



Instituto Politécnico Nacional

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas

Programa de Maestría en Tecnología Avanzada



TESIS

“Diseño de un reactor para la producción de biodiésel con base en las propiedades fisicoquímicas de la reacción de transesterificación”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

Maestro en Tecnología Avanzada

PRESENTA

Ing. Iván Tonatiuh Antonio Fernández

DIRECTORES

Dra. Issis Claudette Romero Ibarra

Dr. Ignacio Elizalde Martínez

Ciudad de México, México

Enero de 2019



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

México, D.F. a 16 de diciembre del 2016

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de UPIITA en su sesión Ordinaria No. 11 celebrada el día 15 del mes de diciembre conoció la solicitud presentada por el(a) alumno(a):

Antonio	Fernández	Iván Tonatiuh
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre (s)

Con registro:

B	1	6	0	0	0	2
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:
"Diseño de un reactor para producción de biodiesel con base en las propiedades fisicoquímicas de la reacción de transesterificación".

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:
Determinar las variables experimentales en la reacción de transesterificación.
Optimizar condiciones de reacción del proceso de transesterificación
Evaluar los procesos de potencia y agitación asociados en la reacción.

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:
Dra. Issis Claudette Romero Ibarra (UPIITA) y Dr. Ignacio Elizalde Martínez (CMPL+)

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesina será elaborado por el alumno en: UPIITA y CMPL+.

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.
4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

Dra. Issis Claudette Romero Ibarra

Aspirante

Iván Tonatiuh Antonio Fernández

Dr. Ignacio Elizalde Martínez (CMPL+)

Presidente del Colegio

Dr. Gilberto Alejandro García Guerra





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 14:00 horas del día 20 del mes de junio del 2018 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de UPIITA para examinar la tesis titulada:
Diseño de un reactor para producción de biodiesel con base en las propiedades fisicoquímicas de la reacción de transesterificación

Presentada por el alumno:

ANTONIO FERNÁNDEZ IVÁN TONATIUH
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)
Con registro:

B	1	6	0	0	0	2
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dra. Issis Claudette Romero Ibarra
4er Vocal

Dr. Ignacio Elizalde Martínez
2º Vocal

Dr. Lev Guzmán Vargas
Presidente

Dr. Aarón Israel Díaz Cano
Secretario

Dr. Oscar Octavio Gutiérrez Frías
3er Vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Juan Hernández Rosas





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, el día 8 del mes de enero del año 2019, el que suscribe **Iván Tonatiuh Antonio Fernández**, alumno del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada, con número de registro B160002, adscrito al Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, manifiesto que soy el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Issis C Romero Ibarra y el Dr. Ignacio Elizalde Martínez y cede los derechos del trabajo titulado **Diseño de un reactor para la producción de biodiésel con base en las propiedades fisicoquímicas de la reacción de transesterificación**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones iantoniof1101@alumno.ipn.mx, issisromero@gmail.com, ielizaldem@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Iván Tonatiuh Antonio Fernández

Agradecimientos

El presente trabajo es el resultado del apoyo de diversas personas a lo largo de 2 años. A cada una de las personas que me ayudaron a concluir esta tesis les brindo mi más sincero agradecimiento.

A la persona más importante en mi vida, mi madre Socorro, por siempre apoyarme en todos mis proyectos y por alentarme a dar lo mejor de mí y seguir mis sueños.

A mi padre Ricardo por estar conmigo en momentos difíciles y por todas las cosas que me ha enseñado.

A mi hermano Rodrigo, gracias por confiar en mí y por ser el mejor hermano mayor que cualquiera pudiera tener.

A mis amigos Gaby, Jehu, Ismael y Ara, por sus consejos y apoyo en el trabajo, pero especialmente gracias por su invaluable amistad.

A los miembros del grupo MATEA, por los consejos y conocimientos proporcionadas para mejor el trabajo.

A la Dra. Issis Claudette Romero Ibarra. Gracias por la paciencia, el tiempo, el conocimiento, por cada uno de los consejos que me brindó tanta para el trabajo como a nivel personal y sobre todo por nunca dejar de confiar en mí.

Al Dr. Ignacio Elizalde Martínez por su notable contribución al trabajo, por las observaciones en el mismo y por las facilidades proporcionadas en el CMPL para realizar la parte experimental del proyecto.

Agradezco a mis sinodales el Dr. Aarón Israel Díaz Cano, el Dr. Mario Fidel García, Dr. Lev Guzmán Vargas y el Dr. Oscar Octavio Gutiérrez Frías, por las observaciones que permitieron mejorar el trabajo.

Agradezco al Instituto Politécnico Nacional, a la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas y al Centro Mexicano Para la Producción Más Limpia, por las herramientas proporcionadas para la realización de este trabajo.

Agradezco el apoyo experimental del Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías (CNMN-IPN) por la realización de la caracterización de Ionización por Electrospray, en particular al Dr. Daniel Arrieta Baez y a la Dra. Mayra Beatriz Gómez Patiño. Agradezco a la Dra. Araceli Martínez Ponce por la ayuda brindada en el análisis de los resultados de Resonancia Magnética Nuclear de Protón.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Agradezco al Proyecto SECITI 071/2016 y CM-SECITI/069/2018.

Agradezco al Proyecto CONACyT "Red temática de almacenamiento de energía", número 279966.

Agradezco al Proyecto SIP multidisciplinario 1983 del Instituto Politécnico Nacional.

Agradezco al módulo SIP 20181907 del Instituto Politécnico Nacional.

Reconocimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado para el desarrollo de esta tesis, a través del proyecto **“Fase I de la remediación de áreas contaminadas con hidrocarburos en la refinería Gral. Lázaro Cárdenas”**, con Número de Registro de proyecto **CONACyT 274276**.

Abstract

This work describes the production of biodiesel by means of the transesterification reaction using sodium hydroxide (NaOH) as homogeneous catalyst and as raw materials cooking oil (collected from the UPIITA-IPN coffee shop) as well as methanol were used. We studied the parameters that affect the transesterification reaction on a laboratory scale and the variables that must be controlled when scaling the process at the pilot plant level. These parameters were methanol-oil molar ratio of 5: 1 and NaOH concentration of 0.5 wt%. Temperature and stirring are the main variables when the process is scaled-up. The temperature was varied at 45 °C and 60 °C also the stirring of the reaction mixture was studied in two levels (300 RPM with magnetic stirring and 600 RPM with mechanical stirring).

The oil and the reaction products were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy, proton nuclear magnetic resonance, electrospray ionization and the viscosity and density profile were also obtained. To determine the optimal reaction conditions, the scaling-up of the process was carried out. The highest yield of biodiesel was 98.94% and it was obtained at a reaction temperature of 45 °C and mechanical stirring at 600 RPM.

With the experimental information found, the design of a pilot-scale batch reactor was proposed. The parts of reactor were sized, considering a biodiesel production of 1000 liter per batch. The inner diameter was the most important parameter to size the reactor since it is directly related to the geometry of the turbines and the type of bottom of the tank. A geometry of the bottom of the torispheric reactor was proposed to maintain a homogeneous agitation of the reaction mixture, favoring the contact between the species which allows to reach high biodiesel yields. The dimensions of the turbines of the stirring system and the positions of those to achieve optimum stirring were also calculated with the diameter of the tank. The calculations of the thickness of the reactor were verified by performing a stress-strain analysis and the stirring of the reaction mixture was validated with a computational analysis of fluid dynamics. The novelty of this work consisted of the conceptual design of a Batch

reactor for the biodiesel production at pilot plant scale from laboratory level information in agreement with the ASME code section VIII division 1.

Resumen

Este trabajo describe la producción de biodiesel por medio de la reacción de transesterificación utilizando hidróxido de sodio (NaOH) como catalizador homogéneo y como materias primas de la reacción se utilizaron aceite de cocina usado (recolectado de la cafetería de UPIITA-IPN) y metanol grado reactivo. Se estudiaron los parámetros que afectan la reacción de transesterificación a escala de nivel laboratorio. Asimismo, se analizaron las variables que deben controlarse para escalar el proceso a nivel de planta piloto. Los parámetros fueron la relación molar metanol-aceite de 5: 1 y la concentración de NaOH de 0.5% en peso. La temperatura y la agitación fueron las principales variables a modificar cuando el proceso se escaló. La temperatura se varió entre 45 °C y 60 °C, asimismo la agitación de la mezcla de reacción también se estudió en dos niveles a 300 RPM con agitación magnética y 600 RPM con agitación mecánica.

El aceite y los productos de reacción se caracterizaron por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier, resonancia magnética nuclear del protón, ionización por electrospray y el perfil de viscosidad y densidad. Esto permitió determinar las condiciones de reacción óptimas para llevar a cabo el escalamiento del proceso. El mayor rendimiento de biodiesel fue del 98,94% y se obtuvo a una temperatura de reacción de 45 °C y agitación mecánica a 600 RPM.

Con la información experimental encontrada, se propuso el diseño de un reactor de lotes a escala piloto, para el cual se dimensionaron cada una de las partes que conforman al reactor, considerando una producción de biodiesel de 1000 litros por lote. El diámetro interior fue el parámetro más importante para dimensionar el reactor, ya que está directamente relacionado con la geometría de las turbinas y el tipo de fondo del tanque. Se propuso una geometría del fondo del reactor torisférico para mantener una agitación homogénea de la mezcla de reacción, favoreciendo el contacto entre las especies lo que permite alcanzar altos rendimientos de biodiesel. Las dimensiones de las turbinas del sistema de agitación y las posiciones de aquellas para lograr una agitación óptima también se calcularon con el diámetro del tanque. Los cálculos del espesor del reactor se validaron realizando un análisis de

esfuerzo y deformación por medio de *SolidWorks Simulation*. Por otro lado, la agitación de la mezcla de reacción se validó con un análisis computacional de la dinámica de fluidos con *SolidWorks Flow Simulation*. La novedad del trabajo consistió en el diseño conceptual de un reactor por lotes para la producción de biodiesel a escala de planta piloto a partir de información de laboratorio con base en el código ASME, sección VIII, división 1.

Índice de contenido

Introducción.....	4
1 Generalidades.....	6
1.1 Consumo energético en México.....	7
1.2 Biocombustibles.....	13
1.2.1 Clasificación de biocombustibles.....	13
1.2.2 Biocombustibles por estado de agregación.....	16
1.3 Biodiésel.....	17
1.3.1 Proceso de obtención de biodiésel.....	17
1.3.2 Procesos de catálisis homogéneos.....	19
1.3.3 Procesos de catálisis heterogéneos.....	22
1.3.4 Propiedades del biodiésel.....	23
1.3.5 Producción de biodiésel a nivel mundial.....	25
1.3.6 Producción de biodiésel en México.....	26
1.4 Problemática del aceite usado.....	28
1.4.1 El aceite usado en la Ciudad de México.....	29
1.4.2 El biodiésel a partir de aceite vegetal usado.....	32
1.5 Antecedentes de diseño de reactores para la producción de biodiésel ...	33
1.5.1 Criterios de selección de un reactor.....	34
1.6 Hipótesis.....	36
1.7 Objetivos.....	36
2 Metodología.....	37
2.1 Recolección de aceite usado.....	37
2.2 Pretratamiento de aceite usado.....	38
2.3 Reacción de transesterificación.....	39
2.3.1 Relación molar aceite-alcohol.....	40
2.3.2 Temperatura.....	41
2.3.3 Cantidad de catalizador.....	41
2.3.4 Tiempo de reacción.....	42

2.3.5	Velocidad de agitación.....	42
2.4	Cinética de reacción.....	42
2.4.1	Tasa de reacción	45
2.5	Caracterización de reactivos y productos.....	46
2.5.1	Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)	46
2.5.2	Perfil de viscosidades y densidad.....	48
2.5.3	Espectroscopía de resonancia magnética nuclear de protón (RMN-H).	49
2.5.4	Ionización por electrospray (ESI-MS)	50
2.6	Diseño del reactor	51
2.6.1	Normas aplicables para el diseño del reactor y el sistema de agitación 52	
2.6.2	Validación de diseño.....	52
3	Resultados y discusión.....	53
3.1	Producción de biodiésel	53
3.2	Caracterización de reactivos y productos.....	54
3.2.1	Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)	54
3.2.2	Perfil de viscosidad y densidad.....	57
3.2.3	Espectroscopía de resonancia magnética nuclear de protón (RMN-H). 59	
3.2.4	Ionización por electrospray (ESI-MS)	66
3.3	Diseño mecánico reactor.....	69
3.3.1	Cuerpo del reactor	69
3.3.2	Fondo del reactor.....	74
3.3.3	Espesores.....	77
3.3.4	Diseño Turbina Rushton	80
3.3.5	Simulación de agitación.....	86
4	Conclusiones.....	91
	Perspectivas.....	92
	Referencias	93

Índice de Figuras

Figura 1.1 Emisiones GEI del sector energía [2].	7
Figura 1.2 Consumo final por sector y energético [3].	11
Figura 1.3 Evolución de la producción y el consumo nacional de energía [3].	12
Figura 1.4 Ciclo de emisiones de carbono de biocombustibles. Traducida de imagen original disponible en: http://www.carsclimate.com	13
Figura 1.5 Reacción general de transesterificación.	17
Figura 1.6 Reacciones reversibles consecutivas del proceso de transesterificación.	18
Figura 1.7 a) Mecanismo de reacción de la reacción de transesterificación catalizada por una base. (b) Mecanismo de reacción de la reacción de transesterificación catalizada por ácido.	20
Figura 2.1 Poster de la campaña “Biodiésel a partir de aceite comestible residual”	38
Figura 2.2 Filtración de partículas sólidas.	39
Figura 2.3 Esquema experimental ACR	43
Figura 2.4 Esquema experimental ACR-1 y ACR-2.	44
Figura 2.5 Diagrama de flujo para obtención de la cinética de reacción de transesterificación	46
Figura 2.6 Modos vibracionales más comunes [37].	47
Figura 2.7 Celda de viscosidad. Modificado de norma ASTM 7042-14.	48
Figura 2.8 Espectrómetro de masas micrOTOF-Q.	50
Figura 2.9 Modelo Descriptivo lineal del diseño	52
Figura 3.1 a) Espectro de infrarrojo del aceite usado; b) Espectro de infrarrojo del biodiésel (ACR); c) Espectro de infrarrojo del biodiésel (ACR-1); d) Espectro de infrarrojo del biodiésel (ACR-2).	55
Figura 3.2 Variación de la viscosidad dinámica en un intervalo de 15 a 70°C del aceite y del biodiésel (ACR).	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3.3 Variación de la densidad en un intervalo de 15 a 70°C del aceite y del biodiésel (ACR).	58
Figura 3.4 Variación de la viscosidad dinámica en un intervalo de 15 a 70°C del aceite y del biodiésel (ACR).	59
Figura 3.5 Espectros de RMN-H del experimento ACR	62
Figura 3.6 Espectros de RMN-H del experimento ACR-1.	63
Figura 3.7 Espectros de RMN-H del experimento ACR-2.	64
Figura 3.8 Comparación de rendimientos de los experimentos ACR, ACR-1 y ACR-2	65
Figura 3.9 Comparación de rendimientos de los experimentos ACR, ACR-1 y ACR-2	66
Figura 3.10 ESI- MS de ésteres metílicos de ácidos grasos de Aceite Usado.	67
Figura 3.11 Dimensiones del cuerpo del reactor	71
Figura 3.12 vista superior de bafle deflector de flujo.	72

Figura 3.13 Render de la del cuerpo del reactor con deflectores.....	72
Figura 3.14 Geometría fondo toriesférico.....	75
Figura 3.15 Plano de revolución fondo toriesférico	76
Figura 3.16 Render de fondo toriesférico.....	76
Figura 3.17 Análisis esfuerzo-deformación a la presión de trabajo.....	79
Figura 3.18 Análisis esfuerzo-deformación a la presión de diseño.....	80
Figura 3.19 Render turbina Rushton	82
Figura 3.20 Gráfica de factor de potencia para impulsores.....	83
Figura 3.21 Determinación de número de potencia utilizando la grafica de factor de potencia de una turbina Rushton [52].....	84
Figura 3.22 Configuración del sistema de agitación con turbinas Rushton.....	86
Figura 3.23 Domino computacional de la simulación.....	87
Figura 3.24 Subdominio del flujo.....	87
Figura 3.25 Ventana de flujo de la simulación.....	88
Figura 3.26 Almacenamiento de datos experimentales de visosidad dinamica al simulador.....	88
Figura 3.27 Almacenamiento de datos experimentales de densidad al simulador.....	89
Figura 3.28 Región de rotación.....	89
Figura 3.29 Resultado de la simulación del sistema de agitación.....	90

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Producción de energía primaria (Petajoules) [3].	8
Tabla 1.2 Producción bruta de energía secundaria [3].	9
Tabla 1.3 Ventajas de los biocombustibles por generación [6].	15
Tabla 1.4 Desventajas de los biocombustibles por generación [6].	15
Tabla 1.5 Ejemplos de biocombustibles por su estado de agregación molecular.	16
Tabla 1.6 Proceso de obtención de biocombustibles [6].	16
Tabla 1.7 Comparación de propiedades del diésel y el biodiésel.	24
Tabla 1.8 Producción anual de biodiésel.	25
Tabla 1.9 Factores que intervienen en las cadenas de producción a partir de aceites usados y grasas [22].	26
Tabla 1.10 Plantas comerciales de biodiésel [22].	27
Tabla 1.11 Ventas anuales de aceite comestible [27].	30
Tabla 1.12 Población de México y de la Ciudad de México [13].	30
Tabla 1.13 Predicción de ventas Anuales de aceite en la Ciudad de México.	30
Tabla 1.14 Aceite usado disponible en la Ciudad de México con potencial para producir biodiésel.	31
Tabla 1.15 Directorio de centros de acopio de residuos urbanos en la CDMX (aceite comestible usado)	32
Tabla 1.16 Producción de biodiésel con diferentes materias primas.	33
Tabla 1.17 Criterios para la clasificación de reactores [35]	34
Tabla 2.1 Reactivos utilizados en la síntesis de biodiésel.	40
Tabla 2.2 Condiciones optimizadas en los experimentos ACR, ACR-1 y ACR-2.	45
Tabla 2.3 Regiones del espectro infrarrojo.	47
Tabla 3.1 Condiciones fijas de la reacción en los experimentos ACR, ACR-1 y ACR-2.	53
Tabla 3.2 Señales presentes en el espectro del infrarrojo teórico del biodiésel.	56
Tabla 3.3 Enlaces asociados a la posición en el espectro.	60
Tabla 3.4 Rendimientos de los experimentos ACR, ACR-1 Y ACR-2 en dependencia del tiempo de reacción.	61
Tabla 3.5 Composiciones del biodiésel producido del aceite usado obtenida mediante ESI-MS	68
Tabla 3.6 Parámetros de operación y diseño	74
Tabla 3.7 Altura y diámetro interior del cilindro	74
Tabla 3.8 Relaciones geométricas principales de la Configuración Estándar de Estanque de Agitación en función del diámetro interior del reactor.	80
Tabla 3.9 Símbolos y valores de variables para el cálculo de la potencia requerida.	85

Introducción

El desarrollo urbano, el transporte, el crecimiento industrial y la producción de energías de alto consumo son los sectores que más impactan en el calentamiento global. Esto se debe a que la energía utilizada en el desarrollo de estas actividades proviene principalmente de combustibles fósiles, los cuales representan una constante emisión de contaminantes al medio ambiente. Una alternativa a los combustibles fósiles son los biocombustibles. Al utilizarse se disminuyen las emisiones de contaminantes generados por su combustión, considerando todo su ciclo de vida. El transporte es un sector donde se utiliza diésel y puede ser sustituido por biodiésel o su mezcla (biodiésel/diésel). El biodiésel es un combustible verde que se obtiene de la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales, tanto vírgenes como usados.

El biodiésel es producido en diversos países a niveles industriales. En México no se ha logrado llegar a estos niveles de producción por problemas asociados a la disponibilidad de la materia prima, no se tienen subsidios económicos para desarrollar proyectos de este tipo y por la falta de interés en diseñar reactores específicos para la producción de biodiésel. Por lo anterior es necesario utilizar una materia prima con amplia disponibilidad en la producción de biodiesel como lo es el aceite usado, el cual es un desperdicio al que se le puede dar un valor agregado y al hacerlo, se evita entre otras cosas que sea vertido a cuerpos de agua y eventualmente llegue a mantos acuíferos provocando su contaminación.

En el diseño de un reactor para producir biodiésel con altos rendimientos se debe conocer la naturaleza de la reacción y las variables que más influyen en ella, como lo son una agitación y un control adecuado de temperatura. Una propuesta que cumpla con estas características permitirá mantener al mínimo los insumos utilizados durante el proceso y esto permitiría abaratar costos de producción.

Por lo tanto, en esta tesis se presentan cuatro capítulos:

En el capítulo 1 se exponen las generalidades del proyecto. Se describe la problemática ambiental que se pretende solucionar al sustituir combustibles fósiles por biocombustibles. Se da un panorama general de los biocombustibles y se

describe el proceso de obtención de biodiésel por medio de la reacción de transesterificación. También se analiza la viabilidad de producir biodiésel a partir de aceite usado y se evalúa la disponibilidad de esta materia prima en la Ciudad de México. Para finalizar este capítulo se describen los antecedentes de diseño de reactores para producir biodiésel y se mencionan los criterios que se deben considerar para diseñarlos.

En el capítulo 2 se presenta la metodología utilizada en la parte experimental para la producción del biodiésel por medio de una reacción de transesterificación homogénea. Se detallan los factores que más afectan en la reacción de transesterificación y se describen los fundamentos de las técnicas de caracterización que se usaron para determinar la composición química del biodiésel a través de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR), espectroscopía de resonancia magnética nuclear de protón (RMN ^1H) y ionización por electrospray (ESI-MS). Adicionalmente, se reportan los métodos para determinar las propiedades fisicoquímicas de transporte, perfil de densidad y viscosidad en un intervalo de temperatura dentro del cual operará el reactor experimental. Este capítulo se concluye haciendo referencia a las normas aplicables al diseño del reactor.

En el capítulo 3 se presentan y discuten los resultados obtenidos de las reacciones de transesterificación realizadas bajo diferentes condiciones de reacción. También se analizan los resultados de las caracterizaciones fisicoquímicas, tanto de las técnicas espectroscópicas de los reactivos usados, como del biodiésel producido. Asimismo, se presentan los datos de la memoria de cálculo del reactor para producir el biodiésel bajo las condiciones óptimas de reacción y su diseño conceptual junto a diversos análisis computacionales. Dichos análisis del espesor del reactor se validaron realizando un análisis de esfuerzo y deformación por medio de *SolidWorks Simulation*. La agitación de la mezcla de reacción se validó con un análisis computacional de la dinámica de fluidos con *SolidWorks Flow Simulation*.

Finalmente, en el capítulo 4 se presentan las conclusiones del proyecto y las perspectivas del trabajo.

1 Generalidades

Según datos del Banco Mundial, en el año 2015 más del 80% del consumo de energía total fue procedente de combustibles fósiles [1].

El transporte, la industria y la generación de electricidad para el sector residencial son los sectores que más energía consumen para su funcionamiento. La energía que consumen proviene de combustibles fósiles, los cuales son fuentes de energía no renovables. Por su composición química, al ser utilizados a través de un proceso de combustión, representan una constante fuente de emisión de contaminantes. Algunos contaminantes que se liberan en la reacción de combustión son monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x), los cuales contribuyen a la generación de los gases de efecto invernadero (GEI) y por tanto al calentamiento global.

En la *Figura 1.1* se presenta la contribución de emisiones de GEI de los sectores energéticos más importantes del México [2]. El transporte contribuye con un 36%, la industria de generación de energía con un 34% y la industria de la manufactura y construcción con un 13%.

Se puede observar que el transporte es el sector que más GEI genera. Esto se debe a que en él se utilizan hidrocarburos principalmente gasolina y diésel, los cuales después de su combustión generan contaminantes ambientales. Es por ello, la importancia de buscar sustitutos parciales o totales a los combustibles utilizados en este sector con la finalidad de que mitigue o disminuya los GEI considerando su ciclo de vida completo, y por ende sean amigables con el medio ambiente.

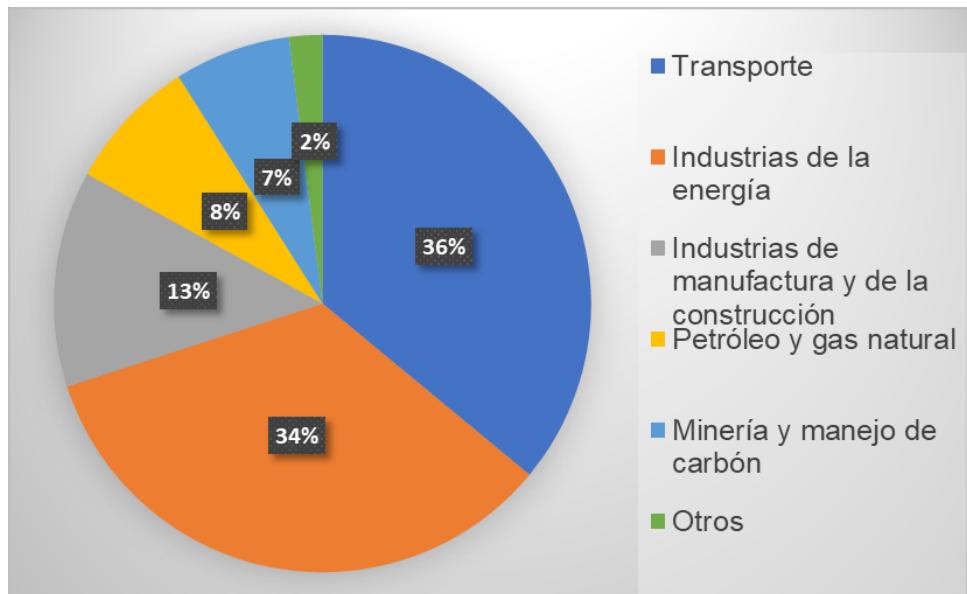


Figura 1.1 Emisiones GEI del sector energía [2].

1.1 Consumo energético en México

En el último Balance de Energía (2016) presentado por el Sistema de Información Energética (SIE) de la Secretaría de Energía (SENER), se reportó que en México la producción de energía primaria (energía que se obtiene directamente de los recursos naturales) utilizada proviene principalmente de los hidrocarburos de petróleo. En la *Tabla 1.1* se puede observar que la producción de energía primaria ha decrecido. En 2016 se produjo 6.62% menos que el reportado en el 2015. Es notoria nuestra dependencia de hidrocarburos, ya que representan más del 86% del total de la producción de energía primaria. Por otro lado, las energías renovables, como otras fuentes de energía, apenas contribuyen con cerca del 8%. Esta situación es alarmante ya que entre los principales puntos de la Reforma Energética aprobada en el 2013 se planteó el desarrollo de energías más amigables con el medio ambiente. Sin embargo, la contribución que se tiene año con año es prácticamente intrascendente.

Tabla 1.1 Producción de energía primaria (Petajoules) [3].

	Variación porcentual		Estructura porcentual
	2015	2016	(%) 2016/2015
Total	8,261.04	7,714.23	-6.62
Carbón	287.69	254.17	-11.65
Hidrocarburos	7,203.85	6,694.85	-7.07
Petróleo crudo	5,067.69	4,826.85	-4.75
Condensados	98.83	88.31	-10.64
Gas natural	2,037.32	1,779.68	-12.65
Nucleoenergía	120.41	109.95	-8.68
Renovables	649.09	655.26	0.95
Hidroenergía	111.21	110.51	-0.63
Geoenergía	134.53	132.59	-1.44
Solar	10.15	11.19	10.18
Energía eólica	31.48	37.36	18.67
Biogás	1.87	1.91	2.38
Biomasa	359.84	361.7	0.51

De las energías primarias se obtienen diferentes tipos de energías a través de diferentes procesos los cuales se denominan energías secundarias. En la *Tabla 1.2* se puede observar la distribución de la producción de diversos combustibles. Las gasolinas, diésel, entre otros representan el 41.52% del total de los combustibles provenientes de refinerías y despuntadoras. Estos combustibles son los más utilizados en los diversos sectores que representan consumos energéticos.

El consumo final de las energías primarias y secundarias corresponde a la energía que se destina al mercado interno o a las actividades productivas del país, y se componen de 2 variables que son el consumo total no energético y energético.

Tabla 1.2 Producción bruta de energía secundaria [3].

