

	<b>GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS</b>		<b>CÓDIGO</b>	FO-GS-15	
			<b>VERSIÓN</b>	02	
	<b>ESQUEMA HOJA DE RESUMEN</b>			<b>FECHA</b>	03/04/2017
				<b>PÁGINA</b>	1 de 1
<b>ELABORÓ</b>	<b>REVISÓ</b>	<b>APROBÓ</b>			
Jefe División de Biblioteca	Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad			

### RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): WILSON NORBEY APELLIDOS: ROMANO TORRES

NOMBRE(S): \_\_\_\_\_ APELLIDOS: \_\_\_\_\_

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): JOSÉ RICARDO APELLIDOS: BERMÚDEZ SANTAELLA

NOMBRE(S): DANIEL ANDREY APELLIDOS: HERRERA SUSANA

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A TRAVÉS DE LA TECNOLOGÍA DE RADIACIÓN POR MICROONDAS.

En este trabajo se presenta el proceso de producción y caracterización de un biocombustible, tipo biodiesel a partir de etanol y aceite de palma africana (*Elaeis Guineensis*) del Norte de Santander. Se desarrolló un banco de pruebas experimental, debidamente instrumentado, para el monitoreo de las variables más significativas en el proceso de producción de biodiesel. La selección de la instrumentación se realizó a partir del Método de Decisión de Selección Binaria para las variables de temperatura de reacción, temperatura de condensación, condiciones ambientales, velocidad del agitador y detección de gases en el condensador. En la etapa experimental, se estableció un diseño factorial en estrella sobre la metodología de producción por radiación de microondas desarrollada en el grupo GIDPI de la UFPS en el 2019. Los resultados evidenciaron un rendimiento máximo de 81.32%, bajo condiciones de 4 minutos de reacción, relación 1:3 aceite:alcohol, 0.5% de catalizador KOH, temperatura de 72.2 °C, agitación de 500 RPM y 900W. Las pruebas de caracterización realizadas presentaron una densidad de 0.8630 g/ml, una viscosidad de 5.32 mm<sup>2</sup>/s, índice de acidez de 0.3366 mgKOH/g, índice de yodo de 52.15 gYodo/100g e índice de refracción de 1.36720, cumpliendo con los valores exigidos por las normas.

PALABRAS CLAVES: Banco experimental, Biodiésel, Diseño factorial, Etanol, KOH, Microondas.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 196 PLANOS: \_\_\_\_\_ ILUSTRACIONES: \_\_\_\_\_ CD ROOM: \_\_\_\_\_

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A TRAVÉS DE LA  
TECNOLOGÍA DE RADIACIÓN POR MICROONDAS.

WILSON NORBEY ROMANO TORRES

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A TRAVÉS  
DE LA TECNOLOGÍA DE RADIACIÓN POR MICROONDAS

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTROMECAÁNICO

WILSON NORBEY ROMANO TORRES

DIRECTOR

Ms.C. I.E. JOSÉ RICARDO BERMÚDEZ SANTAELLA

CO-DIRECTOR

Ms.C. I.M. DANIEL ANDREY HERRERA SUSANA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023



**ACTA DE SUSTENTACIÓN PROYECTO DE GRADO  
MODALIDAD TRABAJO INVESTIGATIVO**

**FECHA:** 23 de octubre de 2023

**HORA:** 05:00 p.m.

**LUGAR:** 4 Piso de Fundadores

**PLAN DE ESTUDIOS:** INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**TITULO DEL TRABAJO DE GRADO:** "ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A TRAVÉS DE LA TECNOLOGÍA DE RADIACIÓN POR MICROONDAS".

**JURADOS:** Msc: JOSE RAFAEL EUGENIO LOPEZ  
Msc: EDWIN JOSÉ VERA ROZO

**DIRECTOR:** Msc: JOSE RICARDO BERMUDEZ SANTAELLA  
**CODIRECTOR** Msc: DANIEL ANDREY HERRERA SUSANA

**MERITORIA**

<b>NOMBRE DEL ESTUDIANTE:</b>	<b>CÓDIGO</b>	<b>CALIFICACION</b>
WILSON NORBEY ROMANO TORRES	1091527	4.8

**FIRMA DE LOS JURADOS:**

Edwin Vera \_\_\_\_\_ 

**VOBO. COORDINADOR COMITÉ CURRICULAR**



*Mayra C.*

## **DEDICATORIA.**

*A Dios*

*Por todas las bendiciones y por darme la fortaleza y la salud*

*para continuar día a días.*

*A mi hermosa madre Maria del Carmen Torres Casadiegos*

*Por siempre estar para mí, por motivarme y ser mi apoyo incondicional día a día;  
gracias madre por enseñarme a ser correcto y a trabajar constantemente por mis sueños, aun  
cuando las situaciones sean difíciles. Te Amo Mucho Madre.*

*A Insor Yesid Miranda Pabón*

*Quien ha hecho las veces de padre para mí y mis hermanas, gracias por siempre querer  
sacarnos adelante, por criarnos y querer siempre lo mejor para nosotros.*

*A mi abuela Juanita Casadiegos que en paz descanse,*

*quien desde pequeño me crio, me guio y me enseñó a ser una persona de bien para con  
los demás.*

*A mis hermanas Keila Romano y Lisbeth Yaili Romano por apoyarme y ayudarme  
cuando más lo necesito, por recordarme lo importante que es el amor de la familia siempre.*

## **AGRADECIMIENTOS.**

*Al MSc. Ing. José Ricardo Bermúdez Santaella*

*Por enseñarme, guiarme, exigirme, motivarme y apoyarme durante mi aprendizaje como estudiante y como investigador. Por demostrarme que la constancia, el esfuerzo, la dedicación y el trasnocho siempre darán resultados exitosos. Estaré agradecido siempre por sus grandes consejos y conocimientos para la vida.*

*Al Msc. Ing. Daniel Andrey Herrera Susa*

*Por su acompañamiento y orientación incondicional, por sus grandes enseñanzas y recomendaciones, y por su gran carisma y deseos de éxitos para conmigo.*

*Al PhD Jorge Hernando Bautista Ruiz*

*Por sus inmensa colaboración, consejos y apoyo durante la realización de este proyecto, y por ser un referente como investigador*

*Al MSc. Ing. Cristian Tarazona*

*por su gran apoyo durante el desarrollo de este proyecto, por su colaboración incondicional y por sus consejos y orientaciones diarias.*

*A la Msc. Luz Yineth Ortiz Rojas*

*Por su colaboración y orientación en el desarrollo de este proyecto*

*A mi novia Daniela Ascanio*

*por su apoyo incondicional, amor y comprensión en todo momento.*

*A mis compañeros y amigos del grupo de investigación GIDPI,*

*por brindarme su amistad, apoyo, motivación, colaboración incondicional durante la realización de este proyecto. Y por hacer del grupo de investigación una familia para mí.*

*¡Gracias!*

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción	20
INGENIERÍA CONCEPTUAL	23
1. Descripción del problema	24
1.1 Título	24
1.2 Planteamiento del problema	24
1.3 Formulación del problema	26
1.4 Objetivos	26
1.4.1 Objetivo general	26
1.4.2 Objetivos Específicos	26
1.5 Justificación	27
1.5.1 Beneficios ambientales	29
1.5.2 Beneficios tecnológicos	29
1.5.3 Beneficios Institucionales	30
1.5.4 Beneficios de Desarrollo Social	30
2. Marco referencial	31
2.1 Antecedentes	31
2.1.1 Antecedentes Regionales	31
2.1.2 Antecedentes Nacionales	32
2.1.3 Antecedentes Internacionales	33
2.2 Marco teórico	35
2.2.1 Combustibles Fósiles	35
2.2.1.1 Diesel	36
2.2.1.2 Emisiones producto de la combustión del Diésel	36
2.2.1.2.1 Acuerdo de París	37

2.2.2	Biocombustibles	37
2.2.2.1	Beneficios de los biocombustibles	38
2.2.2.2	Tipos de Biocombustibles	39
2.2.3	Biodiesel	39
2.2.3.1	Transesterificación	41
2.2.4	Materia Prima para la Transesterificación	42
2.2.4.1	Aceite	42
2.2.4.2	El Alcohol	43
2.2.4.3	Catalizador	43
2.2.5	Radiación de microondas	43
2.2.6	Instrumentación	43
2.2.6.1	Sensores	43
2.2.6.2	Tarjeta de desarrollo	44
2.2.6.2.1	Tecnología Arduino, Software y Hardware	44
2.3	Marco conceptual	44
2.3.1	Biomasa	44
2.3.2	Biodiesel	45
2.3.3	Calentamiento Dieléctrico	45
2.3.4	Prototipo a Escala	45
2.3.5	Sistema de Monitoreo	46
2.3.6	Metodología	46
2.3.7	Radiación por Microondas	46
2.4	Marco legal	47
3.	Diseño metodológico	49
3.1	Tipo de investigación	49

3.2	Limitaciones y delimitaciones	50
3.2.1	Limitaciones	50
3.2.2	Delimitaciones	50
3.2.2.1	Delimitación temporal	50
3.2.2.2	Delimitación espacial	50
3.3	Actividades y Metodologías	51
3.3.1	Objetivo 1. Revisar el estado del arte de la producción de biodiesel asistida por radiación de microondas.	51
3.3.1.1	Actividades	51
3.3.2	Objetivo 2. Implementar el sistema de monitoreo y adquisición de datos del prototipo para la obtención de biodiesel por radiación de microondas.	51
3.3.2.1	Actividades	51
3.3.3	Objetivo 3. Diseñar la metodología para la producción de biodiesel a partir de insumos producidos en la región.	52
3.3.3.1	Actividades	52
3.3.4	Objetivo 4. Determinar las características físico-químicas del biodiesel producido, verificando el cumplimiento de las diferentes normas nacionales (NTC 5444) e internacionales (ASTM-D6751 y EN-14214)	53
3.3.4.1	Actividades	53
	<b>INGENIERÍA BÁSICA</b>	<b>54</b>
4.	Revisión del estado del arte de la producción de biodiesel por radiación de microondas	55
4.1	Espectro de radiación de microondas	56
4.2	Mecanismo de calentamiento por radiación de microondas	57
4.3	Mecanismo Químico de la transesterificación	57
4.4	Resultados de investigaciones realizadas en la producción de biodiesel por radiación de microondas	59

4.5	Rutas alternas para la producción de biodiesel	61
4.5.1	Ruta por microemulsiones	61
4.5.2	Ruta por Pirolisis	62
4.5.3	Ruta por transesterificación NO catalizada con fluido supercríticos	62
5.	Medición de variables en la producción de biodiesel	63
5.1	Variables más importantes durante el proceso de producción del biodiesel	63
5.2	Selección de la instrumentación requerida	64
5.2.1	Metodología del Método de Decisión de Selección Binaria	64
5.2.1.1	Construcción de la matriz de atributos	64
5.2.1.2	Construcción de la matriz de coeficientes de énfasis	66
5.2.1.3	Construcción de la matriz de decisión	66
5.2.2	Selección del sensor para medir la temperatura de reacción	67
5.2.3	Selección del sensor para medir la temperatura del agua del condensador	70
5.2.4	Agitador Mecánico	73
5.2.5	Selección del sensor para medir la temperatura y humedad en el laboratorio	74
5.2.6	Tarjeta de adquisición de datos	77
6.	Diseño de la metodología para la producción de biodiesel a partir de insumos producidos en la región	79
6.1	Materia prima para la producción de biodiesel	79
6.1.1	Aceite	79
6.1.1.1	Aceite de Palma Crudo	79
6.1.1.1.1	Rendimiento de producción	81
6.1.1.1.2	Composición del aceite de palma y propiedades fisicoquímicas	82
6.1.2	Aceite de palma usado en este proyecto	83
6.1.3	Selección del Alcohol	85

6.1.4	Catalizador	86
6.2	Diseño de la metodología para la producción de biodiesel	87
6.2.1	Diseños experimentales estadísticos	87
6.2.2	Diseño factorial en estrella para la producción de biodiesel	89
	INGENIERÍA DE DETALLE	92
7.	Prototipo para la producción de biodiesel	93
7.1	Diseños en SolidWorks	93
7.1.1	Diseño del horno microondas	93
7.1.2	Diseño del sistema de reacción y agitación mecánica	94
7.1.3	Ensamble del banco de pruebas	94
7.2	Fabricación del prototipo	95
7.3	Instrumentación	96
7.3.1	Sensores de Temperatura, Humedad y Alcohol.	97
7.3.2	Sensores del agitador mecánico	98
7.4	Diseño e implementación del sistema de control para el agitador mecánico	100
7.4.1	Modelo matemático motor DC	101
7.4.2	Calculo experimental de los parámetros del modelo	103
7.4.3	Validación del modelo matemático	106
7.4.4	Sintonización del Controlador	108
7.4.4.1	Función de transferencia en el dominio discreto (Z)	108
7.4.4.2	Sintonización a través del PID tuner de Matlab	109
7.4.4.3	Sintonización por el método de Ziegler y Nichols	109
7.4.4.4	Sintonización empleando la Integral Absoluta del Error (IAE)	112
7.4.5	Respuestas de los controladores Sintonizados	112
7.4.6	Robustez del controlador seleccionado	115

7.4.7	Respuesta física del sistema de control	116
7.5	Programación de los sensores en la tarjeta de desarrollo Arduino UNO	116
7.5.1	Programación del sensor termocupla tipo K	117
7.5.2	Programación del sensor de temperatura DS18B20	118
7.5.3	Sensor de temperatura y humedad ambiental	118
7.6	Diseño de la interfaz para el monitoreo de las variables del proceso.	119
7.6.1	Panel frontal de la interfaz de monitoreo	120
7.6.2	Diagrama de bloques de la programación de la interfaz de monitoreo	124
7.6.2.1	Configuración de la comunicación con la tarjeta Arduino	125
7.6.2.2	Lectura y visualización de los datos	127
7.6.2.3	Botonera de pestañas, variables del experimento y generación de informes	127
7.6.2.3.1	Botones para el cambio de pestañas	128
7.6.2.3.2	Generación de Informes en Word	129
8.	Producción de biodiesel	131
8.1	Desarrollo experimental	131
8.2	Análisis del diseño experimental factorial	133
9.	Pruebas de caracterización físico-químicas para el biodiesel y el aceite de palma.	137
9.1	Pruebas de densidad y peso específico	139
9.1.1	Metodología de la prueba	139
9.2	Viscosidad Cinemática	141
9.2.1	Metodología de la prueba	142
9.3	Índice de acidez	143
9.4	Índice de Yodo	145
9.4.1	Metodología de la prueba	146
9.5	Cromatografía de capa fina (TLC)	149

9.5.1 Metodología de la prueba	150
9.5.2 Resultados de la Cromatografía de Capa Fina	154
9.5.2.1 Cálculo de la Relación de Frente de las muestras	155
9.6 Índice de Refracción	157
9.6.1 Metodología de la prueba	158
10. Conclusiones	160
11. Recursos Financieros	162
11.1 Presupuesto global por fuente de financiación	162
11.2 Gastos de personal	162
11.3 Equipos y software	163
11.4 Viáticos	163
11.5 Materiales e insumos	164
12. Referencias	165
13. Anexos	188

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ciclo de las emisiones netas de carbono en los biocombustibles	28
Figura 2 Mecanismo químico de transesterificación	42
Figura 3 Sensor de temperatura Termocupla tipo K con modulo MAX6675	70
Figura 4 Sensor de temperatura DS18B20 con sonda sumergible	73
Figura 5 Sensor de temperatura y humedad DHT11	77
Figura 6 Tarjeta de desarrollo Arduino UNO	78
Figura 7 Racimos de fruto de la palma de aceite	80
Figura 8 Hectáreas sembradas y producción de aceite de palma crudo en Colombia por departamentos	82
Figura 9 Visita a la Planta de extracción de Aceite de palma PALNORTE S.A.S	84
Figura 10 Aceite de Palma Crudo donado por PALNORTE S.A.S	84
Figura 11 Alcohol etanol al 96% de pureza	86
Figura 12 Hidróxido de potasio al 85% de pureza	87
Figura 13 Diseño experimental en estrella para dos factores	90
Figura 14 Diseño del horno microondas en SolidWorks	93
Figura 15 Sistema de reacción y agitación mecánica ensamblado en SolidWorks	94
Figura 16 Banco de pruebas ensamblado en SolidWorks	95
Figura 17 Banco de pruebas para la producción de biodiesel por radiación de microondas	96
Figura 18 Base del sensor de temperatura para el reactor: Diseño en SolidWorks e implementación	98
Figura 19 Sensor de temperatura para el agua del condensador	98
Figura 20 Sensor de gases y alcohol	98

Figura 21 Rueda del encoder: Diseño en SolidWorks e impresión en 3D	99
Figura 22 Circuito de detección del encoder	99
Figura 23 Montaje de los sensores para medición de velocidad y consumo del agitador	100
Figura 24 Representación del motor de corriente continua	101
Figura 25 Comparación de la curva del modelo matemático con la curva de datos reales y la curva identificada en Matlab	107
Figura 26 Índices de desempeño de las curvas de velocidad	107
Figura 27 Comparación de la respuesta en lazo abierto del motor en Laplace y en el dominio Z	109
Figura 28 Lazo cerrado para la sintonización con el bloque PID tuner de Matlab	109
Figura 29 Parámetros de la respuesta del modelo matemático para el sistema de primer orden	110
Figura 30 Comparación entre la respuesta del modelo matemático y la función de transferencia de primer orden	111
Figura 31 Respuesta del modelo con los controladores proporcionales P	113
Figura 32 Respuesta del modelo con los controladores PI	113
Figura 33 Respuesta del modelo con los controladores PID	114
Figura 34 Respuesta del modelo matemático ante perturbaciones en la velocidad. a) Respuesta en lazo abierto. b) Respuesta en lazo cerrado con el controlador PI seleccionado	115
Figura 35 Dinámica del agitador con el controlador PI implementado ante perturbaciones de velocidad	116
Figura 36 Código en Arduino para la termocupla tipo K	117
Figura 37 Código en Arduino para el sensor de temperatura sumergible DS18B20	118

Figura 38 Código en Arduino para el sensor DHT11	119
Figura 39 Panel General de la interfaz de monitoreo de la producción de biodiesel	120
Figura 40 Interfaz para la velocidad del agitador	121
Figura 41 Interfaz para las temperaturas del proceso	122
Figura 42 Interfaz para la generación de informes de la producción en formato WORD	123
Figura 43 Interfaz con los datos de derechos de autor	124
Figura 44 Diagrama general de la programación en LabVIEW	125
Figura 45 Diagrama de bloques de la configuración inicial de la interfaz de monitoreo	126
Figura 46 Diagrama de bloques para la lectura y visualización de los datos	127
Figura 47 Diagrama de bloques para el cambio de pestañas y la generación de informes	128
Figura 48 Diagrama de bloques para el cambio de pestañas en la interfaz	129
Figura 49 Diagrama de bloques para la generación de informes	130
Figura 50 Bloques de configuración para generar el informe	131
Figura 51 Biodiesel producido a partir del diseño experimental	133
Figura 52 Superficie de Respuesta de los resultados del diseño experimental factorial	136
Figura 53 Gráfico de contorno obtenido para optimizar las variables tiempo de reacción y relación alcohol:aceite	137
Figura 54 Medición de densidad con el picnómetro	140
Figura 55 Viscosímetro rotacional Coler-Parmer utilizado en las mediciones	142
Figura 56 Metodología y paso a paso para realizar el índice de acidez	144
Figura 57 Metodología y paso a paso para realizar la prueba de Índice de Yodo	147
Figura 58 Metodología y paso a paso para realizar la prueba de cromatografía	151
Figura 59 Tratamientos para la cromatografía	152

Figura 60 Placa de Silica gel	152
Figura 61 Muestras de los tratamientos en la placa de silica gel	153
Figura 62 Cámara cromatográfica con la placa de silica gel	153
Figura 63 Revelación de la cromatografía en la cámara de yodo	154
Figura 64 Resultados de la cromatografía de capa fina	155
Figura 65 Identificación de los valores de X-Y para la Rf	156
Figura 66 Equipos utilizados para calcular el índice de refracción	158
Figura 67 Fabricación del banco de pruebas	188
Figura 68 Etapa de producción y separación del biodiesel y la glicerina	188
Figura 69 Prueba de densidad: aceite y biodiesel	189
Figura 70 Índice de acidez: titulación	190
Figura 71 Índice de acidez: tratamientos titulados con viraje de color en cada repetición	190
Figura 72 Índice de Yodo	191
Figura 73 Esquema en diagrama de flujos de la programación del control PI discreto del agitador mecánico	192

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas y desventajas que presenta el biodiesel	40
Tabla 2 Estudios de producción de biodiesel con tecnología de radiación por microondas	59
Tabla 3 Matriz de atributos	65
Tabla 4 Matriz de coeficientes de énfasis general	66
Tabla 5 Datos técnicos de los sensores de temperatura	67
Tabla 6 Matriz de énfasis para el atributo A1	68
Tabla 7 Matriz de énfasis para el atributo A2	68
Tabla 8 Matriz de énfasis para el atributo A3	68
Tabla 9 Matriz de énfasis para el atributo A4	69
Tabla 10 Datos técnicos de los sensores de temperatura	70
Tabla 11 Matriz de énfasis para el atributo A1	71
Tabla 12 Matriz de énfasis para el atributo A2	71
Tabla 13 Matriz de énfasis para el atributo A3	72
Tabla 14 Matriz de énfasis para el atributo A4	72
Tabla 15 Características Operativas del Motor DC del Agitador	73
Tabla 16 Datos técnicos de los sensores de humedad y temperatura	74
Tabla 17 Matriz de énfasis para el atributo A1	75
Tabla 18 Matriz de énfasis para el atributo A2	75
Tabla 19 Matriz de énfasis para el atributo A3	75
Tabla 20 Matriz de énfasis para el atributo A4	76
Tabla 21 Resumen de las Características Generales de la Tarjeta Arduino Uno	78
Tabla 22 Propiedades físico químicas del aceite de palma	83

Tabla 23 Diseño factorial de la producción de biodiésel	90
Tabla 24 Matriz de experimentos del diseño factorial para la producción de biodiésel	91
Tabla 25 Parámetros empleados para la simulación y comprobación del modelo matemático para el motor del agitador	105
Tabla 26 Constantes sintonizadas a través del PID tuner de Matlab	109
Tabla 27 Constantes sintonizadas a través de Ziegler-Nichols	111
Tabla 28 Constantes sintonizadas a través del método de IAE	112
Tabla 29 Características de respuesta de los controladores PI y PID	114
Tabla 30 Condiciones del desarrollo experimental parte 1	131
Tabla 31 Condiciones del desarrollo experimental parte 2	132
Tabla 32 Rendimiento de los experimentos realizados del diseño factorial	133
Tabla 33 Normas de calidad del biodiésel para comercialización	138
Tabla 34 Densidades y pesos específico de los tratamientos con sus correspondientes repeticiones	140
Tabla 35 Resultados de las pruebas de viscosidad cinemática	142
Tabla 36 Índice de acidez de los tratamientos	144
Tabla 37 Viraje de color que presenta la solución durante la prueba para el índice de Yodo	148
Tabla 38 Índice de yodo de los tratamientos	149
Tabla 39 Valores de distancia X-Y y Rf	156
Tabla 40 Resultados para el índice de refracción de los tratamientos	158
Tabla 41 Presupuesto global del proyecto por fuentes de financiación (en COP)	162
Tabla 42 Descripción de los gastos en personal (en COP)	162
Tabla 43 Descripción de los equipos de uso propio (en COP)	163

Tabla 44 Viáticos (en COP)	163
Tabla 45 Descripción de los materiales e insumos (en COP)	164

## Introducción

Los grandes cambios industriales que se han producido en el mundo y que han conllevado al desarrollo de nuevas tecnologías y mejoras en los procesos de fabricación, transporte y comercialización durante el siglo XX e inicios del siglo XXI, esto sido posibles gracias al petróleo y sus derivados (Niayeshnia et al., 2020); algunos de estos derivados se emplean actualmente como combustible para los vehículos y maquinas cuyo funcionamiento se basa en motores de combustión interna, lo que ha contribuido a facilitar la prestación de servicios y al transporte de productos de un lugar a otro; sin embargo, la extracción, refinación y quema de estos combustibles fósiles ocasiona diariamente impactos negativos en la salud humana, la calidad del aire y en el medio ambiente, contribuyendo a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Abyaz et al., 2020), y debilitando las condiciones atmosférica para la preservación de la vida en el planeta.

A esta preocupación se suma la necesidad de mantener la demanda actual de combustibles líquidos derivados del petróleo, en donde según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2020), el consumo de combustibles fósiles constituye la fuente de energía más utilizada en el sector del transporte a nivel mundial con un 92%, abarcando en Latinoamérica el 88% y en Colombia alcanzando registros del 96% para el año 2018; entre los combustibles de mayor demanda a nivel nacional, se encuentra la gasolina y el diésel. De acuerdo con esta problemática, se ha encaminado investigaciones y grandes esfuerzos coordinados en busca de fuentes de energía que sirvan como combustibles alternativos a los de origen fósil, reduciendo consigo las emisiones contaminantes producto de la combustión, y permitiendo a su vez minimizar la huella de carbono y el deterioro en la calidad del aire (OMS, 2021; Rafaj et al., 2018),.

A estos combustibles alternativos provenientes de materia orgánica de origen vegetal (biomasa) o animal reciben el nombre de biocombustibles, entre los que destaca el biodiesel, y cuya producción parte principalmente de aceites de origen vegetal. Este biocombustible presenta propiedades muy similares a las del diésel automotor, con ventajas en las emisiones producidas al medio ambientales y en algunos aspectos con mejores características mecánicas y física química (Herrera Susa, 2019), cualidades que lo posiciona como el candidato principal para sustituir al diésel dentro de algunas décadas.

Actualmente el objetivo a nivel mundial es el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan la utilización de biodiésel al 100% en los motores de combustión, por problemas en las características químico-físicas del biodiesel, comercialización, métodos empleados para su producción, este no es utilizado en mayores porcentajes a 20%; razón por la cual, cada país ha adoptado regulaciones que imponen porcentajes de mezcla que deben ser cumplidas rigurosamente, y que, para el caso de Colombia, el gobierno nacional estableció bajo la resolución 40447 del 2022 una mezcla de B10 (10% biodiésel y 90% diésel fósil) en todas las estaciones de servicio a partir del año 2023 (porcentaje que se debía haber cumplido para el 2011), y cuya meta principal es lograr una mezcla de B20 para los próximos años (López Jiménez & Rodríguez Cañón, 2017, p. 134).

En este proyecto de investigación se plantea desarrollar una metodología para la producción de biodiesel, fabricación e implementación de un banco de pruebas para la producción de un biocombustible, tipo biodiesel, con materias primas regionales e mas sustentables con el medio ambiente, implementando la tecnología desarrollada en el grupo de investigación GIDPI de producción con radiación de microondas, en donde se caracteriza físico

químicamente el biodiesel producido, verificando el cumplimiento con los valores exigidos por las normas nacionales e internacionales que regulan su producción.

# **INGENIERÍA CONCEPTUAL**

## **1. Descripción del problema**

### **1.1 Título**

Análisis experimental de la producción de biodiesel a través de la tecnología de radiación por microondas.

### **1.2 Planteamiento del problema**

La demanda de energía a nivel mundial crece rápidamente, debido al excesivo consumo de combustibles fósiles orientados al desarrollo de actividades industriales y de transporte; razón por la cual, el futuro abastecimiento de petróleo depende del descubrimiento de yacimientos nuevos que generalmente son de tamaño pequeño, y que corresponden a la cuarta parte de la demanda anual; su descubrimiento es un proceso cada vez más difícil, lo que conlleva a la implementación de nuevas técnicas de extracción como el fracking (Peters, 2020), que se suma a la necesidad de mejoras tecnológicas de extracción en los grandes pozos ya existentes, y etapas que minimicen las afectaciones provocadas a los ecosistemas y las fuentes hídricas. Este conjunto de situaciones ocasiona incrementos en los costos de los derivados del petróleo para comercializarlos. (Jamoussi et al., 2022).

