agua/alcohol por vacío, calentamiento o adsorbentes. (McCabe et al., 2005; Knothe et al., 2015)

Selectividad: fracción de reactivo convertido al producto deseado frente a subproductos. (Levenspiel, 1999)

Supercrítico (transesterificación supercrítica): proceso con alcohol en condiciones supercríticas (T/P elevadas) que permite conversión rápida sin catalizador. (Saka & Kusdiana, 2001)

Titulación ácido–base (acidez AGL): procedimiento para cuantificar AGL (% como ácido oleico) o número de ácido (mg KOH/g). (AOCS, 2017; ASTM, 2019)

Transesterificación: intercambio alcohólico de triglicéridos para formar FAME/FAEE y glicerol; base del biodiésel. (Freedman et al., 1984; Ma & Hanna, 1999)

Ultrasonido (asistencia de reacción): intensificación por cavitación que mejora mezcla y transferencia de masa/energía. (Knothe et al., 2015)

UCO (aceite de cocina usado): aceite vegetal post-consumo recolectado y pretratado para producir biodiésel. (Atadashi et al., 2012)

Viscosidad cinemática (a 40 °C): resistencia al flujo medida por D445; parámetro normativo en B100. (ASTM, 2018; ASTM, 2022)

Wankat (separaciones): referencia para diseño de torres y procesos de separación por etapas y difusión. (Wankat, 2012)

K. ECUACIONES

Ecuación 1: Determinación de la viscosidad cinemática de PFAD

$$\eta_2 = \frac{\eta_1 * (\rho_2 t_2)}{(\rho_1 t_1)}$$

Donde:

η_2 = Viscosidad del fluido de interés

η_1 = Viscosidad del fluido conocido en la literatura

$\rho_x t_x$ = Densidad y tiempos de compuesto x.

Ecuación 2: Determinación de la densidad de PFAD

$$\rho_{mx} = \frac{m_f - m_o}{V_p}$$

Donde:

ρ_{mx} = Densidad de la muestra (g/mL)

m_f = Masa del picnómetro con la muestra (g)

m_o = Masa del picnómetro con vacío (g)

V_p = Volumen del picnómetro graduado (mL)

Ecuación 3: Determinación de la molaridad de NaOH para solución titulante de PFAD

$$[NaOH] = \frac{m_{ftalato}}{V_{titulado} * M_{Masa\ molar\ ftalato}}$$

Ecuación 4: Determinación de la molaridad de NaOH para solución titulante de biodiésel

$$[NaOH] = \frac{m_{ftalato}}{V_{titulado} * M_{Masa\ molar\ ftalato}}$$

Ecuación 5: Determinación de la densidad de biodiésel

$$\rho_{mx} = \frac{m_f - m_o}{V_p}$$

Donde:

ρ_{mx} = Densidad de la muestra (g/mL)

m_f = Masa del picnómetro con la muestra (g)

m_o = Masa del picnómetro con vacío (g)

V_p = Volumen del picnómetro graduado (mL)

Ecuación 6: Número de Cetano estimado por Gopinath et al., 2009

$$CN = 62.2 + 0.017L + 0.074M + 0.115P + 0.177S - 0.103O - 0.279LI - 0.366LL$$

donde:

CN = Número de cetano estimado

L = % de ácido láurico (C12:0)

M = % de ácido mirístico (C14:0)

P = % de ácido palmítico (C16:0)

S = % de ácido esteárico (C18:0)

O = % de ácido oleico (C18:1)

LI = % de ácido linoleico (C18:2)

LL = % de ácido linolénico (C18:3)

Ecuación 7: Determinación de la media estadística

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

Donde:

X_i = Conjunto de observaciones

N = Número de observaciones

Ecuación 8: Determinación de la desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Donde:

X_i = Conjunto de observaciones

\bar{X} = Media

n = Número de observaciones

Ecuación 9: Determinación del intervalo de confianza

$$I.C = \bar{X} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde:

\bar{X} = Media

n = Número de observaciones

σ = Desviación Estándar

t = Valor de área en distribución t-student

Ecuación 10: Determinación del coeficiente de variación

$$C.V = \frac{\sigma}{\bar{X}} * 100\%$$

Donde:

\bar{X} = Media

σ = Desviación Estándar

Ecuación 11: Propagación de error para la multiplicación por una constante

$$f = k(x \pm \Delta x) = kx \pm k\Delta x$$

donde:

f = resultado de la operación

k = constante (adimensional o con unidades según el caso)

x = valor medido

Δx = incertidumbre (error absoluto) de x.

Ecuación 12: Propagación de error para suma y resta de dos medidas

$$f = (x \pm \Delta x) \pm (y \pm \Delta y) = (x \pm y) \pm \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

donde:

f = resultado de la operación

k = constante (adimensional o con unidades según el caso)

x = valor medido

Δx = incertidumbre (error absoluto) de x.