	2015	2016	Variación porcentual (%) 2016/2015	Estructura porcentual (%) 2016
Producción bruta	5,286.20	4,866.24	-7.94	100
Coquizadoras y hornos	53.46	41.94	-21.54	0.86
Coque de carbón	47.63	36.28	-23.82	0.75
Otros	5.83	5.66	-2.95	0.12
Refinerías y despuntadoras	2,318.18	2,020.56	-12.84	41.52
Coque de petróleo	86.81	70.19	-19.15	1.44
Gas licuado	39.51	26.73	-32.36	0.55
Gasolinas y naftas	720.52	638.69	-11.36	13.12
Querosenos	102.69	92.61	-9.81	1.9
Diésel	630.95	477.72	-24.29	9.82
Combustóleo	565.91	548.05	-3.16	11.26
Productos no energéticos	62.63	64.13	2.39	1.32
Gas seco	109.14	102.44	-6.14	2.11
Plantas de gas y fraccionadoras	1,797.31	1,650.49	-8.17	33.92
Gas licuado	225.35	215.64	-4.31	4.43
Gasolinas y naftas	134.79	124.9	-7.33	2.57
Productos no energéticos	70.86	95.75	35.12	1.97
Gas seco	1,366.31	1,214.16	-11.14	24.95
Otros	0	0.03	0	0
Electricidad	1,117.26	1,153.24	3.22	23.7
Centrales eléctricas públicas	619.14	628.99	1.59	12.93
Centrales eléctricas PIE	325.77	325.19	-0.18	6.68
Centrales eléctricas autogeneración	172.35	195.82	13.62	4.02
Centrales eléctricas generadoras	0	3.25	0	0.07

El consumo no energético refiere a aquellos derivados del petróleo utilizados como insumos para la producción de diferentes bienes. Por otra parte, el consumo energético total se define como la energía destinada a la combustión en los procesos y actividades económicas, así como la satisfacción de necesidades energéticas en la sociedad [3].

En la *Figura 1.2* se pueden identificar 4 sectores generales en el consumo energético los cuales son: industrial, residencial, agropecuario y transporte. Para poder funcionar en estos sectores se emplean diferentes combustibles, los cuales son principalmente derivados del petróleo [3]. El sector que más energía consume es el del transporte donde el consumo es de 2,484.95 Petajoules (PJ) de energía, que representa el 46.8% del consumo total. Los principales combustibles que se utilizan para el transporte son gasolinas (65%) y diésel (25.6%), los cuales después de que se lleva a cabo la combustión emiten diversos contaminantes a la atmósfera como CO₂ o compuestos orgánicos volátiles (COVs) [3].

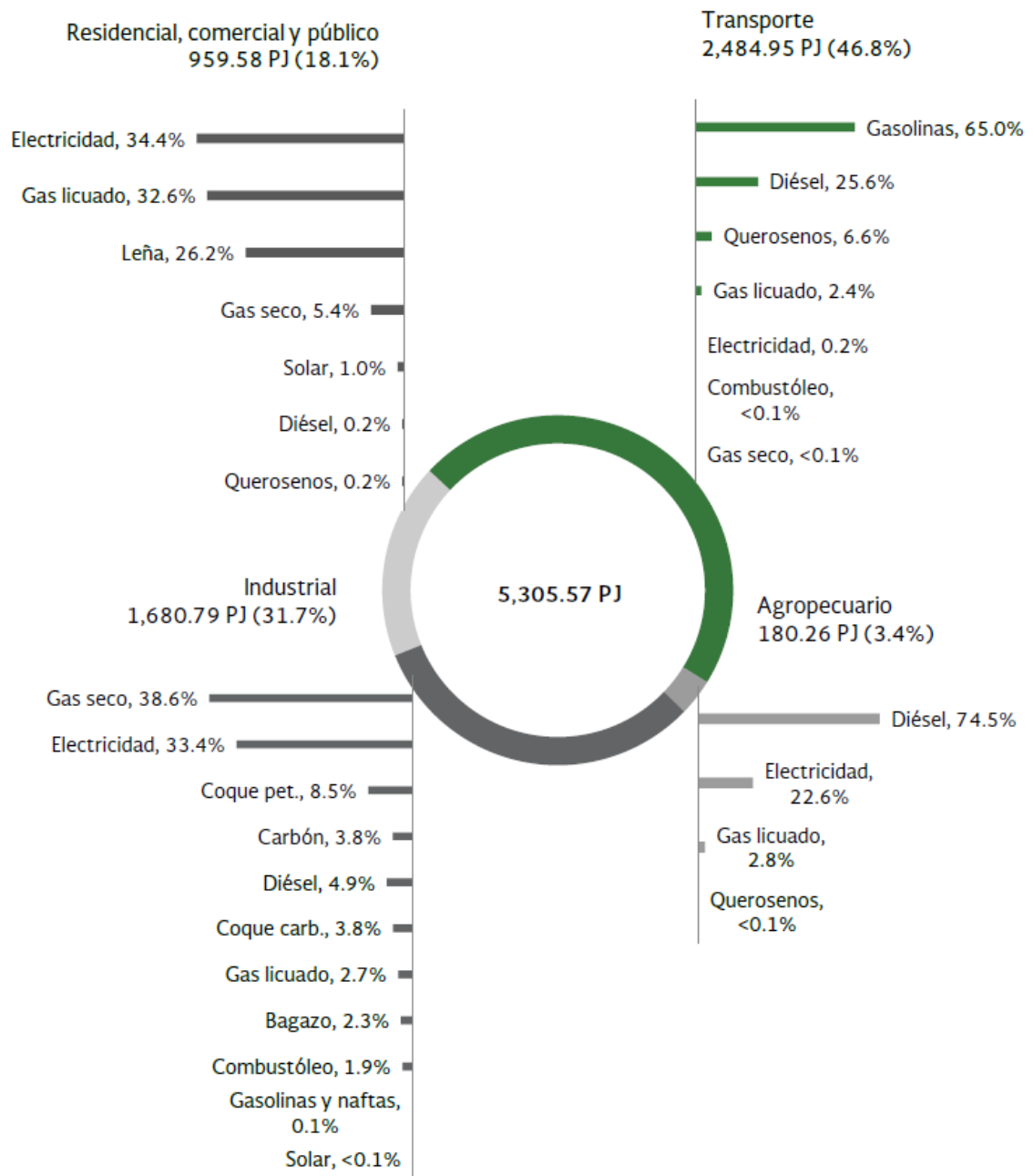


Figura 1.2 Consumo final por sector y energético [3].

En la *Figura 1.3* se puede observar que hasta el 2014 el consumo de energía no superaba su producción, lo que nos convertía en un país energéticamente independiente. Después de ese año el país ha producido menos energía de la que requiere, lo que ha traído consigo el alza de precios de los servicios energéticos y de los combustibles. Como respuesta de esta demanda, existe la necesidad de importar energía para abastecer las necesidades de la nación [3].

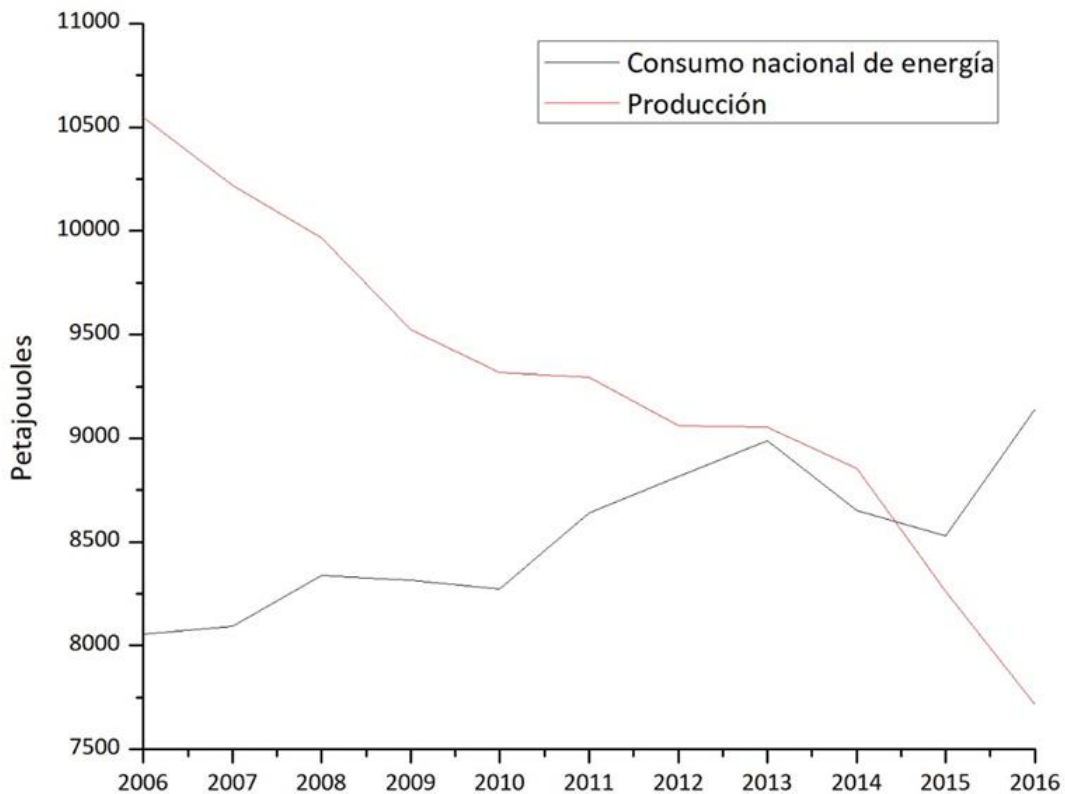


Figura 1.3 Evolución de la producción y el consumo nacional de energía [3].

La dependencia que se tiene con el petróleo y sus derivados no solo trae problemas en la producción de energía, sino también tiene un fuerte impacto en el ambiente ya que el uso de éstos representa una constante emisión de contaminantes y gases de efecto invernadero. Es por ello la importancia de promover el uso y la producción de combustibles más amigables con el medio ambiente como los son los biocombustibles.

1.2 Biocombustibles

Un biocombustible se define como un combustible sólido, líquido o gaseoso que es producido de la biomasa: alcoholes, ésteres, éteres y otros productos químicos (biodiésel, etanol y metano) de fuentes de biomasa (herbáceas y leñosas) plantas, grasas animales, desechos agrícolas y forestales, o residuos sólidos e industriales dentro de un ciclo de carbono activo. En la *Figura 1.4* se puede observar que en la producción y combustión de los biocombustibles se lleva a cabo el ciclo cerrado de CO₂. Estos combustibles se usan para aplicaciones fijas y móviles, es decir electricidad y autotransporte. [4]

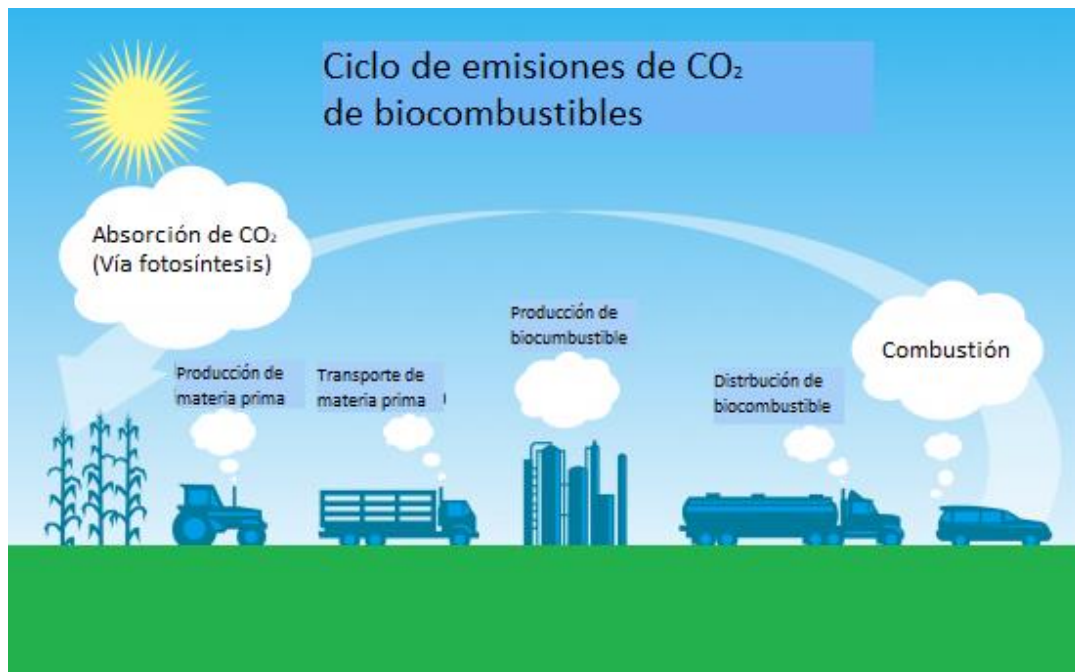


Figura 1.4 Ciclo de emisiones de carbono de biocombustibles. Traducida de imagen original disponible en: <http://www.carsclimate.com>

1.2.1 Clasificación de biocombustibles.

Los biocombustibles suelen clasificarse por la forma en que se obtienen, o dicho de otra manera a partir de la materia prima de la cual se producen. Hasta hoy en día se tienen identificadas 3 generaciones de biocombustibles:

La primera generación se obtiene a partir de las cosechas que pueden destinarse a la alimentación humana o del ganado. Las principales fuentes de esta generación son las grasas animales y los aceites vegetales vírgenes [5].

La segunda generación utiliza como materia prima aceites que no provienen de cosechas que podrían destinarse para la alimentación. Algunos ejemplos son los aceites obtenidos del piñón mexicano (mejor conocido por su nombre científico de *Jatropha curcas L* o simplemente *Jatropha*) y de distintas especies de gramíneas [6]. El aceite usado es un aceite vegetal comestible que se convierte en materia prima para biocombustibles de segunda generación cuando ya ha cumplido con su primer propósito alimenticio [7].

La tercera generación se obtiene de las microalgas, las cuales poseen algunas ventajas con respecto a las fuentes tradicionales. Una de las principales características es que se cultiva en estanques abiertos, por lo cual no se demanda un área de tierra cultivable. Tiene el potencial para un rendimiento de producción de biodiésel hasta 100 veces mayor que el de la soja. Pese a sus grandes ventajas enunciadas anteriormente, uno de los problemas actuales de producir biocombustibles de tercera generación es el costo de producción. Para que esta última alternativa sea viable en el corto plazo se requiere de subsidios gubernamentales [8].

Algunas ventajas y desventajas de cada generación de biocombustibles se enlistan en la *Tabla 1.3 y 1.4*, respectivamente [6]. Cabe destacar, que los biocombustibles de segunda generación son los que actualmente se producen a nivel industrial por las ventajas que tiene en comparación de los biocombustibles de primera y tercera generación.

Tabla 1.3 Ventajas de los biocombustibles por generación [6].

Ventajas		
Primera generación	Segunda generación	Tercera generación
<ul style="list-style-type: none"> • Se parte de cultivos establecidos y disponibles en prácticamente todo el mundo. • Adaptación sencilla a la tecnología ya existente. • Reducción de emisiones de contaminantes a la atmósfera. 	<ul style="list-style-type: none"> • Materia prima no alimentaria. • Puede cultivarse en tierras que no se emplean para cultivos de alimentos. • Innovaciones, tecnologías más amigables con el medio ambiente. • Son generalmente más eficientes amigables con el ambiente que los biocombustibles de primera generación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Son neutrales en las emisiones de carbono durante su ciclo de vida. • Altos rendimientos. • Se pueden producir incluso en laboratorios (en foto-biorreactores) o en instalaciones de círculo cerrado. • En las instalaciones de círculo cerrado, el CO₂ y el agua residual producida, vuelven a ser empleados como nutrientes.

Tabla 1.4 Desventajas de los biocombustibles por generación [6].

Desventajas		
Primera generación	Segunda generación	Tercera generación
<ul style="list-style-type: none"> • Consumos elevados de agua dulce para su producción • Altos costos • Uso intensivo del suelo • Conflictos sociales por destinar alimentos para producir combustibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos elevados derivados de la tecnología que se emplea para producirlos. • Problemas de escalamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones controladas de temperatura. • Aplicación de fósforo, que se está convirtiendo en un recurso escaso y que entraría en conflicto con la fertilización para la producción de alimentos. • Mayores costos de producción.

1.2.2 Biocombustibles por estado de agregación.

Con base en su estado de agregación molecular, los biocombustibles se clasifican en sólidos, líquidos y gaseosos. Algunos ejemplos de esa clasificación se enlistan en la *Tabla 1.5*.

Tabla 1.5 Ejemplos de biocombustibles por su estado de agregación molecular.

Sólidos	Líquidos	Gaseosos
<ul style="list-style-type: none"> • Paja • Leña (sin procesar) • Astillas • Briquetas y pellets • Triturados finos • Carbón vegetal 	<ul style="list-style-type: none"> • Alcoholes • Biohidrocarburos • Aceites vegetales • Ésteres derivados de aceites vegetales (Biodiésel) • Aceites de pirólisis 	<ul style="list-style-type: none"> • Gasógeno • Biogás • Hidrógeno

Para obtener los biocombustibles se usan diferentes procesos (*Tabla 1.6*) que dependerán de la materia prima y el uso energético que tendrán [6]:

Tabla 1.6 Proceso de obtención de biocombustibles [6].

Tipo de proceso	Técnicas	Productos	Aplicaciones
Mecánicos	Astillado Trituración Compactación	Leñas Astillas Briquetas Aserrín	Calefacción Electricidad
Termoquímicos	Pirólisis Gasificación	Carbón Aceites Gasógeno	Calefacción Electricidad Transporte Industria química
Biotecnológicos	Fermentación Digestión anaeróbica	Etanol Biogás	Transporte Industria química Calefacción Electricidad
Extractivos	Extracción fisicoquímica	Aceites Ésteres Hidrocarburos	Transporte Industria química

1.3 Biodiésel

El biodiésel es un biocombustible derivado de los procesos de transesterificación (*Figura 1.5*) de aceites vegetales o grasas animales, con o sin uso previo, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del diésel [9]. En el proceso de obtención de biodiésel se convierten los aceites y grasas en una mezcla de productos que químicamente son llamados ésteres mono-alquílicos de cadena larga. Esta mezcla de metil ésteres se les llama comúnmente FAMES (por sus siglas en inglés: *Fatty Acid Methyl Esters*) [10]. En la catálisis ácida por medio de las reacciones de esterificación y transesterificación se obtienen los FAMES usando comúnmente catalizadores como ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄) o ácido fosfórico (H₃PO₄)[11]. Por otro lado, en la catálisis básica, la reacción de transesterificación se lleva a cabo en presencia de catalizadores como hidróxido de sodio (NaOH)[12] o hidróxido de potasio (KOH)[13]. En la *Figura 1.5* se presenta la reacción general de transesterificación, donde una molécula de triglicérido (aceite) con un alcohol de cadena corta en presencia de un catalizador produce tres moléculas de metil ésteres y la glicerina o glicerol como subproducto.

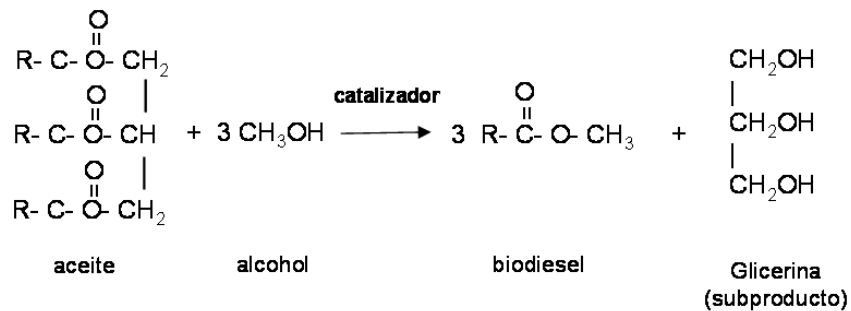


Figura 1.5 Reacción general de transesterificación.

1.3.1 Proceso de obtención de biodiésel

El biodiésel se produce de la reacción de transesterificación como una reacción consecutiva en la cual una molécula de un triglicérido reacciona con una molécula de metanol para producir un diglicérido y formar una molécula de éster metílico (biodiésel). La molécula de diglicérido producida pasa por el mismo proceso de

transformación y se convierte en un monoglicérido y otra molécula de éster metílico. Por último, el monoglicérido nuevamente reaccionará con el alcohol y se tendrá una molécula más de éster metílico, formando una molécula de glicerina como subproducto. Este proceso puede resumirse en la *Figura 1.6*, donde se muestran los pasos elementales y las reacciones asociadas (ver también *Figura 1.5*).

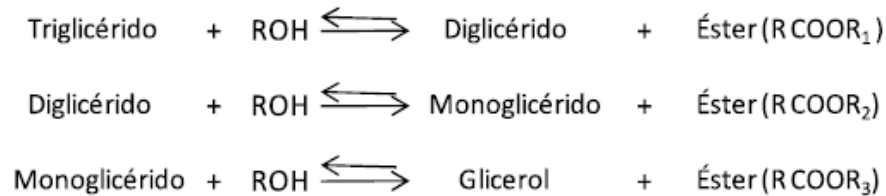


Figura 1.6 Reacciones reversibles consecutivas del proceso de transesterificación.

La reacción se facilita utilizando alcoholes alifáticos primarios como el metanol, etanol o alcoholes secundarios que contengan entre 1 y 8 átomos de carbono. Es preferible utilizar alcoholes de cadena corta, preferentemente metanol, para evitar la formación de fases que impidan la correcta separación de productos y subproductos, lo cual sucede al emplear alcoholes de cadena larga y con estructura ramificada.

Asimismo, es importante mencionar que el alcohol que se utilice debe estar en exceso, ya que al tratarse de una reacción en equilibrio se debe favorecer el desplazamiento de la reacción hacia los productos.

El etanol puede derivarse de productos agrícolas, es renovable y amigable con el medio ambiente. Sin embargo, el metanol se emplea más que el etanol debido a su bajo costo y sus ventajas fisicoquímicas [14].

En la reacción de transesterificación los catalizadores pueden encontrarse en la misma fase (homogéneos) o en fases distintas (heterogéneos), con carácter básico o ácido o ambos. Es importante aclarar que aun cuando se trata de líquidos en la alimentación de los reactores de biodiésel convencionales, éstos forman inicialmente dos fases y posteriormente dan origen incluso a nuevas fases, algunas de ellas muy poco miscibles, por lo cual, el proceso convencional de transesterificación con NaOH o KOH no es homogéneo. Esto es de suma

importancia ya que en el proceso de escalamiento se presentan factores asociados a esta falta de miscibilidad y si no son tomados en cuenta de manera apropiada, pueden ocasionar problemas de conversión al operar los equipos a diferentes escalas.

El proceso de producción de biodiésel que se ha escalado a nivel industrial en distintas regiones y países se realiza con un catalizador homogéneo y metanol, debido al posible escalamiento lineal de estos procesos, a los costos bajos de producción y a los tiempos en los que se obtienen altos rendimiento de biodiésel. Para que el escalado sea lineal, uno de los parámetros clave debe ser el grado de agitación del sistema, el cual debe mantenerse homogéneo en diferentes escalas para poder replicar el funcionamiento de los reactores con pocas variaciones.

Un método alternativo para la producción de biodiesel que ha sido ampliamente estudiado es la utilización de catalizadores heterogéneos, ya que al estar en diferente fase se facilita la recuperación del catalizador sin embargo es difícil el escalamiento debido al alto grado de homogeneidad en la agitación que necesitan estos procesos.

1.3.2 Procesos de catálisis homogéneos.

En los procesos de catálisis homogénea tanto los reactivos como el catalizador se encuentran en una misma fase por lo general en una solución líquida, donde los catalizadores pueden ser ácidos o básicos. El principio en la *catálisis ácida* es la protonación del grupo carbonilo en los triglicéridos y que el alcohol ataque el carbono protonado para crear un tetraedro intermedio. En la *catálisis básica*, el principio es crear un alcóxido nucleofílico del alcohol para atacar la parte electrofílica del grupo carbonilo de los triglicéridos.

La ruptura del triglicérido requiere de tres pasos:

- a) Producir un tetraédrico intermedio como se muestra en el mecanismo de reacción (*Figura 1.7*)
- b) Descomposición del tetraedro intermedio inestable en un ion diglicérido y en un éster de ácido graso.

c) Recuperación del catalizador mediante transferencia de protones.

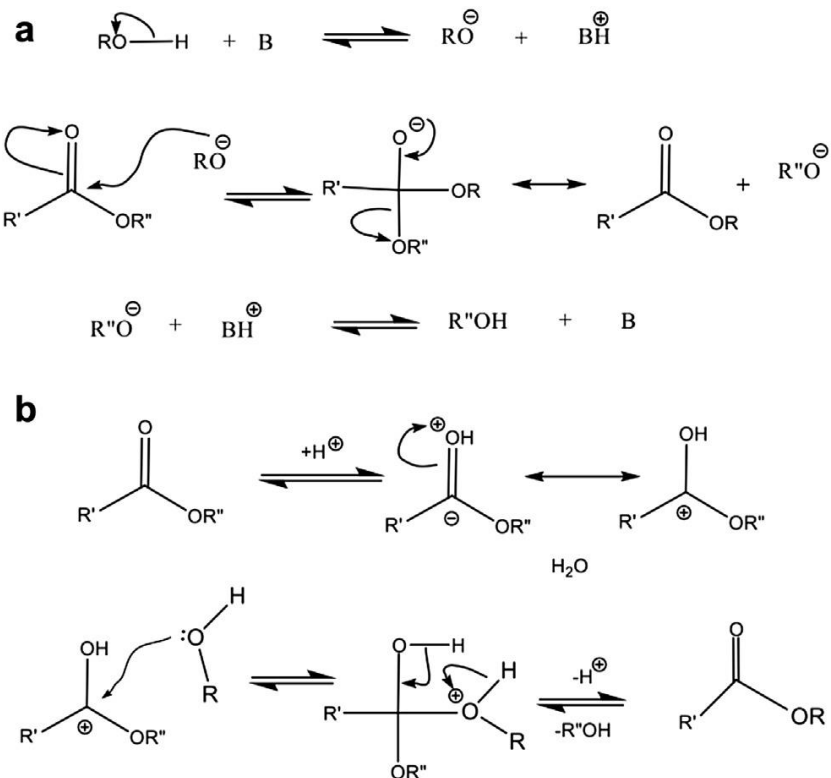


Figura 1.7 a) Mecanismo de reacción de la reacción de transesterificación catalizada por una base. (b) Mecanismo de reacción de la reacción de transesterificación catalizada por ácido.

Estos tres pasos se repiten dos veces para separar cada éster de ácido graso y finalmente se forman tres moléculas de ésteres de ácidos grasos y una molécula de glicerol, asumiendo una conversión total y rendimiento del 100% hacia los FAMES [15].

Ningún proceso a nivel laboratorio e industrial produce conversiones completas con rendimientos del 100%, por lo cual, en la medida que se tenga control sobre los parámetros que afectan el rendimiento del biodiésel, el sistema podrá diseñarse de tal manera que las conversiones y rendimientos estén cercanas a la ideal, y facilitar las subsiguientes etapas que son las de separación y purificación para alcanzar la calidad deseable o requerida.

1.3.2.1 Catálisis acida homogénea.

Una de las principales ventajas de utilizar los catalizadores ácidos es su baja susceptibilidad a la presencia de ácidos grasos libres (*FFA*), por lo que puede ser buena opción si se utiliza materia prima con altos contenidos de *FFA*. Los catalizadores ácidos más utilizados incluyen ácido sulfúrico, clorhídrico, sulfónico y fosfórico. Desde el punto de vista químico, aquellos ácidos grasos ya presentes en las cargas se esterifican, en lugar de transesterificar. En una etapa posterior se podría continuar con el proceso, aunque se ha reportado que es preferible solo esterificar los ácidos grasos libres y posteriormente utilizar los catalizadores básicos para transesterificar el resto de los triglicéridos, dada la rapidez con la que ocurre este último proceso en comparación con el proceso en condiciones ácidas.

Las propiedades finales que tendrá el biodiésel dependen en gran medida de los ácidos grasos presentes en la materia prima y en consecuencia de los ésteres metílicos que se obtienen en el producto. Esto es de gran importancia, ya que se ha observado que la pureza del biodiesel es mayor cuando se produce con aceites vírgenes en comparación con la pureza que se obtiene al utilizar aceites usados de cocina. Esto se debe a las diferentes especies que se forman cuando se utiliza en la cocción de diferentes insumos alimenticios y que al final aparece en la mezcla de reacción.

1.3.2.2 Catálisis básica homogénea.

La catálisis homogénea es la más utilizada a nivel laboratorio, a nivel planta piloto y a escala industrial. Este proceso es catalizado por hidróxidos y alcóxidos de metales alcalinos. Entre los más comunes se encuentra el hidróxido de potasio (KOH) [16] y el hidróxido de sodio (NaOH) [17].

La producción de estos catalizadores es de bajo costo y con ellos se pueden obtener altos rendimientos de la reacción cuando se utiliza materia prima (aceites vegetales) con bajo contenido de ácidos grasos libres. Otra ventaja que presentan son los tiempos cortos de reacción que se necesitan para obtener rendimientos altos hacia los ésteres metílicos correspondientes [18].

Algunas desventajas de utilizar estos catalizadores básicos es que la separación de del glicerol de la mezcla de ésteres metílicos requiere mucha energía. Adicionalmente, se producen aguas residuales, las cuales requieren de tratamientos posteriores para su reutilización. También puede ocurrir la saponificación debido a la reacción de competencia entre los ácidos grasos libres y el catalizador. Otras desventajas son el alto nivel de corrosión que podría provocar, así como la cadena de contaminación durante la producción de los catalizadores.

La catálisis homogénea básica es especialmente sensible al contenido de agua. Se ha demostrado que en cantidades tan pequeñas como 0.1 % peso de agua en la mezcla de reacción afecta los rendimientos de ésteres en la transesterificación de aceite vegetal con metanol; la reacción queda casi completamente inhibida con un 5 % peso de agua o porcentajes superiores.