La búsqueda de alternativas renovables se vuelve apremiante al considerar los graves problemas ambientales ocasionados en el planeta por el uso masivo de los combustibles fósiles durante el último siglo (Odekanle et al., 2021). En países ampliamente consumidores de estos combustibles, es posible apreciar cantidades abrumantes de contaminantes dispersos en la atmosfera, con ciudades que presentan índices de contaminación que se encuentran por encima de lo permitido por las normas ambientales, y las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre la calidad del aire (OMS, 2021), que de acuerdo a las investigaciones

realizadas por Fuller et al. (2022) es la responsable de ocasionar la muerte a aproximadamente 6.7 millones de personas en todo el mundo durante el año 2019.

Estas problemáticas han alertado sobre los peligros inminentes para la salud humana y los impactos en el medio ambiente que tienen las emisiones de los combustibles fósiles, logrando sensibilizar a los gobernantes de los diferentes países del mundo para establecer políticas, que permitan controlar y restringir a valores seguros las emisiones producidas por la combustión de derivados del petróleo (Odekanle et al., 2021) con el fin de mitigar los efectos negativos que día a día se pueden notar en las altas temperaturas que provocan el derretimiento de los casquetes polares, las lluvias ácidas, el deterioro de las fuentes hídricas, la destrucción de ecosistemas y enfermedades que afectan la salud humana en todo el planeta tierra. Como alternativa a las problemáticas que atraviesan actualmente los derivados del petróleo y a los temas que afectan al medio ambiente, se han desarrollado fuentes de energía renovables como es el caso de los biocombustibles, con características de funcionamiento muy similares a estos durante el proceso de combustión, reduciendo las emisiones y prometiendo ser el reemplazo en un futuro de los combustibles de origen fósil (Abyaz et al., 2020).

A este nuevo grupo de combustibles pertenece el biodiesel, que desde hace varios años es considerado en Colombia la principal alternativa para sustituir al diésel debido a sus atractivas ventajas; sin embargo, aún son muchos los problemas de calidad y producción que debe superar este biocombustible para que sea viable comercialmente y llegue a sustituir completamente al diésel automotor en el país (Nikkhah et al., 2023). Entre sus problemas más comunes se encuentran los prolongados tiempos de reacción durante la transesterificación, la contaminación de los productos por remanentes de las materias primas, métodos de calentamiento costosos y

poco óptimos, tiempos prolongados en las etapas de separación, poca reutilización de los catalizadores y el incremento en la huella hídrica, entre otros (Akkarawatkhoosith et al., 2019).

Razón por la cual, es de sumo interés el estudio de nuevas metodologías que contribuyan a mejorar y solucionar las problemáticas relacionadas con la producción de biodiesel, permitiendo tener procesos rentables; aportando al país competitividad económica y la capacidad de soportar la futura demanda de combustible por parte de la industria y el sector transporte

### **1.3 Formulación del problema**

*¿Con la metodología a proponer para la producción de biodiesel por la tecnología de radiación de microondas, será posible obtener en el biodiesel producido las características exigidas por las normas nacionales e internacionales?*

### **1.4 Objetivos**

#### ***1.4.1 Objetivo general***

Analizar experimentalmente la metodología de producción de biodiesel implementada a través de la tecnología de radiación por microondas, mejorando las características del biocombustible.

#### ***1.4.2 Objetivos Específicos***

- Revisar el estado del arte de la producción de biodiesel asistida por radiación de microondas.
- Implementar el sistema de monitoreo y adquisición de datos del prototipo para la obtención de biodiesel por radiación de microondas.
- Diseñar la metodología para la producción de biodiesel a partir de insumos producidos en la región.

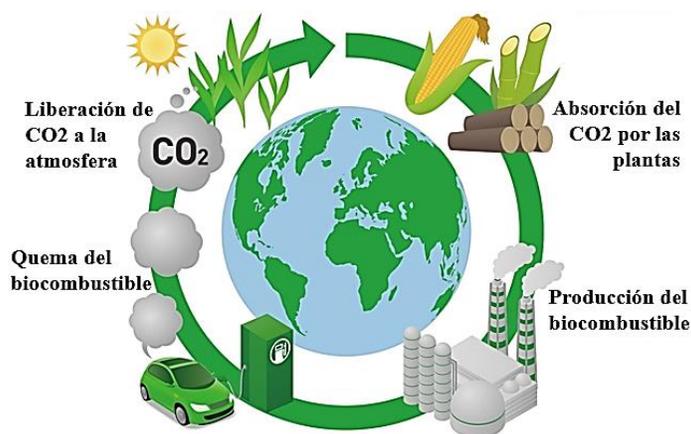
- Determinar las características físico-químicas del biodiesel producido, verificando el cumplimiento de las diferentes normas nacionales (NTC 5444) e internacionales (ASTM-D6751 y EN-14214).

## 1.5 Justificación

En los últimos años, los combustibles de origen vegetal como es el caso del biodiesel han demostrado tener la capacidad para tomar el lugar que ocupa actualmente los derivados del petróleo en países como España, Alemania, Francia, Estados Unidos, Argentina, Brasil, Colombia, Chile, India, Japón, China, etc. (Amaris et al., 2015). El biodiesel específicamente es catalogado como una forma segura de energía, ya que, al ser un combustible oxigenado, presenta una combustión más completa que el diésel, mejorando las emisiones (Herrera Susa, 2019). Hipótesis que es reafirmada con los estudios realizados por García-Muentes et al. (2018), en donde encontraron que, para una mezcla de B20 el material particulado (MP) es reducido un 10.1%, los hidrocarburos aromáticos por su parte disminuyen en un 21.1% y se tiene una reducción de 11% en el monóxido de carbono (CO); De igual forma, para B100 se alcanzan reducciones de 41% para el MP, 31% para los hidrocarburos aromáticos y hasta un 32.2% para el CO.

El hecho de proceder de fuentes renovables (biomasa), ocasiona que la huella neta de emisiones de carbono en un biocombustible sea cero, la razón de ello se debe a que la biomasa a partir de la cual se produce el biocombustible, durante su etapa de crecimiento captura carbono (C) de la atmosfera en forma de  $\text{CO}_2$  mientras realiza la fotosíntesis, al quemarse el biocombustible, los átomos de carbono son devueltos a la atmosfera y no se altera las emisiones netas de carbono como se puede apreciar en la Figura 1. Por el contrario, cuando es quemado el combustible derivado del petróleo, se libera carbono que se encontraba confinado en las

profundidades del subsuelo, con lo cual se aumentan las emisiones netas de carbono en la atmósfera (Reséndiz-Vega et al., 2019). A este factor se suman otros que acompañan y respaldan el desarrollo de los biocombustibles, entre estos encontramos: la capacidad de contribuir como instrumento contra el deterioro ambiental, la posibilidad de impulsar el crecimiento agrícola, y generar desarrollo en la industria automotriz y el sector transporte, entre otros.



**Figura 1.** *Ciclo de las emisiones netas de carbono en los biocombustibles*

*Nota.* Adaptado de *Evaluación de la sostenibilidad medioambiental de los productos bioquímicos*, por CORDIS | European Commission, 2020, <https://cordis.europa.eu/article/id/413526-evaluating-the-environmental-sustainability-of-biochemicals/es>

Ahora bien, tomando en consideración al biodiesel y sus métodos de producción, es de vital importancia avanzar hacia procesos que reduzcan los costos e incrementen los rendimientos y los índices de calidad, con el fin de obtener un producto rentable para competir comercialmente y en uso con el diésel fósil. Factores que son considerados en el método de calentamiento dieléctrico con microondas, que en numerosas investigaciones ha presentado un gran potencial para mejorar y aumentar el rendimiento de procesos químicos (Martínez-Guerra & Gude, 2016), disminuir los tiempos de producción en casi un 80% y lograr resultados superiores a las técnicas convencionales de calentamiento.

En conjunto con lo presentado anteriormente, a través de este proyecto de investigación se esperan generar los siguientes beneficios:

### ***1.5.1 Beneficios ambientales***

De acuerdo a las declaraciones del Dr. Tedros Adhanom Ghebreyesus, director general de la OMS: «Los problemas energéticos actuales ponen de manifiesto la importancia de acelerar la transición a sistemas energéticos más limpios y saludables». Sumado a él, son muchas las voces que se han unido en todo el mundo, con el objetivo de generar conciencia y entregar un único mensaje sobre la necesidad de llevar a cabo acciones, y nuevas investigaciones que contribuyan a mitigar las problemáticas ambientales que aquejan al planeta.

Es por tal razón que el estudio de nuevas metodologías para la producción de biodiesel permitiría lograr porcentajes mayores de mezcla que disminuyan las emisiones contaminantes y las afectaciones al medio ambiente.

### ***1.5.2 Beneficios tecnológicos***

El desarrollo del presente proyecto de investigación promete resultados que puedan aportar al estudio de nuevas metodologías para la producción de biodiesel, contribuyendo en el desarrollo de la técnica de radiación por microondas, que de acuerdo a observaciones realizadas, presenta mejoras en la utilización de la energía, reduce los tiempos de transesterificación en comparación con las técnicas convencionales (Jar-Jin & Yu-Wen, 2017), y posibilitara ampliar las áreas de conocimiento científico a partir del uso de la química, el electromagnetismo, la instrumentación, el control, los procesos industriales, y demás saberes de la ingeniería, que permitan incentivar el empleo de tecnologías orientadas al desarrollo sostenible.

### ***1.5.3 Beneficios Institucionales***

El desarrollo del presente proyecto, busca generar nuevos resultados investigativos y de extensión en la Universidad Francisco de Paula Santander, que permitan incentivar a las comunidades de los cascos urbanos y rurales de la región, a realizar acciones que contribuyan a alcanzar los objetivos propuestos para el sector energético colombiano en las áreas estratégicas que define el Plan Energético Nacional (PEN) 2020-2050.

Áreas estratégicas o pilares que sustentan la visión del PEN para los próximos 30 años en Colombia (UPME, 2020, p.51): 1. Seguridad y confiabilidad del abastecimiento, 2. Mitigación y adaptación al cambio climático, 3. Competitividad y desarrollo económico. 4. Conocimiento e innovación.

### ***1.5.4 Beneficios de Desarrollo Social***

El desarrollo de nuevas fuentes de energía amigables con el planeta, conlleva a impactos positivos sobre el progreso de la sociedad. Con lo cual, estudios en la generación de biocombustibles contribuyen a desarrollar en la región la posibilidad de prosperar hacia energías más distribuidas, ayudar al sostenimiento de fuentes naturales, crecer tecnológicamente, mejorar la calidad del aire, reducir el déficit comercial y la dependencia energética, reforzar el desarrollo rural de las comunidades y aumentar el nivel de empleo para sus habitantes; entre otras razones, que fundamentan la importancia de promover investigaciones a favor de la producción de energías alternativas como el biodiesel.

## 2. Marco referencial

En esta sección, se abordan los conceptos y teorías fundamentales que resultan cruciales para el desarrollo de la tesis, proporcionando de esta manera el contexto necesario y esclareciendo el significado de cada término al ser mencionado en los capítulos posteriores.

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Antecedentes Regionales

Teniendo en cuenta la importante participación que tiene Norte de Santander en la industria de palma de aceite, las problemáticas a causa de las pocas oportunidades laborales y la necesidad de incentivar proyectos que mejoren la calidad de vida en la región y contribuyan a reducir las emisiones contaminantes, Herrera Susa (2019), desarrollo en su tesis de grado: **“Análisis experimental de la eficiencia de un motor monocilíndrico funcionando con mezclas de diésel y biodiesel de palma”**, la estandarización de una novedosa técnica para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma, empleando el método de calentamiento asistido por radiación de microondas; en conjunto con un análisis de las propiedades físicas y el aporte ambiental de las emisiones del motor GUNT CT100.22 funcionando con diferentes porcentajes de mezclas entre diésel y el biodiésel producido.

El análisis experimental se realizó en el banco de pruebas GUNT CT110 para motores de un cilindro de la Universidad Francisco de Paula Santander de la ciudad de Cúcuta, el cual cuenta con un sistema de monitoreo en tiempo real con los softwares GUNT CT100 y CT100.13. El biodiesel utilizado en las diferentes mezclas, se produjo a partir de aceite de palma donado por la empresa PALNORTE S.A, alcohol del tipo etanol y como catalizador se usó el hidróxido de potasio (KOH); para su producción, el autor desarrolló un prototipo desde cero empleando el método de calentamiento por radiación de microondas.

Del trabajo realizado, Herrera Susa (2019) llegó a la conclusión de que empleando la metodología desarrollada a partir del calentamiento por radiación de microondas, se consigue reducir en un 80% el tiempo en la reacción de transesterificación de biodiesel de aceite de palma, el rendimiento aumenta de forma proporcional con la cantidad de alcohol, se necesita un porcentaje menor de catalizador en comparación con los métodos de calentamiento convencional y se consigue reducir notoriamente la cantidad de agua para el lavado del biodiesel. Adicionalmente, el análisis de las emisiones del motor dio resultados importantes, en donde la ppm, el CO y el NO se redujeron en casi un 50%, y las emisiones de SO<sub>2</sub> fueron casi nulas; situación a la que se suma el hecho de que la mezcla B20 generó la mejor estabilidad entre la potencia y las emisiones en el motor.

### ***2.1.2 Antecedentes Nacionales***

El autor Acevedo et al. (2015), evalúa la viabilidad económica de la producción de biodiésel (desde lo técnicamente factible) a partir de aceite crudo de palma en una planta a escala piloto en Colombia en el artículo de investigación titulado: “Análisis de costos operativos para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma a escala piloto en Colombia”, este estudio fue desarrollado para una planta piloto con una capacidad de 20.000 l/día, que emplea como materia prima: aceite de palma crudo y metanol en una proporción molar de 1:10, además de estos factores, (Acevedo et al., 2015) tuvo en cuenta los procesos que se llevan a cabo para la producción de biodiésel en la planta piloto objeto de estudio, los cuales son: esterificación ácida, transesterificación básica, purificación de biodiésel y recuperación y purificación de glicerina, incluyendo el análisis de calidad bajo el cumplimiento de las normas y el impacto de los subproductos en la rentabilidad del proceso. El conocimiento de las etapas del proceso, de los materiales y equipos empleados para llevar a cabo el mismo, permitió los autores concluir que, el

costo de producción de biodiesel con una eficiencia del 99,4% fue equivalente a \$3,75/gl, donde el costo de las materias primas representa aproximadamente el 72,6% del costo total. Según los autores de la investigación el proceso es rentable al generar el 22,4% del ingreso total, un \$1,08/gl.

### ***2.1.3 Antecedentes Internacionales***

Debido a los escasos aportes científicos sobre el cálculo de la cinética en la reacción de transesterificación para la producción de biodiesel, los autores García-Muentes et al. (2018), desarrollaron una investigación sobre la “Cinética de la reacción de transesterificación para la producción de biodiesel a partir del aceite de *Jatropha curcas* L., en la provincia de Manabí, Ecuador”. La reacción se llevó a cabo en condiciones de presión atmosférica, temperaturas de 50°C y 60°C, y una relación molar de 10:1 (metanol/aceite) en presencia de catalizador NaOH al 1% en peso respecto al aceite de *Jatropha curcas*.

Para el análisis de la cinética de reacción, los autores emplearon los métodos integral y diferencial (métodos teóricos) en conjunto con el método de las velocidades iniciales (método experimental), los cuales constituyen los únicos métodos de análisis existentes en la literatura; la toma de datos se realizó con muestras a diferentes tiempos de reacción monitoreadas en cromatografía de gases, según la norma europea UNE-EN 14105. A partir del estudio, García-Muentes et al. (2018) llegaron a la conclusión de que el orden de la reacción de transesterificación en condiciones previamente definidas está en el rango de 1.3 a 1.5 con el método diferencial y el método de la velocidad inicial, presentando valores en la energía de activación en el orden de 12445.59 a 17798.96 J/mol; lo que les permite afirmar que los

resultados obtenidos a partir de los métodos analizados son semejantes, y demuestran la validez de los métodos y del trabajo experimental realizado.

El trabajo es de suma importancia para el proyecto en curso, debido a que su contenido establece y evalúa los métodos existentes en la literatura para el estudio de la reacción de transesterificación de biodiesel, abarcando a profundidad el proceso químico para la obtención de biodiesel y las pruebas de caracterización de las materias primas y los productos finales según las normativas europeas. Teniendo en cuenta la importancia de la tecnología de radiación por microondas para la transesterificación de biodiesel, y la contribución que tiene en la eliminación de los desechos el uso de compuestos renovables como materia prima para la síntesis de catalizadores, que al mismo tiempo, permite aumentar la rentabilidad de la producción de biodiésel; el grupo de investigadores Buasri et al. (2015) de la Universidad de Silpakorn y la Universidad de Chulalongkorn en Tailandia, desarrollaron un trabajo de investigación que lleva por nombre “Oyster and Pyramidella shells as heterogeneous catalysts for the microwave-assisted biodiesel production from *Jatropha curcas* oil”, con el objetivo de examinar el efecto del calentamiento dieléctrico empleando un microondas de uso doméstico, para la transesterificación del aceite de *Jatropha curcas* con metanol, en presencia de un catalizador sólido CaO derivado de residuos de ostras y conchas de pirámide.

Los resultados permitieron a Buasri et al. (2015), concluir que las condiciones óptimas, que conllevaron a una conversión del aceite de casi el 93% para los catalizadores derivados tanto de residuos de concha de ostras como de *Pyramidella*, fueron: el tiempo de reacción de 5 minutos, la potencia de microondas de 800 W, la relación molar metanol/aceite de 15:1 y la cantidad de catalizador de 4% en peso. Adicionalmente, los resultados experimentales evidenciaron que el uso del calentamiento por radiación de microondas mejoró la actividad y

estabilidad del catalizador durante la reacción de transesterificación, permitiendo ser reutilizado durante 3 ciclos con una pérdida de actividad mínima, que fue posible restaurar mediante un proceso de recalificación. Por último, el biodiesel producido posee propiedades físicas y químicas que se ajustan a las normas disponibles.

El documento de Buasri et al. (2015) posee características importantes que se relacionan con el proyecto en curso, debido a que su estudio de investigación tiene como base el calentamiento por radiación de microondas, y emplea materias primas amigables con el planeta como es el caso del catalizador CaO (óxido de calcio) elaborado a partir de residuos de concha de ostras y de *Pyramidella*, y que generalmente es obtenido de desechos como la cascara de huevo, el caparazón de cangrejo y los huesos de animales; lo cual abre una puerta para la inclusión de la sociedad como productores directos de este tipo de catalizador, y que adicionalmente ocasiona de acuerdo a los autores un aumento en la rentabilidad de producción del biodiesel.

## **2.2 Marco teórico**

### ***2.2.1 Combustibles Fósiles***

El petróleo es un recurso limitado no renovable de coloración oscura y textura espesa, formado como resultado de la descomposición de restos de seres vivos (vegetales y animales) que vivieron hace miles de años en el planeta; se extrae de depósitos ubicados a kilómetros de profundidad de la superficie terrestre. (Comisión Nacional Para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), 2016)

Los combustibles fósiles por su parte se refinan del petróleo a partir de procesos físicos y químicos que separan entre sí a los diferentes combustibles como la gasolina, el kerosén, el gas licuado, el diésel (de principal interés en este proyecto) y demás materias primas destinados a la

creación de productos de uso diario. (Comisión Nacional Para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), 2016)

#### **2.2.1.1 Diesel**

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) define al Diesel en la norma NTC 5444 como una mezcla líquida de hidrocarburos con cadenas atómicas de entre 10 y 28 carbono, provenientes de diversos procesos de refinación del petróleo crudo. Que comúnmente es aprovechado como combustible en motores de ciclo diésel para vehículos de carga, transporte y máquinas de trabajo medio y pesado en actividades agrícolas, de la construcción, generación de energía, minería, etc.

#### **2.2.1.2 Emisiones producto de la combustión del Diésel**

En el proceso de combustión es un proceso químico de oxidación, en el cual se requieren 3 elementos principales: el combustible, el comburente (oxígeno) y la energía de activación encargada de aportar energía a la mezcla para que se presente una reacción en cadena, y que finaliza con el desprendimiento de calor.

La combustión desde el punto de vista teórico en el que se utiliza la cantidad exacta de oxígeno (combustión estequiométrica), produce únicamente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Situación que no se presenta en la práctica, ya que para lograr la combustión completa se debe suministrar oxígeno en exceso a través de grandes cantidades de aire (21% oxígeno y 79% nitrógeno), con lo cual se genera a parte del  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{O}$  otros compuestos como óxidos de azufre ( $\text{SO}_2$ ), ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ), ácido fluorhídrico ( $\text{HF}$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). (Herrera Susa, 2019)

### **2.2.1.2.1 Acuerdo de París**

La preocupación por la creciente crisis energética, las concentraciones *GEI* y el aumento de los fenómenos meteorológicos extremos por el cambio climático provocado en el planeta (Nations United, 2022), es un tema que ha impulsado a las organizaciones y países a generar múltiples acuerdos en los últimos 50 años, y cuyo objeto principal ha sido generar acciones alcanzables que contribuyan a reducir las afectaciones en el planeta y en la salud humana; sin embargo, muchos de estos acuerdos no llegaron a feliz cumplimiento por las partes involucradas, lo que ha ocasionado la creación de un nuevo tratado. Este acuerdo es el denominado *Acuerdo de París* que fue adoptado en el 2015 durante la COP21 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, es un acuerdo con característica universal y vinculante que tiene como objetivo mejorar la aplicación de la *Convención* (entiéndase por *Convención* a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, aprobada en Nueva York el 9 de mayo de 1992), reforzando la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, teniendo como principal panorama el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza (Nations United, 2015)

### **2.2.2 Biocombustibles**

Son denominados biocombustibles a aquellos combustibles procedentes de la materia vegetal creada a través de la fotosíntesis (biomasa) y restos orgánicos de origen biológico diferentes a los de origen fósil con las condiciones necesarias para ser aprovechados energéticamente. Su producción se realiza generalmente a partir de plantas oleaginosas, maíz, trigo y azúcares, empleando mecanismos químicos y mecánicos que conserven la característica renovable de estos combustibles. (Samboko et al., 2019)

El nacimiento de los biocombustibles se remonta al diseño del primer prototipo de motor diésel en 1893 desarrollado por el ingeniero alemán Rudolf Diesel, quien realizó las primeras pruebas de funcionamiento con aceite de cacahuete y tenía previsto que su funcionamiento se realizara a partir de aceites vegetales. Sin embargo, con el descubrimiento masivo de los yacimientos de petróleo, el auge comercial de sus derivados debido al bajo costo y las características de eficiencia que estos presentaban, llevaron a que se estableciera el diésel como el combustible principal y más utilizado en este tipo de motores para la época; situación que ha direccionado desde entonces a los fabricantes a diseñar sus motores para aprovechar al máximo de las propiedades de este combustible fósil. (López Jiménez & Rodríguez Cañón, 2017)

#### **2.2.2.1 Beneficios de los biocombustibles**

Los biocombustibles presentan los siguientes beneficios:

- Impulsan las economías rurales, y contribuyen a la generación de empleo al favorecer nuevos cultivos agrícolas necesarios para su producción.
- Reducen los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, disminuyendo el peligro ambiental por el efecto invernadero.
- Debido a su naturaleza son una fuente de energía en constante renovación.
- Incrementa el aprovechamiento de tierras sin uso, diversificando la comercialización de los cultivos alternativos; lo que contribuye al desarrollo de la industria agrícola de los que países para la producción de biocombustibles.
- Mejora la competitividad regional y nacional al no tener que importar fuentes de energía tradicionales.

- Se produce un ciclo cerrado de carbono de valor neto nulo, debido que el volumen total de CO<sub>2</sub> emitido a la atmosfera durante su combustión es devuelto nuevamente a las plantas durante su crecimiento.

#### **2.2.2.2 Tipos de Biocombustibles**

De acuerdo a las propiedades energéticas, las características físico-químicas y el uso principal que se les da a los biocombustibles, estos pueden clasificarse en varios tipos, entre los que destacan el biogás, bioetanol, biohidrógeno y biodiesel.

La clasificación de los biocombustibles también es posible realizarla en función de las fuentes naturales para su generación, dando como resultado las 4 generaciones que se presentaran a continuación.

#### **2.2.3 Biodiesel**

El biodiesel es un biocombustible con características similares a las del diésel fósil, su elaboración se realiza comúnmente por el mecanismo químico de la transesterificación de los triglicéridos presentes en aceites vegetales (aceite de ricino, soya, lino, canola, palma, microalgas), grasas animales y aceites residuales (de cocina) en presencia de alcohol y un catalizador; la elección de cada una de las materias primas debe realizarse teniendo en cuenta de la composición química y la influencia en las propiedades del producto final. (Casas-Jiménez et al., 2021)

La ASTM define al biodiesel como: metilésteres monoalquílicos derivados de ácidos grasos de cadena larga, obtenidos generalmente por el mecanismo químico de transesterificación y que se emplea en motores diésel (Betiku et al., 2021) La principal materia prima para su producción son los triglicéridos presentes en aceites, que se hace reaccionar con un alcohol base en presencia de un catalizador para aumentar la velocidad de la reacción, generando como

resultado una mezcla heterogénea integrada por el producto de esteres libres (biodiesel) y como subproducto glicerina.

Actualmente la tecnología de los motores diésel permite su uso en mezclas con porcentajes entre el 5% y el 20%, debido a que su uso puro ocasiona afectaciones en las partes que componen el motor. En la Tabla 1 se presentan las ventajas y desventajas de este biocombustible, de acuerdo a diferentes estudios.