Ecuación 13: Propagación de error para la multiplicación de dos medidas

$$f = (x \pm \Delta x) \cdot (y \pm \Delta y) = (x \cdot y) \pm (x \cdot y) \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$$

donde:

f = resultado de la operación

k = constante (adimensional o con unidades según el caso)

x = valor medido

Δx = incertidumbre (error absoluto) de x.

Ecuación 14: Propagación de error para el cociente de dos medidas

$$f = \frac{(x \pm \Delta x)}{(y \pm \Delta y)} = \left(\frac{x}{y}\right) \pm \left(\frac{x}{y}\right) \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$$

donde:

f = resultado de la operación

k = constante (adimensional o con unidades según el caso)

x = valor medido

Δx = incertidumbre (error absoluto) de x.

Ecuación 15: Potencia específica de agitación (ecuación de potencias)

$$\frac{P}{V} \propto \frac{\rho N^3 D^5}{V}$$

donde:

P = potencia suministrada al agitador [W]

V = volumen de líquido en el tanque [m³]

ρ = densidad del fluido [kg/m³]

N = velocidad de rotación del impulsor [s⁻¹]

D = diámetro del impulsor [m]

Ecuación 16: Escalamiento geométrico (diámetro de impulsor vs. volumen)

$$\frac{D_2}{D_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{1}{3}}$$

donde:

D₁, D₂ = diámetros del impulsor en los equipos 1 y 2 [m].

V₁, V₂ = volúmenes de trabajo correspondientes [m³]. (La relación de escala asume similitud geométrica.)

Ecuación 17: Relación de diseño impulsor–tanque

$$D = 0.4T$$

donde:

D = diámetro del impulsor [m]

T = diámetro interno del tanque [m]

0.4 = constante de diseño típica (relación D/T).

Ecuación 18: Número de Reynolds en agitación

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu}$$

donde:

Re = número de Reynolds en agitación (adimensional)

ρ = densidad del fluido [kg/m^3]

N = velocidad de rotación [s^{-1}]

D = diámetro del impulsor [m]

μ = viscosidad dinámica del fluido [$\text{Pa}\cdot\text{s}$].

Ecuación 19: Balance diferencial simplificado de esterificación reversible (pseudo-1er orden)

$$\frac{dC_{FFA}}{dt} = -k_1 C_{FFA} + k_{-1} C_{BD}$$

(k_{-1} efectivo si el término de agua se mantiene casi constante en operación controlada)

Donde:

FFA = ácido graso libre

MeOH = metanol

BD = éster metílico formado

H₂O = agua formada

r_f = velocidad de reacción directa

r_r = velocidad de reacción inversa

k_f = constante de velocidad directa

k_r = constante de velocidad inversa

C_{FFA} (o C_A) = concentración de FFA

C_{MeOH} = concentración de metanol

$C_{\text{Éster}}$ (o C_{BD}) = concentración de éster (biodiésel)

C_{H_2O} = concentración de agua

k_1 = constante pseudo–primer orden directa ($k_f \cdot C_{MeOH}$)

k_{-1} = constante pseudo–primer orden inversa (efectiva)

t = tiempo de reacción

Ecuación 20: Conversión temporal hacia el equilibrio en sistema reversible (pseudo-1er orden)

$$\frac{X(t)}{X_{eq}} = 1 - e^{-(k_1+k_{-1})t}$$

donde:

X(t) = conversión al tiempo t (adimensional)

X_{eq} = conversión en equilibrio (adimensional)

k₁, k₋₁ = **constantes aparentes** de velocidad [s⁻¹]

t = tiempo [s].

Ecuación 21: Área de sección circular

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

donde:

A = área de la sección circular [m²]

D = diámetro [m]

π = constante matemática ≈ 3.1416.

Ecuación 22: Velocidad terminal no obstaculizada (ley de Stokes)

$$u_{t0} = \frac{\Delta\rho g d^2}{18\mu_c}$$

donde:

u_{t0} = velocidad terminal no obstaculizada (Stokes) [m·s⁻¹]

Δρ = diferencia de densidades partícula–fluido [kg·m⁻³]

g = **constante** de aceleración gravitatoria ≈ 9.81 m·s⁻²

d = diámetro de la partícula/gota [m]

μ_c = viscosidad de la fase continua [Pa·s].

Ecuación 23: Sedimentación obstaculizada correlación de Maude-Whitmore / Richardson-Zaki:

$$u_t = u_{t0}(1 - c)^n, \quad n \approx 4.65 \text{ (stokes)}$$

donde:

u_t = velocidad de sedimentación/ascenso en medio obstaculizado [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

u_{t0} = velocidad terminal no obstaculizada (Ecuación 22) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

c = fracción volumétrica de fase dispersa (adimensional)

n = **constante/exponente** de Richardson–Zaki; para régimen Stokes $n \approx 4.65$ (adimensional).

Ecuación 24: Tiempo total decantación

$$t_{total} = \frac{H_{BD}}{u_t}$$

donde:

t_{total} = tiempo total de decantación/clarificación [s]

H_{BD} = altura de la capa a clarificar [m]

u_t = velocidad efectiva de sedimentación/ascenso (Ecuación 23) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]