1.3.3 Procesos de catálisis heterogéneos.

En los procesos de catálisis heterogénea los reactivos y el catalizador se encuentran en diferentes fases; los reactivos son líquidos o gases y el catalizador es un sólido. Los catalizadores usualmente son ácidos o básicos, aunque también puede haber bifuncionales (con carácter doble). En la actualidad se busca que los catalizadores heterogéneos sean sustitutos de los homogéneos, ya que pueden resolver uno de los principales problemas que se tiene con los homogéneos: la separación. Esto eliminaría la generación de aguas residuales las cuales tienen efectos negativos en los sistemas de drenaje y en los reactores químicos que se utilizan. Asimismo, la calidad del biocombustible podría requerir menos energía o etapas de separación para retirar los catalizadores en los productos y subproductos. La separación del catalizador sólido es más sencilla que el catalizador disuelto en fase fluida y los primeros pueden reutilizarse.

Una de desventaja importante de utilizar catalizadores heterogéneos es que el escalamiento no se puede llevar a niveles mayores que el laboratorio sin que se afecte el rendimiento apreciablemente.

1.3.4 Propiedades del biodiésel

Las propiedades que tiene el biodiésel se definen principalmente por la proporción en la que se encuentran los ésteres metílicos y esta proporción dependerá de la materia prima de la cual se producirá el biodiésel. La presencia de contaminantes (subproductos de la reacción o productos no deseados) y de contaminantes menores (aquellos que se encuentran originalmente en la materia prima) tienen efecto en las propiedades finales del biodiésel.

Las principales propiedades fisicoquímicas del biodiésel se describirán a continuación.

1.3.4.1 Punto de inflamabilidad

El punto de inflamabilidad es la temperatura más baja a presión atmosférica en la que puede formarse una mezcla inflamable en contacto con un comburente (normalmente el oxígeno del aire), de modo que arderá si se le aplica una fuente de calor a suficiente temperatura y mantendrá la llama tras retirar la fuente de calor.

No tiene efecto en el rendimiento del motor, que está involucrado directamente con los requisitos legales y cuestiones de seguridad involucradas en el manejo y almacenamiento del combustible.

1.3.4.2 Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad de un fluido. Representa un coeficiente que da la medida de qué tan fácil es deformar el fluido que la posee bajo el efecto de un esfuerzo cortante.

La viscosidad del biodiésel generalmente es mucho menor que la del aceite a cualquier temperatura y es comparable con la del diésel convencional, por lo que se puede utilizar en los motores en cualquier proporción con el diésel fósil.

Debido a algunos grupos funcionales que están presentes en la mezcla de metil ésteres, es necesario contar con los datos experimentales de la viscosidad para asegurar la calidad del biocombustible.

1.3.4.3 Número de cetano

El número de cetano es un índice la calidad del biodiésel y del diésel que brinda información de la volatilidad y facilidad de inflamación de estos combustibles. Mientras menor tiempo se requiera para iniciar la combustión mayor es el número de cetano y por lo tanto será un mejor combustible. Dicho número incrementa si la longitud de la cadena es mayor y presenta pocas insaturaciones.

Conociendo la estructura química de las moléculas que forma el biodiésel es posible anticipar su número de cetano, el cual debe ser mayor de 47.

1.3.4.4 Estabilidad oxidativa

Los ácidos grasos insaturados tienen una mayor propensión a sufrir reacciones de oxidación que los ácidos grasos saturados. Entre menor sea el contenido de ácidos grasos poliinsaturados de la materia prima, mejor será la estabilidad del biodiésel a la oxidación. El grupo alquilo unido al éster también influye en la estabilidad oxidativa del éster. Los grupos más largos tienden a mejorar la estabilidad oxidativa.

En la *Tabla 1.7* se presenta la comparación de algunas propiedades del diésel y el biodiésel de acuerdo a las normas de la American Society for Testing and Materials D975 para el diésel [19] y D6751 para el biodiésel [20].

Tabla 1.7 Comparación de propiedades del diésel y el biodiésel.

Propiedad	Diésel	Biodiésel	Unidades
Norma	ASTM D975	ASTM D6751	
Agua (vol. máximo)	0.05	0.05	%
Punto de inflamación (mínimo)	38	93	°C
Punto de ebullición (mínimo)	288	360	°C
Azufre (máximo)	0.0015	0.0015	%
Número de cetano (mínimo)	40	47	-
Viscosidad cinemática	1.3-2.4	1.9-6.0	mm ² /s
Corrosión de tira de cobre (máximo)	No. 3	No. 3	-

1.3.5 Producción de biodiésel a nivel mundial.

Después del etanol, el biodiésel es el biocombustible más producido a nivel mundial. Su producción se incrementa año con año ya que la demanda de energéticos se incrementa, y en los países líderes en este rubro se promueve el uso de combustibles verdes. En la *Tabla 1.8* se muestra la producción por región y por país. Los países que más contribuyen son Estados Unidos, Brasil, Alemania, Francia y Argentina [21].

Tabla 1.8 Producción anual de biodiésel.

	2016	2017	2018
OCDE América	109	111	126
Estados Unidos	102	102	117
Otros	7	8	9
OCDE Europa	241	237	231
Francia	45	40	40
Alemania	60	60	53
Italia	11	14	18
España	26	23	19
Otros	99	100	102
OCDE Asia-Oceanía	11	11	16
Australia	1	1	1
Otros	10	10	15
Total OCDE	362	359	373
Total no OCDE	265	274	308
Brasil	65	74	88
Argentina	51	50	51
Otros	148	149	169
Total biodiésel	627	632	681

1.3.6 Producción de biodiésel en México

Para el 2016 en México, las iniciativas legislativas se centran en el diseño y el fortalecimiento de la política pública para fomentar la producción y uso de biocombustibles e introducirlo en la gama de productos que diversifiquen la matriz energética del país. En nuestro país existen acuerdos, convenios, leyes y programas energéticos para la generación de los biocombustibles como son la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (2008), la Ley general del cambio climático (2008), la Ley de Transición Energética (2015) y el Plan Nacional de Desarrollo (Plan Verde) 2013-2018 [22].

Actualmente, en México el biodiésel puede producirse a partir de los siguientes insumos: a) aceites usados y grasas y b) aceites vegetales crudos. Sin embargo, la única cadena de valor que opera es la de aceites usados y grasas, ya que la producción a partir de aceites crudos no se ha podido sostener debido a costos no competitivos por diferentes factores.

Existen factores que influyen directamente para tener una producción de biodiésel; estos son los productores de materia prima, los recolectores y la elaboración del biodiésel. En la *Tabla 1.9* se describe cada uno de estos factores dependiendo del insumo que se parte y la importancia de estos en la producción de biodiésel [23].

Tabla 1.9 Factores que intervienen en las cadenas de producción a partir de aceites usados y grasas [23].

Insumo	Aceites usados	Grasas animales
Factores que intervienen en la cadena de producción	<ul style="list-style-type: none"> Productores de materia prima: Usuarios de aceites para la cocina - sus prácticas de uso y de separación de aceites usados definen los niveles de recuperación posibles y la calidad de la materia prima Recolectores: Su nivel de organización y eficiencia impactan en los costos finales y la eficacia de la recolección; Acopiadores y procesadores: acumulan y refinan los aceites usados Elaboradores de biodiésel: se especializan en la conversión de aceites a biodiésel, en la disposición final de los coproductos y residuos (glicerina y efluentes finales), y en la distribución comercial del biodiésel. 	<ul style="list-style-type: none"> Productores de materias primas: Rastros, graserías, procesadores de derivados de cerdo Recolectores de grasas de carnicería Elaboradores de biodiésel.

En México son pocas las plantas de producción de biodiésel instaladas y las más destacadas se enlistan en la *Tabla 1.10* [23].

Tabla 1.10 Plantas comerciales de biodiésel [23].

Nuevas plantas con apoyos de SAGARPA				Capacidad	Apoyo	Aporte	Total	Insumo	
Programa	Año	Estado	Beneficiario	m ³ /a	MDP				\$/m ³
Bioeconomía	2010	Pue	GRIMA Biodiésel	90.0	1.8	4.2	6.0	Aceite usado	66,667.0
PEF	2011	Pue	PROBIORAM	950.0	2.8	6.6	9.4	Grasa Animal	9,895.0
PEF	2014	BC	ENRIMEX	74.0	10.5	10.7	21.2	Higuerilla	286,486.0
PEF	2015	Dur	Coop. Agr. Luz Michell	1,440.0	1.5	1.9	3.4	Grasa Animal	2,361.0
PEF	2015	Mex	BIORECEN	628.0	7.7	3.1	10.8	Grasa Animal	17,197.0
PEF	2015	Oax	RICINOMEX	1,000.0	0.8	0.8	1.6	Higuerilla	1,600.0
TOTAL				4,182.0	25.1	27.3	52.4		

Otras plantas han tenido problemas para producir biodiésel y han tenido que ser cerradas. Una de las causas relacionadas con el cierre de plantas de biodiésel es el uso de semillas oleaginosas como lo son la *Jatropha curcas L.*, ya que son producidas en periodos específicos del año lo que conlleva a una producción discontinua. Esto se debe a que, si bien los cuidados que necesita planta no son tan estrictos, se necesita de un clima adecuado, de lo contrario se puede alargar el periodo del desarrollo de la semilla [24]. Algunas plantas de producción de biodiésel que han cesado operaciones por este problema son:

1. En Cadereyta, Nuevo León, establecida en 2005 por el Grupo Energéticos con participación del ITESM Campus Monterrey, utilizaba grasas animales (sebo de res y grasa de pollo) y aceites vegetales de desecho. Su capacidad instalada era de 18,000 m³/año. Dejó de operar en 2011.

2. En Lázaro Cárdenas, Michoacán, se instaló una planta anexa a una fábrica de aceite vegetal, con capacidad de 9,000 m³/año. Fue inaugurada en 2007 y debía utilizar piñón mexicano e higuierilla; por falta de producción de esos cultivos, se cerró en 2008.
3. En 2010, el Instituto de Bioenergéticos de Chiapas instaló una planta de 10,000 m³/año. Utilizaría *Jatropha curcas L.*, pero no hubo producción de semillas suficiente. Cerró operaciones en 2011.

Otra problemática es la falta de diseños racionales de plantas de biodiésel, ya que generalmente se importan las plantas de países que procesan aceites con calidades superiores al aceite usado de cocina, por lo cual una vez operando, la calidad obtenida no corresponde con la adecuada.

1.4 Problemática del aceite usado.

Uno de los principales problemas de aceite usado es el manejo que se tiene con él. Una práctica muy común es tirarlo al sistema de drenaje, lo cual promueve la contaminación de agua ya que, como sustancia hidrófoba y de menor densidad, provoca un cambio estético y aporta contaminante (materia orgánica) al agua. Lo anterior afecta el intercambio gaseoso. Una vez que el aceite entra en el medio acuoso crea una barrera en la superficie reduciendo la oxigenación a través de la interface aire-agua y la actividad fotosintética, ya que absorbe la radiación solar, disminuyendo así la capacidad del agua de almacenar oxígeno disuelto.

Un litro de aceite puro contamina aproximadamente 1000 litros de agua. Esta situación se agrava cuando el aceite ya fue utilizado en alguna actividad productiva por lo explicado en la sección anterior. En 2013 Gonzales Iñigo y Gonzales José del consorcio de aguas Bilbao Bizkaia en España, realizaron un ejercicio teórico para calcular los litros de agua que contaminaría 1 litro de aceite usado y determinaron que son aproximadamente 40,000 litros de agua y que esto es el equivalente al consumo anual de una persona en su hogar [25].

Otro problema que es importante mencionar es que al verter aceites al drenaje provoca que, en unión con restos de detergentes y jabones de uso doméstico, se formen “bolas de grasa”, las cuales generan atascos en el sistema de tuberías de

desagüe y, además, dificultan el intercambio gaseoso entre el agua residual y aire en contacto con ella, aumentando la anoxia del agua.

1.4.1 El aceite usado en la Ciudad de México

La Ciudad de México es una de las urbes más pobladas del mundo y en ella el consumo de aceite vegetal y grasas animales es considerablemente alto, comparado con otras ciudades. Después de ser utilizados, una parte de los aceites o grasas se vuelve un desperdicio y trae consigo los problemas que se describieron en la sección anterior. Sin embargo, este desperdicio puede ser utilizado como materia prima en la producción de biodiésel y las cantidades que se podrían producir contribuirían en la matriz energética del país [26].

El potencial del aceite usado como materia prima para la producción de biodiésel se refleja en la tasa de recuperación de éste, es decir cuánto aceite se puede destinar a la producción del biocombustible después que el mismo ha cumplido su propósito alimenticio.

Lo primero que se debe conocer es el aceite que se vende en la ciudad. Esta información se puede aproximar con la *Ecuación 1* [26]

$$AV_{Ciudad} = \frac{AV_{País}}{Pob_{País}} * Pob_{Ciudad} \quad 1$$

Donde:

AV_{Ciudad} : Aceite vendido en una ciudad.

$AV_{País}$: Aceite vendido en un país.

Pob_{Ciudad} : Población de una ciudad.

$Pob_{País}$: Población de un país.

En la *Tabla 1.11* se muestran datos de la venta anual de aceite y grasas comestibles en el país del 2015 al 2017 y con proyecciones hasta el 2020 [27].

Tabla 1.11 Ventas anuales de aceite comestible [28].

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Venta anual (Ton)	974,000	989,000	1,008,000	1,026,000	1,044,000	1,062,000

La población en el país y en la ciudad de México se pueden observar en la *Tabla 1.12*; los datos del 2018 al 2020 son aproximaciones [29].

Tabla 1.12 Población de México y de la Ciudad de México [13].

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Población México	114,255,555	115,682,868	117,053,750	118,395,054	119,713,203	121,005,815
Población Ciudad de México	8,944,599	8,928,400	8,911,665	8,893,742	8,874,724	8,854,600

De los datos de la *Tabla 1.13* y de la *Tabla 1.14* y con la *Ecuación 1.1* se puede estimar el aceite vendido en la Ciudad de México.

Tabla 1.13 Predicción de ventas Anuales de aceite en la Ciudad de México.

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020
AV_{Ciudad}	76,250.5	76,331.0	76,742.2	77,072.3	77,395.1	77,711.8

Una vez que el aceite vendido ha sido utilizado, solo una parte del originalmente usado podrá ser emplearse para producir biodiésel. El porcentaje de aceite que al final puede utilizarse para producir biodiésel es comúnmente llamado tasa de recuperación. Ésta varía dependiendo del lugar donde se obtiene el aceite. Por ejemplo en Irlanda se determinó una tasa de recuperación de 20.8% [30], en Malasia se reportó una recuperación del 30% [31] y en un caso de estudio que se realizó en

cafeterías de la Universidad Nacional Autónoma de México se determinó que se puede recuperar hasta un 45% de aceite [32].

Para aproximar el aceite usado con potencial para producir biodiésel en la Ciudad de México se utilizará una tasa de recuperación del 30%, ya que para obtener mayores tasas se necesitan medidas más estrictas en el uso de los aceites.

En la *Tabla 1.14* se puede observar la disponibilidad del aceite usado que existiría en los próximos años, tomando como referencia los datos históricos y la *Ecuación 1*.

Tabla 1.14 Aceite usado disponible en la Ciudad de México con potencial para producir biodiésel.

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<i>AV_{Ciudad}</i>	76,250.47	76,330.99	76,742.17	77,072.30	77,395.07	77,711.85
Tasa de recuperación	30%	30%	30%	30%	30%	30%
Aceite usado disponible	22,875.14	22,899.30	23,022.65	23,121.69	23,218.52	23,313.55

Uno de los grandes problemas de tener estas cantidades de aceite usado en la ciudad es su recaudación. Para facilitar esta tarea diversas empresas privadas e instituciones públicas se encargan de recuperarlo. El directorio de centros de acopio de residuos urbanos de la Ciudad de México se muestra en la *Tabla 1.15*. En estos centros se garantiza un manejo adecuado de los desperdicios y están autorizados por el Gobierno de la Ciudad.

Tabla 1.15 Directorio de centros de acopio de residuos urbanos en la CDMX (aceite comestible usado)

Empresa	Dirección	Tipo de residuo
Biofuels de México S. A. de C. V.	Aniceto Ortega 817, depto. D, col. del Valle, del. Benito Juárez.	Aceite vegetal usado. Servicio a domicilio.
Jabón y grasa S.A. de C. V.	Cda. Rafael Ángel Peña 247-4, col. Tránsito, del. Cuauhtémoc. Tel. 4195 0148, 5788 8614.	Grasas, aceites vegetales y animales.
REOIL Internacional S. de R. L. de C. V.	Norte 35 núm. 1012-A, col. Industrial Vallejo, del. Azcapotzalco. Tel. 5587 0033,	Aceite usado de cocina.
Biokeizer	Calle 14 núm. 185, col. Progreso Nacional, del. Gustavo A. Madero.	Aceite vegetal usado.
Industrias Asturcon S. A. de C. V.	Paseo de los Tamarindos núm. 400, col. Bosques de las Lomas, del. Cuajimalpa.	Aceite vegetal usado.
Mercado de Trueque Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX	Programa mensual e itinerante en diferentes puntos de la CDMX. Tel. 53458187 y 88	Aceite vegetal usado.
Technology Comercer & Solutions, S.A. de C.V.*	Retorno 13 de Jesús Galindo y Villa No. 14, col. Jardín Balbuena, del. Venustiano Carranza. Tel. 55714411. gcomercial@sanitech.mx	Recolección y transporte de aceites y grasas usadas de origen vegetal y animal

1.4.2 El biodiésel a partir de aceite vegetal usado.

La disponibilidad del aceite usado en la CDMX es quizás una de las razones principales por la que es una buena opción como materia prima para producir biodiésel, y al utilizarlo con este fin se le estará dando un valor agregado a una materia que es considerada basura y al mismo tiempo se disminuye el impacto al medio ambiente que conlleva tirarlo.

Un punto importante al producir biodiésel son los rendimientos que se tienen, es decir cuánto aceite o grasa se convierte en ésteres metílicos.

Si se comparan los rendimientos que se obtienen al utilizar aceites puros y aceites usados es posible percatarse que se tienen prácticamente los mismos rendimientos.

Tabla 1.16 Produccion de biodiésel con diferentes materias primas.

Materia Prima	MeOH:Aceite	% Catalizador	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Rendimiento (%)	Referencia
Aceite usado	6:1	0.6 (NaOH)	90	90	96.8%	[17]
Aceite de palma	12:1	1.0 (NaOH)	65	120	99.21%	[33]

1.5 Antecedentes de diseño de reactores para la producción de biodiésel

En México existen pocas empresas que diseñan y fabrican reactores para producir biodiésel.

Una de ellas es RENOV la cual asegura que el biodiésel que se obtiene al utilizar sus equipos para producir el biocombustible se cumple con la norma ASTM D6751-08 [34]. En la información que se proporciona en su sitio web no se especifica el cumplimiento de alguna norma de diseño para su reactor.

En el país no se han identificado reactores para producir biodiésel que apliquen normas de ningún tipo para su diseño. El aplicar normas como las del código ASME VIII, asegura una mayor eficiencia del proceso lo cual es un punto primordial al estar produciendo bicomcombustibles los cuales no solo deben ser amigables con el medio ambiente cuando se utilizan como sustitutos de derivados del petróleo, si no también deben ser producidos con el menor impacto posible hacia el medio ambiente.

1.5.1 Criterios de selección de un reactor.






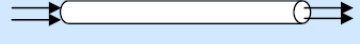


Un reactor se define como el dispositivo donde ocurre un cambio en la composición debido a la reacción química [35].

Los reactores se clasifican de acuerdo con los siguientes criterios [36]:

- Tipo de flujo: ideal al que tiende (mezcla perfecta, flujo en pistón) o real.
- Número de fases en contacto: homogénea (1 fase), heterogénea (2 fases = bifásica, 3 fases = trifásica, o multifásica)
- Modo de operación: continuo, semicontinuo, discontinuo.
- Evolución en el tiempo: régimen estacionario y régimen no estacionario
- Tipo de reacción química: catalítica, bioquímica, térmica.

En la *Tabla 1.7* se presenta de manera esquemática la clasificación general de los reactores. Esta Tabla permite identificar los criterios de selección de un reactor y en ella se puede uno basar para decidirse por el tipo de reactor que se utilizará.

Tabla 1.17 Criterios para la clasificación de reactores [36]

Criterios	Tipos de reactor	Ejemplos industriales
Modo de tratamiento de la carga	Cerrado (sin intercambio de materia con el exterior) 	Química fina, polimerización en discontinuo
	Semicerrado (una parte de la carga es añadida o extraída en el curso de la reacción) 	Cloración orgánica de "pequeños productos"
	Abierto (la carga circula dentro del reactor) 	Intermediarios o productos básicos petroquímicos de gran tonelaje
Evolución en el tiempo	Régimen no estacionario	Operaciones discontinuas, puestas en marcha
	Régimen estacionario	Marcha continua de los reactores abiertos
Modelo de flujo ideal	Reactor prácticamente agitado (composición uniforme) 	Sulfonaciones, nitraciones, polimerizaciones
	Reactor de circulación en pistón (progresión en bloque) 	Reactores catalíticos en lecho fijo, reactores homogéneos en circulación turbulenta.
Puesta en contacto de las fases *	Co-corriente 	Hidrodesulfuración de las fracciones petrolíferas
	Contra-corriente 	Absorción y reacción química gas-líquido
	Corrientes cruzadas 	Combustión del carbón sobre soporte transportador

Una vez escogido el reactor se debe realizar el diseño de éste. Los parámetros principales dependerán del tipo de reactor, así como del tipo de reacción que se tendrá. Los parámetros básicos que tendrá el reactor para su diseño pueden ser:

- Volumen de reacción (reacciones homogéneas)
- Masa de catalizador (reacciones heterogéneas)
- Altura del recipiente y su relación con su diámetro
- Condiciones de presión y temperatura a las cuales se opera
- Naturaleza del fluido y sólidos si existen.

Por último es necesario realizar la ingeniería de detalle que abarca desde aspectos de distribución de volumen (relación altura diámetro) atendiendo a las pérdidas de carga permisibles, el sistema de agitación y también el cálculo del área de transmisión de calor necesaria [36].

La reacción de transesterificación necesita de un reactor en el que el modo de tratamiento de carga se considera cerrado, el régimen será estacionario y requiere de un sistema de agitación con un grado de homogeneidad alto. El reactor que proporciona estos requerimientos es el de tipo *Batch*; algunas de sus características son:

- Operación discontinua.
- Generalmente mejor para pequeños volúmenes de producción (por ejemplo 1000 litros).
- Flexible en operaciones multiproducto.
- Generalmente requiere un capital relativamente bajo.
- Fácil de parar y limpiar.
- Se puede realizar reacciones homogéneas o pseudo homogéneas fácilmente.
- Homogeneidad en la agitación.

1.6 Hipótesis

Basándose en información experimental a nivel laboratorio, correlaciones de la literatura, modelo cinético, normas ASTM y ASME aplicables, es posible dimensionar un reactor de transesterificación de aceites gastados para producir biodiésel a mayor escala que la de laboratorio.

1.7 Objetivos

Objetivo general:

Determinar las propiedades termodinámicas, de transporte y parámetros cinéticos involucrados en el proceso de transesterificación para el diseño mecánico del reactor de transesterificación de aceites usados para producir biodiésel.

Objetivos particulares:

- Obtener biodiésel a partir de la reacción de transesterificación para determinar los parámetros fisicoquímicos del producto.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas de la mezcla de reacción para utilizarlos en la predicción del comportamiento del fluido.
- Obtener los parámetros de la cinética de la reacción para el diseño cinético de la reacción.
- Calcular la potencia de agitación del sistema necesaria para mantener la operación del reactor similar al de baja escala.
- Seleccionar los materiales y espesores de construcción del reactor para proponer su diseño mecánico a escala piloto.

2 Metodología

En este capítulo se describe el procedimiento experimental que se llevará a cabo para determinar las condiciones de la reacción de transesterificación, así como los materiales, reactivos y equipos que serán utilizados en el mismo. También se describen las caracterizaciones que se realizarán a los reactivos y productos para determinar sus propiedades fisicoquímicas. Asimismo, se mencionan las normas que pueden ser aplicadas para el diseño conceptual de un reactor para la producción de biodiésel y el uso de software necesario (*Solid Works*) para simular el desempeño del reactor propuesto.

2.1 Recolección de aceite usado

La materia prima que se utilizará para obtener el biodiésel será proporcionada por la cafetería de UPIITA-IPN y diferentes escuelas del Instituto Politécnico Nacional. El aceite recolectado ya ha sido utilizado previamente para la preparación de alimentos. Esto evita que se deseche aceite usado a mantos acuíferos por un lado y se da un valor agregado a un desecho urbano, así como a la realización de este proyecto. También, se estará promoviendo un mejor manejo de este desperdicio el cual, como previamente se explicó, representa un problema ambiental de gran importancia.

Las cafeterías no solo proporcionan el aceite, sino también fungen como centros de acopio donde cualquier persona pueda donar aceite que ya no pueda ser utilizado con fines alimentarios. Esta información fue difundida en posters como los que se muestran en la *Figura 2.1* los cuales fueron desplegados en diversos puntos del IPN. Como recomendaciones que agilizarán la producción de biodiésel se debe entregar el aceite libre de residuos sólidos y que no contenga agua.

Esta campaña es impulsada por el IPN, está sustentada por la “Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México” entorno al programa llamado “Basura cero”, el cual busca tratar la basura que se genera en la misma, para valorizarla energéticamente.

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

BIODIESEL
a partir de
aceite comestible residual

¡PARTICIPA!
Promotor
Sustentable

Dona el aceite comestible usado con el que preparaste tus alimentos.

Junta el aceite que esté libre de agua y/o restos de comida.

LIÉVALO A LOS CENTROS DE ACOPIO UBICADOS EN LAS CAFETERÍAS DE LAS UNIDADES DEL IPN.
www.cmpl.ipn.mx

El aceite será transformado mediante tecnología IPN

A partir del aceite comestible residual se obtendrá BIODIESEL

1 Litro de aceite comestible residual

CONTAMINA
1000 Litros de agua **X**

1 GENERA
1 Litro de BIODIESEL **✓**

Av. Acueducto s/n, Col. BARRIO LA LAGUNA TICOMÁN,
Deleg. GUSTAVO A. MADERO, Ciudad de México C.P. 07340
Tel. 5729 6000 Exts. 52602 y 52621
www.cmpl.ipn.mx

Secretaría de Servicios Educativos del IPN

ASUMA IPN Capital-IPN CMP CD MX

Figura 2.1 Poster de la campaña "Biodiésel a partir de aceite comestible residual"

2.2 Pretratamiento de aceite usado

Uno de los principales inconvenientes de utilizar aceite usado para la producción de biodiésel es la cantidad de residuos que presenta, tanto líquidos como sólidos, por ello antes de poder utilizarlo como materia prima es necesario realizarle un pretratamiento que incluye la separación de sólidos y la eliminación de agua.

La filtración de partículas sólidas se lleva a cabo en 2 etapas. En la primera se retiran las partículas más grandes utilizando coladeras. Después en un recipiente se coloca una tela fina o papel filtro en el cual se vierte el aceite para poder retener las partículas más pequeñas. Al final se tendrá un aceite con un evidente cambio de coloración.



Figura 2.2 Filtración de partículas sólidas.

Para eliminar algún rastro de agua en el aceite es recomendable calentarlo por encima del punto de ebullición del agua (100°C a nivel de mar). Este aumento de temperatura no contribuirá con la degradación de las moléculas del aceite ya que ésta comienza a temperaturas mayores a los 160°C en la mayoría de los aceites vegetales.

2.3 Reacción de transesterificación

Primero, se inicia con la elección del sistema catalítico; en este trabajo se usó la catálisis básica homogénea para obtener el biodiésel con la finalidad de favorecer el escalamiento lineal. El catalizador empleado fue el hidróxido de sodio (NaOH). El aceite precursor fue el recolectado de las cafeterías del IPN y restaurantes cercanos a sus unidades bajo el programa “*Basura Cero*” del gobierno de la Ciudad de México.

La finalidad de realizar la reacción de transesterificación a nivel laboratorio es para obtener los valores de los parámetros que más influencia tienen y con los que se obtendrán los mejores rendimientos de biodiésel.

Una de las preocupaciones del proyecto es producir biodiésel generando la menor cantidad de desperdicios posible. Para ello es necesario utilizar menores concentraciones de reactivos principalmente de aquellos que puedan ser

perjudiciales con el medio ambiente. Así se tendrá una producción más limpia y se estarán evitando gastos innecesarios de materia prima.

Los reactivos utilizados para síntesis de biodiésel se enlistan en la *Tabla 2.1*.

Tabla 2.1 Reactivos utilizados en la síntesis de biodiésel.