**Tabla 1**

*Ventajas y desventajas que presenta el biodiesel.*

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVANTAJAS</b>	<b>Autor</b>
Es un recurso renovable y 4 veces más biodegradable (85%-88% en agua) que el diésel, lo que le permite disolverse en la naturaleza sin contaminar el medio ambiente.	Presenta una reducción del poder calorífico de entre 2.5 y 8% por galón, comparado con el diésel.	(Zamperi et al., 2021)
Contribuye al desarrollo rural e industrial, generando nuevas oportunidades económicas en las comunidades campesinas eminentemente agrícolas. Lo que permite una transición energética limpia, reduciendo la dependencia de este combustible fósil en el país.	Por su mayor contenido de oxígeno (10%), se oxida con más rapidez que el diésel, dificultando su almacenamiento por tiempos prolongados.	(Wang et al., 2023)
Reduce el porcentaje de contaminantes emitidos a la atmosfera producto de la combustión (CO, MP, hidrocarburos, hollín), tanto en calderas y quemadores, como en vehículos en comparación con el diésel fósil.	Las emisiones de oxidos de nitrógeno (NOx) en la combustión del biodiesel son cercanas al 10% más, comparado con el diésel convencional, lo que contribuye a la formación localizada de smog y ozono.	(Rajan et al., 2022)
Su uso en mezcla con diésel, contribuye a regular la lubricación del combustible a causa de la disminución en los contenidos de azufre presentes en la	Actualmente las técnicas de producción ocasionan que el costo del biodiesel sea superior a la del diésel	(Athar et al., 2022)

---

mezcla y que son altamente contaminantes.		
El ciclo de CO <sub>2</sub> presenta un balance neutro ya que se consume por las plantas a través de la fotosíntesis.	Su costo de producción es mayor a la del diésel fósil.	(Nabi & Rasul, 2018)
Mezclas de hasta B20 con diésel son fáciles de utilizar, sin necesitar de cambios en el motor, y permitiendo un buen desempeño del mismo al reducir el roce ocasionado por la menor viscosidad del diésel en comparación con el biodiésel, lo que se refleja en una mejora de la lubricación.	Posee un punto de nube alto, ocasionando que a temperaturas bajas el biodiésel se empiece a solidificar a una tasa que depende de su perfil de ácidos grasos, lo que puede llegar a obstruir los filtros o el encendido para la ignición de partida.	(Arismendi Londoño et al., 2021)
Reduce en un 90% el riesgo de cáncer, según Test de Ames	Su producción conlleva etapas de lavado que pueden contaminar el recurso hídrico.	(Sánchez-Arreola et al., 2019)
Presenta un mayor octanaje, provocando una combustión con menor presión y más completa. Y su punto de inflamación es alto (>300°F).	En países no agrícolas, la materia prima de producción puede ser costosa.	(Kalinke et al., 2022)

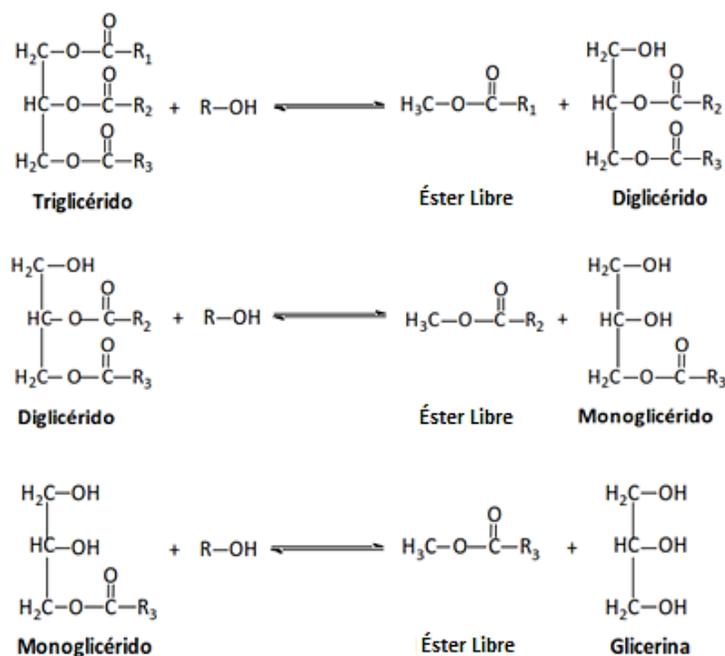
---

### 2.2.3.1 *Transesterificación*

Los mecanismos químicos como microemulsiones y pirolisis no resultan viables económicamente por los altos costos que presentan las condiciones de reacción y además dan lugar a un biodiésel de baja calidad, razón por la cual el método que se emplea a nivel industrial es la transesterificación. (Sridhar & Kazi, 2022)

En este proceso, los aceites vegetales o grasas animales (triglicéridos) reaccionan con alcoholes de cadena corta, en presencia de un catalizador cuyo objetivo es promover la hidrólisis para acelerar la reacción química (Folayan et al., 2019; Kara et al., 2021), generalmente se emplean catalizadores básicos como el NaOH y el KOH, los cuales se mezclan previamente con el alcohol para dar lugar a un alcóxido que mejora la reacción de transesterificación (Anawe & Folayan, 2018). La reacción genera como producto principal ésteres metílicos (FAME) o etílicos

(FAEE), que son los componentes principales del biodiesel, y glicerina como subproducto. En la Figura 2 se puede apreciar el mecanismo químico de esta reacción.



**Figura 2.** Mecanismo químico de transesterificación.

*Nota.* Adaptado de *Obtención De Biodiesel Por Transesterificación De Aceites Vegetales: nuevos métodos de síntesis*, por

Vicente Pardo & Encinar Martín, 2012, <http://hdl.handle.net/20.500.12207/738>

## 2.2.4 Materia Prima para la Transesterificación

### 2.2.4.1 Aceite

El aceite es el insumo principal empleado para la producción de biodiesel, y puede ser extraído de plantas oleaginosas, microalgas o aceites residuales ya usados en frituras o recuperados de trampa de grasas, etc. La calidad de esta materia prima dependerá la necesidad de un pretratamiento (esterificación). Se debe aclarar que no es posible la reacción de transesterificación de biodiesel a partir de aceites minerales como los lubricantes (Folayan et al., 2019).

### **2.2.4.2 El Alcohol**

Entre los alcoholes comúnmente empleados para llevar a cabo la reacción de transesterificación se encuentra el etanol y el metanol. Sin embargo, existen otros alcoholes como el butanol, isopropanol, propanol y pentanol, que no son empleados industrialmente debido a que generan bajos rendimientos y son mucho más sensibles a la contaminación con agua (Akkarawatkhoosith et al., 2023).

### **2.2.4.3 Catalizador**

El catalizador permite que la reacción de transesterificación ocurra a una mayor velocidad, y su selección ideal sería de acuerdo con las características del alcohol y el aceite a emplear, sin embargo, existen otros factores como el costo, la contaminación, la separación y reutilización que deben ser tenidos en cuenta al momento de seleccionarlo (Kara et al., 2021). Los catalizadores pueden ser Básicos (NaOH, KOH, NaOCH<sub>3</sub>), Ácidos (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl) y Enzimáticos (lipasas).

### **2.2.5 Radiación de microondas**

El calentamiento de líquidos por microondas se explica por la interacción del material con el campo eléctrico de la radiación incidente, provocando un movimiento debido a dipolos permanentes o inducidos. Este método ofrece un enfoque muy interesante para la producción de biodiésel porque es eficaz y ahorra energía. (C. Zhang et al., 2016)

### **2.2.6 Instrumentación**

#### **2.2.6.1 Sensores**

Un sensor se define como un dispositivo capaz de entregar una señal de salida transducible en función de la variable medida. Puede entenderse como la ampliación de los

sentidos humanos para conocer cantidades físicas que por su naturaleza y magnitud no pueden ser percibidas directamente.

### **2.2.6.2 Tarjeta de desarrollo**

#### **2.2.6.2.1 Tecnología Arduino, Software y Hardware**

Arduino es una plataforma electrónica y computacional de código abierto (libre) basada en una placa (hardware) con entradas y salidas que, junto con un entorno de desarrollo IDE (Entorno de Desarrollo Integrado, software), basado en Processing/Wiring, implementa el lenguaje de programación en C/C++, con el objetivo de desarrollar objetos interactivos automáticos o conectarse a software en el computador. Este entorno de desarrollo permite la creación, edición, verificación, compilación y grabado (Apaza Mamani & la Torre Javier, 2017). Las placas de Arduino, permiten que una red de sensores proporcione información al microcontrolador a través de las entradas de la placa, y en función del programa cargado sobre el microcontrolador, se genere la comunicación de la información a la interfaz de monitoreo que puede encontrarse en un computador, en un dispositivo móvil o en la nube (López Aldea, 2016). Gracias a su economía y facilidad de uso, a lo largo de los años Arduino ha sido el cerebro de miles de proyectos, desde objetos cotidianos hasta complejos instrumentos científicos.

## **2.3 Marco conceptual**

### **2.3.1 Biomasa**

Se entiende por biomasa a cualquier fuente biodegradable de carbono que puede ser renovada de forma rápida en el ciclo de carbón. Principalmente proviene de plantas y animales. (Gutiérrez Escribano, 2018)

### ***2.3.2 Biodiesel***

Se denomina biodiesel al biocombustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, con o sin uso previo.

### ***2.3.3 Calentamiento Dieléctrico***

Según la RAE (2014b), el término dieléctrico hace referencia a materiales o sustancias que no tienen la capacidad de conducir la electricidad. Por otra parte, el calentamiento se define como la acción de transmitir calor a un cuerpo o sustancia provocando que este eleve su temperatura .

A partir de estas definiciones, el calentamiento dieléctrico se puede entender como la acción de elevar la temperatura de cuerpos o sustancias que no conducen electricidad, empleando algún mecanismo de transferencia de calor (conducción, convección o radiación), que en procesos de ingeniería el calentamiento dieléctrico se realiza a través de radiación electromagnética con ondas microondas generalmente a 2.4 GHz.

### ***2.3.4 Prototipo a Escala.***

Para entender este concepto se hace necesario conocer de antemano el significado de prototipo e implementación a escala.

Según la (Real Academia Española [RAE], 2014c), implementar hace referencia a poner en funcionamiento o aplicar métodos, medidas, etc., para llevar a cabo algo. Por otra parte, según Pérez Porto & Gardey (2021), la escala es la proporción o tamaño en que se desarrolla una idea o un proyecto. Con base en lo anterior, desde la perspectiva del desarrollo de proyectos, la implementación a escala, está orientada a la creación de representaciones pequeñas y manejables que simulen de la forma más cercana posible, el comportamiento y las características del proceso

o elemento real, cuyo objetivo es obtener resultados con un alto grado de precisión y exactitud, facilitando la comprensión y la toma de decisiones.

### ***2.3.5 Sistema de Monitoreo***

Un sistema es un conjunto de elementos, que relacionados entre sí de manera armoniosa, contribuyen al cumplir de diversas tareas (Real Academia Española [RAE], 2014f). Mientras que el monitoreo desde el punto de vista de ingeniería hace referencia a la observación y seguimiento de una o varias variables a través de equipos e instrumentos de medición. (Real Academia Española [RAE], 2014e)

### ***2.3.6 Metodología***

Conjunto de métodos y planes de investigación que permiten el desarrollo de propuestas en el marco de un estudio científico. (Pérez Porto & Gardey, 2021b; Real Academia Española [RAE], 2014d)

### ***2.3.7 Radiación por Microondas***

Las reacciones químicas por radiación de microondas se aceleran debido a la absorción selectiva de la energía de microondas por las moléculas polares. Debido a que la mezcla de aceite vegetal, metanol e hidróxido de potasio contiene componentes polares e iónicos, se produce un calentamiento rápido con la irradiación de microondas.

Dado que la energía se comunica con el reactivo a un nivel molecular, se logra un calentamiento altamente efectivo. En contraste, el calentamiento convencional se caracteriza por su relativa lentitud e ineficiencia, ya que la transferencia de energía al reactivo depende de las corrientes de convección y de la conductividad térmica presentes en la mezcla de reacción (Jar-Jin & Yu-Wen, 2017).

## 2.4 Marco legal

Los aspectos normativos sobre los que se enmarca este proyecto, tienen como soporte principal a la **Constitución Política de Colombia de 1991**, a través del artículo 69 que respalda las directrices que las universidades tomen para la ejecución de sus programas profesionales bajo el concepto de autonomía universitaria; y los artículos 79 y 80 en donde se dictamina la participación del Estado y los ciudadanos en la conservación y protección de los recursos naturales y del ambiente.

De la forma en que se citan a continuación:

**Artículo 69:** “Se garantiza la autonomía universitaria. Las universidades podrán darse sus directivas y regirse por sus propios estatutos, de acuerdo con la ley.”

*Que, en el caso particular para la obtención del título profesional, la **Universidad Francisco de Paula Santander** en los artículos 139 al 167 del **Acuerdo 065 del 26 de agosto de 1996** (Estatuto Estudiantil) define las modalidades de trabajo de grado, entre ellas el Proyecto de Investigación tipo Trabajo de Investigación: Generación o aplicación de conocimientos; en conjunto con el significado de las posibles calificaciones numéricas, y las funciones de los organismos involucrados en todo el proceso.*

**Artículo 79:** “... Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.”

**Artículo 80:** “Se estipula que el Estado es el encargado de la planificación de los recursos naturales para lograr su desarrollo sostenible, así como de la prevención y el control del

deterioro ambiental y la imposición de sanciones o reparaciones a aquellas personas que lo generen.”

En conjunto con lo establecido en la carta magna del Estado colombiano, se reglamenta por medio del **Artículo 2 de la Ley 99 de 1993**, la responsabilidad del **Ministerio de Medio Ambiente** como el encargado de definir las políticas y regulaciones necesarias para la conservación, protección, ordenamiento, aprovechamiento, recuperación y manejo de los recursos naturales renovables y el medio ambiente de la Nación.

Por otra parte, el **Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente** soportado en el **Decreto de Ley 2811 de 1974**, establece como uno de sus objetos principales regular las actividades concernientes a la administración pública y la conducta humana, en términos de protección del medio ambiente y recursos naturales renovables. Entre las regulaciones que establece el código, se encuentra el manejo de las fuentes primarias de energía no agotables como es el caso de la energía eólica, energía hidroeléctrica, energía geotérmica, energía solar, biomasa y biocarburantes como el biodiesel.

Por su parte, el Estado colombiano en el **Artículo 7 de la Ley 939 del 31 de diciembre de 2004** dispuso que el combustible diésel que se utilice en el país podrá contener biocarburantes de origen vegetal o animal para uso en motores diésel en las calidades que establezcan el **Ministerio de Minas y Energía** y el **Ministerio de Ambiente**.

Sumado a esto, y con el fin de garantizar las características de calidad para la producción, comercialización y consumo a nivel nacional de los combustibles utilizados en motores tipo diésel, el **Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)**, estableció la norma técnica **NTC 1438** (octava actualización del 2013), en donde se estipulan las

especificaciones que deben cumplir y los métodos de ensayos que se deben usar para determinar las propiedades definidas para estos combustibles. De forma específica para el biodiesel, el ICONTEC estableció la norma **NTC 5444 de 2006** que cubre las especificaciones para los alquil ésteres de ácidos grasos, derivados de aceites vegetales y grasas animales con fines de uso como combustible o como componente de mezclas con combustibles diésel, teniendo como apoyo las normas internacionales **UNE-EN 14214:2013 V2+A2:2019** y **ASTM D6751-20A** que establecen las características físico-químicas del biodiesel.

### **3. Diseño metodológico**

A continuación, se detalla la planificación del proyecto, incluyendo las limitaciones, las actividades y la metodología diseñadas para alcanzar los objetivos propuestos.

#### **3.1 Tipo de investigación**

El desarrollo del proyecto parte de una investigación de tipo *exploratorio* con el fin de conocer el tema en estudio, que es importante cuando se tiene una cantidad limitada de experiencia o conocimiento sobre un tema de investigación, debido a que garantiza que un estudio riguroso y concluyente parta de una adecuada comprensión de la naturaleza teórica y científica que rodea la investigación. La investigación exploratoria se realiza con el propósito de diagnosticar una situación, seleccionar alternativas, y descubrir nuevas ideas; que finalizan cuando existe una claridad de las variables relevantes y cuando se tiene información suficiente sobre el tema. (Esteban Nieto, 2018)

Conjuntamente, debido a que se llevará a cabo un análisis experimental en donde se requiere interpretar y comparar las variables que integran el tema de estudio. La investigación a realizar es de carácter *correlacional*, ya que la investigación correlacional “presenta como

objetivo medir la relación que existe entre dos o más variables, en un contexto dado” (Ramos-Galarza, 2020).

## **3.2 Limitaciones y delimitaciones**

### ***3.2.1 Limitaciones***

Una de las variables más importantes que deben ser medidas es la temperatura de la reacción, es decir, la temperatura en el reactor que a su vez se encuentra al interior del microondas, situación que ocasiona una limitante en la selección y ubicación del sensor de temperatura.

Otra gran limitante se presenta en la caracterización de algunas propiedades del biodiesel, ya que actualmente la Universidad Francisco de Paula Santander, más específicamente los laboratorios de química, no disponen de todos los equipos necesarios para la realización de estas pruebas; razón por la cual, llegado el momento se deberán solicitar a otras instituciones o laboratorios privados, aumentando consigo los costos para el desarrollo del proyecto.

### ***3.2.2 Delimitaciones***

#### ***3.2.2.1 Delimitación temporal.***

El desarrollo e implementación del proyecto, está definido para una duración de 8 meses.

#### ***3.2.2.2 Delimitación espacial.***

Las actividades relacionadas con el desarrollo del proyecto se llevarán a cabo en el laboratorio de térmicas, y los respectivos laboratorios pertenecientes a los grupos de investigación “GIDPI” de la Universidad Francisco de Paula Santander, sede central, de la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander.

### 3.3 Actividades y Metodologías

#### 3.3.1 *Objetivo 1. Revisar el estado del arte de la producción de biodiesel asistida por radiación de microondas.*

##### 3.3.1.1 *Actividades*

- Actividad 1. *Recopilación de estudios de investigación sobre la producción de biodiesel a través del calentamiento por radiación de microondas*

**Metodología:** Se seleccionarán los estudios de impacto publicados en bases de datos de revistas científicas como Elsevier (ScienceDirect, Scopus), Springer, Taylor & Francis Group, Google Académico, Microsoft Academic Search, y repositorios de diferentes universidades.

- Actividad 2. *Análisis de resultados e información relevante de los estudios realizados sobre la radiación de microondas en la producción de biodiesel*

**Metodología:** Para ello se realizará un análisis y comparación de los resultados obtenidos en los diferentes documentos previamente seleccionados, que contribuyan a fundamentar el desarrollo del proyecto de investigación.

#### 3.3.2 *Objetivo 2. Implementar el sistema de monitoreo y adquisición de datos del prototipo para la obtención de biodiesel por radiación de microondas.*

##### 3.3.2.1 *Actividades*

- Actividad 1. *Determinar las variables más importantes durante el proceso de producción del biodiesel.*

**Metodología:** Con base a los estudios previamente realizados y las características constructivas del prototipo para la producción de biodiesel, se definirán las variables a medir con mayor incidencia durante la producción.

- *Actividad 2. Definir la instrumentación requerida, e implementación del sistema de monitoreo y adquisición de datos.*

**Metodología:** De acuerdo con los rangos de medición de cada variable, la naturaleza de la señal, el protocolo de comunicación y la localización de la instrumentación en el prototipo, se seleccionarán cada uno de los sensores y la tarjeta de adquisición de datos, teniendo en cuenta las características operativas exigidas y la disponibilidad en el mercado. Seguido de su correspondiente instalación en el prototipo de producción.

- *Actividad 3. Diseño de la interfaz HMI para el monitoreo de las variables del proceso.*

**Metodología:** A través del software de simulación LabVIEW, se desarrollará la interfaz de monitoreo de las variables a medir durante la producción de biodiesel, con la finalidad de supervisar las condiciones de producción.

### ***3.3.3 Objetivo 3. Diseñar la metodología para la producción de biodiesel a partir de insumos producidos en la región.***

#### ***3.3.3.1 Actividades***

- *Actividad 1. Selección de la materia prima a emplear para la producción de biodiesel.*

**Metodología:** Se realizará una matriz de alternativas que permita seleccionar los insumos que presentan mejores resultados según lo evidenciado en la literatura, teniendo en cuenta que estas materias primas sean de fácil adquisición, tengan el menor impacto ecológico y se produzcan en la región nortesantandereana.

- Actividad 2. *Caracterización de las propiedades de la materia prima seleccionada.*

**Metodología:** Se llevarán a cabo las pruebas de laboratorio para conocer la composición de las diferentes materias primas, centrando el interés en las propiedades de mayor relevancia establecidas por los estudios analizados en el estado del arte.

- Actividad 3. *Diseño y desarrollo experimental para el proceso de producción de biodiesel*

**Metodología:** Se llevará a cabo una planificación experimental de tipo factorial de dos variables (tiempo de reacción y relación aceite:alcohol) para el proceso de producción de biodiesel; en conjunto con el cálculo de las concentraciones de las materias primas (aceite, catalizador, alcohol). Para determinar las relaciones que hacen posible la transesterificación de biodiesel.

### **3.3.4 Objetivo 4. *Determinar las características físico-químicas del biodiesel producido, verificando el cumplimiento de las diferentes normas nacionales (NTC 5444) e internacionales (ASTM-D6751 y EN-14214)***

#### **3.3.4.1 *Actividades***

- Actividad 1. *Caracterización de las propiedades físico-químicas del biodiesel*

**Metodología:** Se seleccionarán las muestras de biodiésel con las mejores características de la reacción de transesterificación, un fluido estándar de referencia y el aceite empleado para la producción del biodiesel. A los cuales se les realizaran las pruebas de laboratorio más importantes exigidas por las normas nacionales e internacionales para la producción de biodiesel.

# **INGENIERÍA BÁSICA**

#### **4. Revisión del estado del arte de la producción de biodiesel por radiación de microondas**

Según un informe publicado por la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), los biocombustibles representaron en el 2019 el 9.4% (55EJ) del suministro total de energía primaria en el mundo y se espera que para el 2030 alcance el 17%, con una tendencia creciente a superar los 150EJ para 2050 (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2022). Entre estos biocombustibles se distingue el biodiesel, que se produce principalmente mediante la reacción de los aceites vegetales o grasas animales con alcoholes de cadena corta, como el metanol o el etanol, en un proceso conocido como transesterificación (Betiku et al., 2021). Este proceso es el más común y ampliamente utilizado en la industria para la producción de biodiesel, mediante calentamiento convencional en tanques enchaquetados o de resistencia térmica, ocasionando que sean necesarios tiempos de reacción prolongados, debido a que la transferencia de energía hacia las moléculas reaccionantes depende de las corrientes de convección y la conductividad térmica de la mezcla (Lin & Chen, 2017). Ante esta problemática, se ha presentado soluciones novedosas como el calentamiento a través de radiación de microondas (Tran et al., 2017)

La tecnología de irradiación de microondas, que se ha aplicado en diversas áreas, como la química de materiales, digestión de muestras, extracción de compuestos, síntesis de nanopartículas, procesos de secado y síntesis orgánica, desempeña un papel esencial en la producción de biodiesel al acelerar y optimizar el proceso de reacción (Nomanbhay & Ong, 2017). La clave de su eficiencia radica en la absorción selectiva de la energía de microondas por moléculas polares presentes en la mezcla de aceite vegetal y alcohol. Esto da lugar a un calentamiento rápido y uniforme en todo el volumen del reactante, en contraste con los métodos de calentamiento convencionales, que a menudo son más lentos y propensos a crear zonas de

temperatura desiguales (zonas frías y zonas calientes) (Athar et al., 2022). Además, esta tecnología destaca por su eficiencia energética, lo que puede reducir los costos operativos y la huella de carbono asociados a la producción de biodiesel. Sin embargo, su adaptación a escala industrial presenta desafíos que se ha establecido como un campo importante a nivel de investigación (Wang et al., 2023).

#### **4.1 Espectro de radiación de microondas**

La radiación de microondas abarca un amplio rango de frecuencias, que se extiende desde 0,3 hasta 300 GHz, lo que equivale a longitudes de onda que van desde 1 milímetro hasta 1 metro en el espectro electromagnético (Arpia et al., 2021). Las microondas se sitúan entre las ondas de radio y las ondas infrarrojas, las microondas tienen una diversidad de aplicaciones que incluyen las comunicaciones inalámbricas, la tecnología de radar y el calentamiento de alimentos en hornos de microondas. Además, su papel en la producción de biodiésel es fundamental, ya que tanto los reactores de microondas utilizados en la síntesis química como los hornos de microondas domésticos operan a una frecuencia de 2,45 GHz, equivalente a una longitud de onda de 12,25 cm. Por esta razón, se ha convertido en una opción valiosa en el campo de la producción de combustibles alternativos. (Chuah et al., 2017)

Los materiales en presencia de radiación de microondas se dividen en tres categorías. En primer lugar, existen los materiales transparentes a las microondas, como la sílice fundida, vidrios de borosilicato, cerámica y teflón (Kalinke et al., 2022). En segundo lugar, están los materiales absorbentes de microondas, que son vitales para la síntesis en este contexto, incluyendo soluciones acuosas y disolventes polares. La relación entre la pérdida eléctrica y la constante eléctrica, conocida como factor de pérdida o tangente de pérdida, se utiliza para predecir el comportamiento de un material en un campo de microondas. En resumen, la

capacidad de un material para absorber microondas está directamente relacionada con su factor de pérdida (Cooper, 2020; Rokni et al., 2022a)

#### **4.2 Mecanismo de calentamiento por radiación de microondas**

La aceleración de las reacciones inducidas por microondas se atribuye al efecto de recalentamiento, el cual surge con el aumento de la relación entre la pérdida dieléctrica y la constante dieléctrica, en consonancia con la elevación de la temperatura. Este fenómeno, denominado recalentamiento, puede llevar a que ciertos reactivos orgánicos alcancen puntos de ebullición superiores a los que se experimentan en procesos de calentamiento convencional (Allami et al., 2019). Además, las reacciones químicas realizadas bajo la influencia de microondas pueden experimentar una reducción notable en su tiempo de reacción, generalmente logrando ser de 10 a 15 veces más rápido que en condiciones de presión atmosférica en comparación con los procesos que emplean calentamiento tradicional (Herrera Susa, 2019).

La aplicación intermitente de ondas electromagnéticas en las moléculas de un líquido induce movimientos y rotaciones moleculares, generando fricción y, como resultado, un aumento en la temperatura del líquido. El mecanismo de conducción se presenta cuando electrones o iones oscilan bajo la influencia del campo eléctrico de radiación (Khedri et al., 2019b). La polarización superficial se considera un fenómeno que combina elementos de conductividad y polarización. (Waudby & Zein, 2021; Zamberi et al., 2021).

#### **4.3 Mecanismo Químico de la transesterificación**

El mecanismo cinético de la transesterificación consta de tres pasos reversibles (Sridhar & Kazi, 2022). En el primer paso, el triglicérido, formado por tres cadenas largas de ácido carboxílico unidas a una molécula de glicerina, es atacado por una molécula de alcohol, provocando la liberación de una molécula de éster y la conversión del triglicérido en diglicérido.

En el segundo paso del mecanismo, el diglicérido se reduce a monoglicérido, consumiendo una molécula adicional de alcohol y liberando una nueva molécula de éster. Finalmente, en el último paso de este proceso, el monoglicérido se convierte nuevamente en glicerina, mediante el consumo de otra molécula de alcohol y la liberación de una nueva molécula de éster. Como resultado de estas transformaciones, se generan tres moléculas de ésteres libres, es decir, tres moléculas de biodiesel, y como subproducto una molécula de glicerina (García-Muentes et al., 2018; Kara et al., 2021).

La característica reversible del mecanismo se debe a que los productos intermedios como los monoglicéridos y los diglicéridos tienen características hidrófilas mayores respectivamente en comparación con los triglicéridos originales, a causa de sus grupos hidroxilos, lo que conlleva a que la reacción se oriente hacia la formación de triglicéridos en cada paso del mecanismo, ocasionando una disminución en la formación de ésteres libres (Rodríguez & Beckman, 2020). Ante esta situación, se suelen llevar a cabo la reacción utilizando alcohol en exceso (Wong et al., 2023). Además, una cantidad insuficiente de alcohol en el caso de los catalizadores básicos provoca la reacción entre los ácidos grasos libres favoreciendo la formación de jabones (Khan et al., 2020).

El rendimiento obtenido depende de las variaciones de la relación molar de metanol a aceite, la temperatura de reacción, la cantidad de catalizador y el tiempo de reacción, y la potencia en el caso de la radiación con microondas. Los ácidos grasos producidos pueden diferir por la longitud de las cadenas de carbono, el número, la orientación y la posición de los dobles enlaces en la cadena. Por lo que es importante tener en cuenta ciertas consideraciones al momento de elegir las materias primas. (M. G. Nayak & Vyas, 2019)

#### 4.4 Resultados de investigaciones realizadas en la producción de biodiesel por radiación de microondas

A continuación, se presentan las condiciones de producción y resultados de diferentes investigaciones en las que se trabajó con la tecnología de radiación por microondas.