Reactivo	Marca	Pureza
Metanol anhidro (CH ₃ OH)	J.T. Baker	≥99%
Hidróxido de sodio (NaOH)	Avantor	>= 98 %
Hexano (C ₆ H ₁₄)	J.T. Baker	>= 98.5 %
Ácido fosfórico (H ₃ PO ₄)	Sigma-Aldrich	≥99%
Aceite comestible usado	Recolección del programa "Basura Cero"	-

Los parámetros más importantes de la reacción de transesterificación son:

- Relación molar aceite-alcohol
- Temperatura
- Cantidad de catalizador
- Tiempo de reacción
- Rapidez de agitación

La importancia de cada uno de estos parámetros es descrita continuación.

2.3.1 Relación molar aceite-alcohol

La reacción de transesterificación es reversible por lo cual se requiere un exceso de alcohol para promover un desplazamiento hacia los productos. Durante la transesterificación, tres moles de un alcohol de cadena corta reaccionan con un mol de triglicérido (3:1, ver *Figura 1.5*). El exceso de alcohol debe mantenerse lo más cercano a la relación ideal (3:1) para facilitar el proceso de separación del MeOH que no reaccionó. La relación molar de metanol-aceite fue de 5:1.

2.3.2 Temperatura

El aumento de la temperatura de reacción beneficia la miscibilidad del reactivo y las colisiones moleculares. También la viscosidad del aceite decrece, lo que promueve una disminución de la capa límite de transferencia de masa. Se debe tener en cuenta el punto de ebullición del alcohol que se utilice ya que si se trabaja por encima de este valor se deberá utilizar un condensador que disminuya la pérdida por evaporación.

El reactivo con el punto de ebullición más bajo en la reacción de transesterificación es el metanol el cual comienza a evaporarse a una temperatura de 65°C a presión de 1 atm. Esta temperatura será la mayor a la que se realizarán los experimentos previniendo así las pérdidas excesivas de MeOH asociadas a la evaporación, así como la necesidad de diseñar recipientes a presión.

En el diseño del experimento se consideraron dos temperaturas: 45°C y 65 °C que se encuentran dentro del intervalo comúnmente utilizados para llevar a cabo la reacción dada la composición promedio de los aceites usados.

2.3.3 Cantidad de catalizador

Para este proyecto se utilizará hidróxido de sodio (NaOH), un catalizador con el que se puede escalar el proceso de manera lineal y que en comparación con otros es más accesible y económico.

Diversos estudios asocian el incremento en la concentración del catalizador utilizado en la reacción con la obtención de rendimientos mayores. Esto se debe a que habrá más sitios básicos activos en contacto con los reactivos.

Se utilizará la concentración mínima de catalizador con la que se obtengan rendimientos cercanos al 99%. De estudios anteriores en la producción de biodiésel utilizando aceites usados se sabe que al utilizar un 0.5% de catalizador en relación con la masa del aceite se pueden obtener rendimientos cercanos al 99% [17].

En los experimentos de este trabajo se utilizará una concentración de NaOH del 0.5% en peso en relación con el peso del aceite. Para disolver el NaOH se utilizará el metanol en relación 5:1 respecto al aceite que se utilizará.

2.3.4 Tiempo de reacción

Las reacciones de transesterificación homogéneas son rápidas al principio y decrecen su rapidez con respecto al tiempo con tasas cada vez menores. Es importante identificar el momento en el que el aumento del rendimiento es prácticamente nulo con el paso del tiempo para detener la operación.

Al delimitar este parámetro (tiempo) se debe considerar el consumo energético necesario para llevar a cabo la reacción. El tiempo total de la reacción será máximo de 45 minutos, pues se tiene evidencia [17] que a los 30 minutos prácticamente la reacción ya alcanzó el equilibrio químico.

2.3.5 Velocidad de agitación

Tener una velocidad de agitación adecuada permite que se tenga mayor contacto entre las moléculas de aceite y de alcohol ya que es en la interface de ellas donde tiene lugar la reacción [37]; de tal manera que al generarse gotas pequeñas, el área volumétrica se incrementa y así la rapidez inicial de la reacción, donde existen los mayores problemas de transporte de masa.

Inicialmente se utilizará la mejor rapidez de agitación obtenida en otras investigaciones con la misma materia prima [22]. Se variará la rapidez de agitación para observar su influencia en el rendimiento del biodiésel.

2.4 Cinética de reacción

Se realizarán varios experimentos identificados como ACR, ACR-1 ACR-2. Cada experimento tendrá diferentes condiciones. El experimento ACR se realizará en un matraz de bola con dos bocas el cual estará sumergido en un contenedor de silicón, un agitador magnético y será calentado con una parrilla (ver *Figura 2.3*). Los experimentos ACR-1 y ACR-2 se realizarán en un reactor enchaquetado tipo Batch

marca Syrris (ver *Figura 2.4*) con control de temperatura *Master Controller* (-80 a + 250 °C.) y agitador mecánico *Scorpion* (máx. 800 rpm; torque de 11Ncm).

En la *Figura 2.3* se muestran el esquema del experimento ACR.

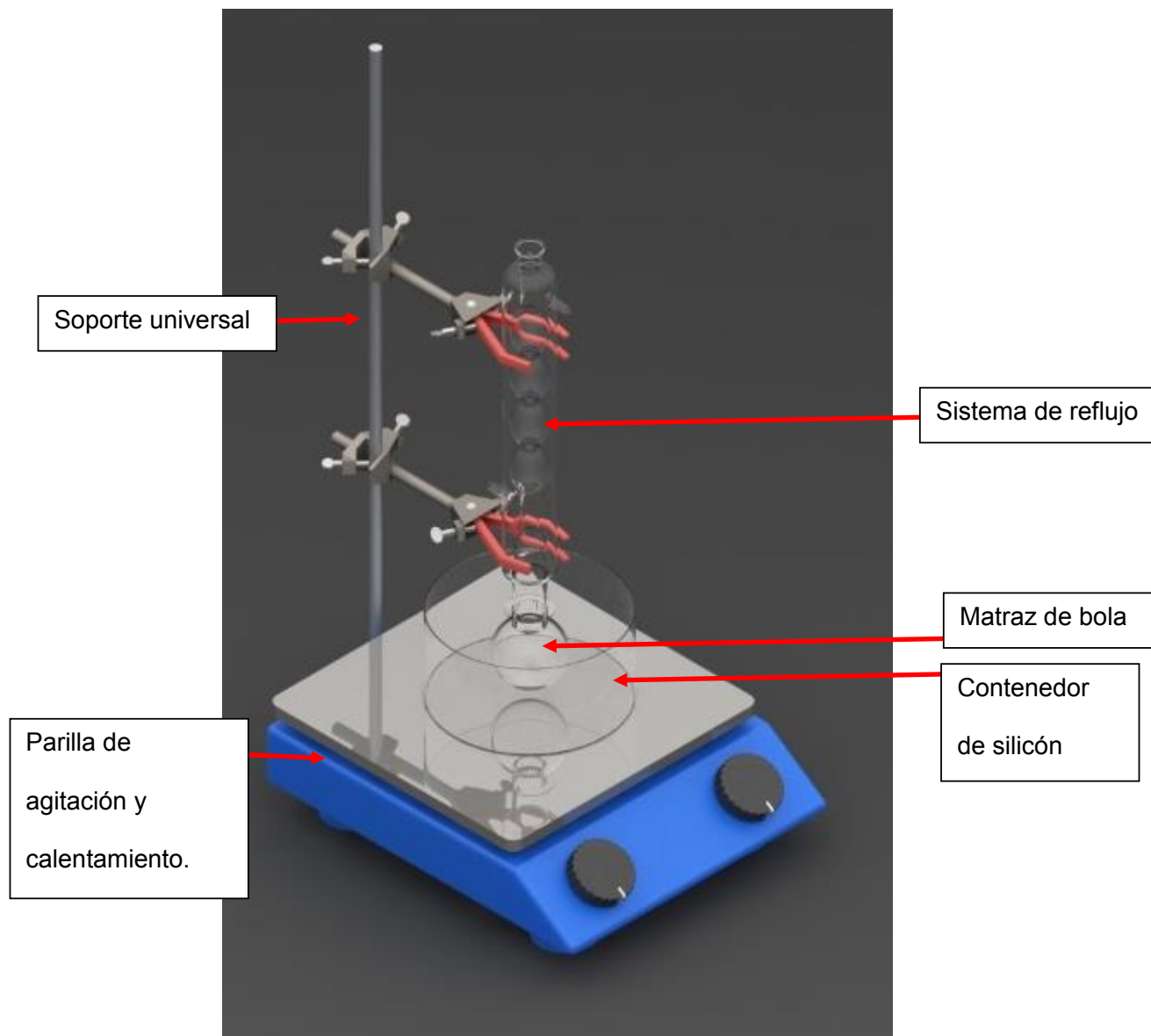


Figura 2.3 Esquema experimental ACR

En la *Figura 2.4* se muestran el esquema del experimento ACR-1 y ACR-2.

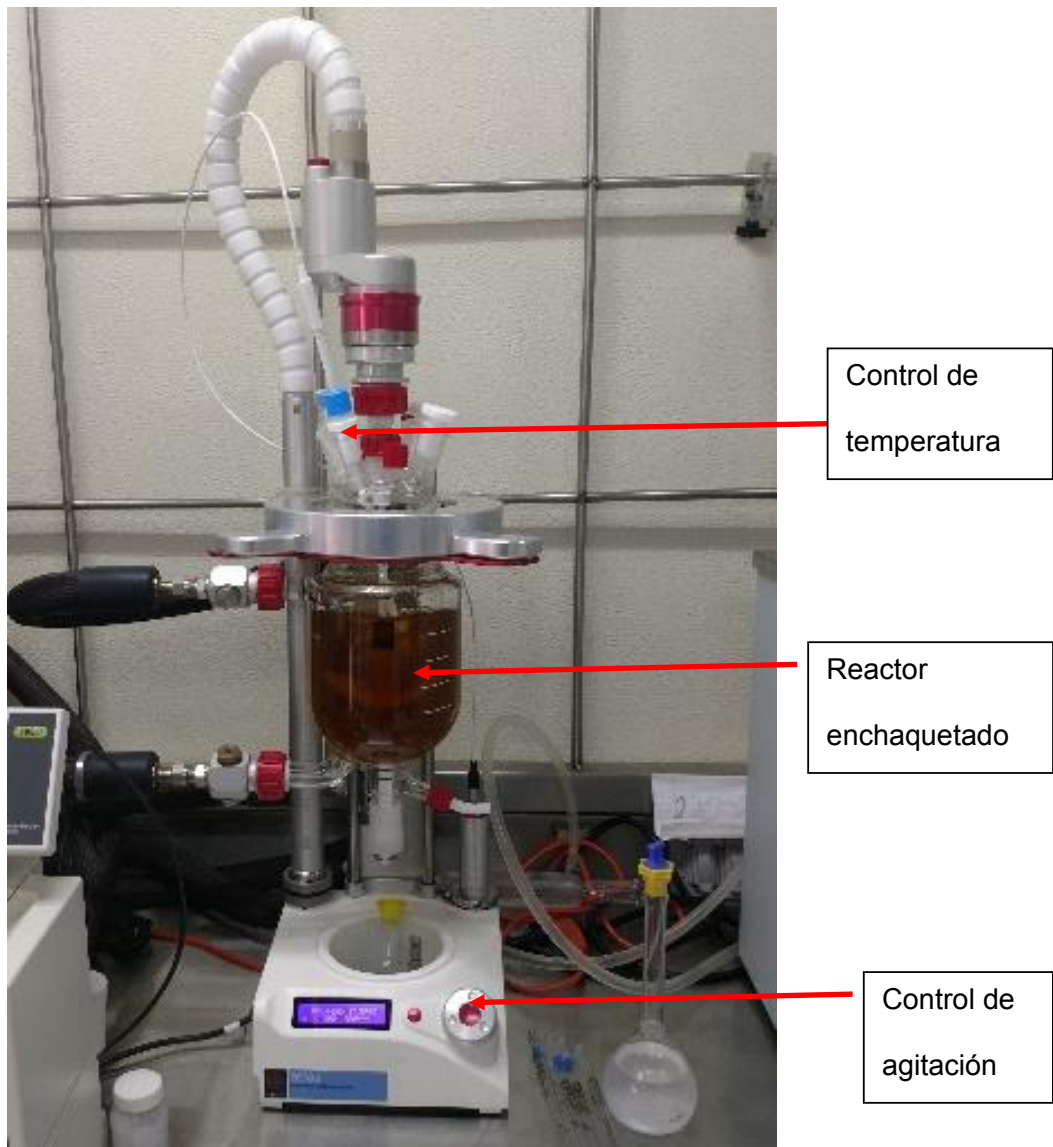


Figura 2.4 Esquema experimental ACR-1 y ACR-2.

De las condiciones que se pueden variar (relación molar aceite-alcohol, temperatura, cantidad de catalizador, tiempo de reacción y rapidez de agitación) se han optimizado previamente la concentración de catalizador y la relación metanol:aceite. En la *Tabla 2.2* se los valores que tendrán las condiciones optimizadas.

Tabla 2.2 Condiciones optimizadas en los experimentos ACR, ACR-1 y ACR-2.

Parámetro	Valor	Unidades
Relación molar MeOH-aceite	5:1	mol:mol
Cantidad de catalizador	0.5	W%
Tiempo de reacción máx	45	min

2.4.1 Tasa de reacción

Para determinar la tasa de reacción se seguirá el procedimiento descrito a continuación:

El primer paso es preparar la disolución de hidróxido de sodio y metanol (NaOH-MeOH). El catalizador y el MeOH necesario para llevar a cabo la reacción de transesterificación dependerá de la cantidad de aceite que se utilizará. Después se debe pesar el aceite en una balanza analítica; el peso utilizado se verá limitado por el reactor donde se llevará a cabo la experimentación.

Enseguida a esto, se procederá a agregar aceite en un matraz de bola o reactor para poder iniciar el calentamiento del sistema (la temperatura a la que se calentará el matraz o reactor deberá estar entre 5 y 10 grados por encima de la temperatura de reacción ya que al agregar la solución NaOH-MeOH la temperatura disminuirá). Al alcanzar la temperatura fijada se procederá a incorporar la disolución del catalizador con el metanol.

A determinados tiempos (3, 5, 8, 11, 15, 30 y 45 minutos) se tendrá que tomar una alícuota de 1 ml de la reacción utilizando una pipeta y se almacenará en viales de 10 ml con hexano (C_6H_{14}) y a los cuales se les agregará agua acidulada en relación equimolar con respecto al NaOH; esto con el fin de neutralizar el NaOH y al mismo tiempo detener la reacción. Cada muestra deberá dejarse reposar hasta que se observen 2 fases definidas: una correspondiente al biodiésel y la otra al glicerol mezclado con el agua acidulada y el NaOH. Finalmente, se separará la fase del biodiésel y se dejará evaporar el hexano que contenga.

El diagrama de flujo de la metodología experimental previamente descrito se muestra en la *Figura 2.5*.

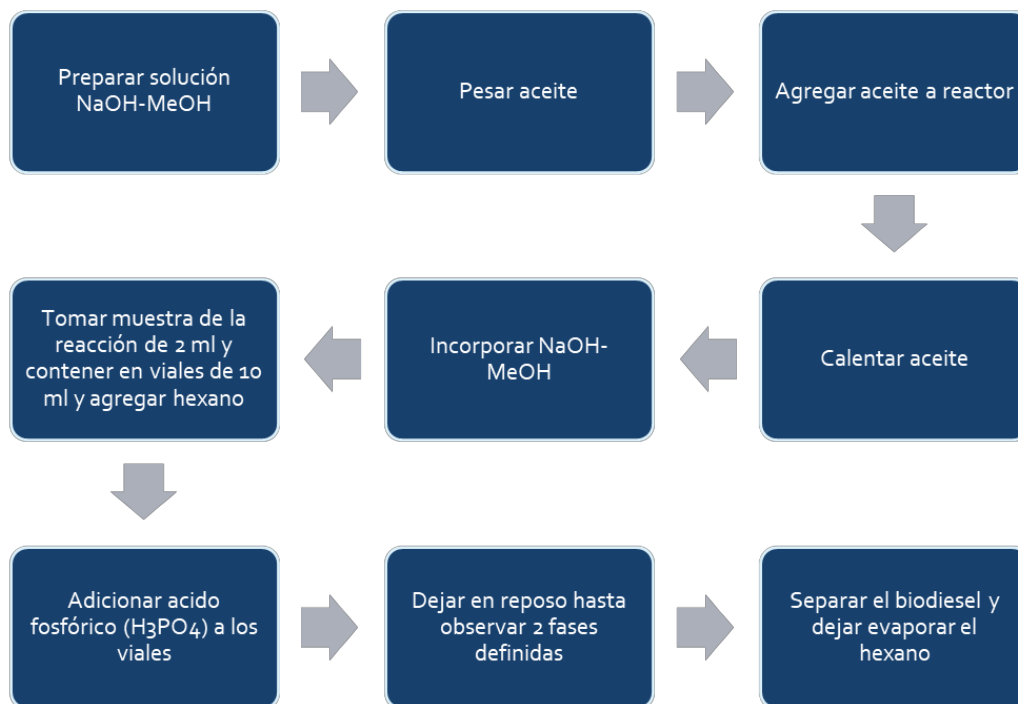


Figura 2.5 Diagrama de flujo para obtención de la cinética de reacción de transesterificación

2.5 Caracterización de reactivos y productos

En esta sección se describe los fundamentos de cada una de las técnicas de caracterización utilizadas en el proyecto, así como los detalles de los equipos utilizados para ello.

2.5.1 Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)

Los espectros en FT-IR son el resultado de distintos cambios energéticos que se producen por las transiciones de las moléculas de estados energéticos vibracionales y rotacionales. Cuando una molécula es expuesta a radiación infrarroja absorbe energía en diferentes longitudes de onda lo que ocasiona vibraciones en los enlaces de ésta, la vibración depende de la masa de los átomos

y de la rigidez del enlace. Ya que los enlaces se doblan o estiran a energías determinadas es posible obtener información acerca de los grupos funcionales que componen la molécula con esta técnica. Algunos de los modos vibracionales más comunes en las moléculas se pueden observar en la *Figura 2.6*.

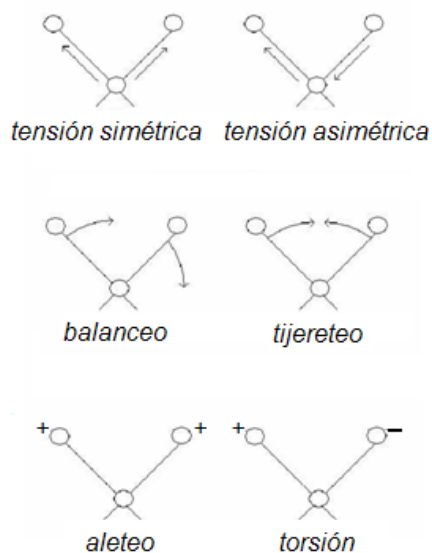


Figura 2.6 Modos vibracionales más comunes [38].

La región infrarroja en el espectro comprende radiación con el número de onda que varía entre 12,800 a 10 cm^{-1} o longitudes de onda de 0.78 a $1000\ \mu\text{m}$. Tanto desde el punto de vista de las aplicaciones como de los instrumentos, es conveniente dividir el espectro infrarrojo en tres regiones. En la *Tabla 2.3* se observa que el espectro puede ser infrarrojo cercano, medio y lejano dependiendo de su longitud de onda [39].

Tabla 2.3 Regiones del espectro infrarrojo

Región	Longitud de onda (λ), μm	Número de onda ($\bar{\nu}$), cm^{-1}	Frecuencias (ν), Hz
Cercana	0.78 a 2.5	12 800 a 4000	3.8×10^{14} a 1.2×10^{14}
Media	2.5 a 50	4000 a 200	1.2×10^{14} a 6.0×10^{12}
Lejana	50 a 1000	200 a 10	6.0×10^{12} a 3.0×10^{11}

Esta caracterización fue realizada en un equipo Bruker Alpha con una ventana de platino y Reflexión Total Atenuada (ATR por sus siglas en inglés) utilizando una gota de la muestra. Los espectros se registran en la región media del infrarrojo ($4000-500\text{ cm}^{-1}$).

2.5.2 Perfil de viscosidades y densidad.

Esta técnica permite determinar la viscosidad dinámica, la densidad absoluta y la viscosidad cinemática de una muestra líquida.

En este ensayo se utiliza de la norma ASTM-7042-14 [40] para determinar los valores de viscosidad y densidad. La muestra se introduce en las celdas de medición, que están a una temperatura controlada y conocida. Las celdas de medición consisten en un par de cilindros concéntricos giratorios y un tubo oscilante en U (Figura 2.7). La viscosidad dinámica se determina a partir de la velocidad de rotación de equilibrio del cilindro interno bajo la influencia de la fuerza de corte de la muestra y un freno de corriente parásita junto con los datos de ajuste. La densidad está determinada por la frecuencia de oscilación del tubo en U junto con los datos de ajuste. La viscosidad cinemática será el resultado de la división de la viscosidad dinámica entre la densidad absoluta.

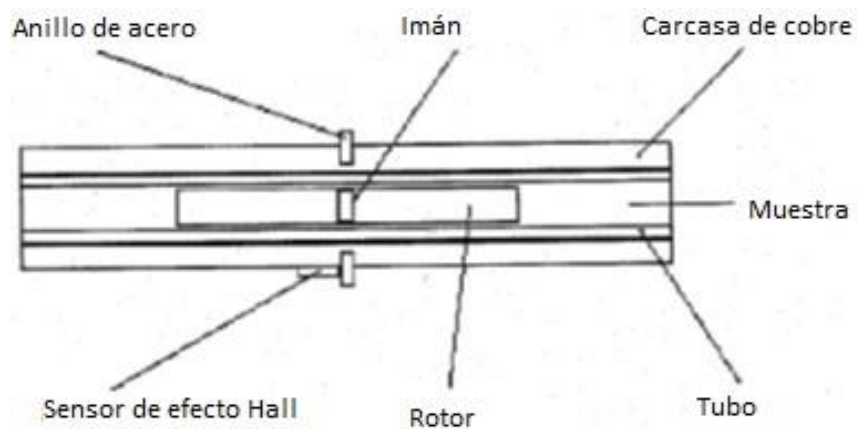


Figura 2.7 Celda de viscosidad. Modificado de norma ASTM 7042-14.

La presión y la temperatura de operación durante la prueba dependerán del material a analizar.

El perfil de viscosidades se determinará entre 15 a 70°C, con intervalos regulares de 5°C. Asimismo la densidad se determinará tanto para reactivos como para productos en el mismo intervalo de temperaturas.

2.5.3 Espectroscopía de resonancia magnética nuclear de protón (RMN-H)

La espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN) se basa en medir la absorción de la radiación electromagnética en la región de radiofrecuencias, de alrededor de 4 a 900 MHz. En contraste con la absorción ultravioleta, visible e infrarroja, los núcleos de los átomos son los que participan en el proceso de absorción en vez de los electrones exteriores. Además, para que en los núcleos se formen los estados de energía que hagan posible la absorción, es necesario colocar el analito en un intenso campo magnético.

Se trata de una de las técnicas más potentes con la que los químicos y bioquímicos pueden dilucidar las estructuras de las especies químicas. También es útil para la determinación cuantitativa de las especies absorbentes [39].

Para la caracterización del biodiésel realizaron varios análisis de resonancia magnética nuclear de protón (^1H -RMN) usando un espectrómetro Bruker Ascend 750 equipado con una criosonda a 750 MHz (^1H). Los espectros de ^1H -RMN se registraron a 298 K. Los desplazamientos químicos se proporcionan en partes por millón de SiMe_4 (^1H) como referencia interna. La conversión de aceite a biodiésel se determinó usando el análisis de ^1H -RMN. El cálculo del rendimiento del biodiésel se realizó mediante la integral del pico característico atribuido a los ésteres metílicos (3.6 ppm) y al multiplete atribuido a los triglicéridos (4.4 a 4 ppm). Todas las muestras, previo al análisis, fueron preparadas utilizando cloroformo deuterado como disolvente [41].

2.5.4 Ionización por electrospray (ESI-MS)

La espectrometría de masas es una técnica de análisis que permite determinar la distribución de las moléculas de una sustancia en función de su masa y carga. No depende de la absorción de la radiación electromagnética, sino más bien examina los iones producidos por una molécula en fase gaseosa; una vez obtenidos estos iones, se separan de acuerdo con su relación masa/carga (m/z). Un espectro de masas será, en consecuencia, una información bidimensional que representa un parámetro relacionado con la abundancia de los diferentes tipos de iones en función de m/z de cada uno de ellos. [41]

El análisis de las muestras de biodiésel obtenido se realizará en un equipo micrOTOF- Q, con una resolución de > 15.000 FWHM y una precisión de masa de <2 ppm (Figura 2.8).



Figura 2.8 Espectrómetro de masas micrOTOF-Q

2.6 Diseño del reactor

El diseño del reactor se llevará a cabo mediante el desarrollo de un modelo lineal. Este modelo comprende 5 etapas. En la *Figura 2-9* se observa el diagrama de flujo de este modelo de diseño el cual comprende las etapas referidas. La primera es la identificación del problema. Después sigue la primera fase de diseño en la que se buscan conceptos o principios de solución al problema, para ello se analiza el problema identificado, se sintetiza una o varias posibles soluciones y se evalúan con respecto a restricciones (especificaciones). En la fase de diseño preliminar se avanza en la concretización de una solución al problema, determinando componentes e interacciones con el suficiente grado como para poderla evaluar objetivamente. Se obtienen formas específicas, materiales propuestos y planos de conjunto con dimensiones generales, que representan al producto como un conjunto organizado de piezas, componentes, enlaces y acoplamientos. La fase de diseño de detalle corresponde a la generación de todas las especificaciones necesarias para la producción del producto-solución. La elaboración de planos de detalle, la determinación de etapas de fabricación, la identificación de proveedores, etc., son típicas actuaciones en esta fase, que es la mejor desarrollada a nivel empresarial, dado su interés particular y su organización orientada a la materializar soluciones[42]. Al terminar estas fases se tendrá el diseño final el cual deberá dar solución al problema planteado. Las fases de diseño preliminar y diseño detallado necesitan de una validación antes de poder continuar el proceso, para ello se puede normalizar el diseño o se pueden implementar herramientas computacionales. El presente trabajo se llevará hasta el diseño preliminar, ya que para el proyecto no se tiene contemplada la fabricación e instalación del reactor.

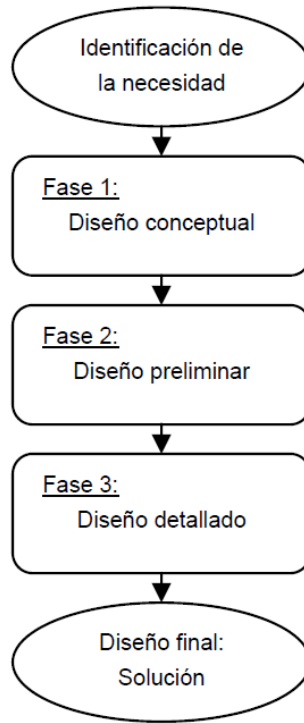


Figura 2.9 Modelo Descriptivo lineal del diseño

2.6.1 Normas aplicables para el diseño del reactor y el sistema de agitación

El diseño del reactor se basará en las normas para la construcción de recipientes a presión del código ASME sección VIII división 1.

2.6.2 Validación de diseño

La validación del diseño se enfocará principalmente en comprobar la resistencia del reactor a los esfuerzos producidos por la carga que contendrá y en el grado de agitación que alcanzaría el fluido dentro del mismo. Se utilizará el complemento Simulation de SolidWorks en un análisis estático para tener una aproximación de la deformación que se producirá en el reactor y se utilizará el módulo de Fluid Simulation también del programa SolidWorks para observar el comportamiento del fluido dentro reactor.

3 Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la síntesis de biodiésel por medio de la reacción de transesterificación, las caracterizaciones que se realizaron a la materia prima y a los productos, así como el diseño mecánico e hidráulico del reactor a nivel planta piloto para la producción del biocombustible biodiésel. Los cálculos del espesor del reactor se validaron realizando un análisis de esfuerzo y deformación por medio de *SolidWorks Simulation*. La agitación de la mezcla de reacción se validó con un análisis computacional de la dinámica de fluidos con *SolidWorks Flow Simulation*.

3.1 Producción de biodiésel

A través de la reacción de transesterificación (*Figura 1.5 y 1.6*) se obtuvo exitosamente el biodiésel, usando NaOH como catalizador básico homogéneo. Se realizaron varios experimentos identificados como ACR, ACR-1 y ACR-2. ACR se usa como acrónimo de aceite usado o aceite residual proveniente de la cafetería de UPIITA. Cada experimento se realizó bajo diferentes condiciones. Las variables del proceso fueron temperatura, tipo de agitación y número de revoluciones por minuto. Los valores de estas variables se resumen en la *Tabla 3.1* y se presentan las condiciones de reacción los experimentos. La cantidad de aceite utilizada en cada experimento se vio limitada por el reactor utilizado en cada reacción (ver *Figura 2.3 y 2.4*).

Tabla 3.1 Condiciones fijas de la reacción en los experimentos ACR, ACR-1 y ACR-2.

Experimento	Cantidad de aceite	Tipo de agitación	Rapidez de agitación	Temperatura
ACR	100 g	Magnética	300 RPM	45°C
ACR-1	700 g	Mecánica	600 RPM	65°C
ACR-2	700 g	Mecánica	600 RPM	45°C

3.2 Caracterización de reactivos y productos

Primero se realizaron las caracterizaciones para obtener las propiedades de transporte del aceite y del biodiésel obtenido de la muestra ACR-2 por medio del perfil de viscosidades y densidad. Por otro lado, para identificar los grupos funcionales de las muestras se usó espectroscopía de infrarrojo (FT-IR), para calcular la conversión del aceite a biodiésel se empleó la resonancia magnética nuclear de protón (RMN-H) y finalmente para identificar la composición química del biodiésel se analizaron los espectros obtenidos por ionización por electrospray (ESI-MS).

Los resultados se muestran y son discutidos en las siguientes secciones.

3.2.1 Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)

La técnica de FT-IR fue usada para identificar los grupos funcionales presentes en las diferentes muestras de aceite y de biodiésel obtenido bajo diferentes condiciones experimentales.

Los espectros descritos en esta sección corresponden a la última alícuota a 45 minutos de reacción de cada uno de los experimentos realizados para la transesterificación de aceite usado. En la *Figura 3.1* se pueden observar los espectros de infrarrojo del aceite y de las muestras de biodiésel obtenido. La *Figura 3.1a* corresponde al aceite usado precursor; la *Figura 3.1b* al biodiésel obtenido a 45 °C, 300 RPM, con 0.5% en peso del catalizador y con una relación molar metanol: aceite de 5:1 (ACR). La *Figura 3.2c* (ACR-1) corresponde a la muestra obtenida a 65 °C, 600 RPM bajo las mismas condiciones de concentración de la muestra ACR. La *Figura 3.3d* (ACR-2) muestra el biodiésel obtenido bajo 45°C a 600 RPM. Los grupos funcionales característicos del biodiésel se resumen en la *Tabla 3.2*. En esta tabla se presenta el número de onda al cual se observa un pico característico asociado a la vibración de un grupo funcional presente en los metil ésteres, mostrando las señales más intensas. La señal de 730-710 cm^{-1} corresponde a el grupo -C-C-. Otra señal que confirma la obtención de biodiésel es la de 1050 cm^{-1} que indica la presencia del metil éster ($\text{CH}_3\text{-(CO)-O}$). El pico de 1350 a 1180 cm^{-1}

se atribuye a la vibración C-O del grupo éster. Las señales características tanto del aceite como del biodiésel se encuentran entre el intervalo de 1365-1470 cm^{-1} y corresponden a la flexión del grupo metilo (-C-H). En el aceite esta señal es un singlete mientras que en el biodiésel es un doblete. En el intervalo 1715 a 1750 cm^{-1} se presenta la señal asociada al estiramiento C=O del grupo carbonilo. Y finalmente se observa la tensión C-H del grupo metilo en el intervalo de 1970 a 2860 cm^{-1} .

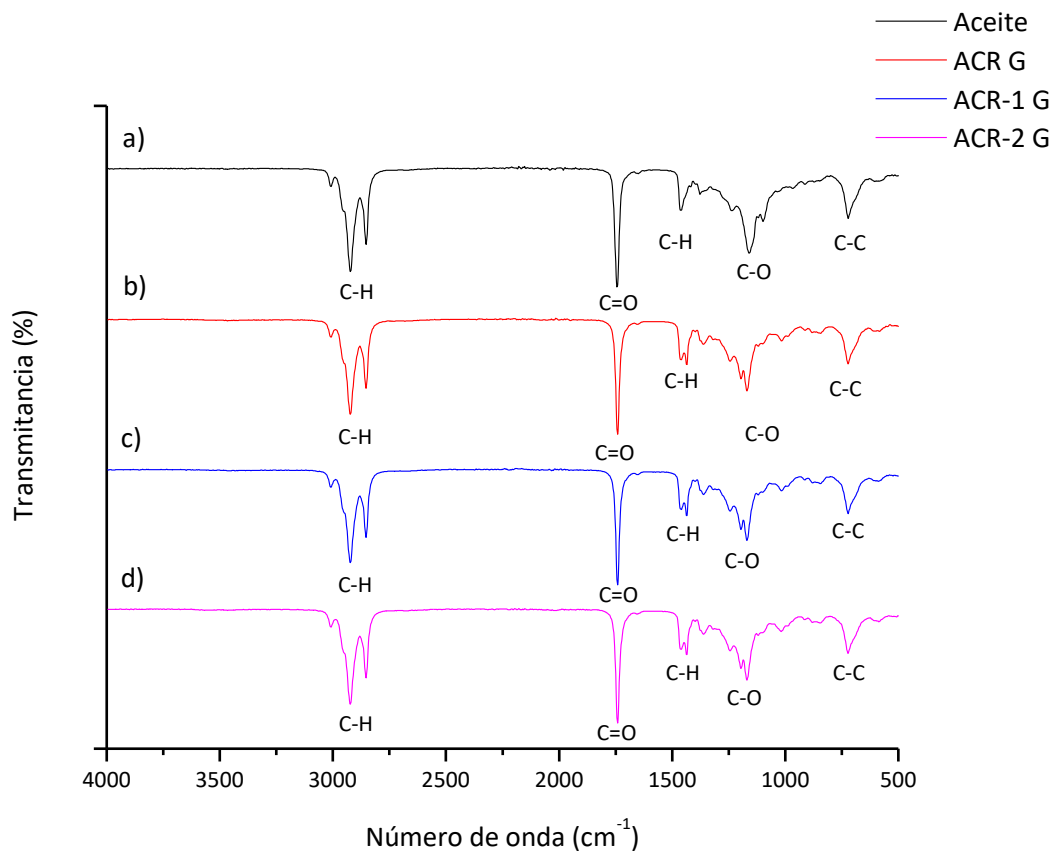


Figura 3.1 a) Espectro de infrarrojo del aceite usado; b) Espectro de infrarrojo del biodiésel (ACR); c) Espectro de infrarrojo del biodiésel (ACR-1); d) Espectro de infrarrojo del biodiésel (ACR-2).

Tabla 3.2 Señales presentes en el espectro del infrarrojo teórico del biodiésel.

Número de onda (cm ⁻¹)	Tipo de vibración	Grupo funcional
1970-2860	Tensión C-H	Metilo (-CH ₃)
1715-1750	Estiramiento C=O	Carbonilo (C=O)
1365-1470	Flexión C-H	Metilo (-CH ₃)
1350-1180	Vibración C-O	Éster
1050	Estiramiento C-O	Metil éster (CH ₃ -(CO)-O)
730-710	Vibración C-C	Cadena de metilenos (-(CH ₂) _n -)

Los seis grupos enlistados en la tabla anterior fueron identificados en los espectros de la *Figura 3.1*. En los tres espectros de los experimentos ACR, ACR-1 y ACR-2 se presentan las mismas señales, por lo que se puede concluir que en los tres casos se obtiene biodiésel.

Las condiciones experimentales reportadas en este trabajo para producir el biodiesel por la reacción de transesterificación básica homogénea. La temperatura de la reacción determinada para este trabajo fue de 45°C. Cabe destacar que este resultado omite la implementación de un condensador y disminución del gasto energético, haciendo que los costos de manufactura y operación disminuyan. La relación molar metanol:aceite (5:1) es muy similar a la relación estequiométrica (3:1). La concentración de catalizador es de 0.5 % en peso, en relación con el aceite, es un porcentaje muy bajo en comparación al método convencional, por lo que los insumos en el proceso serían menores y los residuos generados disminuirían al evitar lavados y contaminación de agua en procesos de purificación de biodiesel subsecuentes. Ejemplo de ello es la disminución de las emisiones de subproductos y catalizador residual que se vierten al medio ambiente.

Una vez determinados los parámetros de reacción para la obtención del biodiesel, se determinaron los perfiles de viscosidad y densidad (para ACR-2 y aceite precursor).

3.2.2 Perfil de viscosidad y densidad

El perfil de viscosidad y densidad fue utilizado para determinar el comportamiento que tendrán estas variables en el aceite y el biodiésel con el aumento de la temperatura. Esta información permite conocer si el biodiésel sintetizado tiene una densidad y viscosidad dentro de la norma ASTM D6751. También esta información será requerida para el diseño del reactor, principalmente para los cálculos del sistema de agitación.

En la *Figura 3.2* se muestra la variación de la viscosidad dinámica del aceite y del biodiésel (ACR) al aumentar la temperatura. Se observa que al variar la temperatura entre 15 y 70°C la viscosidad dinámica disminuirá de forma exponencial tanto en el aceite como en el biodiésel. Asimismo, se observa la diferencia entre las viscosidades a diferentes temperaturas del aceite con respecto a la mezcla de metil ésteres obtenida al máximo tiempo de reacción.

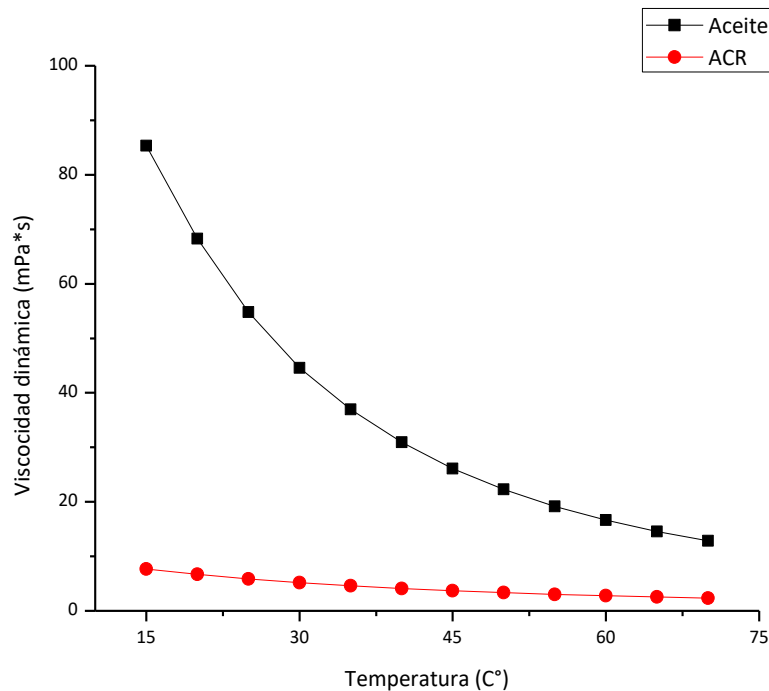


Figura 3.2 Variación de la viscosidad dinámica en un intervalo de 15 a 70°C del aceite y del biodiésel (ACR).

En la *Figura 3.3* se muestra la variación de la densidad del aceite y del biodiésel (ACR) al aumentar la temperatura. Se observa que al variar la temperatura entre 15 y 70°C la densidad disminuirá de manera lineal tanto en el aceite como en el biodiésel, siendo la de este último menor en cada temperatura.

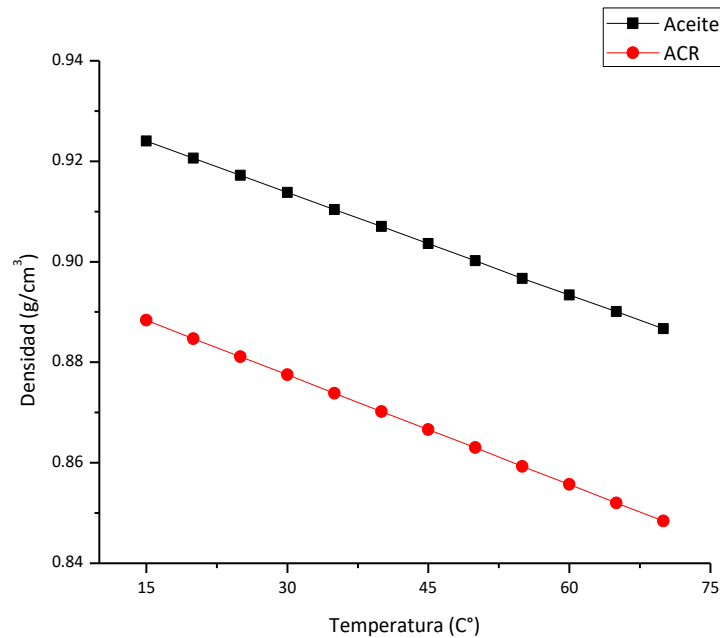


Figura 3.3 Variación de la densidad en un intervalo de 15 a 70°C del aceite y del biodiésel (ACR).

En la *Figura 3.4* se muestra la variación de la viscosidad cinemática del aceite y del biodiésel (ACR) al aumentar la temperatura. Se observa que al variar la temperatura entre 15 y 70°C la viscosidad cinemática disminuirá de forma exponencial tanto en el aceite como en el biodiésel.

Esta caracterización permitió conocer el valor la viscosidad cinemática del biodiésel a 40°C (temperatura indicada en la norma) y la cual tiene un valor $4.72 \frac{mm^2}{s}$ por lo que se encuentra dentro de los valores que se permiten en la norma ASTM D6751

la cual indica que el biodiésel debe tener una viscosidad cinemática ente 1.9 y 6.0 $\frac{mm^2}{s}$. También se obtuvo información importante de la viscosidad dinámica que tendrá el aceite cuando se comienza la agitación (15°C-temperatura promedio anual de la CDMX), esto es importante ya que el aceite para producir biodiésel es el más viscoso y será el que limite el sistema de agitación. Se considerará por lo tanto su viscosidad dinámica con un valor de 85.31 $mPa \cdot s$ como la viscosidad de diseño.

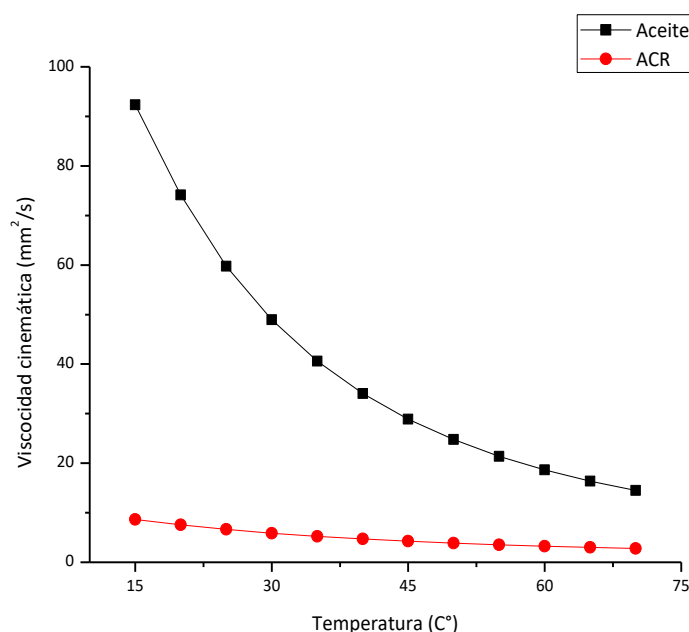


Figura 3.4 Variación de la viscosidad dinámica en un intervalo de 15 a 70°C del aceite y del biodiésel (ACR).

3.2.3 Espectroscopía de resonancia magnética nuclear de protón (RMN-H).

En la *Figura 3.5* se observa el espectro de resonancia magnética nuclear de protón del biodiésel obtenido del experimento ACR, el cual se realizó bajo las siguientes condiciones: 100g de aceite; relación metanol:aceite de 5:1; 0.5% en peso de NaOH como catalizador; una temperatura de 45°C; una agitación magnética a 300 RPM. Para monitorizar el avance de la reacción ACR con respecto al tiempo se tomaron

alícuotas a los 3, 5, 8, 11, 15, 30 y 45 minutos. La *Figura 3.6* corresponde al experimento ACR-1 el cual se realizó con las condiciones de reacción: 700g de aceite; relación MeOH:Aceite de 5:1; 0.5% en peso de NaOH como catalizador; una temperatura de 65°C; una agitación mecánica a 600 RPM. En el experimento ACR-1 se tomaron alícuotas a los 3, 5, 8, 11, 15, 30 y 45 minutos. Por último, en la *Figura 3.7* se observa el espectro de resonancia del biodiésel obtenido del experimento ACR-2 el cual se realizó con las condiciones del experimento ACR-1 variando únicamente la temperatura a 45°C. En este experimento las alícuotas se tomaron a los 6, 8, 11, 13, 15, 30 y 45 minutos. Los espectros correspondientes a cada alícuota se encuentran ordenados de manera ascendente en las figuras referidas.

En cada uno de los espectros se identificaron las señales asociados a los grupos funcionales característicos del biodiésel. En la *Tabla 3.3* se enlistan los grupos funcionales que se identifican de acuerdo con la posición en el espectro y las letras minúsculas que se asignaron a cada grupo funcional en el espectro de RMN-H. Las letras mayúsculas corresponden a cada espectro adquirido de cada toma de alícuota a los diferentes tiempos de reacción. Este diseño de experimento tiene la finalidad de identificar el rendimiento obtenido a diferentes tiempos de la reacción. En las *Figuras 3.5, 3.6 y 3.7* la letra A corresponde a la primera alícuota tomada y el espectro G corresponde a la muestra tomada al detener la reacción.

Tabla 3.3 Enlaces asociados a la posición en el espectro.

Letra	Enlaces asociados	Posición en el espectro (ppm)
a	CH=CH-CH ₂	5.45-5.20
b	COO-CH ₃	3.65
c	CH-CH ₂ -CH	2.80-2.70
d	COO-CH ₂ -CH ₂	2.35-2.25
e	CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH-CH	2.10-1.95
f	O=C-CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂	1.70-1.50
g	CH ₂ -CH ₂ -CH ₂	1.40-1.20
h	CH ₂ -CH ₂ -CH ₃	0.95-0.80

En los espectros se señala con “*” el pico de 4.4 a 4 ppm y corresponde a los triglicéridos. A medida que el tiempo de la reacción avanza el pico va disminuyendo ya que la transesterificación convierte los triglicéridos en metil ésteres. Los metil ésteres se pueden identificar a partir de la ruptura o descomposición de la molécula de triglicérido. La letra b en los espectros, asignada al grupo H₃C-O-, aumenta conforme avanza el tiempo de reacción (su intensidad aumenta). Para calcular los rendimientos del biodiésel se utilizó la *Ecuación 2*:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Area 3.6 ppm}}{\text{Area 3.6 ppm} + \text{Area 4.4 ppm}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2)$$

Donde las áreas de los picos asociados al biodiésel se obtienen de las señales de los metil esterres (3.6 ppm) y la integral de triglicéridos se obtiene de las señales asociadas a estos (4.4 - 4 ppm).

Los rendimientos del biodiésel de los experimentos ACR ACR-1 y ACR-2 se muestran en la *Tabla 3.4*.

Tabla 3.4 Rendimientos de los experimentos ACR, ACR-1 Y ACR-2 en dependencia del tiempo de reacción.

Muestra	ACR		ACR-1		ACR2	
	Tiempo (min)	Rendimiento (%)	Tiempo (min)	Rendimiento (%)	Tiempo (min)	Rendimiento (%)
A	3	83.56	3	94.14	6	93.65
B	5	85.24	5	96.07	8	93.67
C	8	88.53	8	97.32	11	94.47
D	11	89.89	11	98.41	13	94.91
E	15	91.88	15	98.55	15	96.36
F	30	96.12	30	98.87	30	97.40
G	45	97.84	45	98.94	45	98.49

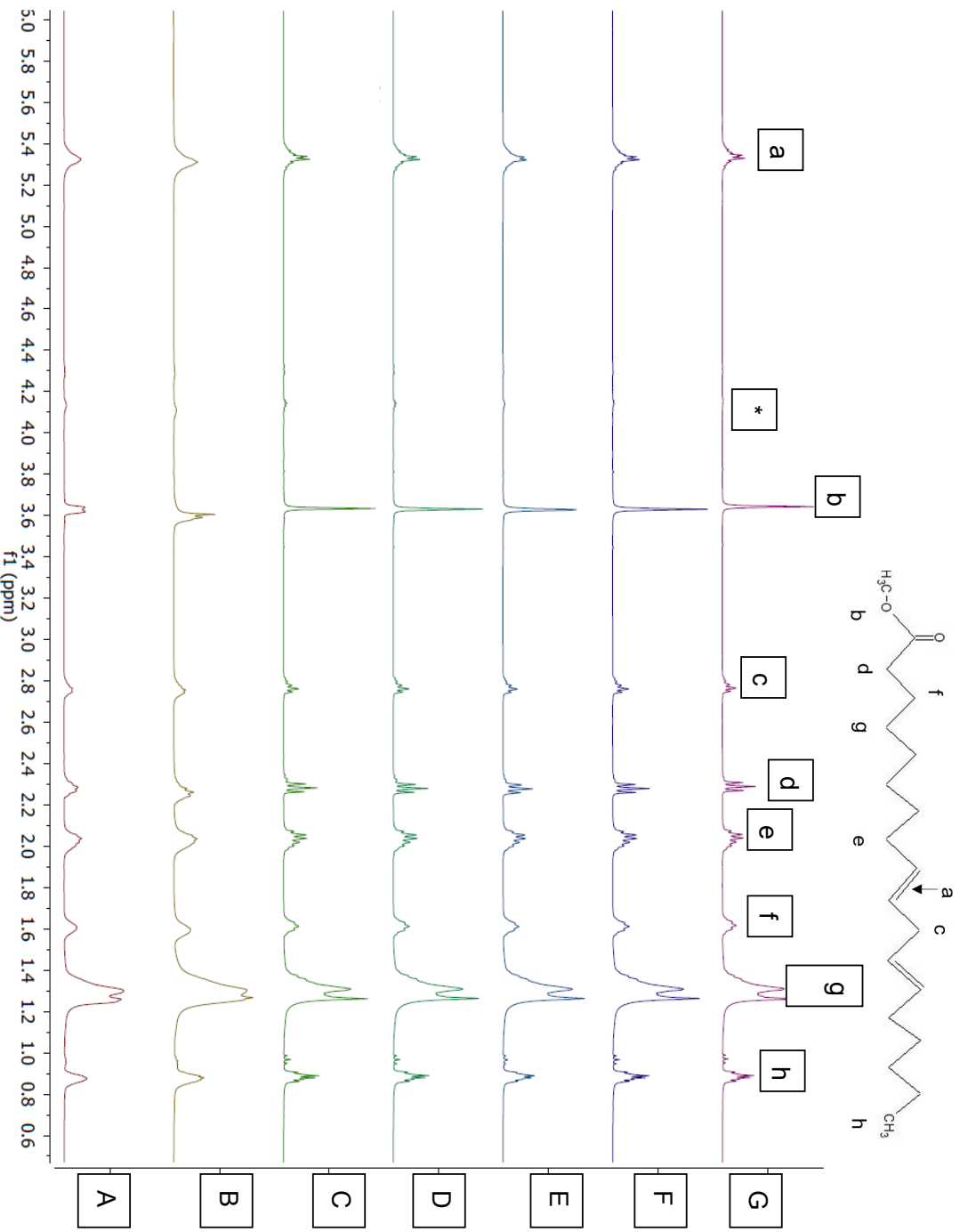


Figura 3.5 Espectros de RMN-¹H del experimento ACR

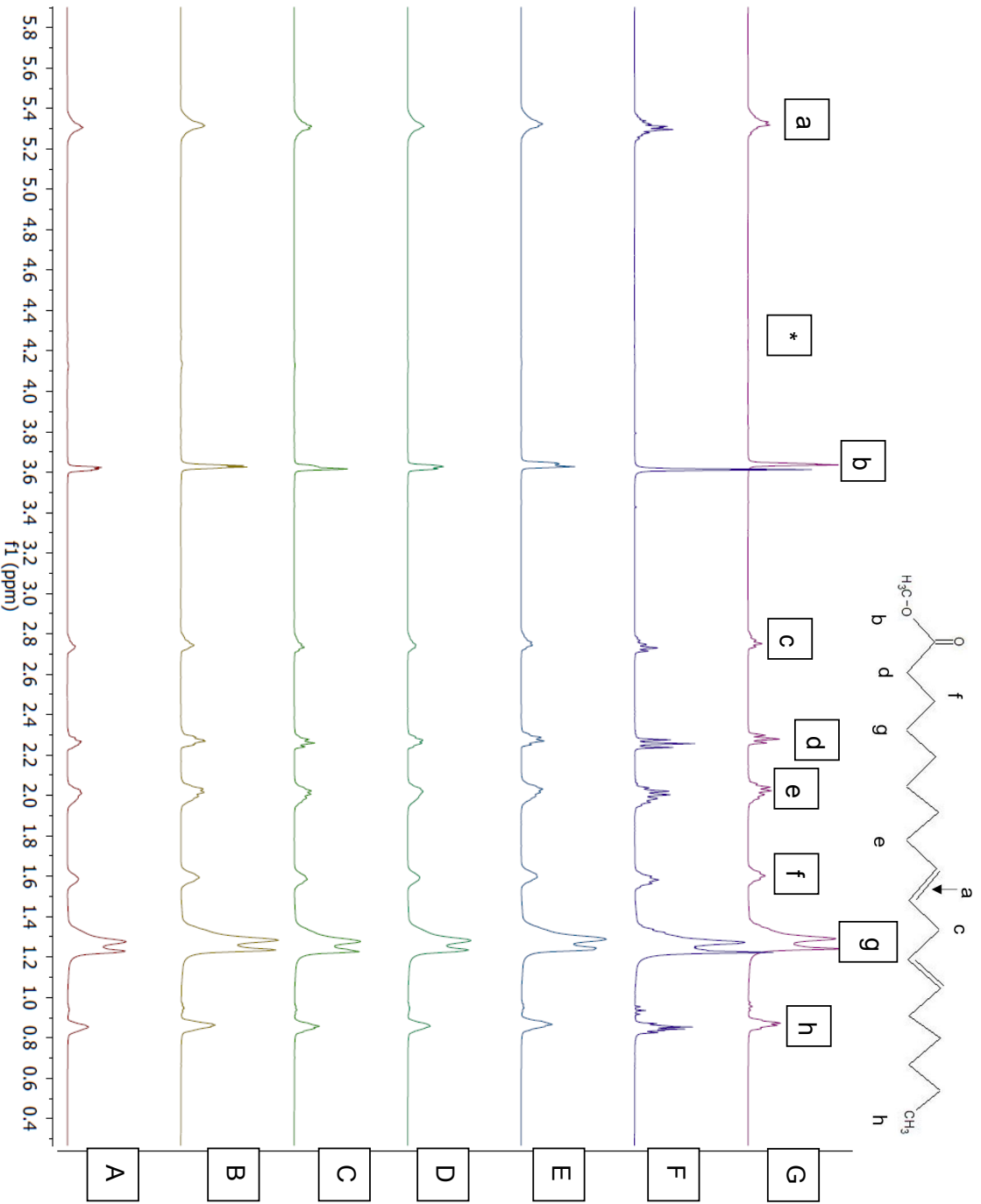


Figura 3.6 Espectros de RMN-H del experimento ACR-1.

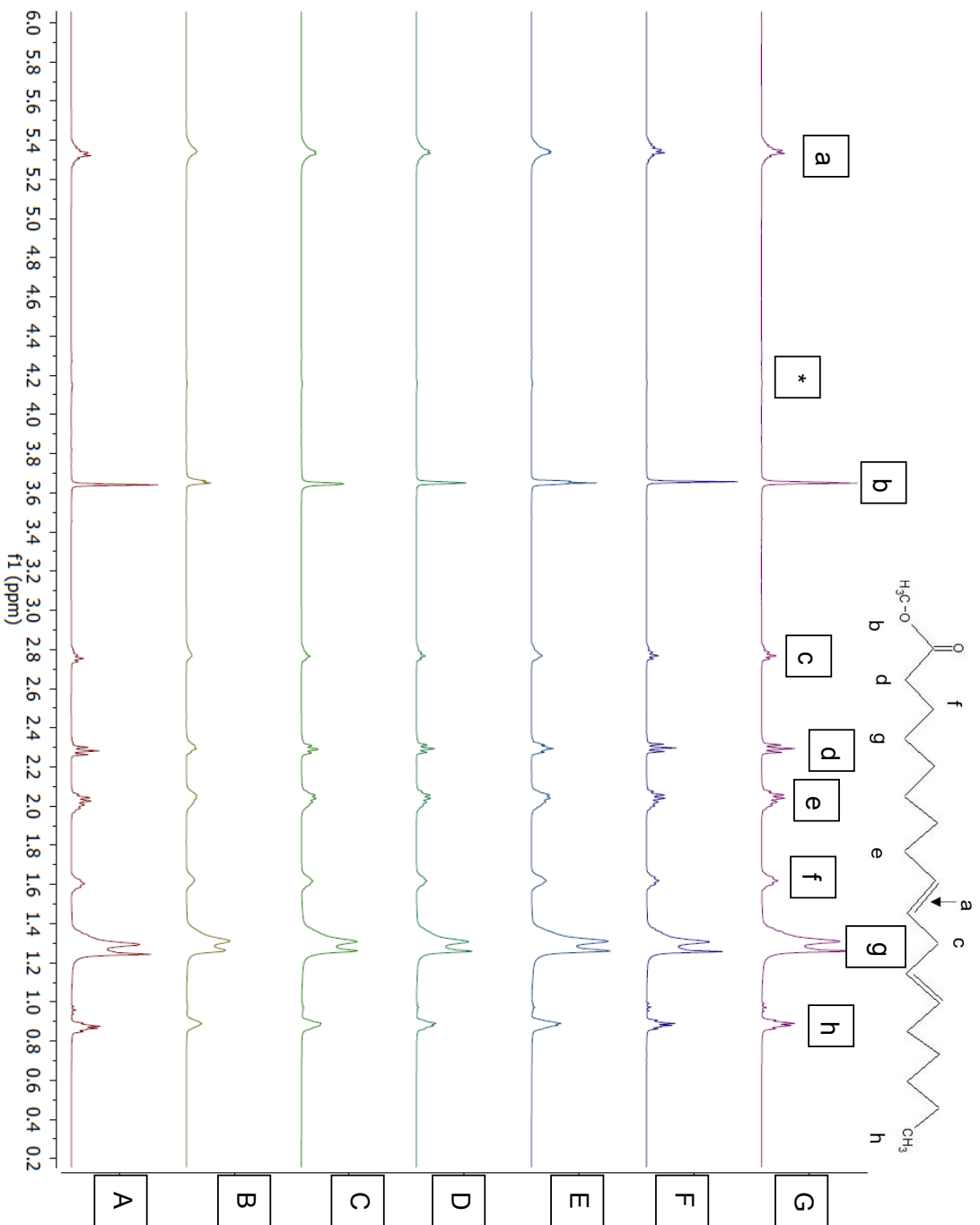


Figura 3.7 Espectros de RMN-H del experimento ACR-2.