**Tabla 2**

*Estudios de producción de biodiesel con tecnología de radiación por microondas.*

Aceite	Alcohol	Cat.	%Cat	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Relación Aceite: alcohol	Pot. (W)	Rend. (%)	Referencia
Aceite de dátil de desecho	Metanol	KOH	0.75% p/p	60	2 - 1.75	1:6	800	98.72	(Inayat et al., 2018)
Aceite De Cocina Usado	80.47% Metanol Y 19.53% Etanol	KOH (0.5%) y NaOH (100%)	30.35% KOH Y 69.65% NaOH p/p	70	1.75	1:6	677.77	96.2	(Khedri et al., 2019b)
Aceite de papaya no comestible	Metanol	NaOH	0.95 % p/p	62.33 °C	3.30 min	1:9.50	700	99.3	<b>(M. G. Nayak &amp; Vyas, 2019)</b>
Aceite De Espuma Láctea (DSO)	Metanol	KOH	1% p/p	55	5	1:7	600	93.47	(Binnal et al., 2021)
Aceite Crudo De Palma	Metanol	KOH	1.2% p/p	65	3.2	1:6.5	700	89	(Rajan et al., 2022)
Aceite De Cocina De Semilla De algodón Usado (UCCO)	Metanol	CaO	1.26 (p/p %), 1.37 (p/p %) y 1.34 (p/p %)	50	9,7 - 9,28 y 9,89	1:9.6, 1:9.33 y 1:9.61	700	91.32, 90.49 y 90.71	(Prajapati et al., 2022)
Aceite de semilla de <i>Pyrus glabra</i>	Metanol	HAp "hidroxiapatita"	0.5% p/p	80	30	1:6	800	89.21	(Mohammadi et al., 2023)

Aceite	Alcohol	Cat.	%Cat	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Relación Aceite: alcohol	Pot. (W)	Rend. (%)	Referencia
Aceite de Jatropa	Metanol	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Ácido Sulfúrico)	2% p/p	55	90	7:11	400	61.10	(Athar et al., 2022)
Aceite de camelina	Metanol	KOH	1.26% p/p	60	5.85	1:6.91	800	95.31	(Rokni et al., 2022a)
Aceite De Cocina Usado	Metanol	CaO (modificado con bromoetano)	4% p/p	65	75	1:8	300	98.2	(Hsiao et al., 2020)
Aceite De Plumas De Pollo	Metanol	Bio Nano CaO “NCaO”	1% p/p	50	5	1:8	500	95	(M. Zhang et al., 2022)
Aceite De Palma	Metanol	ChOH	6% p/p	50	1	1:13.2	800	89.72	(Phromphithak et al., 2020)
Aceite de cocina usado	Metanol	Lipasa inmovilizada de <i>Candida antarctica</i>	4%	45	40h	5:1	-	92	(Parandi et al., 2023)
Aceite unicelular de <i>Mucor circinelloides</i>	Etanol anhidro	Lipasa inmovilizada de <i>Candida antártida</i> (Novozym 435)	10%	60	72h	1:12	-	93	(Carvalho et al., 2015)
Lípidos en células de microalgas	Etanol e isopropanol	Ácido sulfúrico concentrado	3%	>90	2 - 30	8:1	500	95	(Huang et al., 2015)
Aceite vegetal usado	Etanol - metanol	NaOH	0,75%	95	2	9:1	100	96	<b>(Martinez-Guerra &amp; Gude, 2016)</b>
Lípidos producidos por <i>Mucor circinilloides</i>	Etanol	Lipasa Novozym 435	-	60	10h	1:12	200	90,1	(Carvalho et al., 2018)
Aceite de soja	Etanol	Catalizador carbonoso sulfonado	20%	75	20	6:1	0 - 600	88,7	(Rocha et al., 2019)

Aceite	Alcohol	Cat.	%Cat	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Relación Aceite: alcohol	Pot. (W)	Rend. (%)	Referencia
Aceite de <i>Jatropha curcas</i>	Etanol	Lipasa inmovilizada de <i>Burkholderia cepacia</i>	-	45	24h	1:9	-	98,3	(Souza et al., 2016)
Aceite de <i>Ricinus communis</i>	Etanol	KOH	1,4p/p		7	8p/p	275	95	(Thirugnanasambandham et al., 2016)
Aceite de semilla de algodón	Etanol	KOH	-	70°	12min	1:17	270W	99,5%	<b>(Thirugnanasambandham &amp; Sivakumar, 2015)</b>
Aceite de cocina usado	Etanol	KOH	0,11%	240	25	20:1	-	98,12	(Hassan et al., 2020)

#### 4.5 Rutas alternas para la producción de biodiesel

El proceso de transesterificación es el más común y ampliamente utilizado en la industria para la producción de biodiesel, sin embargo, existen otras rutas de producción, como las microemulsiones, la pirolisis y la transesterificación no catalizada (Abrar & Bhaskarwar, 2018). La elección de la ruta de producción depende de diversos factores, como la disponibilidad de recursos, el grado de desarrollo tecnológico y las condiciones específicas de cada proyecto. A continuación, se discute más a profundidad las rutas de producción de biodiesel.

##### 4.5.1 Ruta por microemulsiones

Las microemulsiones representan una ruta alternativa, de bajo costo y menos frecuente para la producción de biodiesel, que consiste en una suspensión coloidal termodinámicamente estable, transparentes e isotrópica entre una fase no polar (aceite) con una fase polar (alcohol) como el metanol, etanol o 1-butanol, con un tamaño de gota dispersa de entre 5 y 100 nm en los cuales se emplea un agente tensoactivo (surfactante) para reducir la tensión superficial entre las fases (Deepak & Mohamed Ibrahim, 2023; Iqbal et al., 2019); el objetivo de esta reacción es

reducir la viscosidad del aceite y la formación de depósitos de carbón en el inyector provocados por el uso directo de aceites vegetales como combustible, así como la formación de NO<sub>x</sub> y las emisiones de CO (Abrar & Bhaskarwar, 2018).

#### ***4.5.2 Ruta por Pirolisis***

Por otra parte, la pirolisis consiste en un proceso termoquímico de degradación de los triglicéridos contenidos en el aceite vegetal, exponiéndolos a temperaturas superiores a los 450° C en ausencia de oxígeno (Aneesh et al., 2023). Mediante este proceso, los triglicéridos se descomponen en diferentes fracciones, incluidos gases, bio-aceites que pueden ser convertidos en biodiesel y bio-carbón como residuo sólido (Khuenkaeo & Tippayawong, 2018). Si bien la pirólisis ofrece una alternativa para obtener combustibles líquidos a partir de aceites y grasas, la técnica aún se encuentra en etapas de investigación y desarrollo debido a que las condiciones de degradación lo convierten en un proceso costoso, y tiene ciertos inconvenientes, como una reacción incontrolada, una calidad del producto indefinida y un tratamiento posterior de los productos finales (Gad et al., 2022).

#### ***4.5.3 Ruta por transesterificación NO catalizada con fluido supercríticos***

La transesterificación no catalizada a partir de fluidos supercríticos para la producción de biodiesel es un área de investigación relativamente nueva, que surgió como alternativa atractiva para mejorar los tiempos de reacción y evitar algunas problemáticas que conlleva el uso de catalizadores y aceites no tratados en la transesterificación catalizada (Mani Rathnam et al., 2020; Promraksa et al., 2023). Los primeros investigadores en llevar a cabo experimentos a través de esta ruta fueron Saka y Kusdiana en el año 2001 (Mani Rathnam et al., 2020), quienes reportaron un rendimiento de reacción del 95% en un tiempo de 2 min a 350°C, 45MPa con una relación molar de 42:1 (Saka & Kusdiana, 2001). Los fluidos supercríticos comúnmente

utilizados son los alcoholes de cadena corta como el metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) y el etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) (Mani Rathnam et al., 2020), con los cuales se suele llevar a cabo la reacción de transesterificación bajo condiciones de temperatura mayores a los  $240^\circ\text{C}$  y presiones superiores a los 8,1 MPa; de acuerdo con Tobar & Núñez (2018), las condiciones óptimas para tener altos rendimientos de biodiesel se encuentran entre los  $270^\circ\text{C}$  y  $350^\circ\text{C}$ , presiones entre 10MPa y 45MPa, relaciones molares entre 1:20 y 1:43 y tiempos de reacción entre 4 y 110 minutos. Sin embargo, condiciones de presión por encima de los 20MPa y tiempos prolongados de reacción pueden provocar la degradación de los esteres libres de ácidos grasos formados (biodiesel), y favorecer reacciones secundarias que afectan el rendimiento del biodiesel (Tobar & Núñez, 2018).

## **5. Medición de variables en la producción de biodiesel**

### **5.1 Variables más importantes durante el proceso de producción del biodiesel**

En el proceso químico de producción de biodiesel, la temperatura es una de las variables más importantes que interviene directamente en la reacción de transesterificación, es decir, un valor determinado de temperatura puede significar una reacción más rápida o más lenta (Khedri et al., 2019a; Mishra & Goswami, 2018). De igual forma, es importante evitar la evaporación del alcohol con un condensador para que las proporciones de los reactivos se mantenga.

Conjuntamente, la velocidad de mezclado de los reactivos ha demostrado un gran efecto en diversos estudios; los cuales recomiendan trabajar en el rango de 400 a 600 RPM (Khedri et al., 2019b; S. N. Nayak et al., 2019). La influencia de la velocidad se debe a la baja miscibilidad que presenta el aceite y el alcohol, lo que ocasiona que la transferencia de masa se desarrolle de forma lenta en las fronteras de estas sustancias y la reacción no tenga éxito (García-

Muentes et al., 2018; Soltani et al., 2015). A causa de esto es importante asegurar que las fases se mezclen lo más homogéneamente posibles a una velocidad determinada durante la reacción.

Adicional a estas variables, se tendrán en cuentas las condiciones de producción como son humedad del ambiente y temperatura ambiental.

## **5.2 Selección de la instrumentación requerida**

Antes de hacer la elección de los sensores para las variables del proceso de producción de biodiesel, es importantes verificar que estos dispositivos soporten las temperaturas y la exposición a la radiación electromagnética, debido a que la reacción ocurre por encima de la temperatura ambiente, y al interior del horno microondas, estando este encendido durante todo el tiempo de producción. De igual forma, se debe seleccionar cables con características de protección al ruido electromagnético para evitar alteraciones en el transporte de los datos hasta la tarjeta de adquisición.

Teniendo en cuenta estas condiciones, se empleó el Método de Decisión de Selección Binaria (MDSB) con el fin de realizar una evaluación y selección objetiva de los sensores más apropiado teniendo en cuenta los siguientes parámetros: modelo, rango de medición, precisión, temperatura de trabajo y precio.

### ***5.2.1 Metodología del Método de Decisión de Selección Binaria***

#### ***5.2.1.1 Construcción de la matriz de atributos.***

Teniendo en cuenta los criterios de selección, se asigna una identificación a cada criterio y seguidamente se establece la importancia entre ellos.

**Atributo 1 (A1)** = Rango de medición

**Atributo 2 (A2)** = Precisión

**Atributo 3 (A3)** = Salida digital

**Atributo 4 (A4)** = Precio

**Importancia:**

A1 es más importante que A2 y A4.

A3 es más importante que A4, pero menos importante que A1;

A4 es más importante que A2.

Se procede a construir la matriz de atributos presentada en la Tabla 3, en donde se compara cada atributo, con el fin de saber su ponderación. Las comparaciones se realizan por filas, y se da un valor de 2 al atributo que tenga mayor importancia, un 1 a aquellos que tengan la misma importancia y un 0 al atributo que tenga menor importancia. La diagonal debe contener 1 para cada fila debido a que se compara cada atributo consigo mismo.

**Tabla 3**

*Matriz de atributos.*

Atributos	A1	A2	A3	A4	Valor	Peso
<b>A1</b>	1	2	2	2	7	7/16
<b>A2</b>	0	1	0	0	1	1/16
<b>A3</b>	0	2	1	2	5	5/16
<b>A4</b>	0	2	0	1	3	3/16
<b>TOTAL</b>					16	1

A partir de los valores de peso, que el atributo de mayor relevancia durante la selección de los sensores será el rango de medición.

### 5.2.1.2 Construcción de la matriz de coeficientes de énfasis

Esta matriz permite compara para cada atributo cada uno de los dispositivos encontrados en el mercado. Para ello se construye una matriz por cada atributo, y se analiza de igual manera que en la matriz de atributos (Tabla 4), con la diferencia de que se analiza al dispositivo en relación al atributo, no en relación a los demás dispositivos. En este caso se hará para 4 sensores, y se detallará más adelante.

**Tabla 4**

*Matriz de coeficientes de énfasis general.*

Sensores	S1	S2	S3	S4	Valor	Peso
S1	1	-	-	-	-	-
S2	-	1	-	-	-	-
S3	-	-	1	-	-	-
S4	-	-	-	1	-	-
	<b>TOTAL</b>				-	-

### 5.2.1.3 Construcción de la matriz de decisión

Por último, se realiza la matriz de decisión en donde se tienen en cuenta los pesos calculados anteriormente, el modelo de la matriz se presenta en (1).

$$\begin{bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \\ S4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & W_{34} \\ W_{41} & W_{42} & W_{43} & W_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$S$ : es el valor final para cada sensor, este valor indica cual es el sensor a seleccionar.

$W_{ia}$ : son los pesos de las matrices de coeficientes de énfasis de cada atributo, en donde "a" corresponde al atributo, e "i" corresponde al instrumento o dispositivo.

$P$ : es el peso para cada atributo.

### 5.2.2 Selección del sensor para medir la temperatura de reacción

En la Tabla 5 se muestran los datos técnicos de los sensores de temperatura presenten en el mercado.

Criterios que debe cumplir el sensor de temperatura:

- Rango de medición: 20 – 120°C
- Precisión:  $\pm 2^\circ\text{C}$
- Temperatura de trabajo:  $\leq 120^\circ\text{C}$
- Precio:  $\leq 50.000$

**Tabla 5**

*Datos técnicos de los sensores de temperatura.*

Sensores	Modelo	A1	A2	A3	A4
S1	Termocupla Tipo K	0-600°C	$\pm 1.5^\circ\text{C}$	Sí	21.900
S2	LM35	-55-150°C	$\pm 1.5^\circ\text{C}$	No	15.000
S3	MIx90614 BCC	-70 - 380	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	No	84.000
S4	DS18b20 Sonda	-55-125°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	Sí	11.000

Con los datos de los sensores de temperatura consultados, se desarrolla la matriz de coeficiente de énfasis para cada atributo, tal como se desarrolla en las Tablas 6, 7, 8, 9.

**Tabla 6***Matriz de énfasis para el atributo A1.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	2	2	2	7	7/16
<b>S2</b>	0	1	0	1	2	2/16
<b>S3</b>	0	2	1	2	5	5/16
<b>S4</b>	0	1	0	1	2	2/16
<b>TOTAL</b>					16	1

**Tabla 7***Matriz de énfasis para el atributo A2.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	1	0	0	2	2/16
<b>S2</b>	1	1	0	0	2	2/16
<b>S3</b>	2	2	1	1	6	6/16
<b>S4</b>	2	2	1	1	6	6/16
<b>TOTAL</b>					16	1

**Tabla 8***Matriz de énfasis para el atributo A3.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	2	2	1	6	6/16
<b>S2</b>	0		1	0	2	2/16
<b>S3</b>	0	1	1	0	2	2/16

<b>S4</b>	1	2	2	1	6	6/16
<b>TOTAL</b>					16	1

**Tabla 9**

*Matriz de énfasis para el atributo A4.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	0	2	0	3	3/16
<b>S2</b>	2	1	2	0	5	5/16
<b>S3</b>	0	0	1	0	1	1/16
<b>S4</b>	2	2	2	1	7	7/16
<b>TOTAL</b>					16	1

Finalmente se ubican los valores obtenidos en cada matriz de énfasis junto con los valores de los pesos de cada atributo para realiza la multiplicación de las matrices.

$$\begin{bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \\ S4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7/16 & 2/16 & 6/16 & 3/16 \\ 2/16 & 2/16 & 2/16 & 5/16 \\ 5/16 & 6/16 & 2/16 & 1/16 \\ 2/16 & 6/16 & 6/16 & 7/16 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 7/16 \\ 1/16 \\ 5/16 \\ 3/16 \end{bmatrix}$$

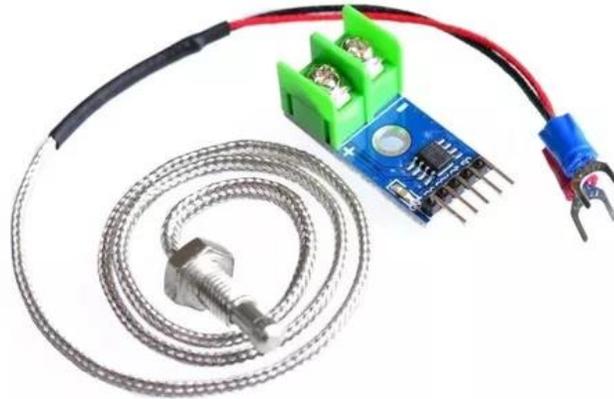
$$S1 = 0.352$$

$$S2 = 0.160$$

$$S3 = 0.211$$

$$S4 = 0.277$$

**Selección:** cómo se puede apreciar en los valores finales obtenidos de la matriz de decisión, el sensor con mejores características para la medición de temperatura al interior del horno microondas es el sensor 1, correspondiente a la Termocupla tipo K (ver Figura 3).



**Figura 3.** Sensor de temperatura Termocupla tipo K con modulo MAX6675.

### 5.2.3 Selección del sensor para medir la temperatura del agua del condensador

En la Tabla 10 se muestran los datos técnicos de los sensores de temperatura presenten en el mercado.

Criterios que debe cumplir el sensor de temperatura, entre ellos que pueda sumergirse en agua:

- Rango de medición: 0 – 40°C
- Precisión:  $\pm 1^\circ\text{C}$
- Temperatura de trabajo:  $\leq 40^\circ\text{C}$
- Precio:  $\leq 50.000$

Con los datos de los sensores de temperatura consultados, se desarrolla la matriz de coeficiente de énfasis para cada atributo, tal como se desarrolla en las Tablas 11, 12, 13, 14.

#### **Tabla 10**

*Datos técnicos de los sensores de temperatura.*

<b>Sensores</b>	<b>Modelo</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>A4</b>
<b>S1</b>	Termocupla Tipo K	0-600°C	±1.5°C	Sí	21.900
<b>S2</b>	LM35	-55-150°C	±1.5°C	No	15.000
<b>S3</b>	RTD Pt100 Con Módulo	-20 - 450	±0.3°C	Sí	42.000
<b>S4</b>	DS18B20 Sumergible	-55-125°C	±0.5°C	Sí	11.000

**Tabla 11**

*Matriz de énfasis para el atributo A1.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	0	0	0	1	1/16
<b>S2</b>	2	1	2	1	6	6/16
<b>S3</b>	2	0	1	0	3	5/16
<b>S4</b>	2	1	2	1	6	6/16
<b>TOTAL</b>					16	1

**Tabla 12**

*Matriz de énfasis para el atributo A2.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	1	0	0	2	2/16
<b>S2</b>	1	1	0	0	2	2/16
<b>S3</b>	2	2	1	1	6	6/16
<b>S4</b>	2	2	1	1	6	6/16
<b>TOTAL</b>					16	1

**Tabla 13***Matriz de énfasis para el atributo A3.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	2	1	1	5	5/16
<b>S2</b>	0	1	0	0	1	1/16
<b>S3</b>	1	2	1	1	5	5/16
<b>S4</b>	1	2	1	1	5	5/16
<b>TOTAL</b>					16	1

**Tabla 14***Matriz de énfasis para el atributo A4.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	0	2	0	3	3/16
<b>S2</b>	2	1	2	0	5	5/16
<b>S3</b>	0	0	1	0	1	1/16
<b>S4</b>	2	2	2	1	7	7/16
<b>TOTAL</b>					16	1

Finalmente se ubican los valores obtenidos en cada matriz de énfasis junto con los valores de los pesos de cada atributo para realiza la multiplicación de las matrices, se tienen los siguientes resultados.

$$S1 = 0.168$$

$$S2 = 0.25$$

$$S3 = 0.270$$

$$S4 = 0.367$$

**Selección:** cómo se puede apreciar en los valores finales obtenidos de la matriz de decisión, el sensor con mejores características para la medición de temperatura del agua que ingresa hacia el condensador es el sensor 4, correspondiente al DS18B20 con sonda sumergible (ver Figura 4).



**Figura 4.** *Sensor de temperatura DS18B20 con sonda sumergible.*

#### **5.2.4 Agitador Mecánico**

El agitador mecánico establecido para el proceso de producción consta de un motor DC encargado de generar un movimiento circular en el agitador; un alabe de agitación que se encuentra en contacto con el fluido, y es el encargado de provocar la mezcla entre los reactivos. Entre estos dos componentes se encuentra un eje con la función de transmitir el giro del motor DC hasta el alabe de agitación que se encuentra al interior del reactor, su importancia se debe a que el motor DC no puede ser introducido al interior del microondas por razones de seguridad y posibles daños debido a sus características metálicas. Las características operativas del motor se presentan en la Tabla 15.

#### **Tabla 15**

*Características Operativas del Motor DC del Agitador.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Modelo	Nisca NF5475
Peso	700 gr
Voltaje nominal	24V
Corriente nominal	540mA
Velocidad nominal	3600 RPM

**5.2.5 Selección del sensor para medir la temperatura y humedad en el laboratorio**

En la Tabla 16 se muestran los datos técnicos de los sensores de temperatura y humedad presenten en el mercado.

Criterios que debe cumplir el sensor, entre ellos que tenga la capacidad de medir las dos variables:

- Rango de medición: 0 – 40°C y 0 – 100°C
- Precisión:  $\pm 2.5^\circ\text{C}$  y  $\pm 5\%$
- Temperatura de trabajo:  $\leq 40^\circ\text{C}$
- Precio:  $\leq 50.000$

**Tabla 16**

*Datos técnicos de los sensores de humedad y temperatura.*

<b>Sensores</b>	<b>Modelo</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>A4</b>
<b>S1</b>	DHT22	-40-80°C y 0-99%	$\pm 0.5^\circ\text{C} \pm 2\%$	Sí	22.000
<b>S2</b>	DHT11	0-50°C y 20-95%	$\pm 2^\circ\text{C} \pm 4\%$	Sí	8.000

<b>S3</b>	Termohigrometro Digital	-50-70°C y 10-99%	$\pm 1^{\circ}\text{C} \pm 5\%$	No	19.500
<b>S4</b>	AHT10	-40-85°C y 0-100%	$\pm 0.3^{\circ}\text{C} \pm 2\%$	Sí	16.000

Con los datos de los sensores de temperatura consultados, se desarrolla la matriz de coeficiente de énfasis para cada atributo, tal como se desarrolla en las Tablas 17, 18, 19, 20.

**Tabla 17**

*Matriz de énfasis para el atributo A1.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	0	2	1	4	4/14
<b>S2</b>	0	1	2	2	5	5/14
<b>S3</b>	0	0	1	1	2	2/14
<b>S4</b>	1	0	1	1	3	3/14
<b>TOTAL</b>					14	1

**Tabla 18**

*Matriz de énfasis para el atributo A2.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	2	2	1	6	6/14
<b>S2</b>	0	1	2	0	3	3/14
<b>S3</b>	0	0	1	0	1	1/14
<b>S4</b>	1	2	2	1	6	6/14
<b>TOTAL</b>					14	1

**Tabla 19**

*Matriz de énfasis para el atributo A3.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	1	2	1	5	5/16
<b>S2</b>	1	1	2	1	5	5/16
<b>S3</b>	0	0	1	0	1	1/16
<b>S4</b>	1	1	2	1	5	5/16
<b>TOTAL</b>					16	1

**Tabla 20**

*Matriz de énfasis para el atributo A4.*

<b>Sensores</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>S1</b>	1	0	0	0	1	1/16
<b>S2</b>	2	1	2	2	7	7/16
<b>S3</b>	2	0	1	0	3	3/16
<b>S4</b>	2	0	2	1	5	5/16
<b>TOTAL</b>					16	1

Finalmente se ubican los valores obtenidos en cada matriz de énfasis junto con los valores de los pesos de cada atributo para realiza la multiplicación de las matrices, se tienen los siguientes resultados.

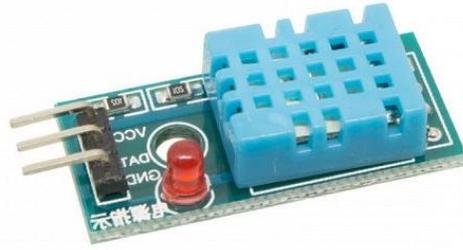
$$S1 = 0.261$$

$$S2 = 0.349$$

$$S3 = 0.122$$

$$S4 = 0.277$$

**Selección:** cómo se puede apreciar en los valores finales obtenidos de la matriz de decisión, el sensor con mejores características para la medición de temperatura del agua que ingresa hacia el condensador es el sensor 2, correspondiente al DHT11 (ver Figura 5).



**Figura 5.** Sensor de temperatura y humedad DHT11.

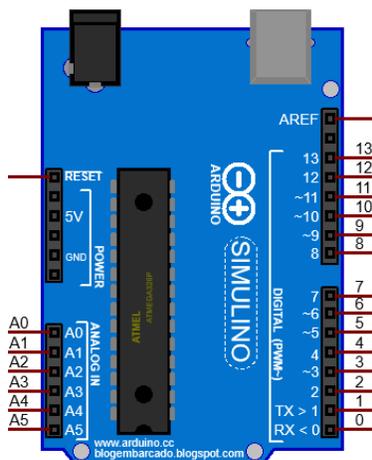
### 5.2.6 Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos utilizada en este proyecto fue la tarjeta de desarrollo Arduino UNO (ver Figura 6), debido a la compatibilidad que tiene con la mayoría de los sensores previamente seleccionados, la capacidad de procesamiento y la relación precio-calidad. Esta tarjeta es la encargada de recibir las señales de los sensores, interpretar los protocolos de comunicación, y transmitir los datos a través del puerto serial a la interfaz HMI en LabVIEW.

Las características más importantes bajo las cuales se seleccionó el modelo del Arduino fueron:

- Entradas analógicas: mínimo 3
- Entradas digitales: mínimo 9
- Salidas digitales: mínimo 1
- Salidas PWM: mínimo 1
- Niveles de tensión: 5V

- Comunicación serial: I2C, SPI.



**Figura 6.** Tarjeta de desarrollo Arduino UNO.

**Tabla 21**

*Resumen de las Características Generales de la Tarjeta Arduino Uno.*

Característica	Atmega328P
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada	7 – 12V
Voltaje de entrada (Límite)	6 – 20V
Pines para entrada- salida digital.	14 (6 permiten salidas PWM)
Pines de entrada analógica.	6
Corriente continua por pin IO	40 mA
Corriente continua en el pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (0,5 KB ocupados por el bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia de reloj	16 MHz

## **6. Diseño de la metodología para la producción de biodiesel a partir de insumos producidos en la región**

### **6.1 Materia prima para la producción de biodiesel**

La selección de las materias primas adecuadas es el primer paso de la producción de biodiésel. Factores económicos, disponibilidad local, técnicos, ambientales y sociales pueden desempeñar un papel importante en la selección de materias primas (Anwar, 2021).

#### ***6.1.1 Aceite***

La materia prima principal para llevar a cabo la producción de biodiesel es el aceite vegetal, que puede ser extraído de plantas oleaginosas, microalgas o aceites usados; estos se clasifican en cuatro generaciones de acuerdo a su procedencia, y fines de uso. Los aceites de primera generación, que provienen de cultivos destinados a la producción de alimentos, son la principal fuente utilizada en la producción comercial de biodiesel en la actualidad (Anwar, 2021). Esta opción ofrece numerosas ventajas, como su disponibilidad global y el uso de tecnologías ya establecidas, lo que garantiza un proceso de producción estable. entre estos se encuentra el aceite de palma, aceite de girasol, aceite de soya; que se utilizan ampliamente en cantidades comerciales como materias primas para biomasa en Asia, Europa y los Estados Unidos, respectivamente (Kara et al., 2021), también suelen emplearse el aceite de coco, el aceite de colza, el aceite de maní, aceite de mostaza, entre otros (Akkarawatkhoosith et al., 2019; Anwar, 2021).