En la *Figura 3.8* y *3.9* se muestran las graficas de los rendimientos de cada una de las reacciones para comparar el compartamiento en cada experimento.

Los experimentos ACR y ACR-2 se realizaron a una temperatura de 45°C. El primero se realizó con agitacion magnetica mientras que el segundo con agitaci3n mecánica. En la *Figura 3.9* se observa que la reacci3n ACR-2 alcanza mayores rendimientos que la ACR en los mismos tiempos. Esto se asocia a la mejor agitaci3n que se alcanza por el tipo de agitador asi como la mayor rapidez utilizada.

En la *Figura 3.9* se puede observar el efecto que tiene la temperatura en la reacci3n. En los experimentos ACR-1 y ACR-2 se tuvieron las mismas condiciones de volumen de reacci3n, variando solo la temperatura. El aumento de la temperatura promueve una mayor interaccion entre las fases ya que la miscibilidad del reactivo y las colisiones moleculares aumentan. Esto hace que se alcancen mayores rendimientos a menores tiempos aumentando la temperatura.

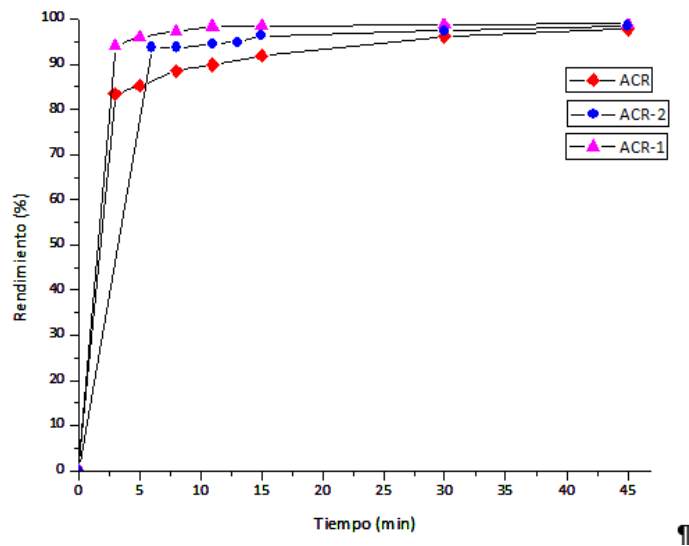


Figura 3.8 Comparaci3n de rendimientos de los experimentos ACR, ACR-1 y ACR-2

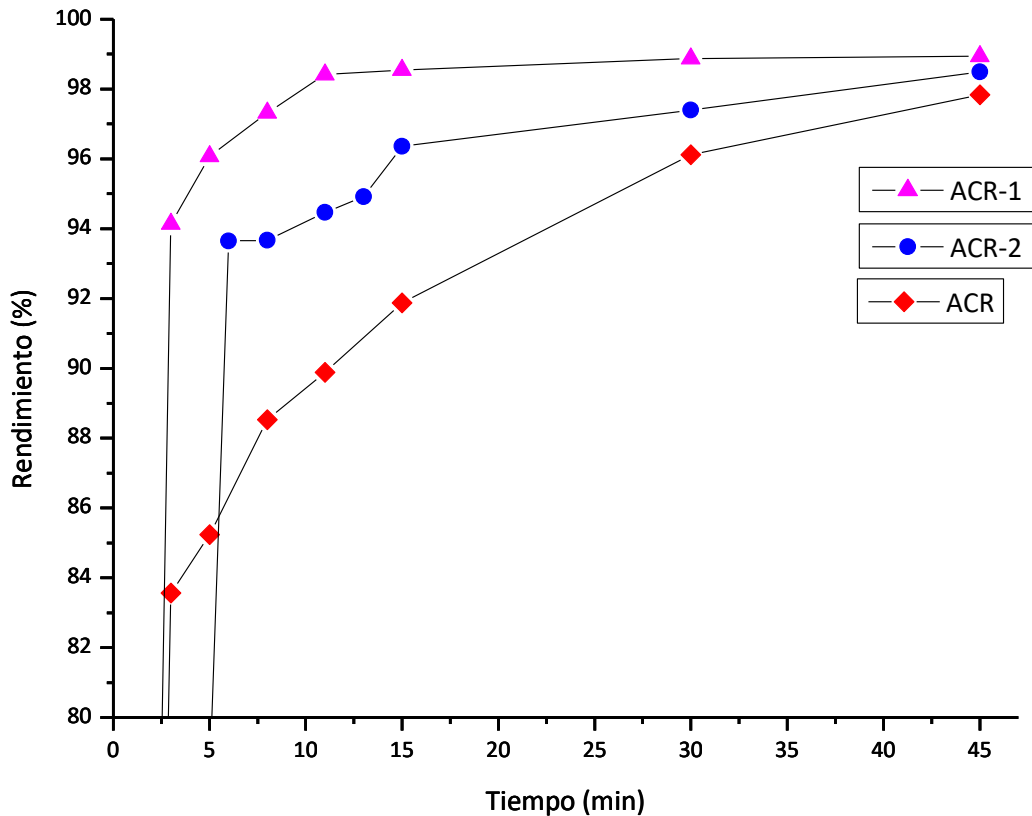


Figura 3.9 Comparación de rendimientos de los experimentos ACR, ACR-1 y ACR-2

Para el escalamiento de la reacción se propone utilizar agitación mecánica para garantizar una alta homogeneidad de mezclado y una temperatura de reacción de 45°C ya que llevar a cabo la reacción a mayor temperatura conlleva un mayor consumo energético y el control de temperatura se facilita cuanto menor sea la temperatura requerida para la reacción.

3.2.4 Ionización por electrospray (ESI-MS)

La técnica de ESI-MS se utilizó para poder determinar la composición química y el rendimiento de los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME por sus siglas en inglés) de la transesterificación del aceite usado.

Los perfiles FAME del biodiésel sintetizado utilizando el aceite usado se identificaron como iones $[FAME+Na]^+$ en modo positivo y se muestran en la *Figura 3.10*. En la *Tabla 3.5* se muestran los FAMEs principales resultantes de la reacción de transesterificación. Los ésteres metílicos determinados fueron el éster metílico linoleico ($C_{18}H_{30}O_2$), éster metílico eicosadienoico ($C_{20}H_{36}O_2$), éster metílico oleico ($C_{18}H_{32}O_2$) y éster metílico eicosanoico ($C_{20}H_{38}O_2$) con una composición del 44%, 14.3%, 22.1% y 11% respectivamente. En menor cantidad se encontraron los FAMEs del éster palmítico ($C_{16}H_{30}O_2$) y linolénico ($C_{18}H_{28}O_2$) con una composición del 1.7% y 6.9% respectivamente.

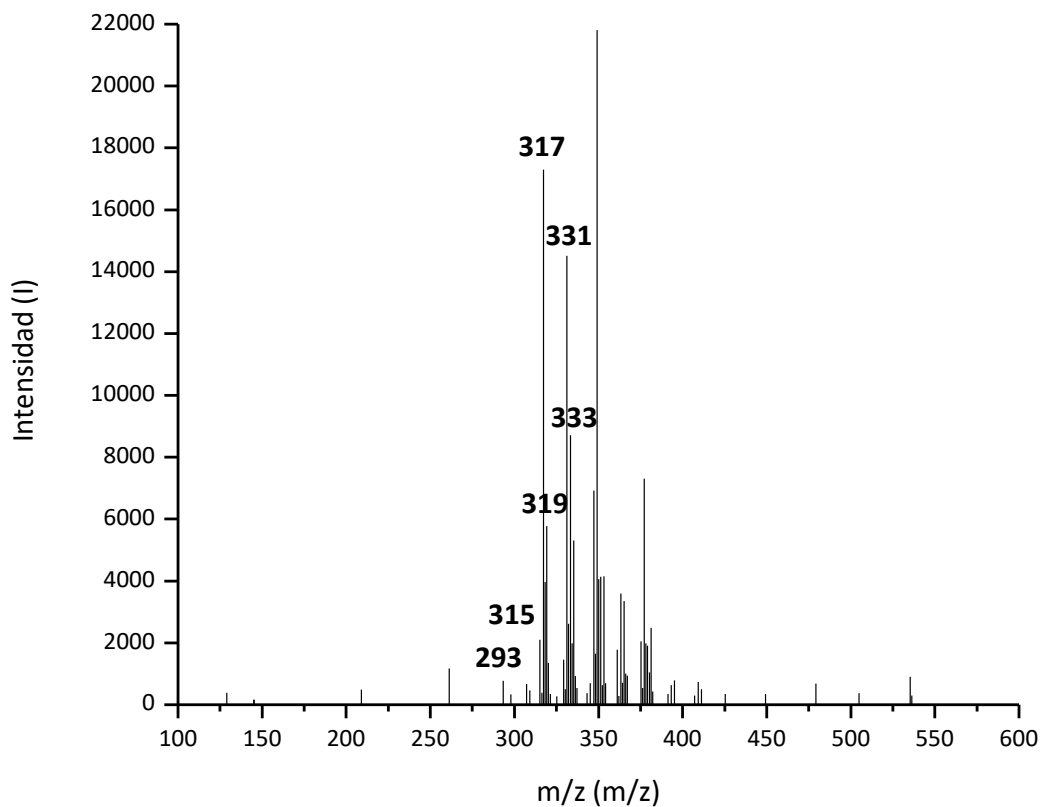
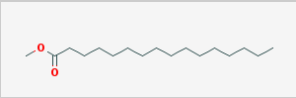
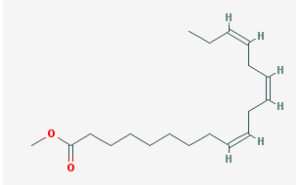
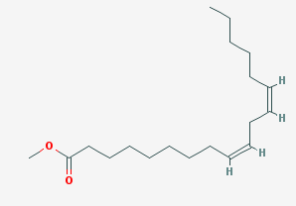
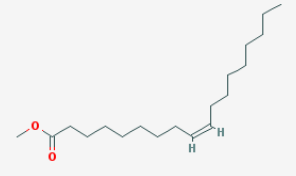
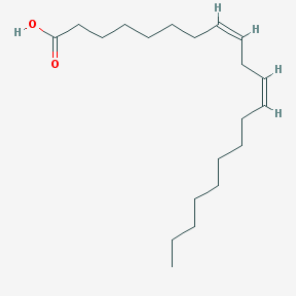
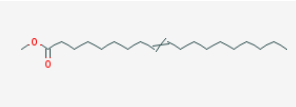


Figura 3.10 ESI- MS de ésteres metílicos de ácidos grasos de Aceite Usado.

Tabla 3.5 Composiciones del biodiésel producido del aceite usado obtenida mediante ESI-MS

FAME g/mol	[FAME+Na] ⁺ m/z	Composición %	Ésteres metílicos de ácidos grasos	
1	270	293	1.7	<p>Éster metílico palmítico[43] (C16:0) (C₁₆H₃₀O₂)</p> 
2	292	315	6.9	<p>Éster metílico linolénico[44] (C18:3) (C₁₈H₂₈O₂)</p> 
3	294	317	44.0	<p>Éster metílico linoleico[45] (C18:2) (C₁₈H₃₀O₂)</p> 
4	296	319	14.3	<p>Éster metílico oleico[46] (C18:1) (C₁₈H₃₂O₂)</p> 
5	308	331	22.1	<p>Éster metílico eicosadienoico [45] (C20:2) (C₂₀H₃₆O₂) (8,11)</p> 
6	310	333	11.0	<p>Éster metílico eicosanoico[47] (C20:1) (C₂₀H₃₈O₂)</p> 

Mediante la técnica de ESI-MS se pudo determinar la composición química total del biodiésel obtenido. Estos resultados al igual que los rendimientos obtenidos con RMN-H son similares en ambas técnicas.

A continuación, se presenta la descripción del diseño del reactor desglosando los siguientes subtemas:

3.3 Diseño mecánico reactor.

De acuerdo con el modelo de diseño que se utilizará, lo primero que se debe realizar es identificar el problema, el cual será escalar el proceso de producción de biodiesel de nivel laboratorio a nivel planta piloto. Después de conocer los resultados de las diversas caracterizaciones que se realizaron al biodiesel se determinaron que las variables que se escalaran son las correspondientes al experimento ACR-2, el cual se realizó a 600 RPM y a 45°C.

3.3.1 Cuerpo del reactor

Para poder dimensionar el cuerpo del reactor el primer paso es obtener el volumen de la mezcla de reacción.

El volumen inicial de reacción (V_r) considerará la suma de los volúmenes de cada uno de los reactivos que estarán presentes en el reactor durante la reacción de transesterificación

$$V_r = V_{oil} + V_{MeOH} + V_{NaOH} \dots\dots\dots(3)$$

Para producir 1000 litros de biodiésel en una reacción de transesterificación de NaOH 0.5% en relación con el peso del aceite, y una relación MeOH-Aceite 5:1 se tendrá un volumen de aceite de 1m³, 0.26 m³ de MeOH y 0.02 m³ de NaOH. Sustituyendo estos valores en la *Ecuación 3* se obtiene el volumen inicial de reacción:

$$V_r = (1 + 0.26 + 0.02) m^3$$

$$V_r = 1.28 m^3$$

El volumen de diseño (V_D) se determina con la *Ecuación 4*. Considera el V_r previamente calculado multiplicado por un factor de diseño (f_d) que puede variar desde 1.1 hasta 1.5, dependiendo en gran medida del tipo de reacción que se llevará a cabo.

$$V_D = f_d * V_r \dots\dots\dots(4)$$

Para reactores que trabajan a presiones atmosféricas (como lo es en este caso) se considera comúnmente un factor de 1.15. Se sustituyen estos valores en la *Ecuación 4*.

$$V_D = 1.15 * 1.28 \text{ m}^3$$

$$V_D = 1.47 \text{ m}^3$$

El V_D será con el que se dimensione el cuerpo del reactor. Una relación de altura entre diámetro interior ($\frac{H}{D_i}$) que es recomendada para este tipo de reactores es de 1.5 ya que se ha estudiado previamente el impacto que tiene en el diseño del agitador. Esta relación favorece una agitación homogénea.

Para determinar el volumen del cuerpo del reactor se tiene un sistema de dos ecuaciones.

$$\frac{H}{D_i} = 1.5 \dots\dots\dots(5)$$

$$V_D = \pi * \frac{D_i^2}{4} * H = 1.47 \text{ m}^3 \dots\dots\dots(6)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones se obtienen los siguientes resultados:

$$H = 1.61 \text{ m}$$

$$D_i = 1.08 \text{ m}$$

La *Figura 3.11* muestra un plano con el cuerpo del reactor dimensionado

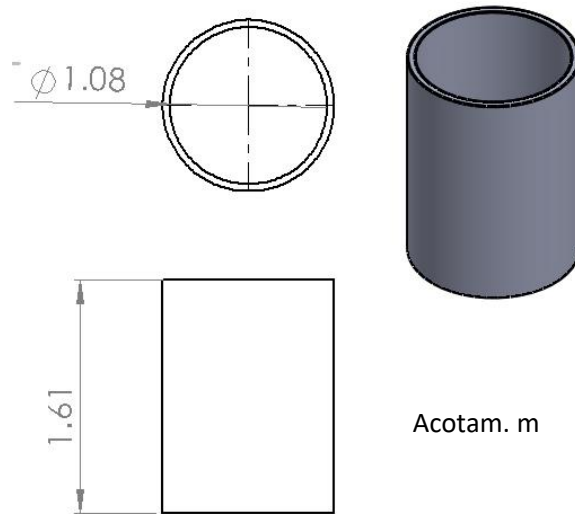


Figura 3.11 Dimensiones del cuerpo del reactor

En el cuerpo del reactor será necesaria la implementación de baffles ya que estos disminuyen la formación de vórtices dentro del reactor. La viscosidad de la mezcla es considerablemente alta por lo que en estos casos el ancho de los baffles (A_B). Se calcula con la *Ecuación 7*:

$$A_B = \frac{D_i}{20} \dots\dots\dots(7)$$

Sustituyendo El valor de D_i en la *Ecuación 7* se obtiene el ancho de los baffles

$$A_B = \frac{1.08 \text{ m}}{20} = 0.054 \text{ m}$$

En la *Figura 3.12* se puede observar el tipo de baffle que se selección para el reactor con las dimensiones que deberá de tener para un funcionamiento adecuado.

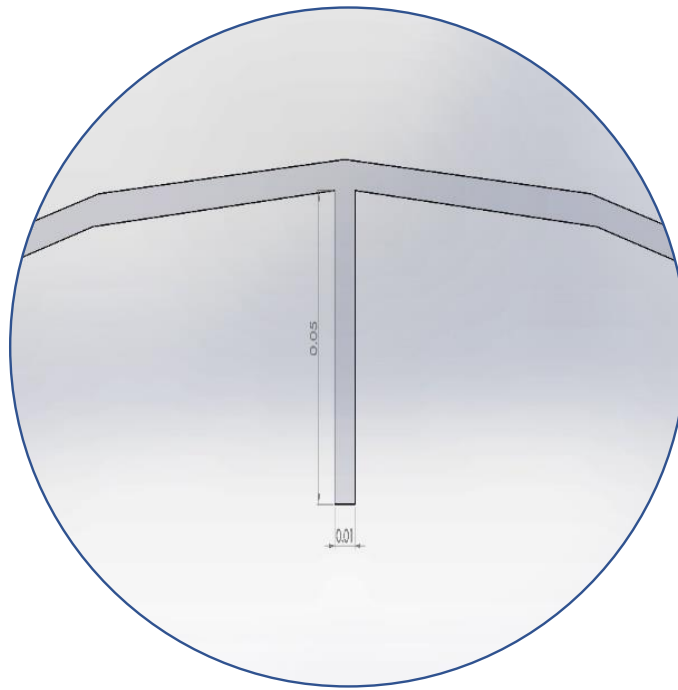


Figura 3.12 vista superior de baffle deflector de flujo.

En la *Figura 3.13* se muestra el render del cuerpo del reactor con los deflectores.



Figura 3.13 Render del cuerpo del reactor con deflectores.

Para poder determinar los espesores del reactor es necesario considerar la presión que se presenta en las paredes del contenedor.

Debido a que la composición de la mezcla de reacción es variable dependiendo del tiempo de reacción puesto que inicialmente hay solo metanol y aceite, pero luego se generan diglicéridos, monoglicéridos, glicerol y metil éster, asimismo la temperatura de operación tiene efecto en la densidad, se simuló un sistema de reacción batch con los componentes característicos de los aceites residuales de cocina.

En la *Figura 3.2* se muestran los perfiles de densidad de la mezcla a las temperaturas de 45 y 65°C, de donde se puede deducir que el mayor valor esperado de densidad es de 903.6 Kg/m³.

Una manera práctica de calcular esta presión es considerando que el líquido que esté contenido en el cilindro es agua, esto en gran medida se puede hacer ya que la densidad del agua es mayor que cualquiera de los reactivos que estarán en el reactor y por lo que se podrá considerar como una presión hidrostática.

La ecuación que con la que se calcula la presión hidrostática es la siguiente:

$$P_{H_2O} = \rho gh \dots\dots\dots(8)$$

Donde se considerará que la densidad (ρ) y la aceleración de la gravedad (g) son tomadas en la Ciudad de México y por lo que $\rho = 999.19 \frac{kg}{m^3}$ y $g = 9.78 \frac{m}{s^2}$. La altura de líquido que estará en el cilindro depende ahora del V_D y será $h = 1.40m$.

Sustituyendo estos valores en la *Ecuación 8* se obtiene que:

$$P_{H_2O} = \left(999.19 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.78 \frac{m}{s^2}\right) (1.40 m) = 13712.1 Pa = 13.71 kPa$$

La P_{H_2O} no será la presión de diseño P_D . La P_D se calcula teniendo en cuenta la presión atmosférica (P_O) y un valor de seguridad de 206.84kPa (según el código ASME VIII)

$$P_D = (P_o + P_{H_2O}) + 206.84 \text{ kPa} \dots\dots\dots(9)$$

Sustituyendo valores en la *Ecuación 9* se determinará la presión de diseño:

$$P_D = (101.325 \text{ KPa} + 13.71 \text{ kPa}) + 206.84 \text{ kPa} = 321.88 \text{ kPa}$$

P_D será entonces la presión de diseño que se utilizará para calcular los espesores del reactor y también permitirá determinar la geometría del fondo toriesférico del mismo.

Los parámetros hasta ahora determinados se enlistan en la *Tabla 3.6* y *Tabla 3.7*.

Tabla 3.6 Parámetros de operación y diseño

	Parámetros de operación		Parámetros de diseño	
	Símbolo	Magnitud	Símbolo	Magnitud
Presión	P_T	101.33 KPa	P_D	321.88 KPa
Volumen	V_T	1.28 m ³	V_D	1.47 m ³
Temperatura	T_T	45°C	T_D	90°C

Tabla 3.7 Altura y diámetro interior del cilindro

	Símbolo	Magnitud
Altura cilindro	H	1.61 m
Diámetro interno	D_i	1.08 m

3.3.2 Fondo del reactor.

El fondo del reactor que será de tipo toriesférico ya que, por un lado, es fácil manufacturarlo y también porque, con un buen agitador, se ven disminuida las zonas muertas de agitación.

Este tipo de fondo tiene la geometría que se muestra en la *Figura 3.14*. Donde:

R : Radio del fondo toriesférico.

- r : Radio toriesférico.
- h : Altura recta.
- f : Altura toriesférica.
- e : Espesor del fondo toriesférico
- H : Altura total del fondo toriesférico.
- De : Diámetro exterior del fondo toriesférico.

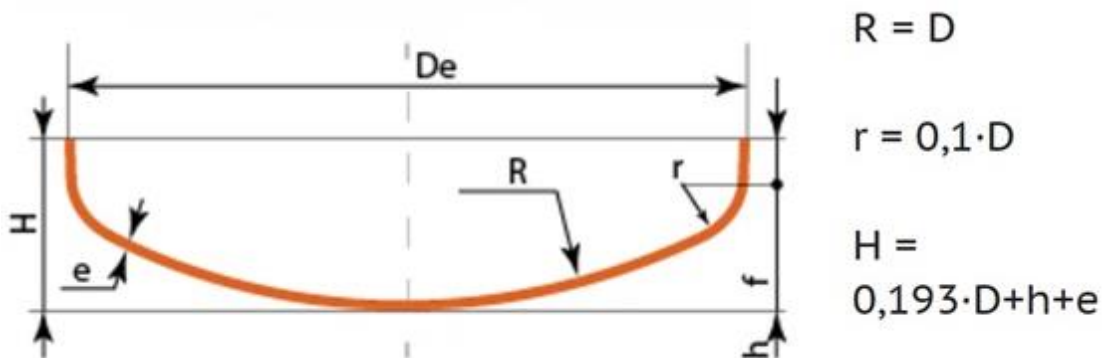


Figura 3.14 Geometría fondo toriesférico

El primer parámetro que se conoce es el D_i el cual es igual a R

El valor de R se calcula con la Ecuación 10:

$$R = D_i \dots\dots\dots(10)$$

$$R = 1.08 \text{ m}$$

Para obtener el valor de r se sustituye el valor del D_i en la Ecuación 11:

$$r = 0.1 * D_i \dots\dots\dots(11)$$

$$r = 0.1 * 1.08 \text{ m} = 0.11\text{m}$$

Para obtener el valor de f se sustituye el valor de en la Ecuación 12:

$$f = 0.193 * D_i \dots\dots\dots(12)$$

$$f = 0.193 * 1.08 \text{ m} = 0.21\text{m}$$

El volumen del fondo toriesférico se puede calcular sustituyendo el valor del D_i en la Ecuación 13:

$$V_f = 0.1 * D_i^3 \dots\dots\dots(13)$$

$$V_f = 0.1 * (1.08 \text{ m})^3 = 0.12 \text{ m}^3$$

En la *Figura 3.15* se puede observar el plano de revolución del fondo toriesférico con las medidas calculadas anteriormente.

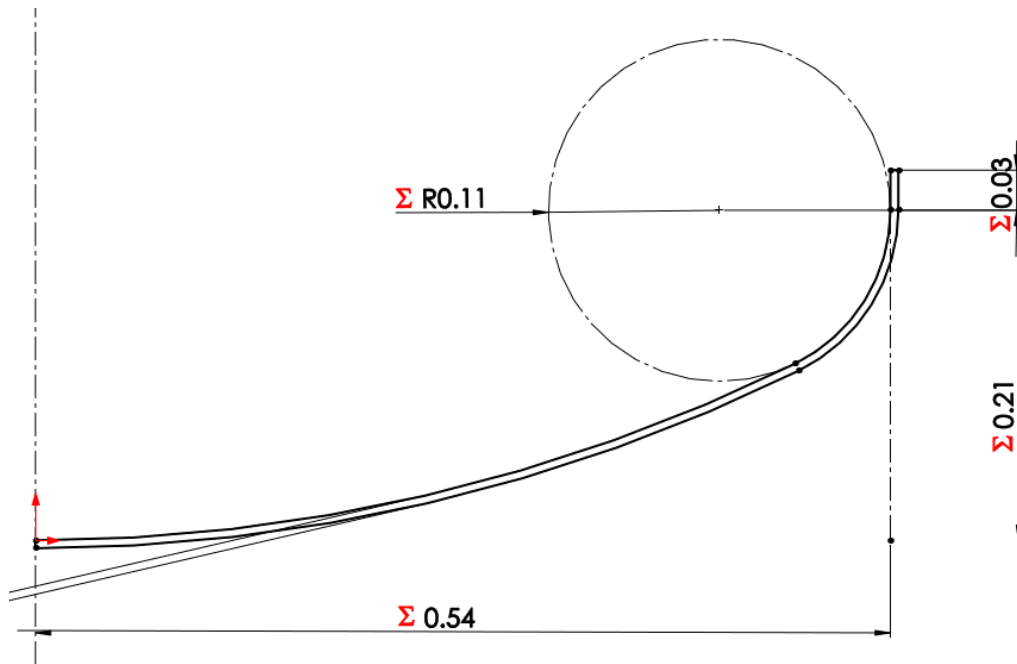


Figura 3.15 Plano de revolución fondo toriesférico

En la *Figura 3.16* se muestra el render del fondo toriesférico.

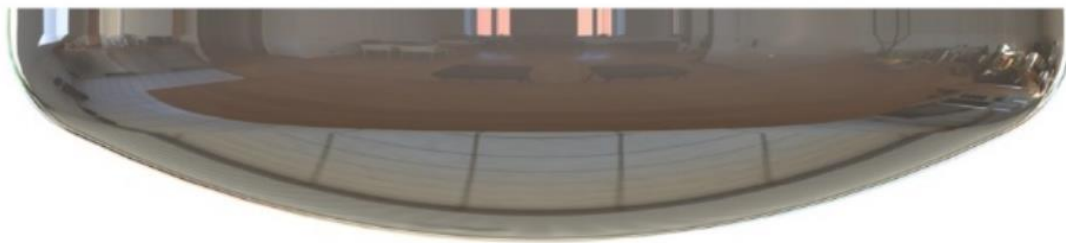


Figura 3.16 Render de fondo toriesférico.

3.3.3 Espesores

Los espesores, tanto de la parte cilíndrica como del fondo se pueden obtener con las ecuaciones descritas en el código ASME sección 8 [48]. El material propuesto es el acero inoxidable 304 el cual es resistente a la corrosión, ya que uno de los principales problemas de la reacción de transesterificación es que ocurre en medio básico.