##### ***6.1.1.1 Aceite de Palma Crudo***

El aceite de palma, obtenido de la fruta de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*), se utiliza ampliamente en la industria alimentaria y en la fabricación de productos de consumo. En Colombia, los cultivos de palma de aceite se distribuyen en más de 120 municipios, delimitados

geográficamente en "zonas palmeras," que se dividen desde una perspectiva administrativa y logística en zona Norte, Central, Oriental y Suroccidental. El departamento de Norte de Santander se encuentra en la zona central y es una de las regiones donde se cultiva y produce aceite de palma. Para la región, la palma de aceite ha sido una fuente importante de ingresos y empleo. Además, el aceite de palma también se utiliza en la producción de biodiesel, dada su alta eficiencia y sostenibilidad en Colombia como fuente de materia prima para la producción de combustibles alternativos. (García-Núñez et al., 2022; López Jiménez & Rodríguez Cañón, 2017; Rincón-Romero et al., 2023)



**Figura 7.** *Racimos de fruto de la palma de aceite.*

*Nota.* Adaptado de Muestreo y análisis de racimos en el cultivo de la palma de aceite, por Prada & Romero.

Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite: guía para facilitadores, 2012.

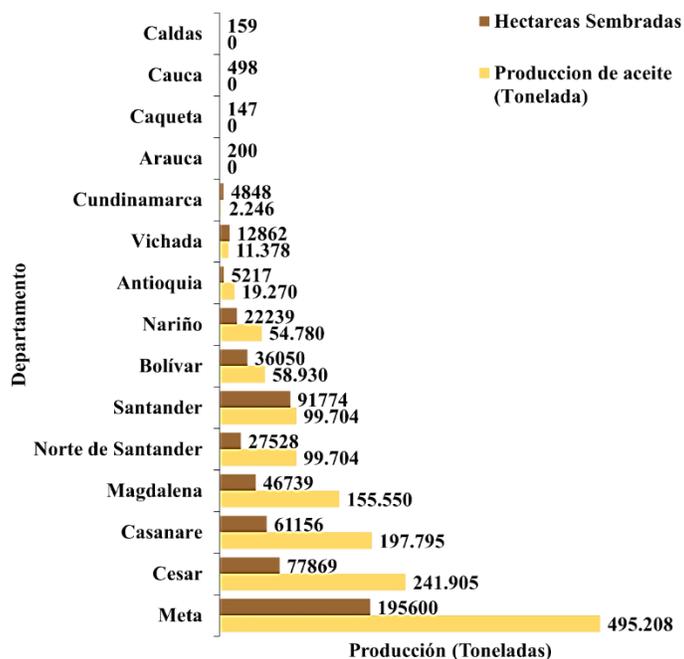
En la agroindustria de la palma de aceite los productos principales son el aceite de palma crudo (APC) y el aceite de almendra o de palmiste. El APC es distribuido para productos del sector de alimentos, le generación de concentrados y la producción de biodiesel. En los últimos 20 años, la producción de aceites y grasas se ha triplicado, al mismo tiempo que se han vuelto más estrictas las exigencias del mercado en parámetros de calidad del aceite de palma, generando la necesidad de establecer estrategias en el departamento para afrontar todos los retos que tiene el sector. (Fedepalma, 2023a; García-Núñez et al., 2022)

#### **6.1.1.1.1 Rendimiento de producción**

La palma de aceite es un cultivo que destaca por su alto rendimiento en la producción de aceite en comparación con otros cultivos oleaginosos, produciendo aproximadamente 10 veces más aceite que la mayoría de las otras plantas de este tipo. El rendimiento de la palma de aceite varía según la edad de la planta y factores genéticos. A la edad de cinco años, se espera que una palma produzca alrededor de catorce racimos por año, con un peso promedio de 7 kg por racimo, mientras que a los ocho años se estima que el número de racimos producidos sea de aproximadamente ocho, con un peso promedio de 22 kg cada uno. Esta versatilidad de producción hace que el aceite de palma sea un componente esencial en la fabricación de productos basados en grasa vegetal.

En la Figura 8 se muestran los datos de las hectáreas sembradas y la producción de aceite en los departamentos que conforman las zonas palmeras en Colombia de acuerdo a las estadísticas de la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma) para 2022 (Fedepalma, 2023b). Cabe resaltar que los departamentos de Caldas, Cauca, Caquetá y Arauca no registran producción de aceite debido a que no cuentan con plantas de transformación, sin embargo, sus cosechas se distribuyen hacia los departamentos cercanos que si las tienen.

Esta combinación de alto rendimiento y la versatilidad de los aceites que produce hace que la palma de aceite sea un cultivo valioso en la industria alimentaria y en la industria del biodiesel para Colombia.



**Figura 8.** *Hectáreas sembradas y producción de aceite de palma crudo en Colombia por departamentos.*

#### 6.1.1.1.2 *Composición del aceite de palma y propiedades fisicoquímicas*

El aceite de palma se compone principalmente de ácidos grasos, siendo una mezcla de ácidos grasos saturados e insaturados. Los componentes más comunes del aceite de palma son:

- **Ácidos grasos saturados:** Estos son los ácidos grasos sólidos a temperatura ambiente y son los que le dan al aceite de palma su consistencia semisólida. Los ácidos grasos saturados más comunes en el aceite de palma son el ácido palmítico y el ácido esteárico.
- **Ácidos grasos insaturados:** Estos son los ácidos grasos líquidos a temperatura ambiente. El ácido oleico es uno de los ácidos grasos insaturados más comunes presentes en el aceite de palma.

- **Ácido linoleico:** Este es un ácido graso esencial (omega-6) que también se encuentra en el aceite de palma.
- **Ácido linolénico:** Este es otro ácido graso esencial (omega-3) que, aunque en menor cantidad que otros aceites, está presente en el aceite de palma.
- **Vitaminas liposolubles:** El aceite de palma también contiene algunas vitaminas liposolubles, como la vitamina E (tocoferoles y tocotrienoles), que pueden tener propiedades antioxidantes.

**Tabla 22**

*Propiedades físico químicas del aceite de palma.*

<b>Propiedad</b>	<b>Aceite del pericarpio</b>	<b>Aceite del mesocarpio</b>
Índice de Yodo	81	80
Índice de refracción 40°C	1.4616	1.4581
Índice de Acidez	1.85	0.72
Punto de Fusión	12.8 °C	13.6 °C
Índice de saponificación	193	192

### ***6.1.2 Aceite de palma usado en este proyecto***

Una de las principales materias primas para la fabricación del biodiesel es el aceite vegetal, en nuestro caso el aceite de palma. Para el desarrollo del proyecto fue necesario solicitar la donación de este a diferentes empresas extractoras de aceite de palma de la región; entre ellas se encuentran: Aceites y Grasas del Catatumbo S.A.S., Cooperativa Palmas Risaralda Ltda. – Coopar, Oleaginosas del Norte de Santander S.A.S., Oleonorte S.A.S., Palmicultores del Norte S.A.S. (PALNORTE). La empresa que aceptó apoyarnos con la donación de aceite crudo de palma fue PALNORTE S.A.



**Figura 9.** *Visita a la Planta de extracción de Aceite de palma PALNORTE S.A.S.*

El proceso de solicitud fue por medio del Grupo de Investigación en Desarrollo de Procesos Industriales GIDPI, donde se formalizó una solicitud por parte del director del grupo hacia el gerente encargado de la planta; una vez aprobada la solicitud de donación, el autor de la tesis junto a un integrante del grupo de investigación, procedieron a viajar a la planta principal ubicada en el corregimiento de campo 2, vía Tibú-Catatumbo, en Norte de Santander. Estando allí, el ingeniero de planta nos dio un recorrido por las instalaciones de la empresa y las etapas que conforman la línea de producción del aceite de palma; finalizando la visita, se procedió a la entrega del aceite de palma crudo.



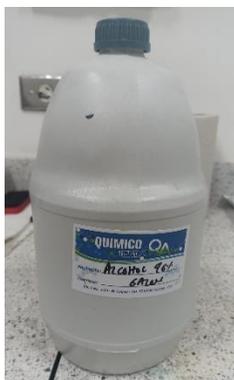
**Figura 10.** *Aceite de Palma Crudo donado por PALNORTE S.A.S.*

### ***6.1.3 Selección del Alcohol***

El metanol y el etanol son los alcoholes que se usan con mayor frecuencia en la producción de biodiesel porque tienen longitudes de cadenas más cortas entre los alcoholes y son menos costosos que los otros (Arce Saavedra et al., 2022). Ambos alcoholes reaccionan rápidamente con los triglicéridos presentes en la materia prima. Industrialmente el metanol es usado preferentemente como donante de alquilo ya que es más reactivo que el etanol y tiene un menor costo. Sin embargo, su procedencia no renovable a partir del petróleo, su alta toxicidad y corrosión (Akkarawatkhoosith et al., 2023), ha conllevado a centrar las investigaciones hacia alcoholes renovables, entre ellos el etanol que es menos tóxico, más limpio y menos corrosivo (Fadhil & Ahmed, 2018; Jeevahan et al., 2020; Wong et al., 2023). El etanol es el segundo alcohol con cadena más corta en la naturaleza, después del metanol, con fórmula química  $C_2H_5OH$  y tiene un punto de ebullición mayor que el metanol, así como una presión crítica más baja 6,3 MPa (1.9MPa menos que el metanol), lo que contribuye a dar mayor seguridad al proceso y mejorar el consumo de energía (Akkarawatkhoosith et al., 2023).

El etanol puede obtenerse a través de dos métodos principales: la fermentación de azúcares como la caña de azúcar, el maíz y de forma sintética a partir del etileno. La fermentación de azúcares, proceso común para su obtención, involucra la transformación de azúcares complejos en azúcares simples y, posteriormente, en alcohol y dióxido de carbono. El etanol tiene una amplia variedad de aplicaciones en la industria, la medicina, la química y también se utiliza como componente en bebidas alcohólicas.

El alcohol empleado para el desarrollo del proyecto fue etanol al 96% de pureza, que se adquirió de las distribuidoras de químicos de la ciudad (ver Figura 11).



**Figura 11.** Alcohol etanol al 96% de pureza.

#### **6.1.4 Catalizador**

Los catalizadores utilizados en la producción de biodiesel se pueden clasificar según su fase en homogéneos o heterogéneos, y según su capacidad de actuación química en ácidos, básicos y enzimáticos. En la transesterificación, un proceso clave para la producción de biodiesel, los catalizadores básicos, como el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio (NaOH), se utilizan de manera convencional a nivel industrial debido a su eficacia y velocidad en la reacción, permitiendo condiciones operativas moderadas (Folayan et al., 2019; Kara et al., 2021). A pesar de su eficacia, estos catalizadores presentan desafíos, como la necesidad de procesos de purificación del biodiesel debido a su alta corrosión. En contraste, el uso de alcóxidos, que se producen al reaccionar hidróxidos metálicos con alcohol antes de mezclarse con los triglicéridos, ha ganado atención reciente debido a su capacidad para simplificar el proceso de producción y aumentar su eficiencia. Estos alcóxidos ofrecen ventajas en términos de rendimiento y pureza en la producción de biodiesel, lo que los convierte en una alternativa prometedora en comparación con los catalizadores tradicionales (Pandya et al., 2019).

Se determinó trabajar con el KOH, por las características de su forma caustica, el potasio se convierte en un nutriente para el suelo, caso contrario del NaOH que es toxico.

El hidróxido de potasio grado analítico al 85% de pureza utilizado para la transesterificación fue adquirido de los laboratorios de químicas de la Universidad (ver Figura 12).



**Figura 12.** *Hidróxido de potasio al 85% de pureza.*

## 6.2 Diseño de la metodología para la producción de biodiesel

En este contexto es importante resaltar que la región del Catatumbo actualmente es una de los mayores productores de aceite de palma (*Elaeis guineensis*) en Colombia. Debido a la ubicación estratégica de la Universidad Francisco de Paula Santander, este proyecto se propuso como objetivo implementar la tecnología de reacción de microondas para la producción de biodiesel, buscando mejorar la eficiencia de su producción. La propuesta comprende un diseño experimental de tipo factorial, en donde se evalúa la incidencia de dos factores en el rendimiento de la reacción.

### 6.2.1 Diseños experimentales estadísticos

El diseño de experimentos (DOE) se puede definir como un proceso que implica la planificación de los pasos necesarios para la recolección y posterior análisis de información en la

investigación. Su principal objetivo es obtener la máxima cantidad de información requerida con la máxima eficiencia y el menor costo posible. Un diseño efectivo se caracteriza por su capacidad para proporcionar información precisa con la menor cantidad de datos (Rojas Reyes et al., 2017). Estos diseños experimentales son de gran importancia en una variedad de campos, particularmente en la investigación científica y la toma de decisiones en áreas como la ingeniería. Cuando un investigador busca desarrollar o mejorar un proceso, puede emplear un procedimiento experimental para evaluar cómo las variables independientes afectan las respuestas (Fernández Bao, 2020).

Hay tres formas de resolver un problema experimental. Para realizar experimentos con dos o tres variables, por ejemplo, las posibilidades son: Análisis univariante, Matriz con todas las combinaciones y Diseño Rotacional Central Compuesto (RCCD). El método de análisis univariante es el procedimiento experimental más extendido y habitual, en el que se evalúa una de las variables y se fijan las demás. Este método puede utilizarse, pero es bastante ineficaz, ya que no sería posible detectar los efectos de las interacciones entre las variables, haciendo que las condiciones se limiten a una región (Ávila Ávila et al., 2019). El estudio matricial, con la combinación de todos los factores, explorando todo el espacio experimental, tiene sin embargo el inconveniente de requerir un gran número de mediciones. Además, como no se repite ninguna prueba, no es posible calcular ningún tipo de error estándar inherente a las manipulaciones experimentales. Para resolver el problema se puede utilizar un diseño estadístico conocido como Diseño Experimental Factorial, que permite utilizar menos mediciones y explorar todo el espacio experimental.

El diseño factorial puede definirse como las pruebas realizadas de forma planificada, en las que se alteran los factores (o variables controladas) para evaluar su impacto sobre una

variable de respuesta. A continuación, se enumeran algunas nomenclaturas sobre este enfoque (Padovani, 2014).

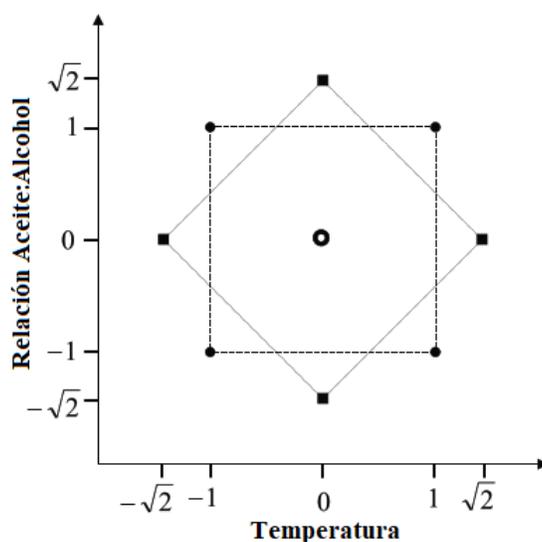
- Factores: Son las variables independientes controladas en el experimento, cuyos efectos se quieren probar.
- Respuesta (variable): Es la variable dependiente en el experimento, que se utilizará para evaluar la influencia de los factores.
- Niveles: Cada uno de los posibles valores que puede tomar la variable independiente (o factor) en el experimento.
- Tratamiento: El tratamiento es una combinación de niveles de variables controladas (o factores).

Con este método, se puede calcular el error experimental cuando se tiene la precaución de repetir la condición de punto central al menos tres veces, lo que resulta esencial para evaluar la reproducibilidad del proceso. También es posible desarrollar un modelo matemático que, si se valida estadísticamente, puede utilizarse para obtener la Superficie de Respuesta y, mediante este análisis, determinar las condiciones optimizadas, conociendo la significación estadística de las respuestas.

### ***6.2.2 Diseño factorial en estrella para la producción de biodiesel***

Para estudiar las condiciones de funcionamiento del banco de producción de biodiésel mediante radiación con microondas, se definieron las siguientes variables: tiempo de reacción entre 1:21 – 12:40 minutos y relaciones de aceite:alcohol 1:2.58 - 1:5.41. Se fijó la potencia a 900W (100%), temperatura del condensador entre 10-20°C, velocidad del agitador en 500 RPM, y bajo condiciones ambientales de 25-28°C y humedad relativa entre 50-68%. Los valores de

cada variable se eligieron en función de los resultados presentados en la revisión bibliográfica. El efecto de cada parámetro sobre el rendimiento de ésteres, así como sus interacciones, se investigó desarrollando el diseño experimental, y su análisis se realizó a partir de los gráficos de superficie de respuesta elaborados con el software STATISTICA, con licencia gratuita estudiantil on-line.



**Figura 13.** Diseño experimental en estrella para dos factores.

*Nota.* Adaptado de *Emprego de planejamento fatorial para a otimização das temperaturas de pirólise e atomização de Al, Cd, Mo e Pb por Etaas*, por Pereira-Filho et al., 2002, <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000200013>.

Las temperaturas se normalizaron entre -1 y +1. Además, se realizaron tres experimentos en el punto central (temperaturas y relación aceite:alcohol normalizadas a 0) para calcular el error, y cuatro experimentos en estrella ( $+\sqrt{2}$  y  $-\sqrt{2}$ ). Es importante resaltar que el diseño en estrella da una ecuación de segundo orden que permite analizar la influencia de los factores.

### Tabla 23

*Diseño factorial de la producción de biodiésel.*

Factores	$-\sqrt{2}$	-1	0	1	$\sqrt{2}$
----------	-------------	----	---	---	------------

<b>Tiempo</b>	01:21	4	7	11	12:40
<b>Relación Aceite:alcohol</b>	1:2.58	1:3	1:4	1:5	1:5,41

**Tabla 24**

*Matriz de experimentos del diseño factorial para la producción de biodiésel.*

<b>Experimento</b>	<b>Tiempo (minutos)</b>		<b>Relación Aceite:Alcohol</b>	
<b>0 (3 veces)</b>	0	7	0	1:4
<b>1</b>	+1	11	+1	1:5
<b>2</b>	+1	11	-1	1:3
<b>3</b>	-1	4	+1	1:5
<b>4</b>	-1	4	-1	1:3
<b>5</b>	$+\sqrt{2}$	12:40	0	1:4
<b>6</b>	$-\sqrt{2}$	01:21	0	1:4
<b>7</b>	0	7	$+\sqrt{2}$	1:5.41
<b>8</b>	0	7	$-\sqrt{2}$	1:2.58

La Tabla 23 contiene el diseño factorial para las variables de producción de biodiésel conformado por 11 experimentos. Según el planteamiento, se comenzó con proporciones de 1:4, para una solución total de 300 ml. Posteriormente, se realizaron experimentos con proporciones de 1:5, 1:3, 1:5.41, 1:2.58, en los que se consiguió una transesterificación completa con una proporción masa/volumen del catalizador KOH de 0.5% para cada experimento.

La Tabla 24 muestra la matriz del diseño factorial de las variables de producción de biodiésel, realizada para los diferentes experimentos planteados en este trabajo, con un total de 11 experimentos.

# **INGENIERÍA DE DETALLE**

## 7. Prototipo para la producción de biodiesel

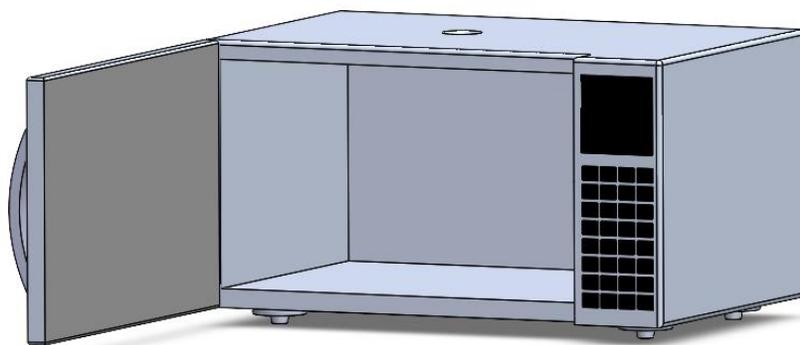
La fabricación del banco de producción de biodiesel se realizó en el laboratorio de Térmicas, adjunto al departamento de ingeniería mecánica, por el autor del proyecto, y se contó con el total apoyo y asesoramiento técnico-científico de los compañeros del grupo de investigación GIDPI y los directores del proyecto. Terminada esa etapa, se procedió con el desarrollo experimental del proceso de producción del biodiesel.

### 7.1 Diseños en SolidWorks

Antes de llevar a cabo la fabricación física del banco de pruebas, se realizaron los diseños de cada elemento y sistema en el software SolidWorks, con el objetivo de establecer una proyección de las dimensiones y métricas de ajuste entre los elementos que conforman la bancada. Una vez culminada a detalle la fase de diseño se procedió a realizar la fabricación en físico.

#### 7.1.1 Diseño del horno microondas

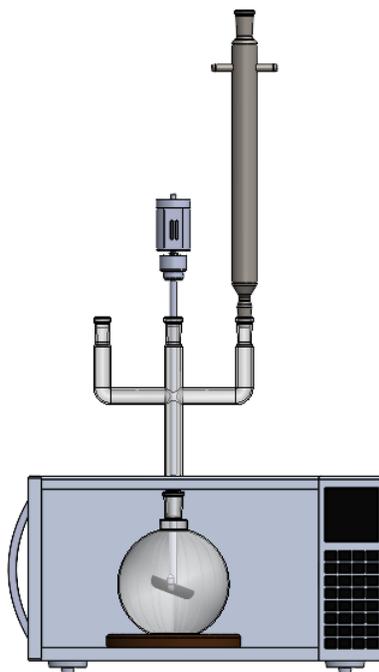
El diseño elaborado para el horno microondas seleccionado e implementado en este proyecto, se puede ver en la Figura 14.



**Figura 14.** *Diseño del horno microondas en SolidWorks.*

### ***7.1.2 Diseño del sistema de reacción y agitación mecánica***

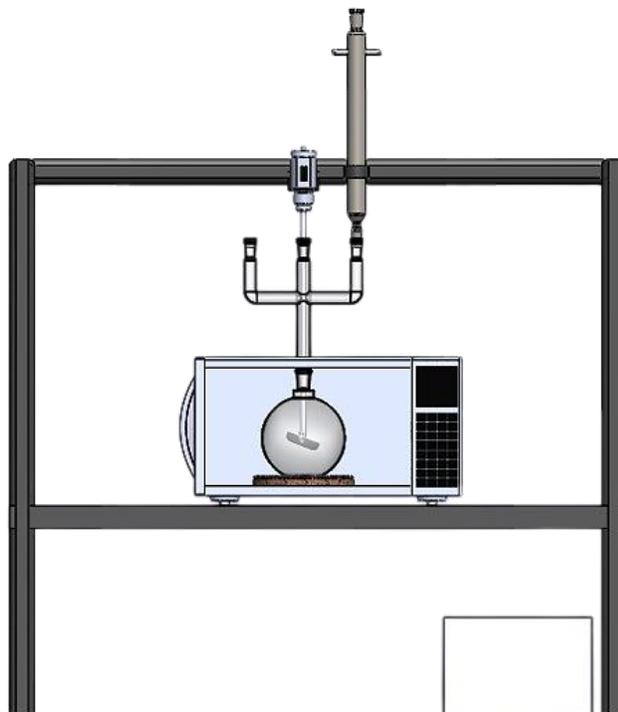
El ensamblado del sistema de reacción y el sistema de agitación mecánica se puede ver en la Figura 15.



**Figura 15.** Sistema de reacción y agitación mecánica ensamblado en SolidWorks.

### ***7.1.3 Ensamble del banco de pruebas***

En la Figura 16 se puede apreciar el banco de prueba ensamblado en SolidWorks.



**Figura 16.** Banco de pruebas ensamblado en SolidWorks.

## 7.2 Fabricación del prototipo

Al banco de producción de biodiésel desarrollado se le realizaron algunas modificaciones en relación al diseñado en SolidWorks, por temas económicos y ergonómicos. El banco experimental está constituido por un sistema de agitación mecánico con control de velocidad para obtener una mayor precisión en la mezcla de los reactivos, que son un factor importante. El agitador se trabajó con materiales “invisibles” a la radiación de microondas, es decir, teflón y vidrio, y también hay un sistema de refrigeración con condensador, con el objetivo principal de bajar la temperatura de los gases producidos por la reacción química en el interior del reactor, mediante un flujo de agua fría en el rango de temperatura de 10 a 20°C. La reacción de transesterificación tiene lugar en el interior de un reactor cargado previamente con la materia prima, de forma circular, fondo plano y capacidad de 2 litros. La fuente de calor del reactor es un

horno microondas convencional con potencia nominal de funcionamiento de 900 W marca Whirlpool. El banco de pruebas se puede apreciar en la Figura 17.



**Figura 17.** Banco de pruebas para la producción de biodiesel por radiación de microondas.

### 7.3 Instrumentación

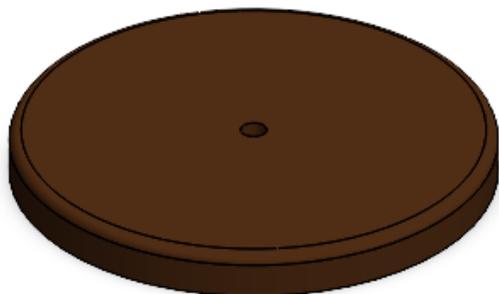
Al banco de pruebas se le implementaron sensores e instrumentos de medición de las variables más importantes para la producción, los cuales facilitan la lectura de datos, y la representación gráfica en tiempo real, que permite conocer las condiciones en cada experimento.

El banco de pruebas se compone de los siguientes elementos previamente seleccionados:

- Sensor de temperatura para la reacción: Termocupla Tipo K con modulo MAX6675
- Sensor de temperatura para el agua fría del condensador: Sensor DS18B20
- Sensor de temperatura y humedad relativa del ambiente: DHT11
- Sensor Encoder para el agitador: 20 pulsos por revolución
- Indicador de Voltaje Corriente: Voltímetro Amperímetro Digital DC de 0-100 V y 10A.
- Detector de Gases y alcohol a la salida del condensador: MQ-3

### ***7.3.1 Sensores de Temperatura, Humedad y Alcohol.***

Los sensores de medición de temperatura, humedad y alcohol se encuentran ubicados estratégicamente en el banco de pruebas, inicialmente, se tiene un sensor que toma la temperatura de la reacción; este se ubica en una base de un material cerámico poroso (para evitar el recalentamiento) fijado con una pieza de teflón cuadrado para aislar la sonda de la radiación y evitar que entre en contacto con la base cerámica como se evidencia en la Figura 18. También se tiene un sensor de temperatura para el agua del condensador, esta se encuentra sumergida en contacto con el agua como se presenta en la Figura 19. por último, se cuenta con un sensor de temperatura y humedad que registra las condiciones ambientales de cada experimento y un sensor de alcohol ubicado en la boquilla de salida del condensador (ver Figura 20).