Para el espesor del cilindro se utiliza la formula UG – 27 del código ASME VIII basadas en el Esfuerzo Circunferencial[49] :

$$t_c = \frac{P_D D_i}{SE - 0.6P_D} \dots\dots\dots(14)$$

Donde E es eficiencia de soldadura, la cual en este caso es 1 porque la soldadura será tanto de manera externa como de manera interna, y S es el modulo de corte que para el acero inoxidable es igual a 115.14 MPa. Sustituyendo estos valores en la Ecuación 14 se calcula el espesor del cilindro.

$$t_c = \frac{321.88 kPa * \left(\frac{1.08 m}{2}\right)}{(115142.8196 kPa * 1) - 0.6(321.88 kPa)}$$
$$t_c = 0.0015 m = 1.5 mm$$

El mismo código ASME con la Ecuación 15 indica que se debe tomar un margen de corrosión del material dado por:

$$t = t_c + c \dots\dots\dots(15)$$

Por el carácter básico de la reacción se consideran 3 mm más de espesor. Sustituyendo el valor de t_c y considerando los 3 mm en la Ecuación 15 obtendremos el espesor necesario para el cilindro del reactor. El resultado de esta suma da un espesor que no es comercial por lo que se tiene que aproximar al inmediato superior que se tenga en el mercado, que es en este caso de 5 mm.

$$t = 1.5 mm + 3 mm = 4.5 mm \approx 5 mm$$

Para el espesor del fondo toriesférico se utiliza la formula UG – 32 del código ASME VIII:

$$t_H = \frac{PRM}{2SE - 0.2P_D} \dots\dots\dots(16)$$

La eficiencia de soldadura y el módulo de corte serán los mismos que en el cálculo del espesor del cilindro. Sustituyendo valores en la *Ecuación 16* se obtiene el espesor del fondo.

$$t_H = \frac{321.88 \text{ kPa} * (1.08 \text{ m}) * 1.54}{(2 * 115142.8196 \text{ kPa} * 1) - 0.2(321.88 \text{ kPa})}$$

$$t_H = 0.0014 \text{ m} = 1.4 \text{ mm}$$

Nuevamente se debe considerar el margen de corrosión y aproximar el resultado a un espesor comercial. De la *Ecuación 15* se sustituye el espesor calculado y al tratarse de la misma operación se consideran 3 mm más por el efecto que tiene la corrosión en el material.

$$t = t_H + c$$

$$t = 1.4\text{mm} + 3\text{mm} = 4.4\text{mm} \approx 5 \text{ mm}$$

Para validar los espesores que se obtuvieron se realizó un análisis de estático de deformación por el método de Von Mises, uno a la presión de trabajo y otro con la presión de diseño.

En la *Figura 3.17* se puede observar que a la presión a la que se trabajará dentro del reactor no tendrá efectos de deformación de éste, y que no presenta ningún punto crítico de concentraciones de esfuerzos por lo que se puede afirmar que los espesores calculados son adecuados

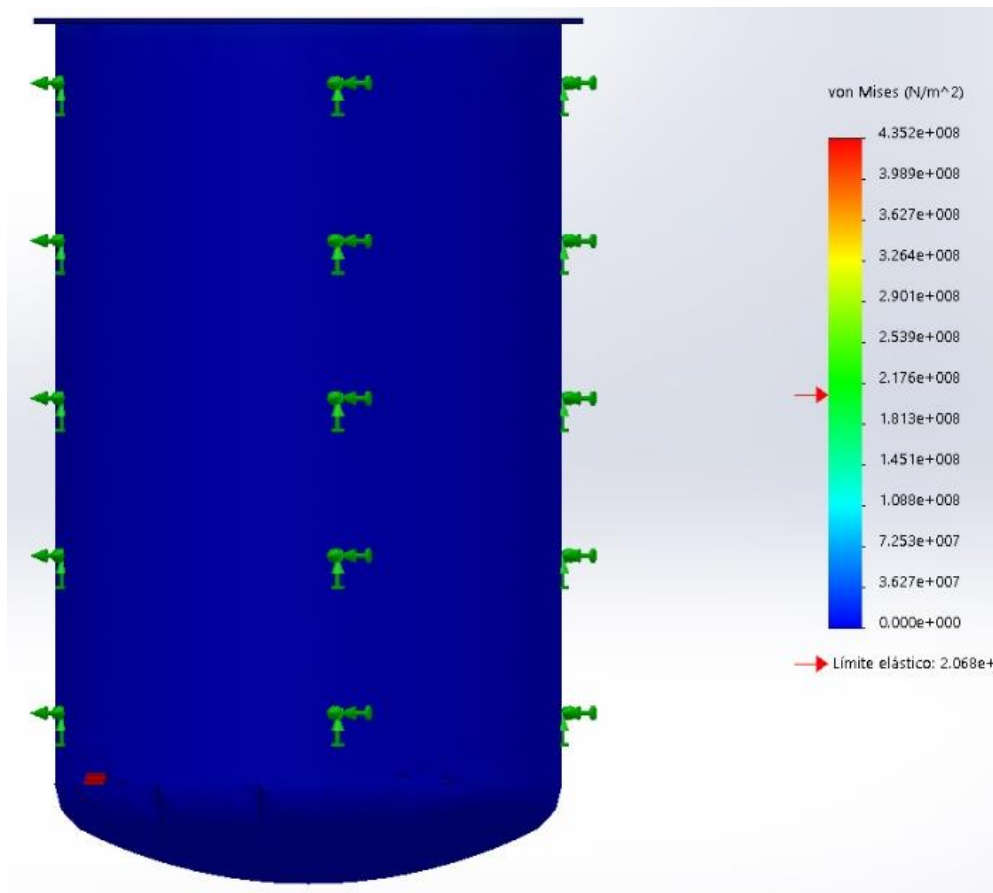


Figura 3.17 Análisis esfuerzo-deformación a la presión de trabajo.

Adicionalmente se realizó el mismo ejercicio a la presión de diseño para poder conocer la deformación que tendría el reactor a mayores valores de la misma. En la *Figura 3.18* podemos observar que a la presión máxima de diseño, el reactor tendría una notoria deformación en el fondo toriesférico y que la zona de la soldadura que lo junta con el cilindro sería la que alcanzaría un esfuerzo crítico el cual puede ocasionar un fallo

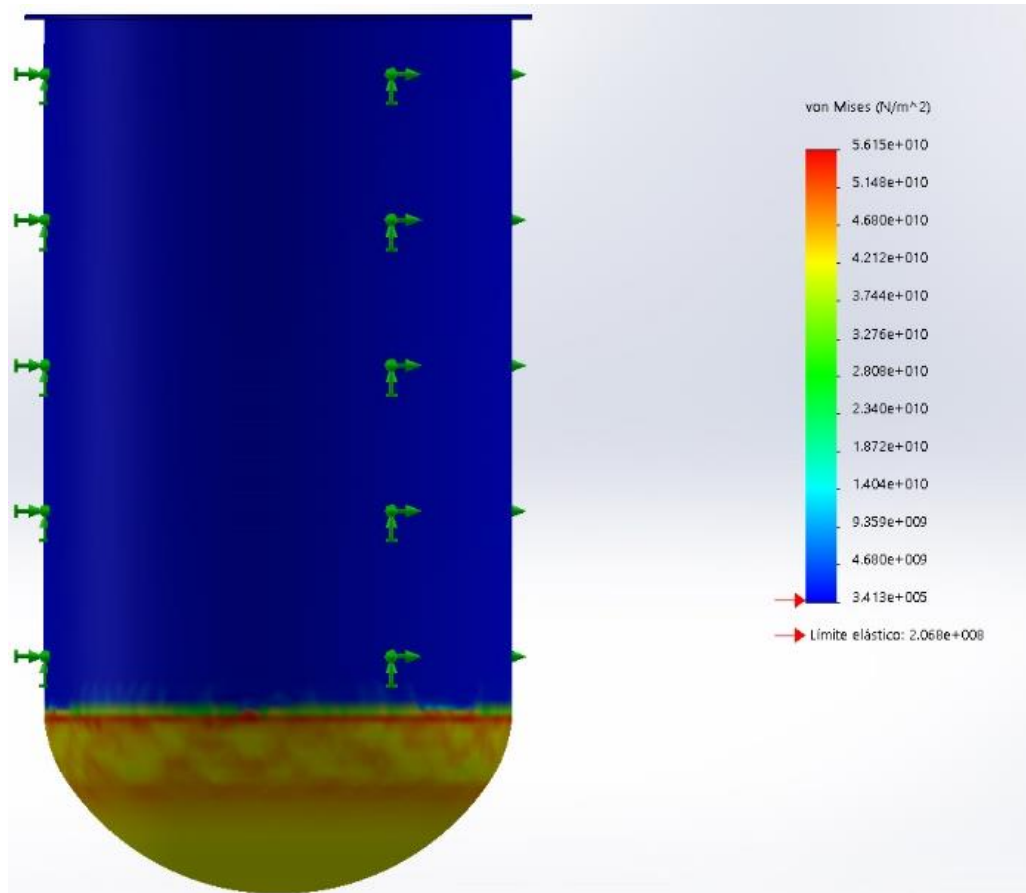


Figura 3.18 Análisis esfuerzo-deformación a la presión de diseño.

3.3.4 Diseño Turbina Rushton

El impulsor que se propone para el sistema de agitación es una turbina Rushton ya que puede ser dimensionada fácilmente y su geometría depende prácticamente del diámetro interno del reactor. Las relaciones geométricas de la turbina Rushton se muestran en la *Tabla 3.8*.

Tabla 3.8 Relaciones geométricas principales de la Configuración Estándar de Estanque de Agitación en función del diámetro interior del reactor.

$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$	$\frac{E}{D_a} = 1$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$	$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$	$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$
---------------------------------	---------------------	-------------------------------	-------------------------------	--------------------------------

Donde:

D_a : Diámetro del rodete (mm)

W : Anchura de las palas (mm)

L : Largo de las palas (mm)

J : Ancho de los baffles (mm)

D_t : Diámetro interno del reactor (mm)

D_{pl} : Diámetro de la placa circular del rodete (mm)

E : Distancia de la parte inferior del tanque al centro de las paletas de la turbina (m)

Usando las relaciones de la Tabla 8 se procede a realizar los cálculos, como sigue:

Dado que $D_t = D_i = 1080 \text{ mm}$, con estos valores se pueden calcular los valores de las otras dimensiones.

$$\text{De } \frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \text{ se despeja } D_A = \frac{D_t}{3} = \frac{1080 \text{ mm}}{3} = 360 \text{ mm}$$

$$\text{De } \frac{E}{D_a} = 1 \text{ y al despejar de manera apropiada se tiene: } E = D_A = 360 \text{ mm}$$

$$\text{De } \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}, L \text{ puede calcularse entonces con: } L = \frac{D_A}{4} = \frac{360 \text{ mm}}{4} = 90 \text{ mm}$$

$$\text{De } \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \text{ despejando } W = \frac{D_A}{5} = \frac{360 \text{ mm}}{5} = 72 \text{ mm}$$

$$\text{De } \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}, J \text{ está dada entonces por: } J = \frac{D_t}{12} = \frac{1080 \text{ mm}}{12} = 90 \text{ mm}$$

Y finalmente,

$$D_{pl} = D_a - L = 360 \text{ mm} - 90 \text{ mm} = 270 \text{ mm}$$

En la *Figura 3.19* se muestra el render final de la turbina con las dimensiones obtenidas anteriormente.

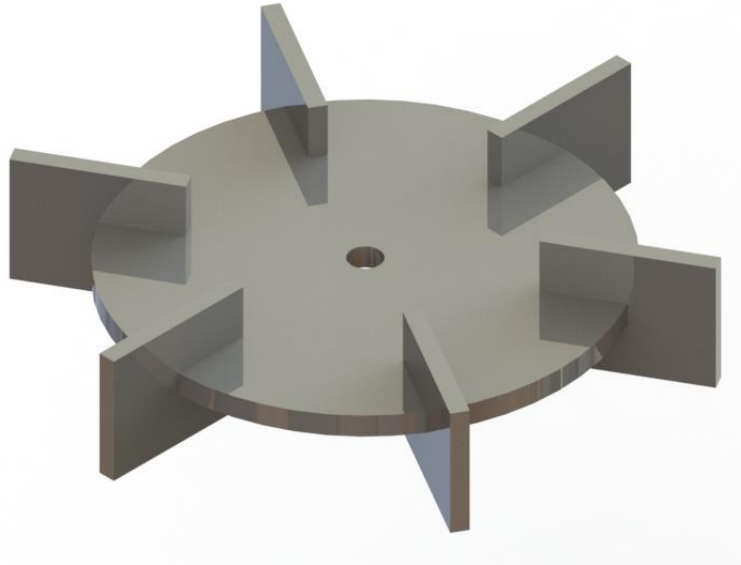


Figura 3.19 Render turbina Rushton

En esta propuesta la altura del líquido es 1.5 veces mayor a la del diámetro del cilindro. Cuando la altura del líquido que se agitará es 1.25 veces mayor que el diámetro del cilindro, será necesario utilizar múltiples turbinas.

El número de turbinas (N_T) se determina con la ecuación de Weber [50]

$$N_T = WELH/D_i \dots\dots\dots(17)$$

Donde

$WELH$: Columna de agua equivalente.

D_i : Diámetro interno del reactor.

El valor de $WELH$ se obtiene multiplicando la altura máxima del líquido que se agitará por el promedio de la gravedad específica del contenido del reactor. La altura máxima de líquido en este caso será de 1.53 m y el promedio de la gravedad específica de los líquidos que serán mezclados es de 0.8495. Sustituyendo estos valores en la *Ecuación 17* se puede determinar el número de turbinas necesarias para nuestro reactor.

$$N_T = \frac{WELH}{D_i} = \frac{(1.53m * .8495)}{1.08m} = 1.20 \approx 2$$

Al ser N_T mayor a 1 se utiliza el número entero inmediato superior, por lo que en este reactor serán necesarias 2 turbinas.

La distancia entre impulsores debe ser entre 1 y 1.5 veces el diámetro de impulsor. Si los impulsores están muy distanciados, habrá áreas no agitadas y la acción del impulsor se ve reducida. En cambio, si los impulsores están muy cercanos, la corriente de flujo impulsada por una turbina interfiere con la del impulsor adyacente dando como resultado un inadecuado mezclado [51].

3.3.4.1 Potencia de agitación

Para poder calcular la potencia de agitación primero es necesario obtener el número de potencia el cual varía dependiendo del tipo de impulsor utilizado.

El número de potencia es un valor que se obtiene de graficas de factor de potencia para impulsores. En la *Figura 3.20* se muestran diferentes curvas de diversos tipos de impulsores. La curva identificada con el número 1 corresponde a una turbina Rushton.

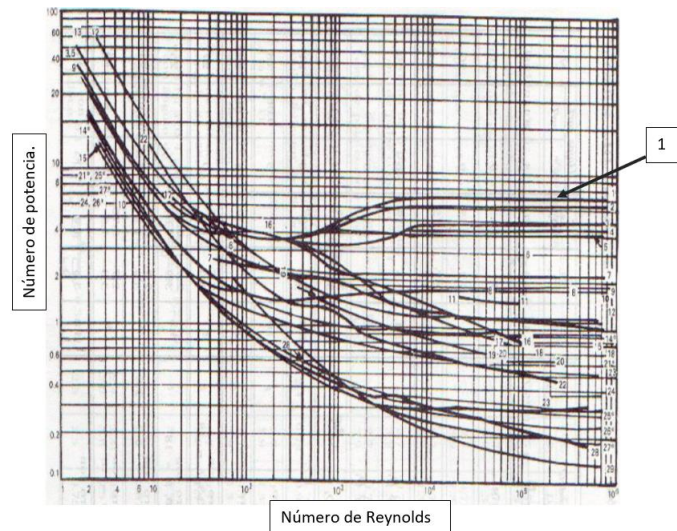


Figura 3.20 Gráfica de factor de potencia para impulsores.

Para obtener el número de potencia se utiliza la gráfica de la *Figura 3.20*. Primero se calculó el número de Reynolds con la ecuación siguiente:

$$Re = \frac{Da^2 N \rho}{\mu} \dots\dots\dots(18)$$

Sustituyendo los valores de diámetro del impulsor (Da), velocidad de agitador (N), densidad (ρ) y viscosidad (μ) de fluido en la *Ecuación 18* se obtiene el número de Reynolds

$$Re = \frac{(0.36)^2(10)(924.00)}{0.03} = 45849.76$$

El número de Reynolds es mayor de 10 000, cuando esto sucede el flujo será turbulento [52]. En la *Figura 3.21* se identifica la curva 1 (Turbina Ruston) y el número de Reynolds calculado. Con ello se observa que el valor de *Po* será 7.

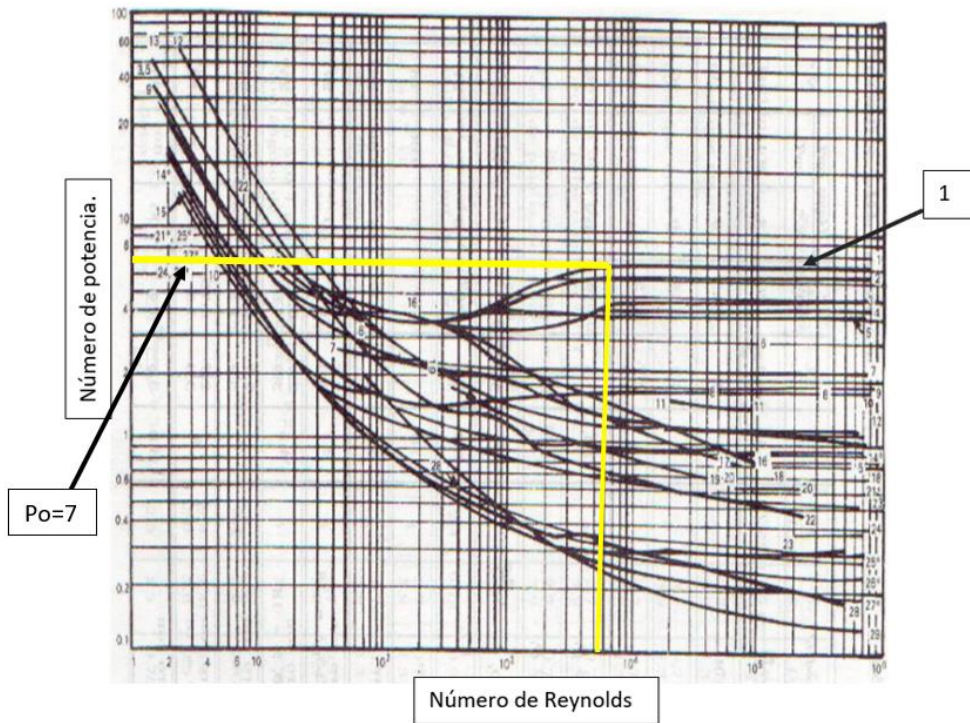


Figura 3.21 Determinación de número de potencia utilizando la grafica de factor de potencia de una turbina Rushton [53].

La potencia de agitación requerida se calcula con la ecuación:

$$P = \frac{Po * \rho * N^3 * Da^5}{g} \dots\dots\dots(19)$$

El significado de los símbolos y los valores que tienen se muestran en la *Tabla 3.9*.

Tabla 3.9 Símbolos y valores de variables para el cálculo de la potencia requerida.

Nombre	Símbolo	Unidades	Valor
Diámetro del agitador	Da	m	0.36
Velocidad del agitador	N	rev/s	10.00
Aceleración de la gravedad	g	m/s	9.78
Densidad	ρ	kg/m ³	924.00
Viscosidad dinámica	μ	Pa * s	0.03
Número de potencia	Po		7

La densidad y viscosidad corresponden a los valores que tiene el aceite a 15°C (temperatura promedio de la CDMX) obtenido en el del perfil de densidad que se explica en la sección 3.2.1. La velocidad del agitador es la que se determinó para la reacción, la cual corresponde a la velocidad utilizada en los experimentos de la síntesis de biodiésel ACR-1 y ACR-2.

Sustituyendo los valores de la *Tabla 3.9* en la *Ecuación 19*

$$P = \frac{(7) * (924) * (10)^3 * (0.36)^5}{9.78} = 3998.93 \frac{kg * m}{s} = 39.22 kW$$

La configuración final del sistema de agitación se puede observar en la *Figura 3.22*.

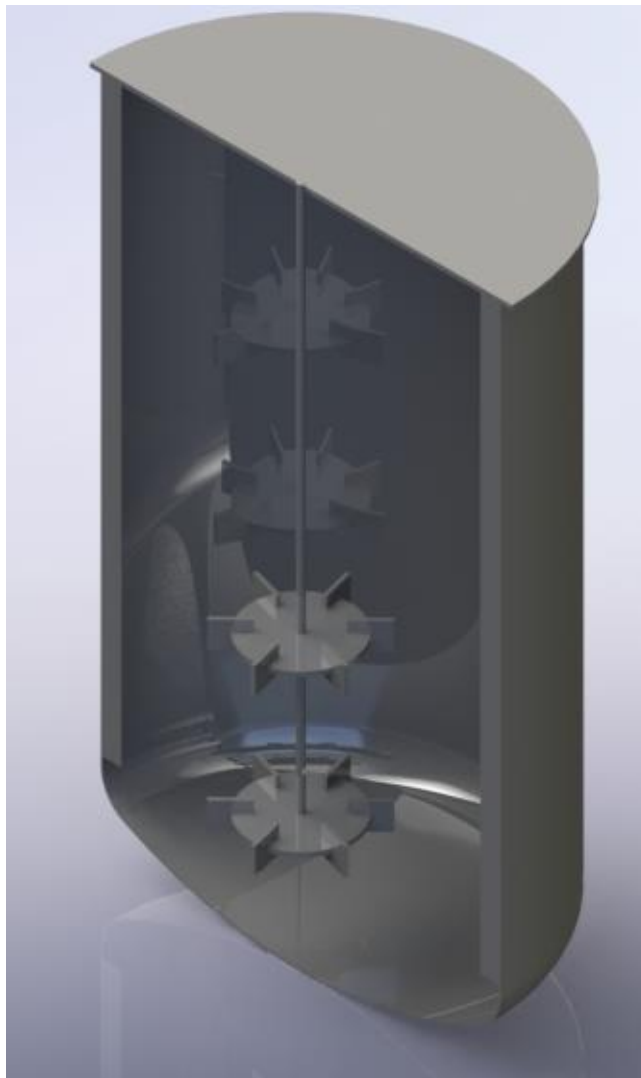


Figura 3.22 Configuración del sistema de agitación con turbinas Rushton.

3.3.5 Simulación de agitación.

El grado de agitación que pueda alcanzar el reactor es muy importante ya que esta variable afecta directamente a los rendimientos [37].

El software de diseño donde se realizaron todas las partes del reactor cuenta con un módulo de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) el cual fue utilizado para poder predecir el grado de agitación que alcanzaría el reactor diseñado.

El dominio computacional de la simulación se muestra en la *Figura 3.23*.

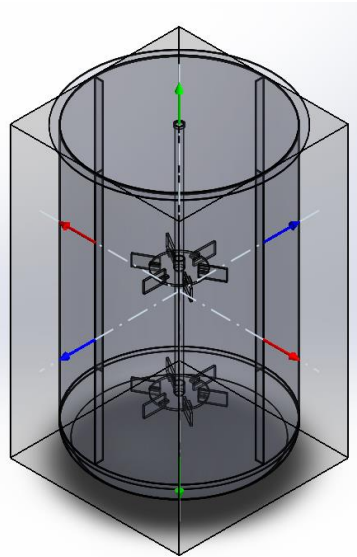


Figura 3.23 Dominio computacional de la simulación.

El subdominio para la simulación considera un volumen del 100% a la presión de trabajo (101325 Pa) y la temperatura de la reacción ($45^{\circ}\text{C}=318.15\text{ K}$) se muestra en la *Figura 3.24*.

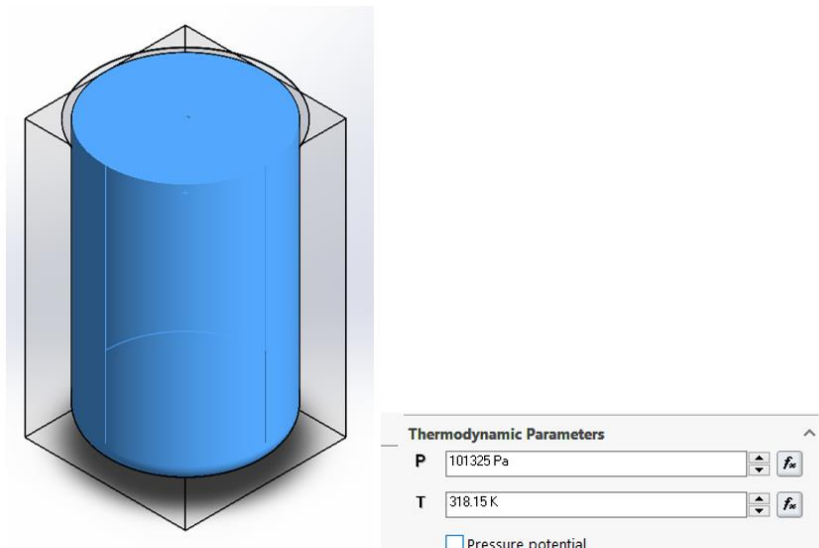


Figura 3.24 Subdominio del flujo.

La información proporcionada en la caracterización del perfil de densidad y viscosidad fue utilizada para definir un nuevo líquido en la base de datos del programa (Figura 3.25).

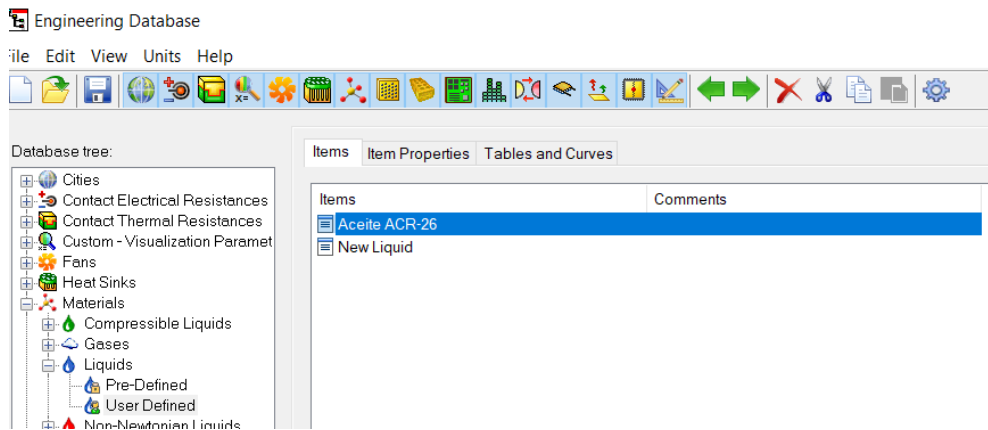


Figura 3.25 Ventana de flujo de la simulación.

Se definió la viscosidad del fluido (Figura 3.26)

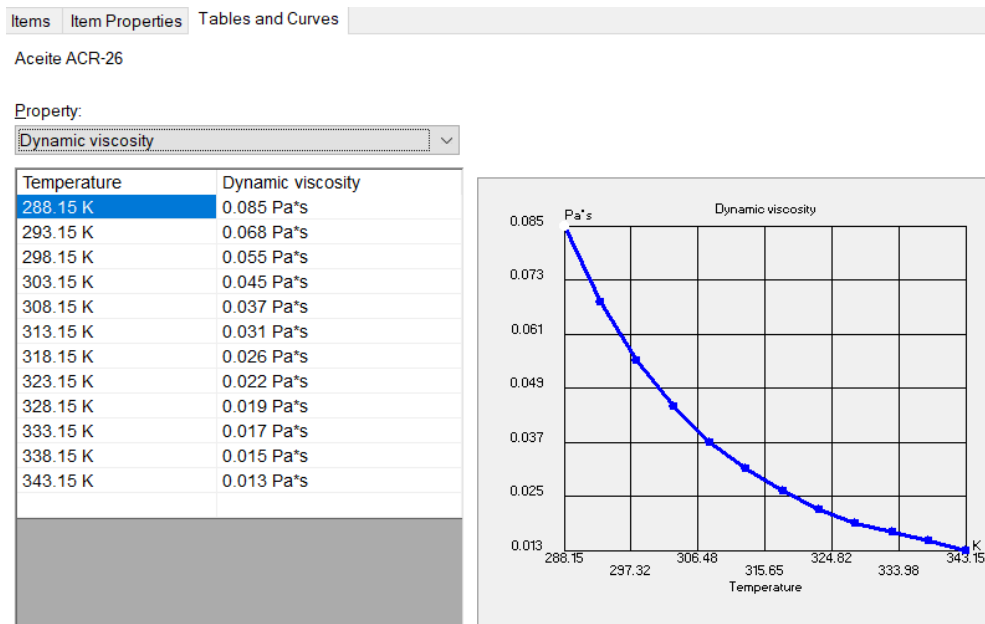


Figura 3.26 Almacenamiento de datos experimentales de viscosidad dinámica al simulador.