**Figura 18.** *Base del sensor de temperatura para el reactor: Diseño en SolidWorks e implementación.*



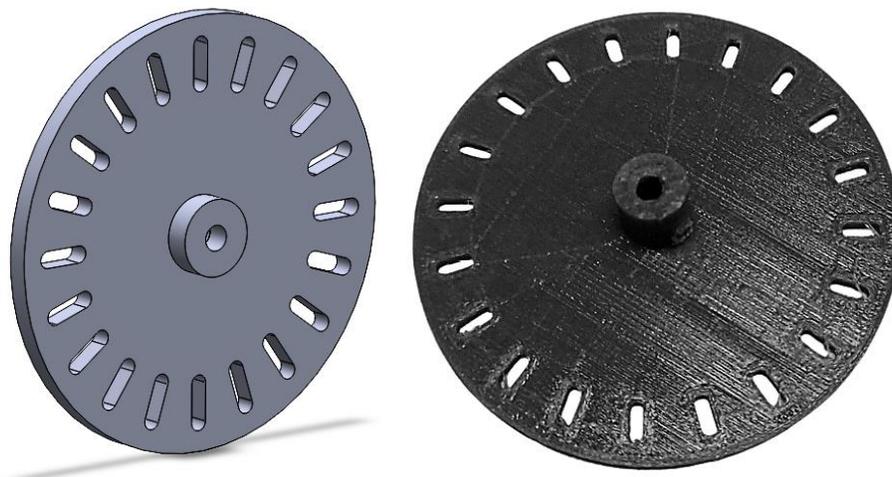
**Figura 19.** *Sensor de temperatura para el agua del condensador.*



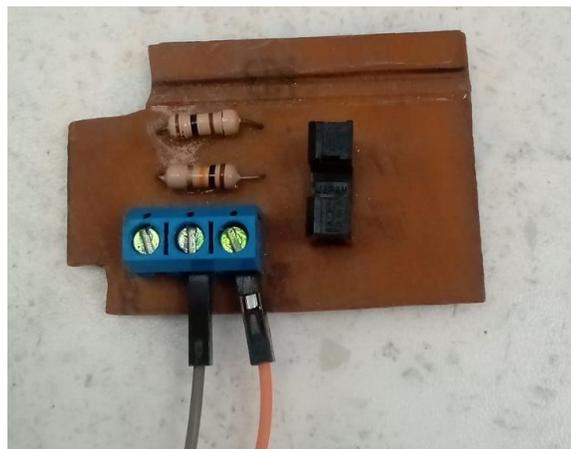
**Figura 20.** *Sensor de gases y alcohol.*

### 7.3.2 Sensores del agitador mecánico

En el agitador mecánico se tiene un sensor encoder para medir la velocidad de giro, diseñado desde cero. Lo compone un circuito de detección y una rueda de 20 ranuras acondicionado al motor. El circuito se diseñó en Proteus y la rueda en SolidWorks (se imprimió en una impresora 3D).

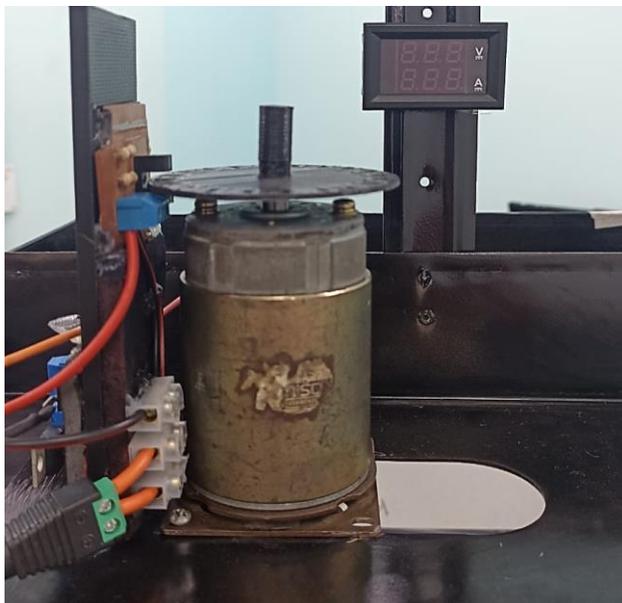


**Figura 21.** Rueda del encoder: Diseño en SolidWorks e impresión en 3D.



**Figura 22.** Circuito de detección del encoder.

Conjuntamente, se acoplo un Indicador de voltaje corriente para visualizar el consumo del motor que compone al agitador. En la Figura 23 se puede apreciar el montaje de los sensores.



**Figura 23.** Montaje de los sensores para medición de velocidad y consumo del agitador.

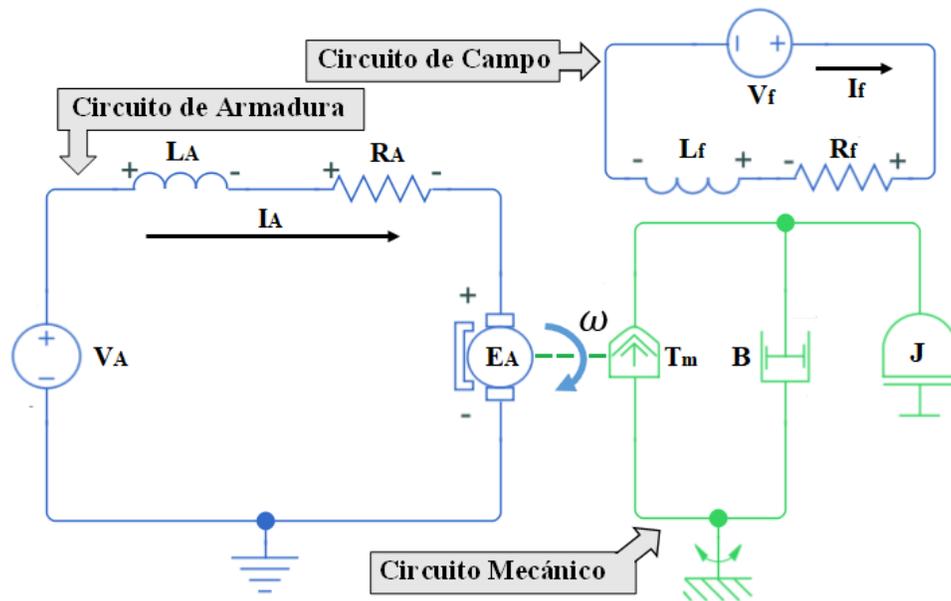
#### **7.4 Diseño e implementación del sistema de control para el agitador mecánico**

Una problemática presente en la reacción de transesterificación de biodiesel es la baja miscibilidad entre los reactivos (aceite y alcohol) aun con la presencia del catalizador; este fenómeno provoca que la reacción ocurra únicamente en las fronteras de los reactivos, (Soltani et al., 2015), el rendimiento de la reacción disminuya, y se necesiten tiempos prolongados para la producción (Rokni et al., 2022). En consecuencia, es necesaria una agitación intensa que permita un mayor contacto entre las diferentes fases inmiscibles (Khedri et al., 2019a).

En el presente proyecto se planteó usar un agitador mecánico, conformado por un motor de corriente continua (Ramírez Betancour et al., 2018). En este contexto, se hace importante que el dispositivo de agitación trabaje bajo condiciones de velocidad y régimen de flujo específicas, con el fin de garantizar una mezcla homogénea entre las fases de los reactivos facilitando la reacción de transesterificación (Marwaha et al., 2019; Wulandani & Ibrahim, 2022).

### 7.4.1 Modelo matemático motor DC

La velocidad de un motor de corriente continua puede ser controlada por el circuito de campo o por el circuito de armadura (Sami et al., 2021). El caso más frecuente es el control por voltaje de armadura, para ello el modelado matemático se establece a partir del circuito de armadura del motor DC (Anatolii et al., 2017; Canal et al., 2017).



**Figura 24.** Representación del motor de corriente continua.

Análisis de las caídas de tensión en el circuito de armadura

$$V_A(t) = R_A i_A(t) + L_A \frac{di_A(t)}{dt} + e_A(t) \quad (2)$$

Análisis de la componente mecánica del motor

$$T_m(t) = B\omega(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (3)$$

Ecuación de relación para la fuerza contra electromotriz

$$e_A(t) = K_A \omega(t) \quad (4)$$

Ecuación de relación para el torque mecánico

$$T_m(t) = K_m i_A(t) \quad (5)$$

### Llevando las ecuaciones al dominio de Laplace

Para (2).

$$\begin{aligned} V_A(t) &= R_A i_A(t) + L_A \frac{di_A(t)}{dt} + e_A(t) \\ &\quad \downarrow \mathcal{L} \\ V_A(s) &= R_A I_A(s) + sL_A I_A(s) + E_A(s) \end{aligned} \quad (6)$$

Despejando  $I_A(s)$  de (6),

$$I_A(s) = \frac{V_A(s) - E_A(s)}{R_A + sL_A} \quad (7)$$

Para (3).

$$\begin{aligned} T_m(t) &= B\omega(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \\ &\quad \downarrow \mathcal{L} \\ T_m(s) &= B\omega(s) + sJ\omega(s) \end{aligned} \quad (8)$$

Para (4).

$$e_A(t) = K_A \omega(t) \xrightarrow{\mathcal{L}} E_A(s) = K_A \omega(s) \quad (9)$$

Para (5).

$$T_m(t) = K_m i_A(t) \xrightarrow{\mathcal{L}} T_m(s) = K_m I_A(s) \quad (10)$$

**Solución para el sistema de ecuaciones.**

Igualando (8) y (10),

$$B\omega(s) + sJ\omega(s) = K_m I_A(s) \quad (11)$$

Reemplazando  $I_A(s)$  de (7) en (11), obtenemos:

$$B\omega(s) + sJ\omega(s) = K_m * \left( \frac{V_A(s) - E_A(s)}{R_A + sL_A} \right) \quad (12)$$

Reemplazando  $E_A(s)$  de (9) en (12), obtenemos:

$$B\omega(s) + sJ\omega(s) = K_m * \left( \frac{V_A(s) - K_A\omega(s)}{R_A + sL_A} \right) \quad (13)$$

Reorganizando los términos obtenemos:

- **Función de transferencia para la velocidad angular**

$$\frac{\omega(s)}{V_A(s)} = \frac{K_m}{s^2 J L_A + s(B L_A + J R_A) + B R_A + K_m K_A} \quad (14)$$

#### **7.4.2 Cálculo experimental de los parámetros del modelo**

A pesar de que el motor tiene una velocidad nominal de 3600 RPM a 24V, el cálculo de los parámetros experimentales se realizó sobre una velocidad de trabajo de aproximadamente

518 RPM, esto debido a que diversos estudios han logrado producción con velocidades recomendadas entre 400 RPM y 600 RPM para el agitador (Dhingra et al., 2016; Khedri et al., 2019b; S. N. Nayak et al., 2019).

Las pruebas para la medición de los parámetros del motor se realizaron siguiendo las metodologías comúnmente empleadas en la literatura (Hernández Paredes et al., 2019)

**Resistencia de Armadura:** El valor de la resistencia de armadura se calculó a partir de los valores de voltaje y corriente consumidos por el devanado de armadura antes de que el motor empezara a girar.

$$R_A = \frac{V_A}{I_A} = \frac{2.5V}{0.147A} = 17\Omega \quad (15)$$

**Constante contraelectromotriz  $K_A$  y Constante Mecánica  $K_m$ :** Para el cálculo de estas constantes se asumen condiciones en estado estable para el motor, provocando que sus respectivas derivadas desaparezcan y el inductor se comporte como un corto circuito.

La expresión resultante bajo esta condición de estado estable se presenta en (16), con una corriente de armadura de 0.140A.

$$K_A = \frac{E_A}{\omega} = \frac{V_A - R_A I_A}{\omega} \quad (16)$$

De la expresión (16), se calcula el valor de la constante contraelectromotriz y la constante mecánica,

$$K_A = 0.050695954 \frac{V}{rad/s}$$

$$K_m = 0.050695954 \frac{Nm}{A}$$

Se calcula el valor de  $L_A$  de forma indirecta a partir de la constante de tiempo  $\tau$  ( $L_A = R_A \tau_{electr}$ ) de la corriente consumida para los 518 RPM.

$$L_A = 102 \text{ mH}$$

**Inercia Mecánica J:** Para el cálculo de la inercia mecánica se emplea la expresión (17)

$$J = \frac{t_{mec} \cdot K_A \cdot Km}{R_A} \quad (17)$$

La constante de tiempo mecánica corresponde al  $\tau$  de la señal de voltaje, el cual se calcula a partir del tiempo que tarda en alcanzar el 63.2% del valor en estado estable, con ayuda de un osciloscopio.

$$J = 6.349602 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

**Constante de fricción de Coulomb B:** se emplea la expresión (18) a partir del cálculo del torque mecánico.

$$B = \frac{T_m}{\omega} \quad (18)$$

$$T_m = K_m I_A = 7.0974335 \times 10^{-3} \text{ Nm} \quad (19)$$

Se desprecia el torque de fricción

$$B = 0.00013084 \text{ Nms/rad}$$

En la Tabla 25 se presenta el resumen de los parámetros hallados para el motor de corriente continua del agitador.

### Tabla 25

*Parámetros empleados para la simulación y comprobación del modelo matemático para el motor del agitador.*

Parámetro	Valor	Unidades
$\omega$	54.245 ó 518	rad/s ó RPM
$V_A$	5.13	V
$I_A$	0.140	A
$K_A$	0.050695954	V/rad/s
$K_m$	0.050695954	Nm/A
$L_A$	102	mH
$R_A$	17	$\Omega$
J	<b><math>6.349602 \times 10^{-5}</math></b>	kgm <sup>2</sup>
B	0.00013084	Nms/rad
$T_m$	<b><math>7.0974335 \times 10^{-3}</math></b>	Nm

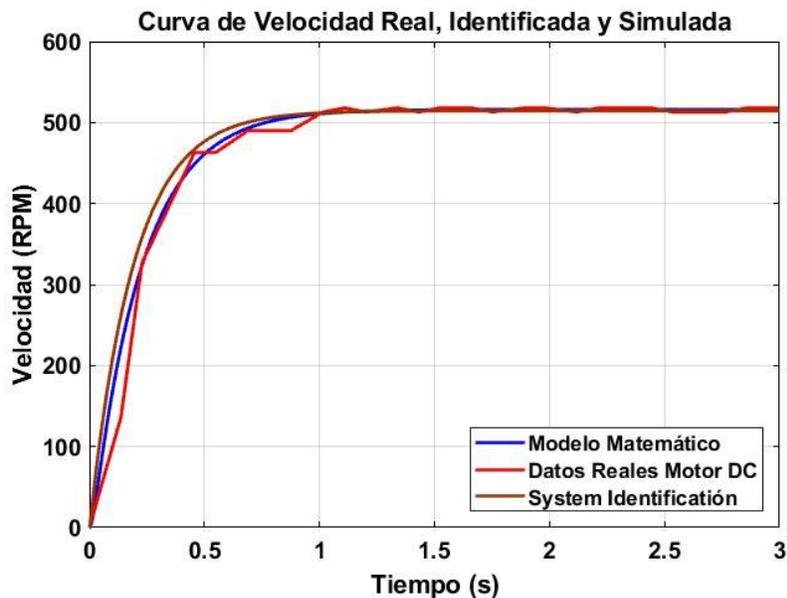
#### 7.4.3 Validación del modelo matemático

En la expresión (20) se establece la representación del modelo matemático en el espacio de estados. La salida de la velocidad angular se multiplica por un factor de 9.5493 para convertir a unidades de RPM.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{I}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -248.89 & 96435.27 \\ -204.83 \times 10^{-6} & -4.44 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega \\ I_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.12345 \end{bmatrix} \cdot V_a \quad (20)$$

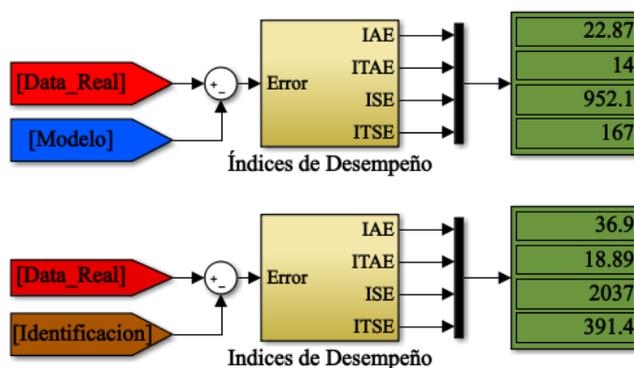
$$y = [9.5493 \quad 0] \cdot \omega$$

Para comprobar que el modelo matemático desarrollado y los parámetros hallados del motor describen correctamente la dinámica de velocidad, se grafica (ver Figura 25) la curva del modelo matemático, la curva de los datos reales del motor y la curva identificada a través de la herramienta system identification de Matlab con 93% de ajuste.



**Figura 25.** Comparación de la curva del modelo matemático con la curva de datos reales y la curva identificada en Matlab.

Para evaluar de manera objetiva que curva describe mejor la dinámica real del motor DC, se calcularon los índices de desempeño para cada una de ellas (ver Figura 26). De acuerdo a los resultados el modelo matemático con los parámetros hallados describe mejor el comportamiento real del motor DC en comparación con la curva identificada a través de la herramienta de Matlab.



**Figura 26.** Índices de desempeño de las curvas de velocidad.

#### 7.4.4 Sintonización del Controlador

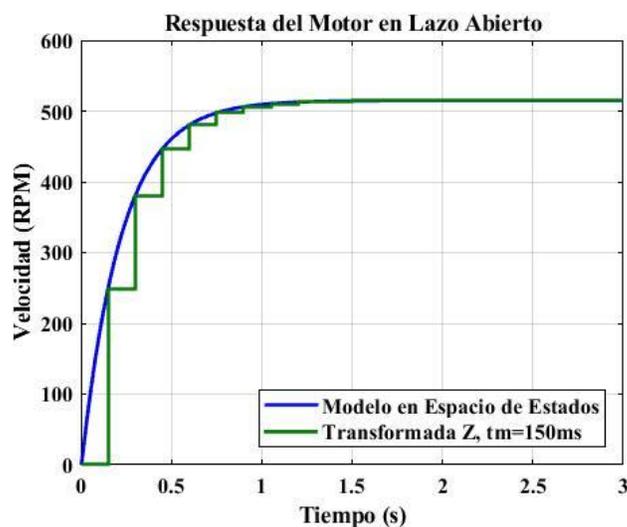
Durante mucho tiempo, las estrategias de control clásico como el PI o PID (Proporcional-Integral-Derivativo) han destacado por sus innumerables ventajas en el control de sistemas térmicos, de nivel, flujo, velocidad, etc. Entre estas ventajas, se destaca su sencillez de ajuste, su excepcional capacidad para mantener la referencia deseada y su versatilidad en cuanto a su implementación en dispositivos programables.

En este trabajo se utilizaron los métodos de sintonización de Ziegler-Nichols, la Integral Absoluta del Error (IAE), y la sintonización por software a través del PID tuner de Matlab.

##### 7.4.4.1 Función de transferencia en el dominio discreto (Z)

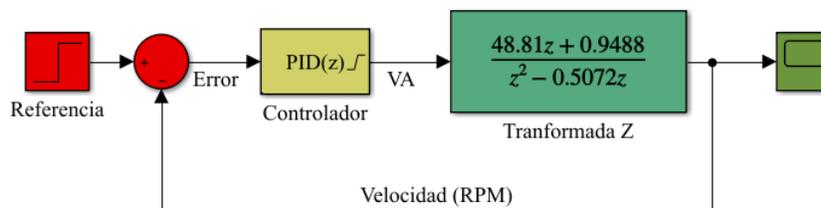
Como el controlador a implementar es de tipo digital, se realiza la transformación de la función de transferencia del modelo del dominio  $s$  al dominio  $z$ , para ello se implementa un retenedor de orden cero. En (21) se presenta la transformada  $z$  del modelo matemático con su correspondiente retenedor y un tiempo de muestreo  $t_m = 150ms$ .

$$G_h G(z) = \frac{48.81z + 0.9488}{z^2 - 0.5072z} \quad (21)$$



**Figura 27.** Comparación de la respuesta en lazo abierto del motor en Laplace y en el dominio Z.

#### 7.4.4.2 Sintonización a través del PID tuner de Matlab



**Figura 28.** Lazo cerrado para la sintonización con el bloque PID tuner de Matlab.

Se utilizó el bloque PID tuner de Matlab para sintonizar las constantes de los controladores P, PI y PID, para esto fue necesario ubicar la transformada Z del modelo en un lazo cerrado de control como se evidencia en la Figura 28. Las constantes sintonizadas se presentan en la Tabla 26.

**Tabla 26**

Constantes sintonizadas a través del PID tuner de Matlab.

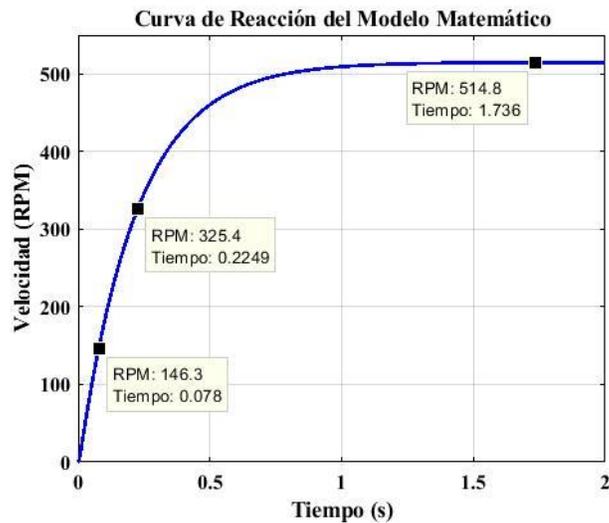
Controlador	Constates Sintonizadas
P	$K_p = 0.0115626$
PI	$K_p = 0.0060491$
	$K_i = 0.0251982$
PID	$K_p = 0.0024486$
	$K_i = 0.01632426$
	$K_d = 9.182399 \times 10^{-5}$

#### 7.4.4.3 Sintonización por el método de Ziegler y Nichols

En este método de sintonización la respuesta de la planta en lazo abierto debe estar representada a través de una función de transferencia de primer orden con retardo.

Inicialmente se obtiene los parámetros de la función de transferencia (22) a partir de la curva de reacción generada a través de Matlab del modelo matemático (ver Figura 29); estos parámetros son la ganancia estática de la planta ( $K$ ), el retardo de la planta ( $\theta$ ) y la constante de tiempo ( $\tau$ ).

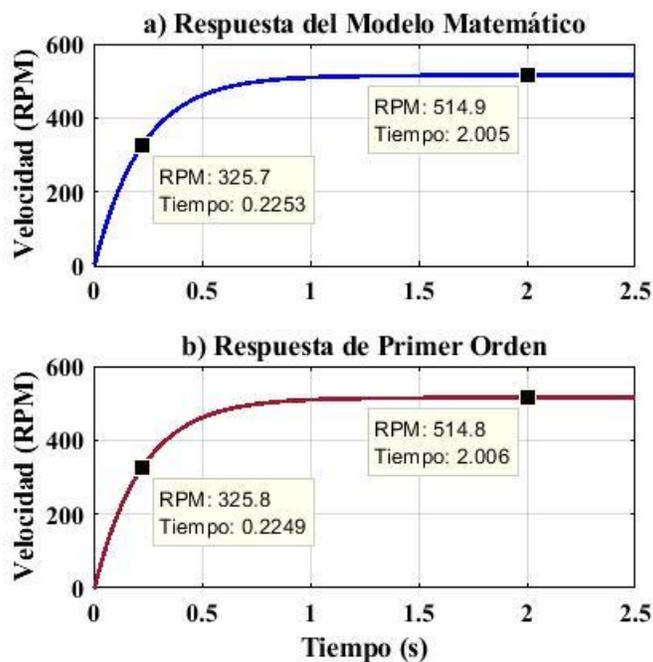
$$G_p(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (22)$$



**Figura 29.** Parámetros de la respuesta del modelo matemático para el sistema de primer orden.

Función de transferencia de primer orden de la respuesta del modelo matemático.

$$G_p(s) = \frac{100.941 e^{-0.0045s}}{0.2205s + 1} \quad (23)$$



**Figura 30.** Comparación entre la respuesta del modelo matemático y la función de transferencia de primer orden.

Para calcular las constantes de los controladores P, PI y PID, se emplean las fórmulas presentadas en el libro de García Jaimes, (2010), realizando la siguiente modificación al retardo de la planta.

$$\theta' = \theta + \frac{t_m}{2} = 0.0795 \quad (24)$$

Las constantes sintonizadas se presentan en la Tabla 27.

**Tabla 27**

Constantes sintonizadas a través de Ziegler-Nichols.

Controlador	Constates Sintonizadas
P	$K_p = 0.0274720$
PI	$K_p = 0.0247247$
	$K_i = 0.0933007$

---

	$K_p = 0.0329664$
PID	$K_i = 0.20733585$
	$K_d = 0.0013104144$

---

#### 7.4.4.4 Sintonización empleando la Integral Absoluta del Error (IAE)

La sintonización a través de la integral absoluta del error se realiza siguiendo el procedimiento descrito anteriormente para el método de Ziegler- Nichols, usando las fórmulas presentadas en el libro de García Jaimes, (2010).

**Tabla 28**

*Constantes sintonizadas a través del método de IAE.*

---

Controlador	Constates Sintonizadas
P	$K_p = 0.0244033825$
PI	$K_p = 0.0266490437$
	$K_i = 0.1511495752$
PID	$K_p = 0.0363697850$
	$K_i = 0.3109314938$
	$K_d = 0.0012118761$

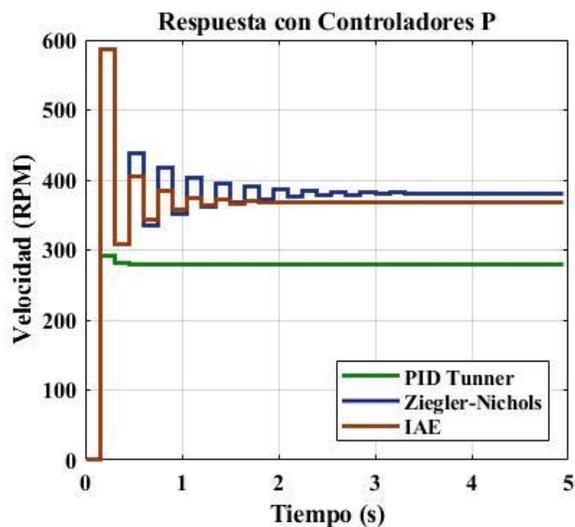
---

#### 7.4.5 Respuestas de los controladores Sintonizados

Para la selección del controlador se establecieron las siguientes condiciones de respuesta:

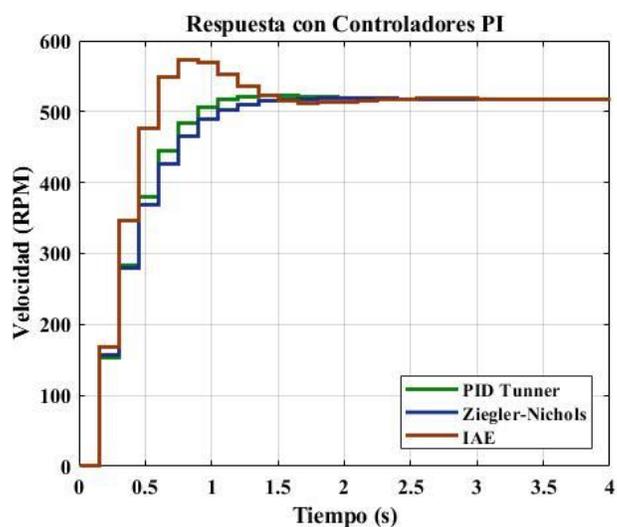
- Sobre impulso inferior al 5%
- Error en estado estable menor al 2%

- Rango de la acción de control menor al 70% de la capacidad del actuador (12V)  
(Ramírez Betancour et al., 2018).

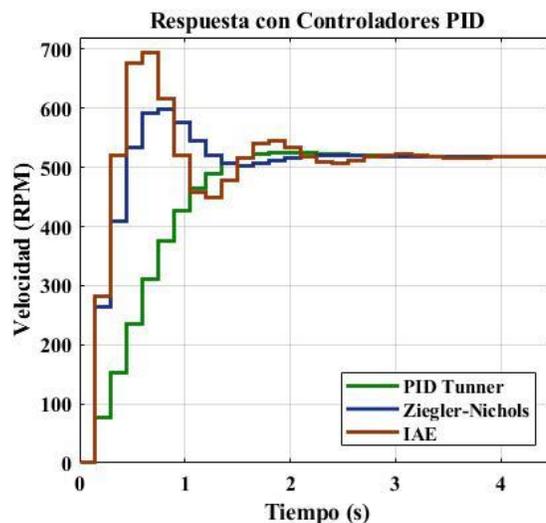


**Figura 31.** Respuesta del modelo con los controladores proporcionales P.

Los controladores proporcionales sintonizados presentaron un elevado error en estado estable como se puede ver en la Figura 31.



**Figura 32.** Respuesta del modelo con los controladores PI.



**Figura 33.** Respuesta del modelo con los controladores PID.

**Tabla 29**

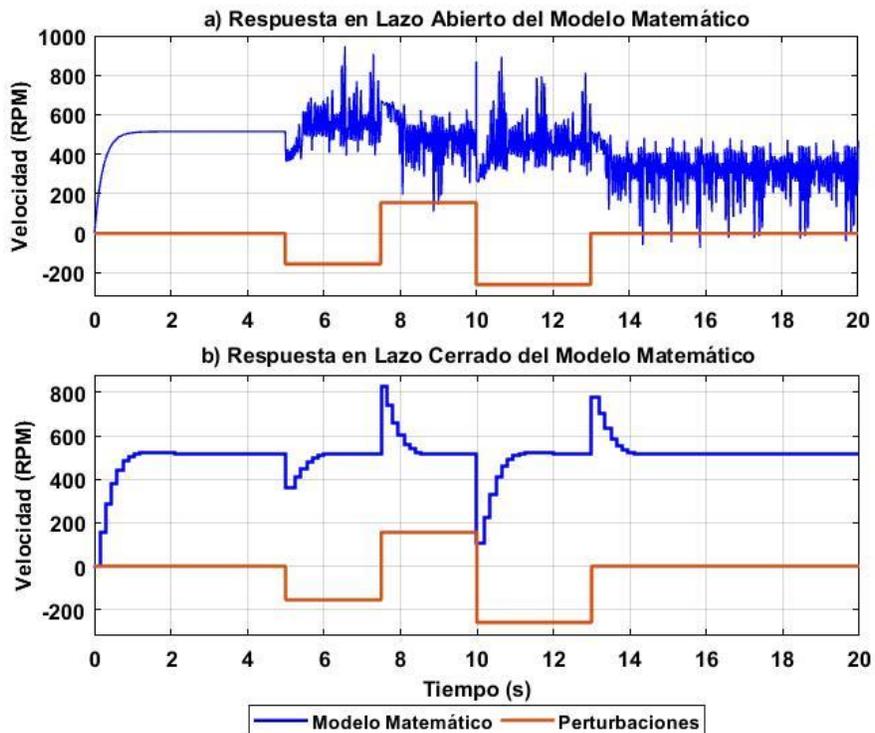
*Características de respuesta de los controladores PI y PID.*

	Método	Sobre impulso	$E_{es}$	$t_{es}$ (s)	Rangos de la acción de control (V)
<b>PI</b>	PID Tunner	0.505%	0%	1.056	5.233 – 3.133
	Ziegler-Nichols	0.505%	0%	1.2	5.142 – 3.202
	IAE	10.556%	0%	1.354	6.171 – 3.451
<b>PID</b>	PID Tunner	1.531%	0%	1.503	5.233 – 1.585
	Ziegler-Nichols	15.698%	0%	1.802	6.580 – 4.880
	IAE	34.459%	0%	2.557	8.3 – 3.906

De los controladores sintonizados, se seleccionó el controlador PI sintonizado a través del PID tunner de Matlab, debido a que presentó el mejor desempeño de acuerdo a las condiciones de diseño establecidas. De igual forma, es importante anotar que la sintonización a través del método de Ziegler-Nichols tuvo una gran aproximación al controlador seleccionado, con una breve diferencia en el tiempo de estabilización de 0.144 segundos.

#### 7.4.6 Robustez del controlador seleccionado

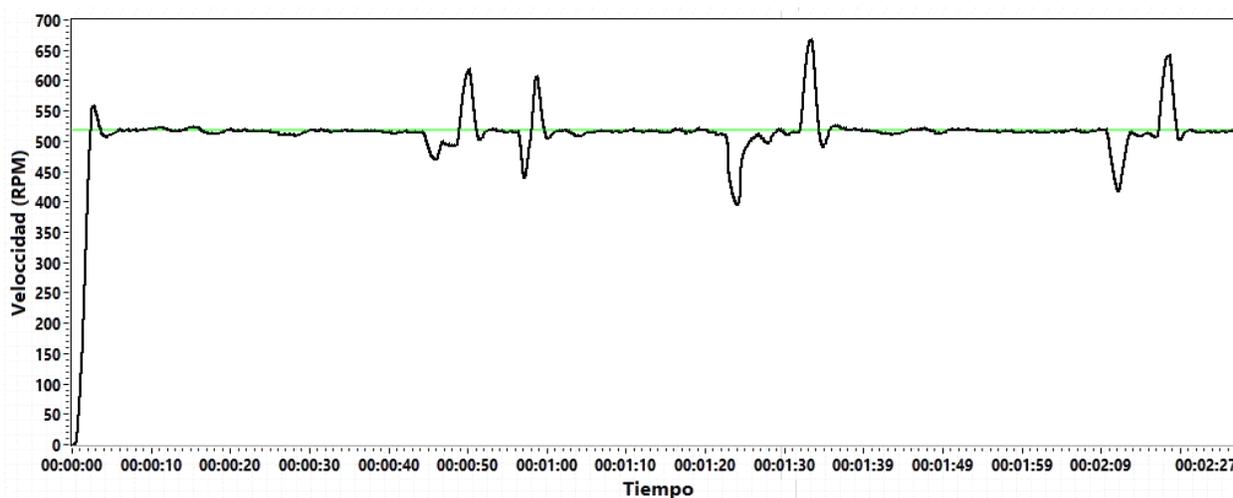
En la Figura 34, se aprecia la respuesta del modelo matemático en lazo cerrado y lazo abierto ante perturbaciones de velocidad del -30%, +60%, -80% y +30% en relación a la velocidad de referencia de 518 RPM. Es posible evidenciar que el controlador soporta perturbaciones elevadas que no ocasionen la saturación del actuador (12V), situación que no se presenta en la respuesta en lazo abierto, que ante perturbaciones sostenidas el sistema no tiene la capacidad de estabilizar su velocidad en un valor fijo.



**Figura 34.** Respuesta del modelo matemático ante perturbaciones en la velocidad. a) Respuesta en lazo abierto. b) Respuesta en lazo cerrado con el controlador PI seleccionado.

### 7.4.7 Respuesta física del sistema de control

El controlador PI se implementó en la tarjeta de desarrollo Arduino UNO, siguiendo la lógica de programación presentada en los Anexos. En la Figura 35 se puede apreciar la respuesta del agitador en físico ante perturbaciones de velocidad.



**Figura 35.** Dinámica del agitador con el controlador PI implementado ante perturbaciones de velocidad.

## 7.5 Programación de los sensores en la tarjeta de desarrollo Arduino UNO

Para la programación de los sensores en la tarjeta Arduino UNO, se utilizó el entorno de desarrollo integrado (IDE) propio de Arduino. Se descargaron las librerías correspondientes a cada uno de los sensores, se definieron las variables y funciones para la lectura e interpretación de los datos y se comunicaron por el puerto serial los datos a la interfaz HMI. Para esto, se crearon códigos individuales para cada dispositivo, los cuales posteriormente se integraron en un programa general que organiza todos los dispositivos y los hace funcionar de manera conjunta.

### 7.5.1 Programación del sensor termocupla tipo K

El código de programación en Arduino se puede evidenciar en la Figura 36. Inicialmente se instala la librería para trabajar con el módulo MAX6675 que permite la comunicación e interpretación de los datos de la comunicación SPI, posteriormente se declaran las variables, se inicializa la comunicación a 115200 baudios y se realiza la lectura de la temperatura cada 250ms, este tiempo es mayor al tiempo que le toma al módulo convertir la señal de la termocupla en una señal digital (170ms a 220ms).

```

temocuplaBase$
//Declaracion de la libreria para el modulo MAX6675
#include "max6675.h"

/* Se crea una variable tipo flotante para almacenar el dato
de la temperatura. */
float temperatura_c = 0;
float temperatura_f = 0;
float temperatura_k = 0;

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo MAX6675 en la tarjeta.
//estos pines seran los encargador de leer la señal de informacion del sensor
int ktcSO = 5;
int ktcCS = 6;
int ktcCLK = 7;
MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);

//***** Variables Para el filtro promedio del encoder
float RPM_mean = 0.0, media = 0.0;
float vector[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
int tprom = 10, i = 0, j = 0;

//Variables del filtro pasa bajo o media movil exponencial
double temperatura_filtro = temperatura_c;
double Alpha = 0.1;

void setup() {
  Serial.begin(115200); //inicializacion de la comunicacion serial.
}

void loop() {
  // PARA GRADOS CELSIUS (°C)
  temperatura_c = ktc.readCelsius(); /*leer el valor de temperatura en grados celsius
  temperatura_filtro = Alpha * temperatura_c + (1.0 - Alpha) * temperatura_filtro; //
  Serial.print(temperatura_c);
  Serial.print(",");
  Serial.println(temperatura_filtro);
  delay(250); //Pausa de 500ms para repetir el proceso de lectura
}

```

**Figura 36.** Código en Arduino para la termocupla tipo K.

### 7.5.2 Programación del sensor de temperatura DS18B20

El código de programación para el sensor DS18B20 se puede apreciar en la Figura 37.

Inicialmente se instala la librería para trabajar con protocolo de comunicación OneWire, es decir envío de datos por un solo un cable. Posteriormente se declaran las variables, se inicializa la comunicación a 115200 baudios y se realiza la lectura de la temperatura cada 150ms,

```

DS18B20 §
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

const int Datos = 3;
OneWire oneWireObjeto (Datos);
DallasTemperature sensorDS18B20 (&oneWireObjeto);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  sensorDS18B20.begin();
}

void loop() {
  sensorDS18B20.requestTemperatures();
  Serial.print("Temp. Agua Condensador: ");
  Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(0));
  Serial.println(" C° ");
  delay(150);
}

```

**Figura 37.** Código en Arduino para el sensor de temperatura sumergible DS18B20.

### 7.5.3 Sensor de temperatura y humedad ambiental

El código de programación para el sensor DHT11 se puede apreciar en la Figura 38.

Inicialmente se instala la librería correspondiente al tipo de sensor DHT que se está trabajando, seguido de las variables del código; se inicializa la comunicación a 115200 baudios y se

establece un condicional para ejecutar la función de lectura de temperatura y humedad cada 500ms bajo una rutina temporizada, esto con el fin de realizar la lectura del sensor en el tiempo establecido por el fabricante, sin que el retardo afecte la ejecución de los demás sensores.

```

TemperaturaAmb-HR $
#include <DHT.h> // Incluir librería
#define DHTDATA 8 // Pin digital para la recepción de los datos del sensor
#define DHTTYPE DHT11 // se debe definir el tipo de sensor DHT
DHT dht(DHTDATA, DHTTYPE); // Se inicializa el sensor DHT11

// Delcaración de Variables
unsigned long tiempo;
unsigned long tiempo2 = 0;
float T=0;
float HR=0;
float F=0;
float hic=0;
float hif=0;

void setup() {
  Serial.begin(115200); // Inicialización de la comunicación serial
  dht.begin(); // Inicialización del sensor
}

void loop() {
  tiempo = millis();
  if (tiempo - tiempo2 >= 5000) {
    tiempo2 = tiempo;
    LecturaDHT11();
  }
  Serial.print("Temperatura: ");
  Serial.println(T);
  Serial.print("Humedad: ");
  Serial.print(HR);
}

void LecturaDHT11() {
  T = dht.readTemperature(); // Leemos la temperatura en grados celsius (por defecto)
  HR = dht.readHumidity(); // Leemos la humedad relativa
}

```

**Figura 38.** Código en Arduino para el sensor DHT11.

## 7.6 Diseño de la interfaz para el monitoreo de las variables del proceso.

La interfaz de monitoreo se desarrolló haciendo uso del software LabVIEW, con la finalidad de visualizar en tiempo real la dinámica de las variables más significativas durante el proceso de producción. Adicionalmente, esta interfaz permite guardar los datos de las variables en un archivo Excel para su posterior tratamiento, y también permite generar un reporte con los

datos de producción ingresados, las curvas de las variables sensadas y las observaciones o comentarios que se tienen al finalizar la reacción por parte del investigador.

### 7.6.1 Panel frontal de la interfaz de monitoreo

El panel frontal de la interfaz HMI del proceso de producción de biodiesel se puede observar en las Figuras 39, 40, 41, 42 y 43 la cual se diseñó para brindar información de las variables en tiempo real. En este programa se pueden observar datos del agitador, datos de temperatura en el horno, datos de temperaturas en el agua del condensador, datos de condiciones ambientales de temperatura y humedad, un indicador de escape de reactivos en el condensador, un apartado con los parámetros de las reacciones, los parámetros de configuración de la comunicación con Arduino, el guardado automático de los datos sensados en Excel, un generador de reportes de investigación con las curvas y datos de las reacciones, y por último la información de derechos de autor de la interfaz.

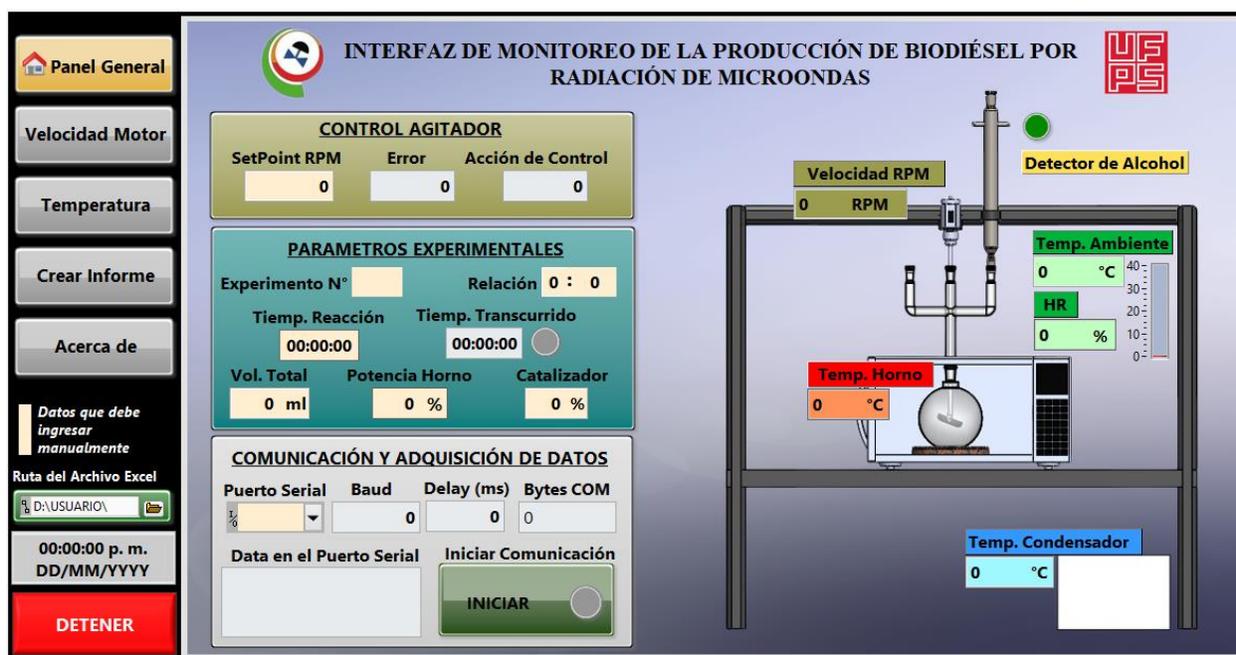
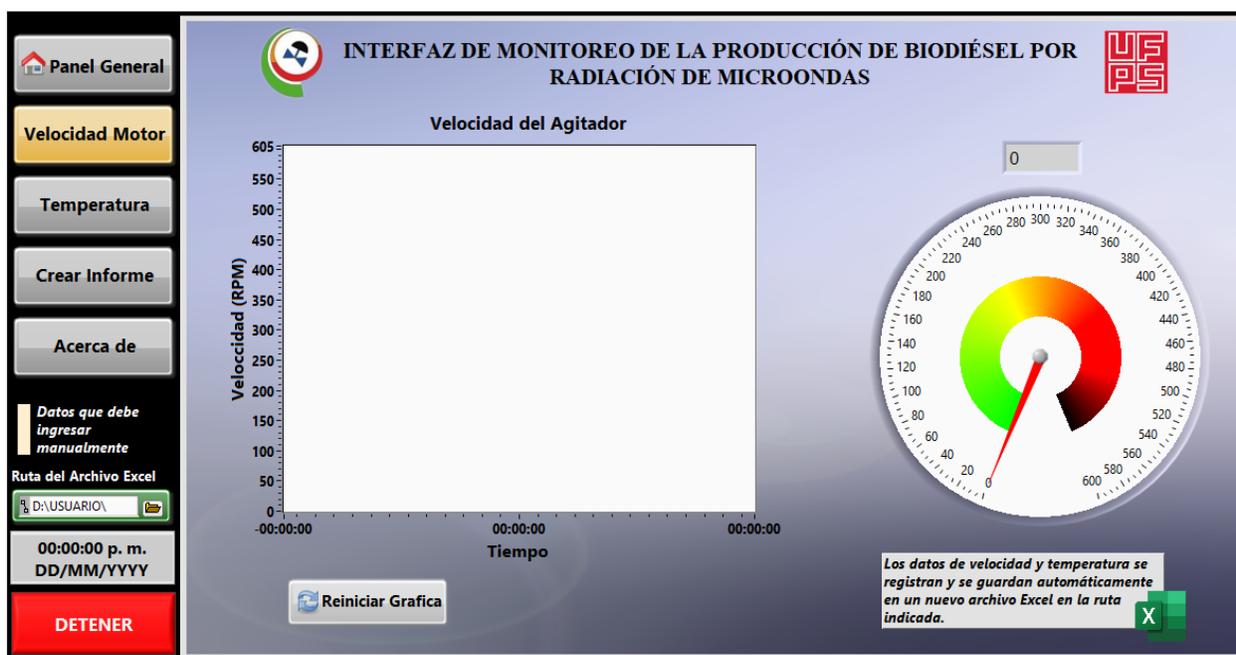


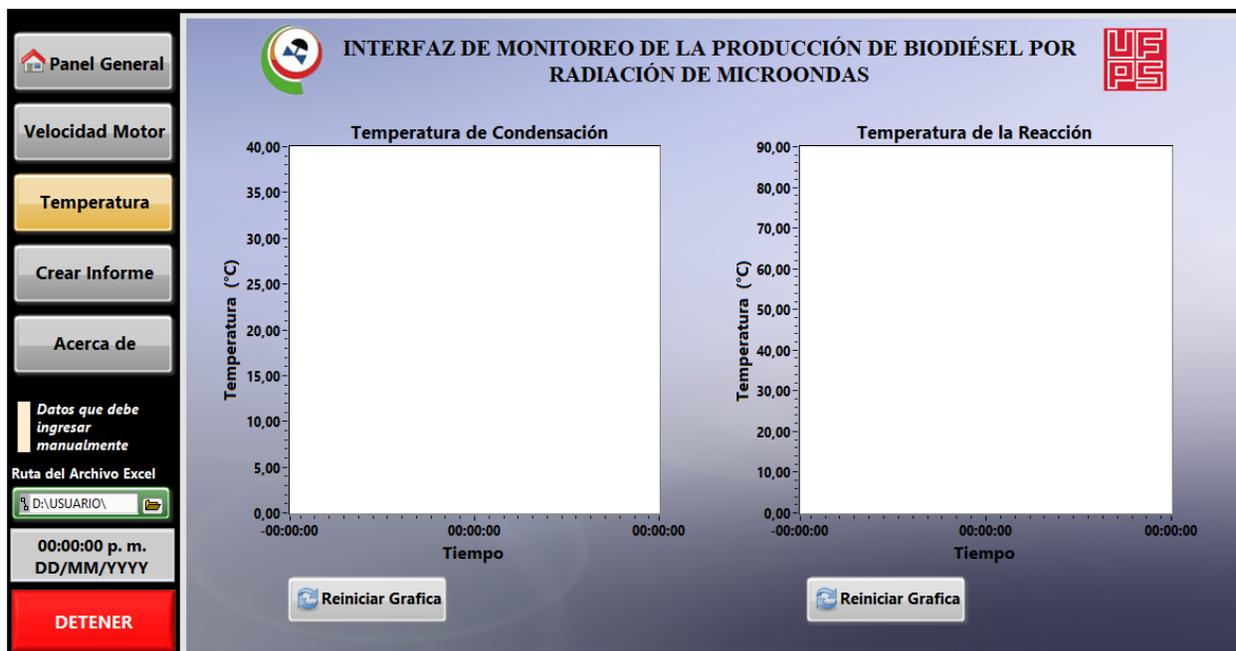
Figura 39. Panel General de la interfaz de monitoreo de la producción de biodiesel.

Al costado izquierdo de la Figura 39 se encuentran los botones para el cambio de vista de la interfaz HMI, seguido de un selector de ruta de archivo para guardar los datos en un Excel, un indicador de fecha y hora y por último un botón color rojo para detener todo el programa. El primer botón selector de vistas corresponde al panel general, al hacer clic sobre esta opción se despliega la ventana que se muestra en la Figura 39; esta ventana permite establecer la configuración de la comunicación con la tarjeta de adquisición, ingresar los parámetros de cada experimento, y visualizar las variables del control del agitador y el valor leído de cada sensor en el prototipo de producción.



**Figura 40.** Interfaz para la velocidad del agitador.

El segundo botón selector de vistas corresponde a la velocidad del agitador, al hacer clic sobre esta opción se despliega la ventana que se muestra en la Figura 40; esta ventana permite ver el comportamiento en tiempo real del agitador, graficando las variables de setpoint y velocidad en el motor expresada en RPM. Conjuntamente se tiene un botón para reiniciar la gráfica de velocidad.



**Figura 41.** *Interfaz para las temperaturas del proceso.*

El tercer botón selector de vistas corresponde a la temperatura en el condensador y la temperatura de la reacción, al hacer clic sobre esta opción se despliega la ventana que se muestra en la Figura 41; esta ventana permite ver el comportamiento en tiempo real de las temperaturas, graficando por separado el comportamiento de la temperatura que tiene el agua del condensador, y el comportamiento que tiene la temperatura de la reacción al interior del reactor. Conjuntamente se tiene un botón para reiniciar cada gráfica de temperatura.

**Figura 42.** Interfaz para la generación de informes de la producción en formato WORD.

El cuarto botón selector de vistas corresponde al generador de informes, al hacer clic sobre esta opción se despliega la ventana que se muestra en la Figura 42; esta ventana consiste de tres secciones:

La prima sección presenta los contenidos que tendrá el informe, estos contenidos son: el título ingresado del informe, las condiciones iniciales del experimento, la gráfica de temperatura de reacción, la gráfica de temperatura del agua del condensador, la gráfica de velocidad del agitador y por ultimo las observaciones que ingrese el investigador sobre el experimento.

La segunda sección permite ingresar por teclado el título del informe, y las observaciones o conclusiones que se tienen del experimento.

La tercera sección corresponde a las condiciones del experimento, algunas de ellas deben ser ingresadas por teclado.

Por último, se tiene un botón para generar el informe en un archivo Word.



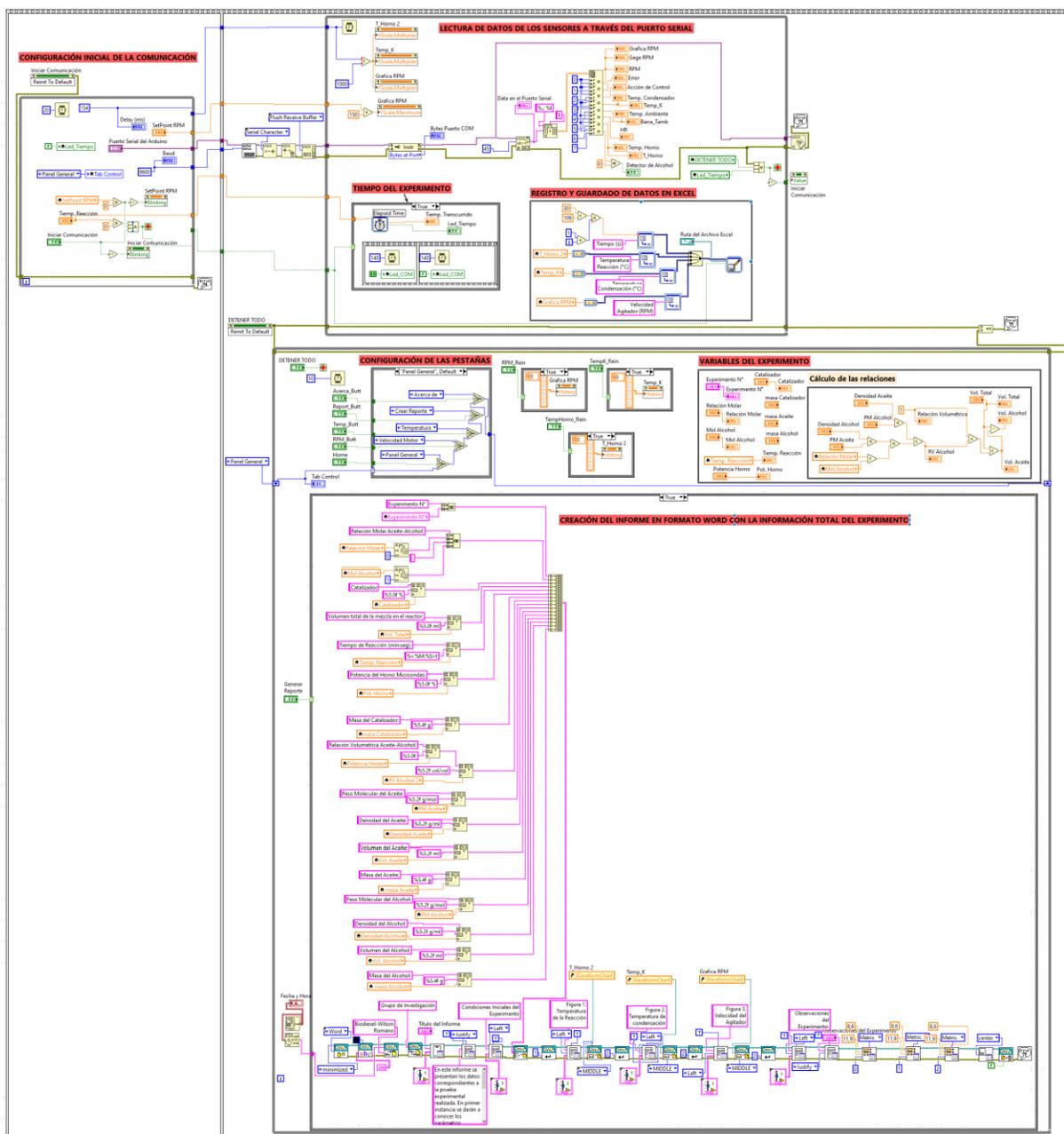
**Figura 43.** *Interfaz con los datos de derechos de autor.*

El cuarto botón selector de vistas corresponde a la información de derechos de autor, al hacer clic sobre esta opción se despliega la ventana que se muestra en la Figura 43.

### **7.6.2 Diagrama de bloques de la programación de la interfaz de monitoreo**

En la Figura 44, se muestra el diagrama de bloques general de la programación del panel frontal de la interfaz de monitoreo en LabVIEW.