También fue definida la densidad (*Figura 3.27*)

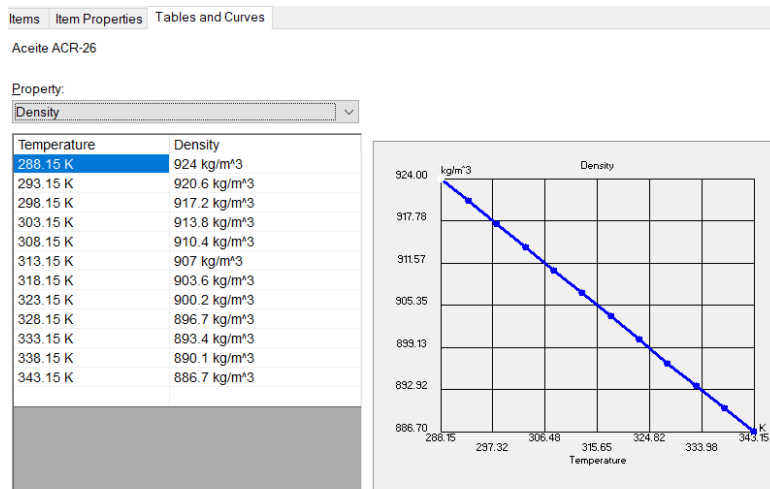


Figura 3.27 Almacenamiento de datos experimentales de densidad al simulador.

En la *Figura 3.28* se muestra la sección de rotación de la simulación. La región de rotación considerada fue el sistema de agitación (turbinas Rushton y eje) a la velocidad a la que se llevará la reacción de transesterificación (600 RPM=63 rad/s).

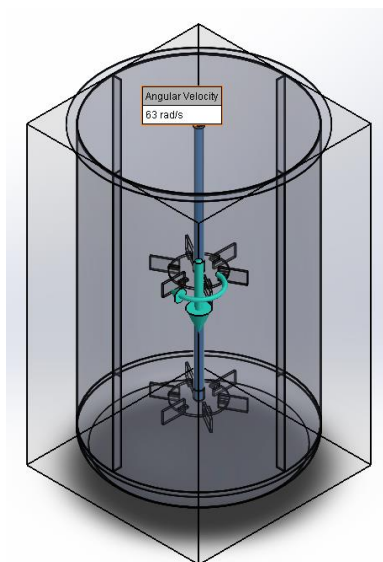


Figura 3.28 Región de rotación.

En la *Figura 3.29* se muestran los resultados de la simulación con los parámetros anteriormente descritos. Se observa que por el tipo de agitador el campo de flujo generado será radial. La implementación de deflectores de flujo permite la disminución de vorticidad en las zonas cercanas a la pared cilíndrica. El uso de un fondo toriesférico promueve una mezcla sin zonas de agitación muertas en la parte baja del reactor.

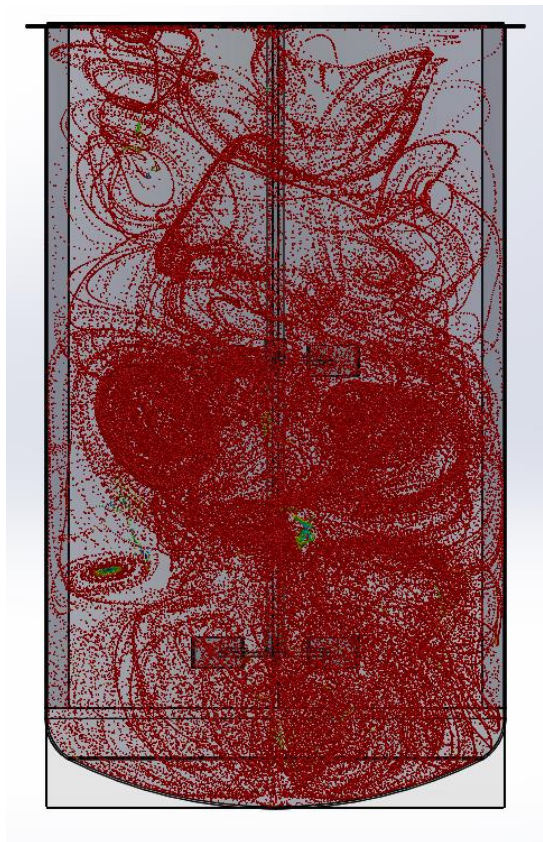


Figura 3.29 Resultado de la simulación del sistema de agitación.

La presencia de un color rojo en prácticamente todo el subdominio del fluido en la simulación permite determinar que el grado de agitación dentro del reactor será alto.

4 Conclusiones

Se identificaron las propiedades de transporte y los parámetros involucrados en la reacción de transesterificación (tiempo de reacción, velocidad de agitación, temperatura, concentración de catalizador y relación molar metanol:triglicérido). Estas condiciones de reacción fueron utilizadas en el diseño de un reactor para producir biodiésel a nivel planta piloto. El diseño se basa en las normas del código ASME y las normas DIN para garantizar un correcto funcionamiento de los componentes del reactor.

El diseño experimental realizado permitió el monitoreo del avance de la reacción de transesterificación en medio básico (NaOH) con respecto al tiempo. El producto obtenido de la reacción de transesterificación fue caracterizado mediante: espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR), espectroscopía de resonancia magnética nuclear de protón (RMN-H) y ionización por electrospray (ESI-MS). Se identificaron los grupos funcionales característicos del biodiésel en todas las muestras. Se calcularon los rendimientos de cada experimento y en todos los casos se obtuvo biodiésel con rendimientos mayores al 98.5%. La composición de las muestras analizadas está integrada en su mayoría de diversos tipos de metil esterés (el éster metílico linoleico en mayor proporción con 44%), por lo que se puede afirmar que se obtuvo exitosamente biodiésel.

Se obtuvo el perfil de densidad y viscosidad del aceite y del biodiésel. La viscosidad máxima que se tendrá en el proceso es la del aceite a 15°C con un valor de 924 kg/m³. Este valor nos permitió seleccionar el tipo de turbina que se podía utilizar en el proceso. Se propone utilizar turbinas tipo Rushton ya que con ellas se pueden alcanzar flujos turbulentos y la viscosidad de la mezcla se encuentra en el intervalo en el que se recomienda su uso. La evaluación de la variación de la viscosidad y densidad a diferentes tiempos fue utilizada posteriormente para predecir el comportamiento del fluido al utilizar las turbinas en el sistema. Se calculó la potencia requerida en el sistema de agitación para mantener las condiciones de operación de la producción a baja escala.

Se diseñó el reactor utilizando como material propuesta el acero AISI 304 ya que este material presenta buena resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas son adecuadas para las condiciones a las que se trabajará. Los espesores calculados fueron de 5 mm para el cilindro y el fondo toriesférico. Estos espesores fueron validados con un análisis de esfuerzo y deformación, usando *SolidWorks Simulation*, en el que se determinó las condiciones de operación a las cuales el reactor no sufrirá ninguna deformación y habrá puntos críticos de concentración de esfuerzos.

Se utilizó el módulo de CFD de SolidWorks para hacer una simulación de la mezcla, obteniéndose una agitación homogénea dentro del reactor.

La propuesta de diseño que se presenta es de gran importancia dadas las condiciones experimentales para producir el biodiesel por la reacción de transesterificación básica homogénea (método más usado). La temperatura de la reacción determinada para este trabajo fue de 45°C. Cabe destacar que este resultado omite la implementación de un condensador y disminución del gasto energético, haciendo que los costos de manufactura y operación disminuyan. La relación molar metanol:aceite (5:1) es muy similar a la relación estequiométrica (3:1). La concentración de catalizador es de 0.5 % en peso es un porcentaje muy bajo en comparación al método convencional, por lo que los insumos en el proceso serían menores y los residuos generados disminuirían al evitar lavados y contaminación de agua en procesos de purificación de biodiesel subsecuentes. Ejemplo de ello es la disminución de las emisiones de subproductos y catalizador residual que se vierten al medio ambiente.

Perspectivas

Si se considera la implementación de este reactor en alguna planta piloto, será necesario el desarrollo la fase de diseño detallado en el que se añadiría el sistema de calentamiento, se calcularían sujeciones y se haría la selección del motor-reductor necesario para el sistema de agitación.

Referencias

- [1] Banco Mundial, "Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total) | Data," *Banco Mundial*, 2014. [Online]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS?view=chart>. [Accessed: 16-Mar-2018].
- [2] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, "Inventario Nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero- Sectores de interés nacional," 2018.
- [3] SENER, "Balance nacional de energía 2016," p. 184, 2016.
- [4] D. Rutz, "Biofuel Technology Handbook," *Contract*, p. 152, 2008.
- [5] Z. Helwani, M. R. Othman, N. Aziz, W. J. N. Fernando, and J. Kim, "Technologies for production of biodiesel focusing on green catalytic techniques: A review," *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 12, pp. 1502–1514, 2009.
- [6] E. Salinas and V. Gasca, "Los biocombustibles," *El Cotid.*, vol. 157, pp. 75–82, 2009.
- [7] Biofuels.org.uk, "Second Generation Biofuels," *Biofuels*, 2010. [Online]. Available: <http://biofuel.org.uk/second-generation-biofuels.html>. [Accessed: 16-Mar-2018].
- [8] D. H. Lee, "Algal biodiesel economy and competition among bio-fuels," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 43–49, 2011.
- [9] M. A. H. Fangrui Ma, "Biodiesel production: a review 1," *Sci. Technol.*, vol. 70, pp. 1–15, 1999.
- [10] T. L. Alleman, R. L. McCormick, E. D. Christensen, G. Fioroni, K. Moriarty, and J. Yanowitz, *Biodiesel Handling and Use Guide*, no. November. 2016.
- [11] Sahar *et al.*, "Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 41, no. May, pp. 220–226, 2018.
- [12] J. K. Efavi *et al.*, "The effect of NaOH catalyst concentration and extraction time on the yield and properties of Citrullus vulgaris seed oil as a potential biodiesel feed stock," *South African J. Chem. Eng.*, vol. 25, pp. 98–102, 2018.
- [13] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Población," Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI, 2018.
- [14] L. Tejada and L. Monroy, "Obtención De Biodiesel a Partir De Diferentes Tipos De Grasa Residual De Origen Animal," *Luna Azul*, no. 34, pp. 240–256, 2012.
- [15] E. Aransiola, T. Ojumu, O. Oyekola, T. Madzimbamuto, and D. Ikhu-Omoregbe, "A review of current technology for biodiesel production: State of the art," *Biomass and Bioenergy*, vol. 61, pp. 276–297, 2014.

- [16] Abdullah, R. N. Rahmawati Sianipar, D. Ariyani, and I. F. Nata, "Conversion of palm oil sludge to biodiesel using alum and KOH as catalysts," *Sustain. Environ. Res.*, vol. 27, no. 6, pp. 291–295, 2017.
- [17] F. Ouanji, M. Khachani, M. Boualag, M. Kacimi, and M. Ziyad, "Large-scale biodiesel production from Moroccan used frying oil," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 45, pp. 21022–21029, Dec. 2016.
- [18] H. Fukuda, A. Kondo, and H. Noda, "Biodiesel fuel production by transesterification of oils," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 92, no. 5. Elsevier, pp. 405–416, 01-Jan-2001.
- [19] American Society for Testing and Materials, "Standard Specification for Diesel Fuel Oils ASTM D975," 2002.
- [20] American Society for Testing and Materials, "Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels ASTM D6751-15c," 2010.
- [21] International Energy Agency, "Oil Market report," *IEA / OECD*, 2016. [Online]. Available: <https://www.iea.org/media/omrreports/tables/2018-03-15.pdf>. [Accessed: 02-Apr-2018].
- [22] D. E. Vallarta Cardona, "Optimización a escala piloto de un proceso de transesterificación de aceite comestible residual para la obtención sustentable de biodiésel," 2018.
- [23] E. Riegelhaupt, J. Odenthal, and L. Janeiro, "Diagnóstico de la situación actual del biodiésel en México y escenarios para su aprovechamiento Diagnóstico de la situación actual del biodiésel en México y escenarios para su aprovechamiento," 2016.
- [24] R. López, "Potencial De Produccion De Semilla De Jatropha Curcas En Sinaloa," *Univ. Nac. Autónoma México - Cent. Geociencias Posgrado*, 2008.
- [25] I. González and J. A. González, "Aceites usados de cocina. problemática ambiental, incidencias en redes de saneamiento y coste del tratamiento en depuradoras," *Aguasresiduales.Info*, pp. 1–8, 2015.
- [26] O. G. Díaz Cartas, "Sistema de recolección de aceite usado para conversión de biodiesel," Universidad Nacional Autónoma De México, 2014.
- [27] Seale & Associates, "Reporte de la Industria del Aceite de Consumo," 2017.
- [28] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Banco de Información Económica (BIE)," 2018.
- [29] Consejo Nacional de Población, "Datos de Proyecciones," *CONAPO*, 2018. [Online]. Available: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos. [Accessed: 02-Apr-2018].
- [30] T. Thamsiriroj and J. D. Murphy, "How much of the target for biofuels can be

- met by biodiesel generated from residues in Ireland?," *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3579–3589, 2010.
- [31] P. Kumaran, N. Mazlini, I. Hussein, M. Nazrain, and M. Khairul, "Technical feasibility studies for Langkawi WCO (waste cooking oil) derived-biodiesel," *Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1386–1393, 2011.
- [32] M. A. Plascencia Muñoz, "Estudio de factibilidad para el uso de biodiésel en el transporte interno de Ciudad Universitaria a partir de aceites comestibles de desecho," Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [33] A. S. Silitonga, H. H. Masjuki, H. C. Ong, F. Kusumo, T. M. I. Mahlia, and A. H. Bahar, "Pilot-scale production and the physicochemical properties of palm and Calophyllum inophyllum biodiesels and their blends," *J. Clean. Prod.*, vol. 126, pp. 654–666, 2016.
- [34] RENOV, "Equipos para hacer Biodiesel en México." [Online]. Available: <http://renov.com.mx/equipos-para-hacer-biodiesel-en-mexico.html>. [Accessed: 06-Jun-2018].
- [35] A. Fidel, C. Montserrat, and I. J. Tejero, "Reactores Químicos," pp. 1–47, 2010.
- [36] F. Cunill, M. Iborra, and J. Tejero, "Reactores químicos-apuntes," *React. químicos-apuntes*, pp. 70–89, 2010.
- [37] Y. Feng, T. Qiu, J. Yang, L. Li, X. Wang, and H. Wang, "Transesterification of palm oil to biodiesel using Brønsted acidic ionic liquid as high-efficient and eco-friendly catalyst," *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 25, no. 9, pp. 1222–1229, Sep. 2017.
- [38] F. J. Skoog, Douglas A. ; Holler, *Principles of Instrumental Analysis*, vol. 6. 2008.
- [39] D. A. Skoog, F. J. Holler, and S. R. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*. 2016.
- [40] American Society for Testing and Materials, "Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity) ASTM D7042," 2013.
- [41] G. Mijangos, "Síntesis y caracterización de catalizadores básicos heterogéneos para producción de biodiesel y productos de valor agregado a partir del glicerol," Instituto Politécnico Nacional, 2018.
- [42] J. Chaur Bernal, "Diseño conceptual de productos asistido por ordenador : Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa," *TDX (Tesis Dr. en Xarxa)*, Jun. 2005.
- [43] National Center for Biotechnology Information, "Methyl palmitate | C17H34O2," *PubChem Compound Database*. [Online]. Available: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/methyl_palmitate#section=Top.

[Accessed: 12-Jun-2018].

- [44] National Center for Biotechnology Information, "Methyl linolenate | C19H32O2," *PubChem Compound Database*. [Online]. Available: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/methyl_linolenate. [Accessed: 12-Jun-2018].
- [45] D. Lingwood and K. Simons, "Lipid Rafts As a Membrane-Organizing Principle," *Science (80-.)*, vol. 327, no. 5961, pp. 46–50, Jan. 2010.
- [46] National Center for Biotechnology Information, "Methyl oleate | C19H36O2," *PubChem Compound Database*. [Online]. Available: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/methyl_oleate#section=Top. [Accessed: 12-Jun-2018].
- [47] National Center for Biotechnology Information, "Methyl nonadec-9-enoate | C20H38O2," *PubChem Compound Database*. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/71386712#section=Top>. [Accessed: 12-Jun-2018].
- [48] American Society of Mechanical Engineers, "VIII Rules for Construction of Pressure Vessels," 2013.
- [49] J. Manrique, "Diseño de un recipiente a presión con un sistema de agitación para el procesamiento de biodiesel de 3 m3 de capacidad," Universidad Nacional De Ingeniería, 2011.
- [50] F. Holland and F. Chapman, *Liquid Mixing and Processing in Stirred Tanks*. 1966.
- [51] F. M. Martínez Nelis and A. Valencia Musalem, "Estudio numérico de la fluidodinámica de un estanque de agitación utilizando método de mallas deslizantes," p. 105, 2010.
- [52] R. H. Perry, D. Green, and J. Maloney, *Manual del Ingeniero Químico*. McGraw-Hill Professional Publishing, 2001.
- [53] "Cambiadores de calor de serpentines y chaqueta," *Ing. del Calor*, pp. 140–174, 2013.

Anexos

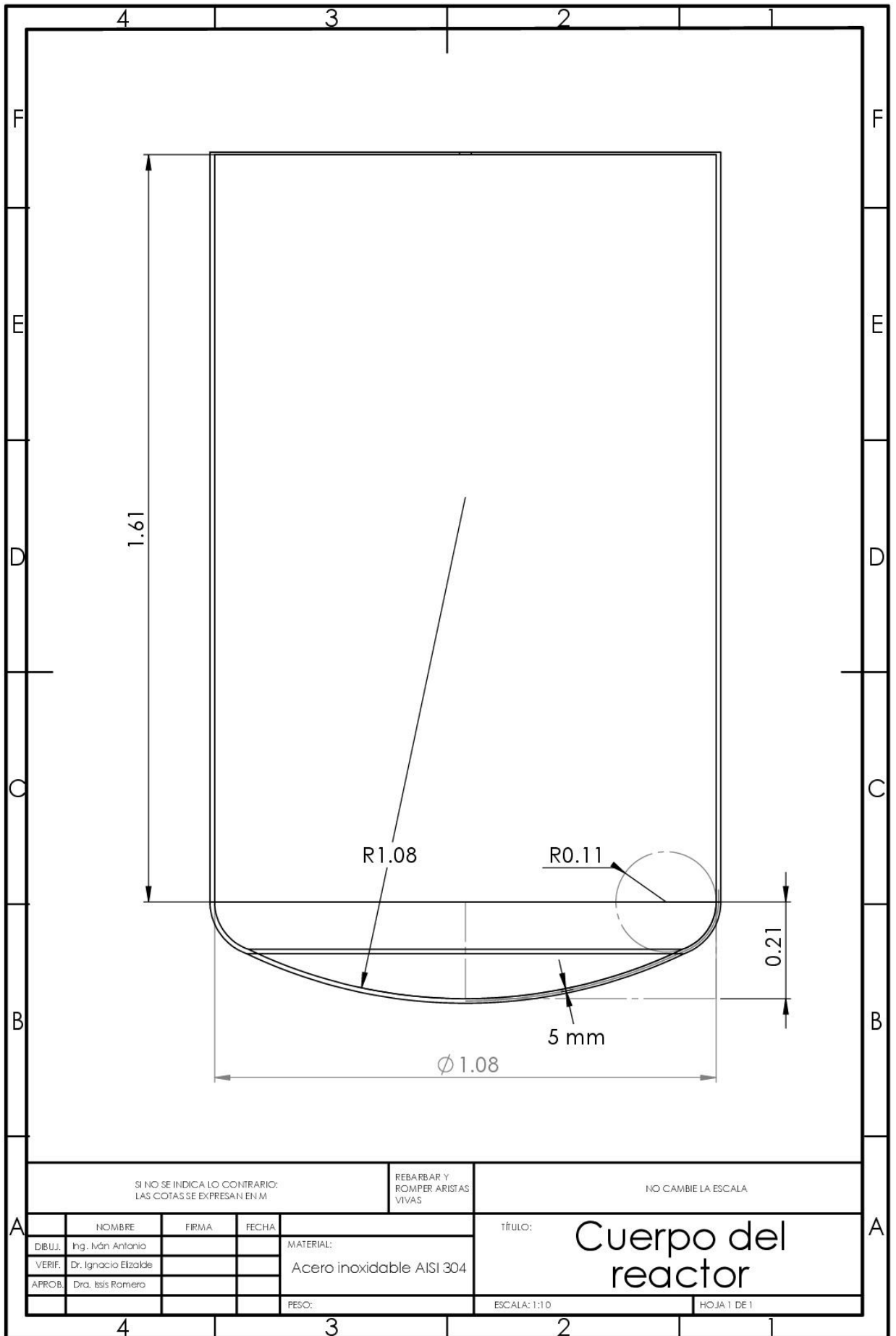


*X International Conference on Surfaces,
Materials and Vacuum
September 25th to 29th, 2017
Ciudad Juarez - Chihuahua, Mexico*

Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales

The Conference Organizing Committee certifies that
Iván Tonatiuh Antonio Fernández, Issis Romero Romero
Ibarra, Elizalde Martínez Ignacio
presented the following oral contribution
224- RWE
"Reactor design for biodiesel production based on
physicochemical properties of transesterification reaction."

Dr. Gregorio Hernández Cocoltzi
President SMCTSM



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN M

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Ing. Iván Antonio		
VERIF.	Dr. Ignacio Etzalde		
APROB.	Dra. Isis Romero		

MATERIAL:
Acero inoxidable AISI 304

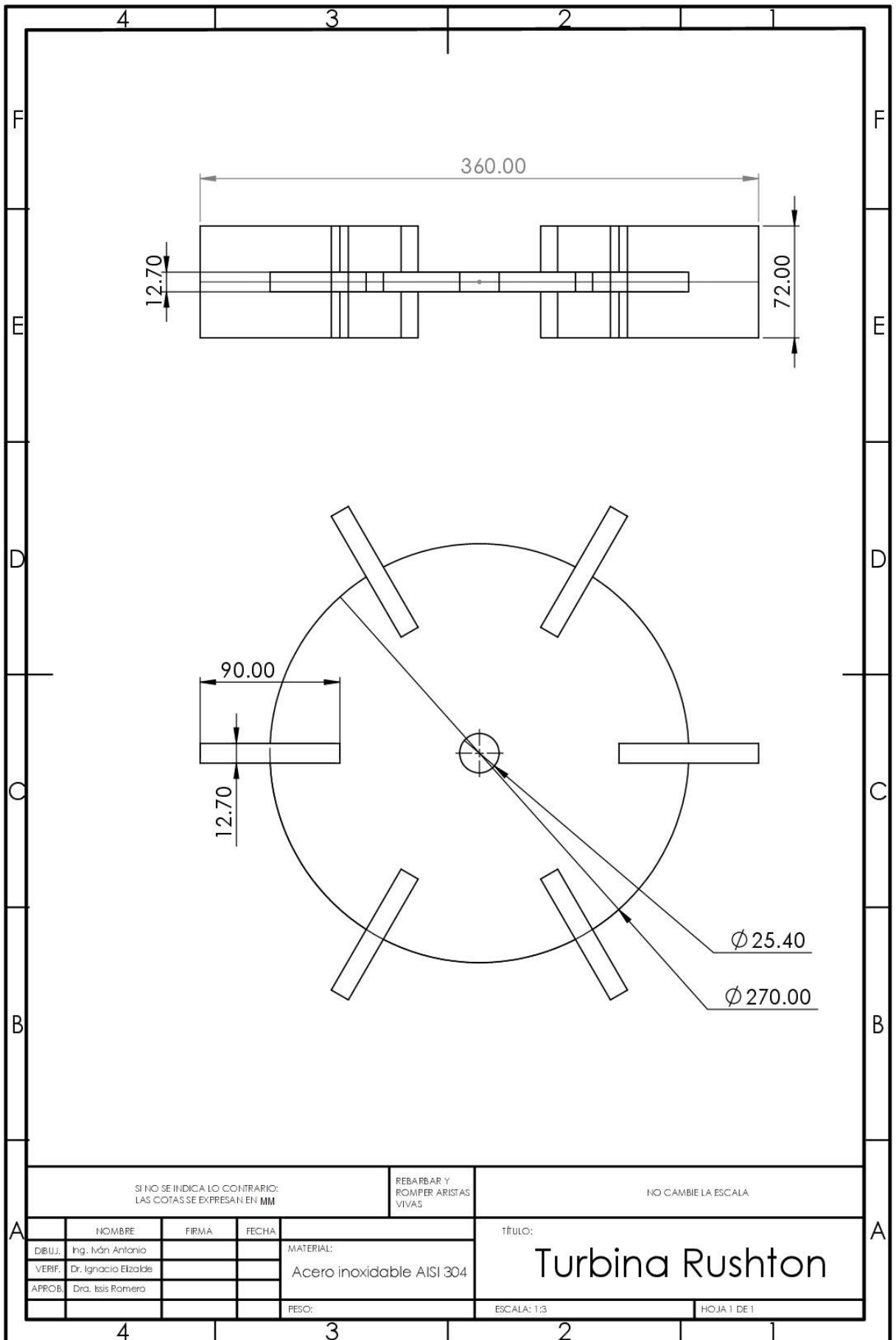
TÍTULO:

Cuerpo del
reactor

PESO:

ESCALA: 1:10

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

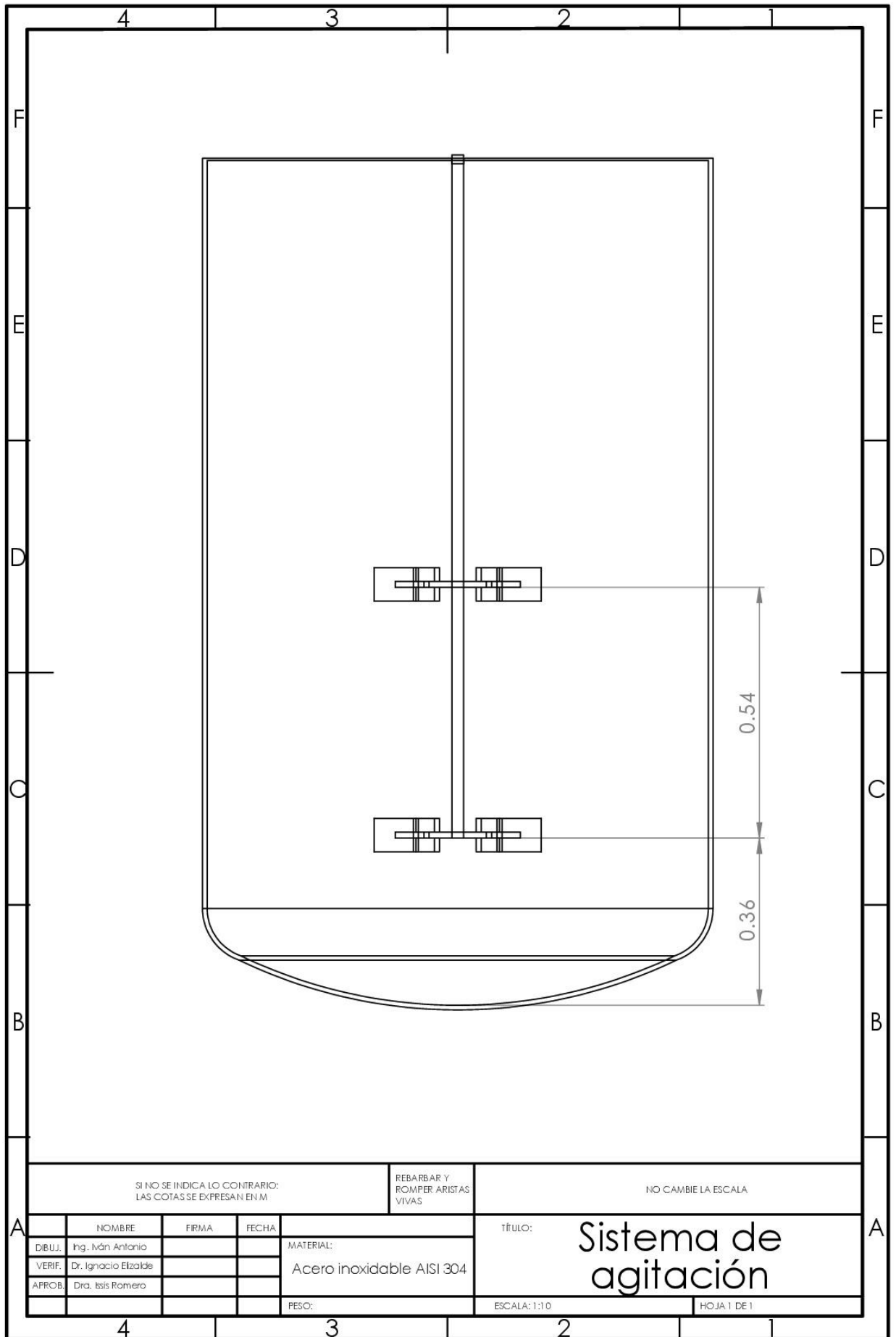
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIB.UJ.	Ing. Iván Antonio			MATERIAL:
VERIF.	Dr. Ignacio Elizalde			Acero inoxidable AISI 304
APROB.	Dra. Isis Romero			PESO:

TÍTULO:

Turbina Rushton

ESCALA: 1:3

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN M

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Ing. Iván Antonio		
VERIF.	Dr. Ignacio Etzalde		
APROB.	Dra. Isis Romero		

MATERIAL:
Acero inoxidable AISI 304

PESO:

TÍTULO:

Sistema de agitación

ESCALA: 1:1.0

HOJA 1 DE 1