A nivel general, la programación por bloques se organiza dentro de una estructura “Flat Sequence” de dos ventanas con el objetivo de configurar en la primera ventana los parámetros de la comunicación serial y en la segunda ventana la lectura, tratamiento y visualización de los datos; dando de esta forma un orden secuencial al funcionamiento de la interfaz de monitoreo.

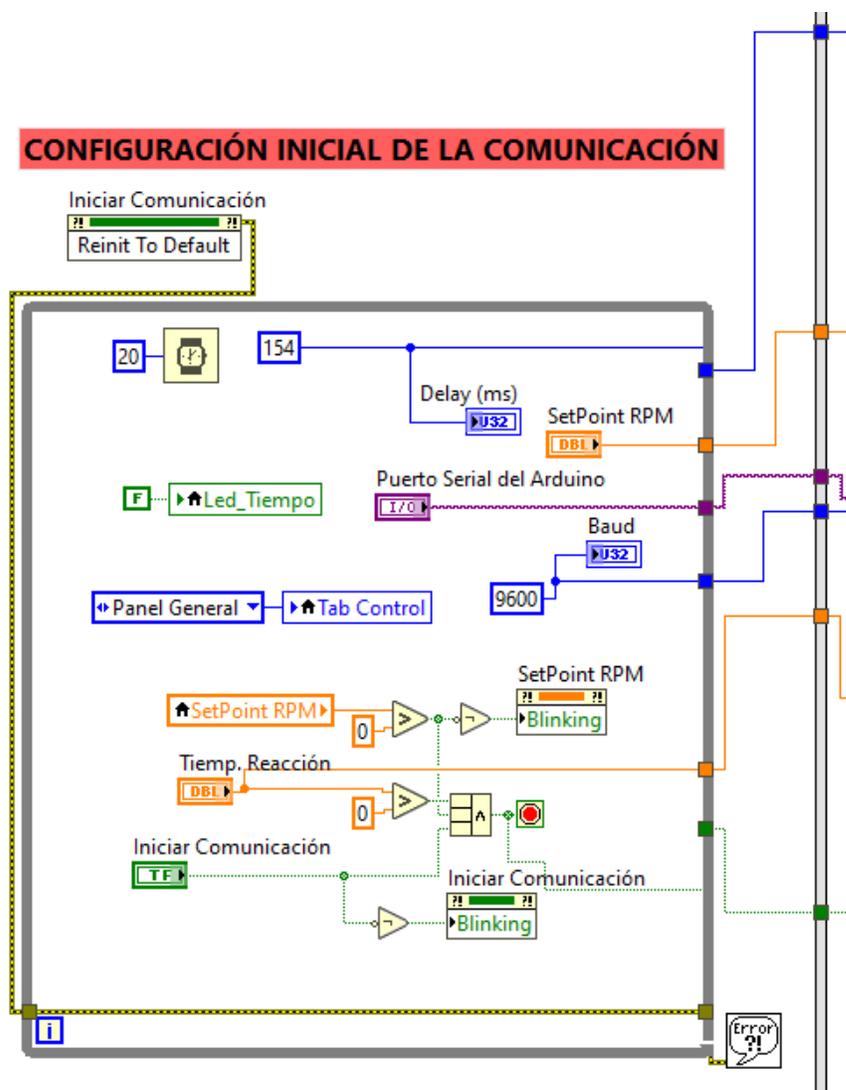


**Figura 44.** Diagrama general de la programación en LabVIEW.

### 7.6.2.1 Configuración de la comunicación con la tarjeta Arduino

En la Figura 45, se puede apreciar la programación por bloques de la comunicación serial con la tarjeta de adquisición; para esto se usa una estructura “While Loop” con un tiempo de repetición por iteración de 20ms. El objetivo de esta estructura es asegurar que los parámetros

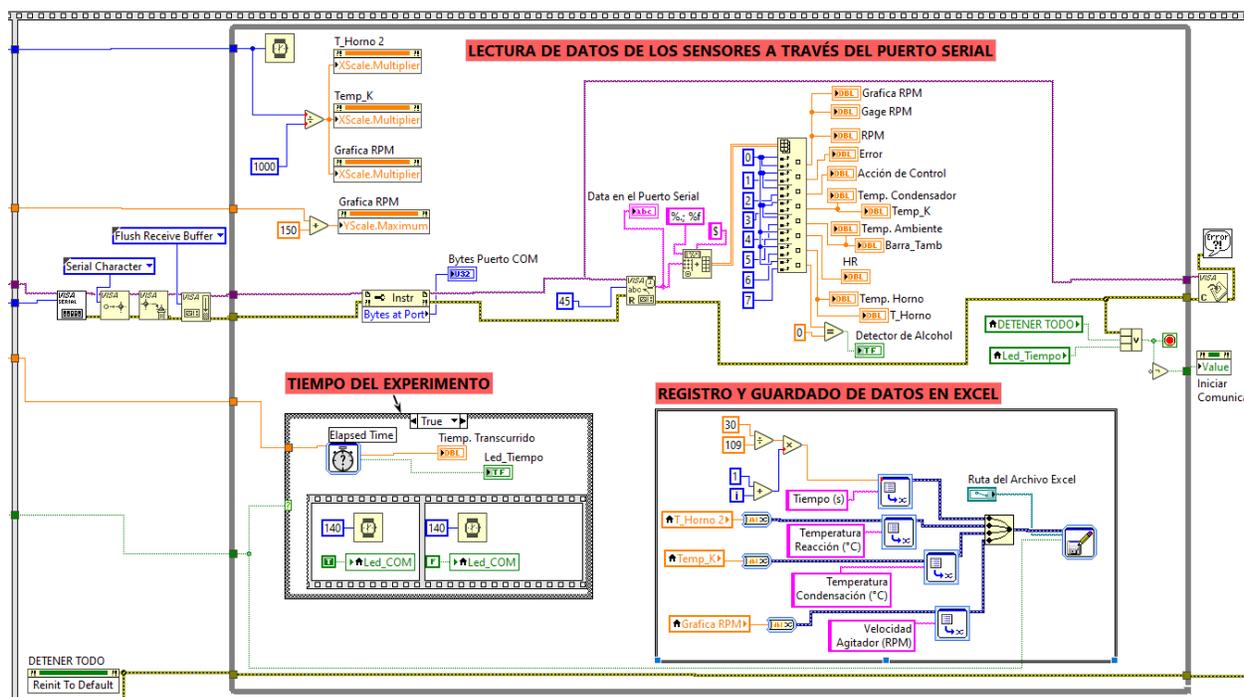
iniciales y más importantes para la adquisición de los datos sean ingresados y no se presenten problemas durante la lectura y tratamiento de los datos.



**Figura 45.** Diagrama de bloques de la configuración inicial de la interfaz de monitoreo.

Los parámetros de configuración que deben establecerse son: el puerto de comunicación (COM), la velocidad de transferencia de datos (baudios), la velocidad de referencia del agitador, el tiempo total de reacción. Estando estos parámetros establecidos, se da clic al botón "Iniciar" del "Panel General" para iniciar la adquisición de datos.

### 7.6.2.2 Lectura y visualización de los datos

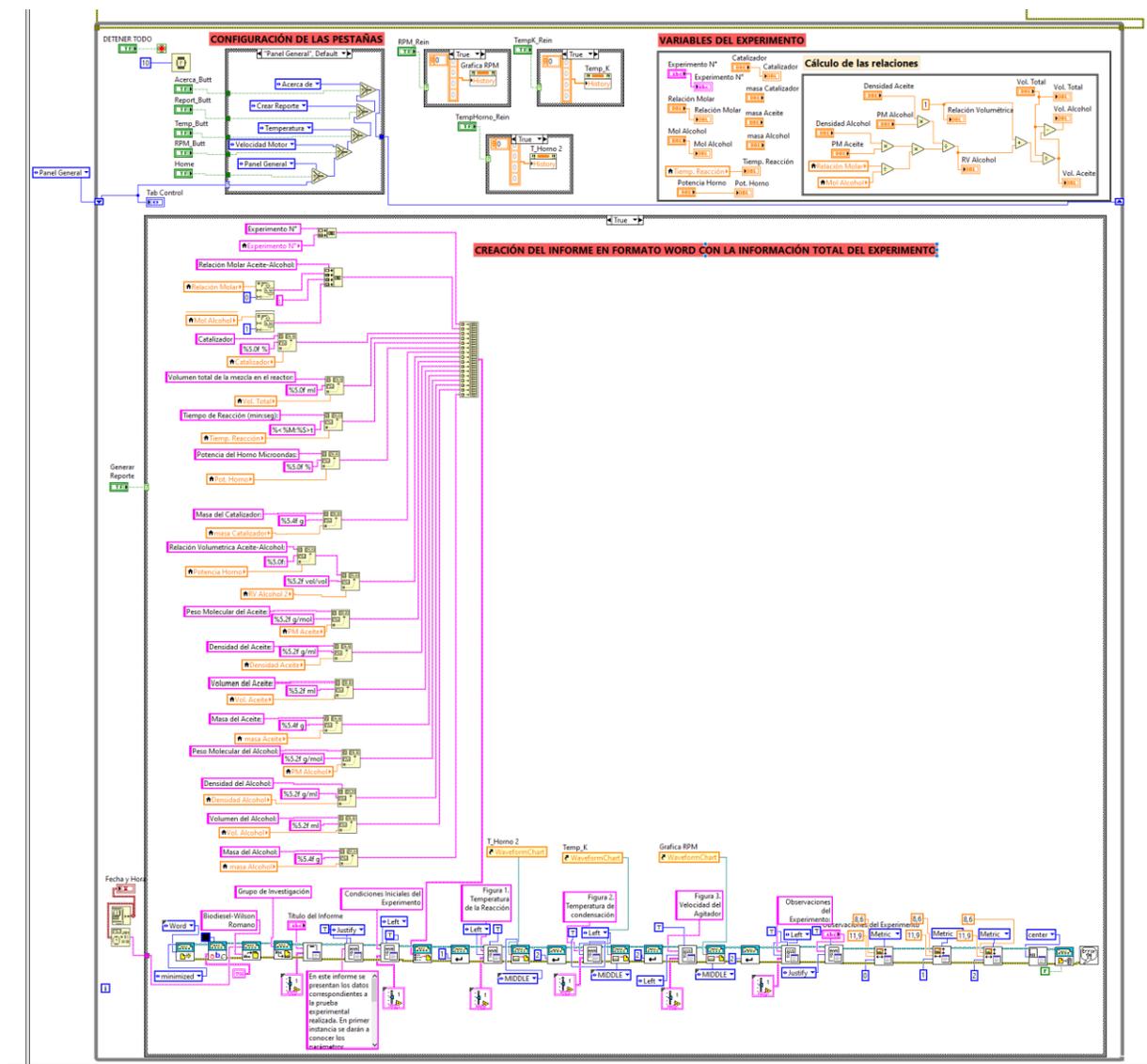


**Figura 46.** Diagrama de bloques para la lectura y visualización de los datos.

En la Figura 46 se presenta el diagrama de bloques de la estructura “While Loop” utilizada para llevar a cabo las tareas de lectura de datos a través del puerto serial, la representación de los datos en graficas e indicadores, el temporizado del experimento, y el registro y guardado de datos en Excel.

### 7.6.2.3 Botonera de pestañas, variables del experimento y generación de informes

En la Figura 47 se presenta la programación en bloques de la botonera para el cambio de pestañas de la interfaz, los bloques para la generación del informe en un documento Word y las variables del experimento que se incluirán en el informe.

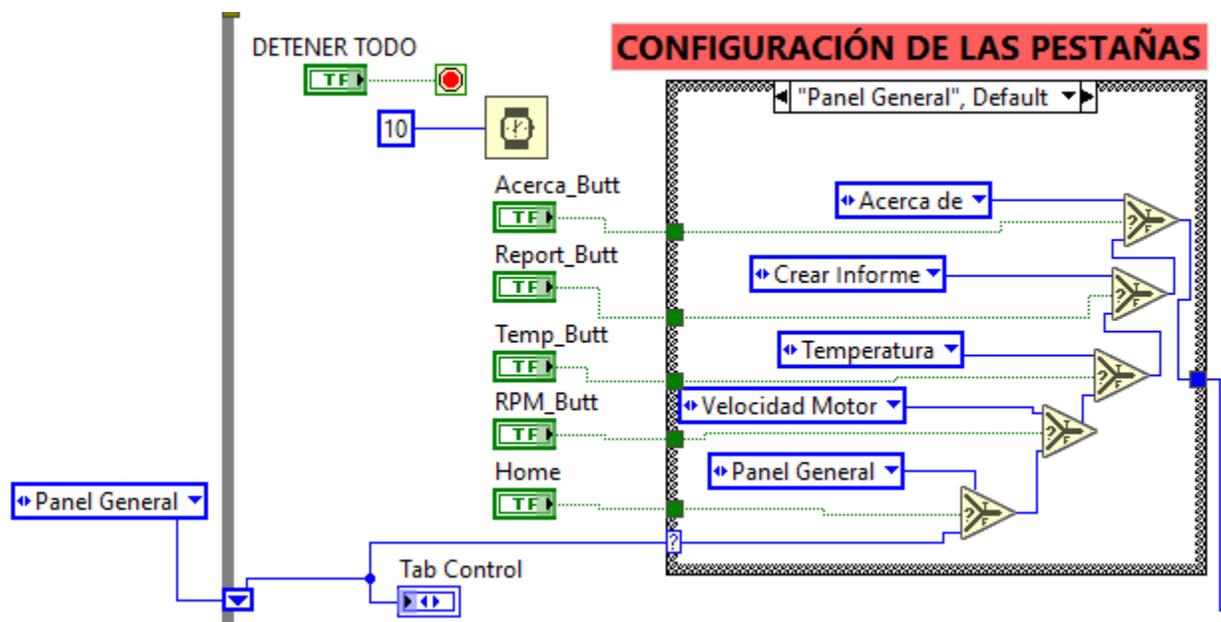


**Figura 47.** Diagrama de bloques para el cambio de pestañas y la generación de informes.

### 7.6.2.3.1 Botones para el cambio de pestañas

La programación de los botones encargados de realizar el cambio entre las pestañas de “Panel General”, “Velocidad Motor”, “Temperaturas”, “Crear Informe” y “Acerca de”, se realizó en una estructura de tipo “Case Structure” como se puede ver en la Figura 48. Por defecto la interfaz iniciará en la pestaña del “Panel General”, y una vez se haga clic sobre alguno de los botones, esta señal ingresará a la estructura Case en donde se compara por medio de los

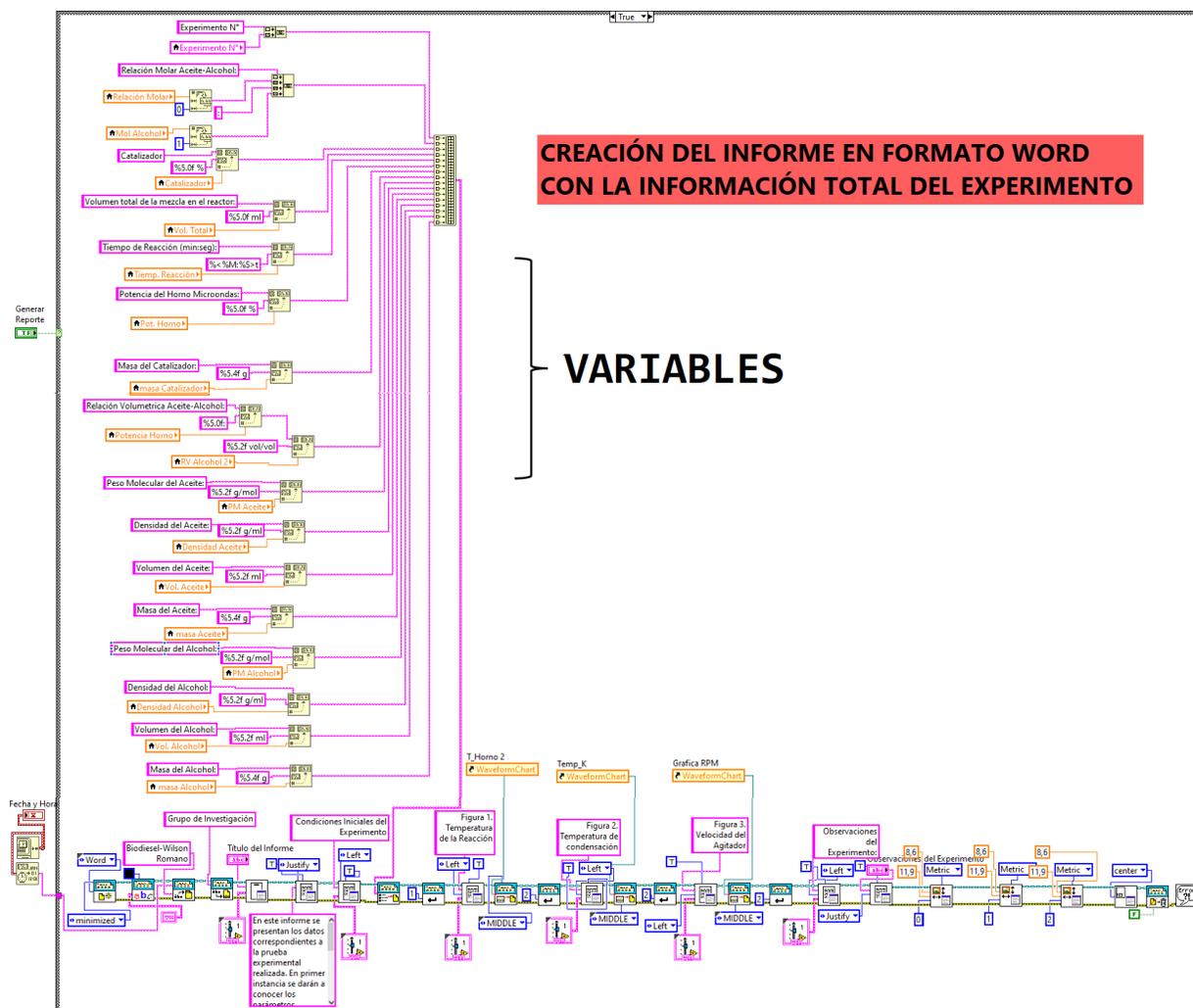
selectores en cascada con las demás pestañas, y posteriormente se dará la orden al “Tap Control” para cambiar a la pestaña correcta.



**Figura 48.** Diagrama de bloques para el cambio de pestañas en la interfaz.

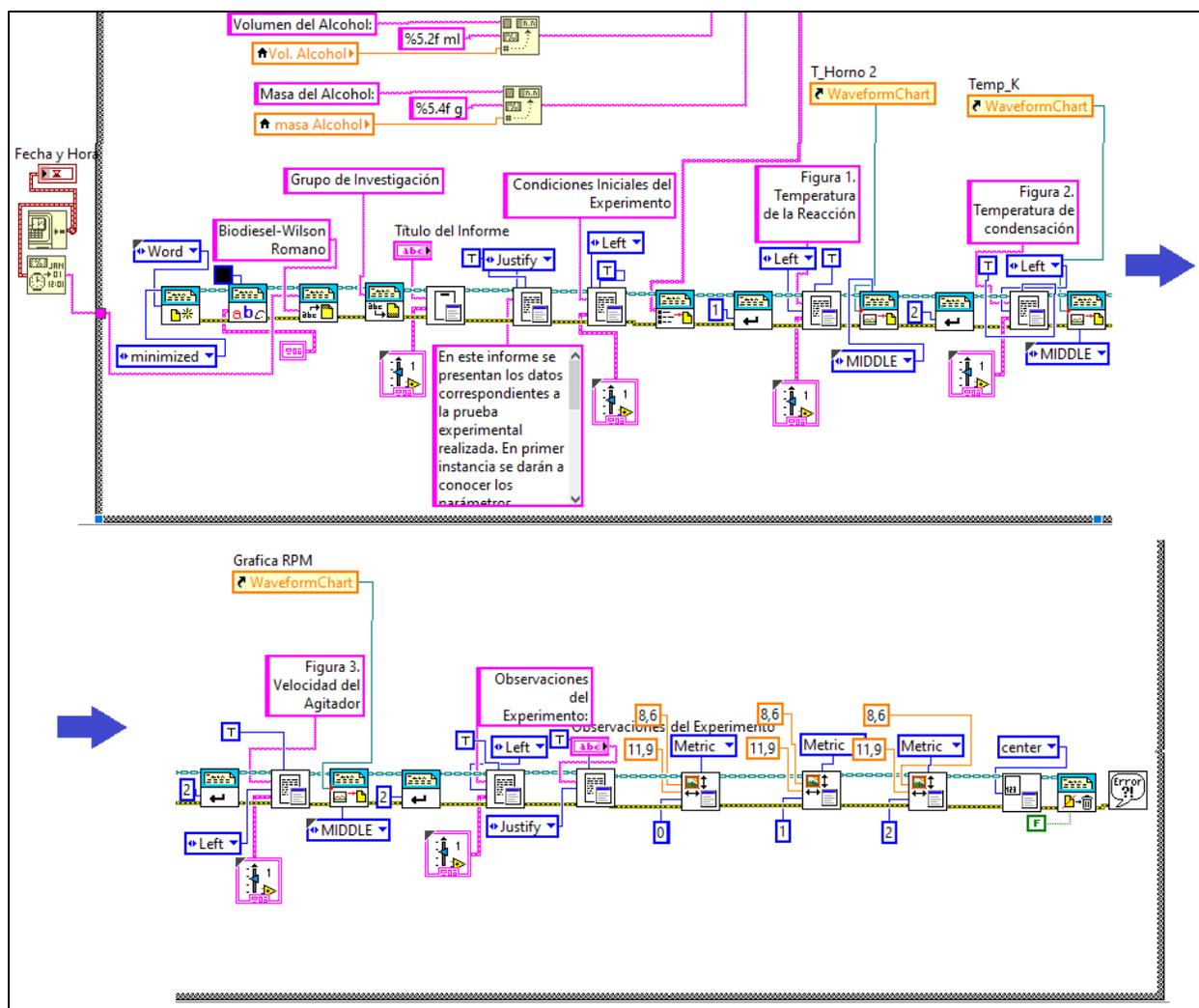
#### 7.6.2.3.2 Generación de Informes en Word

En la Figura 49 se puede apreciar la programación en bloques utilizado para la generación de informes en documentos Word con los datos registrados de cada experimento.



**Figura 49.** Diagrama de bloques para la generación de informes.

En la Figura 50 se puede apreciar de forma detallada los bloques empleados para generar los informes; estos bloques permiten agregar el tipo, color y tamaño de letra, el encabezado y pie de página al documento Word, el título del informe (de acuerdo al que ingrese el investigador), un párrafo de presentación del informe, las variables y condiciones de cada experimento, seguido por las gráficas de temperatura y velocidad, culminando con las observaciones del experimento (de acuerdo a las que ingrese el investigador).



**Figura 50.** Bloques de configuración para generar el informe.

## 8. Producción de biodiesel

### 8.1 Desarrollo experimental

Se trabajó para una cantidad total de solución de 300ml en el reactor. En las Tablas 30 y 31, se pueden apreciar las condiciones establecidas para cada una de las reacciones y en la Figura 51 se aprecian los resultados obtenidos de producción.

**Tabla 30**

*Condiciones del desarrollo experimental parte 1.*

Experimento	Relación	% KOH	Tiempo de reacción (min)	Potencia	RPM	Temperatura inicial del aceite	Temperatura Final
<b>0 (x1)</b>	1:4	0.5	7:00	100	500	43	71
<b>0 (x2)</b>	1:4	0.5	7:00	100	500	40	70.15
<b>0 (x3)</b>	1:4	0.5	7:00	100	500	38.9	72.1
<b>1</b>	1:5	0.5	11:00	100	500	42.6	70.7
<b>2</b>	1:3	0.5	11:00	100	500	40	70.0
<b>3</b>	1:5	0.5	4:00	100	500	40.4	71.08
<b>4</b>	1:3	0.5	4:00	100	500	41.6	72.2
<b>5</b>	1:4	0.5	12.40	100	500	40	72.2
<b>6</b>	1:4	0.5	1:21	100	500	42.9	70.2
<b>7</b>	1:5.41	0.5	7:00	100	500	46.4	72.3
<b>8</b>	1:2.58	0.5	7:00	100	500	42.3	71.1

**Tabla 31**

*Condiciones del desarrollo experimental parte 2.*

Experimento	Temp. Condensación (inicial-final)	Tiempo de inicio de la condensación (min)	Temp. Ambiente	%HR	Tiempo separación
<b>0 (x1)</b>	14.3 - 21	1:45	27.0	56	24h
<b>0 (x2)</b>	12.6 - 18.6	1:38	25.2	55	24h
<b>0 (x3)</b>	14.6 - 19.7	1:44	26.4	58	24h
<b>1</b>	9.2 - 25.8	1:55	25.5	54	24h
<b>2</b>	8.8 - 28	1:25	26.6	54	24h

<b>3</b>	12.2 - 18.4	1:46	25.15	56	24h
<b>4</b>	9.8 - 16.8	1:44	26.3	56	24h
<b>5</b>	6.3 - 21	1:56	26	54	24h
<b>6</b>	8 - 17.2	1:55	27.1	56	24h
<b>7</b>	7.4 - 23.2	1:48	26.8	55	24h
<b>8</b>	7.6 - 16.4	1:50	26.6	55	24h



**Figura 51.** Biodiesel producido a partir del diseño experimental.

## 8.2 Análisis del diseño experimental factorial

Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales que constituyen al diseño experimental factorial se muestran en la Tabla 32. Se puede observar que los rendimientos oscilan entre 35.98 y 81.321%.

**Tabla 32**

*Rendimiento de los experimentos realizados del diseño factorial.*

<b>Experimento</b>	<b>Tiempo (minutos)</b>	<b>Relación Aceite:Alcohol</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
--------------------	-------------------------	------------------------------------	------------------------

<b>1</b>	11	1:5	66.31
<b>2</b>	11	1:3	73.14
<b>3</b>	4	1:5	68.33
<b>4</b>	4	1:3	81.32
<b>5</b>	12:40	1:4	69.40
<b>6</b>	01:21	1:4	49.11
<b>7</b>	7	1:5.41	53.12
<b>8</b>	7	1:2.58	35.98
<b>Repetición 0 (x1)</b>	7	1:4	71.99
<b>Repetición 0 (x2)</b>	7	1:4	71.00
<b>Repetición 0 (x3)</b>	7	1:4	70.15

---

Al comparar las reacciones con menor contenido de alcohol, los experimentos 2, 4 y 8, que tienen una relación aceite-alcohol de 1:3 y 1:2.58, el tiempo es mayor para el ensayo 2, con un tiempo de reacción de 11 minutos frente a los 4 minutos del experimento 4 y los 7 minutos del experimento 8. También se observó una diferencia de 8.18% entre los rendimientos 2 y 4; lo que representa una influencia importante en el tiempo de reacción para las cantidades propuestas. Del mismo modo, se analizaron las reacciones con mayor contenido de alcohol, en las que los rendimientos de la reacción de transesterificación con etanol y KOH, disminuyó a medida que el tiempo aumento. Esto representa una producción constante y eficiente de biodiesel con las características presentadas, manteniendo el hidróxido de potasio constante al 0.5%.

El resultado más importante del diseño experimental fue la producción de biodiésel en poco tiempo (4 minutos) para una cantidad baja de alcohol (relación 1:3), lo que se traduce en un bajo costo de producción. Además, la variación del rendimiento respecto a las relaciones aceite:alcohol fue significativa, comparado con los experimentos 4 y 6 (relación 1:5 y 1:4), que

tienen tiempos de reacción iguales o menores pero relaciones mayores en comparación al experimento de mayor rendimiento.

Estos resultados indicaron que la relación aceite: alcohol y el tiempo de permanencia de la reacción al interior del horno microondas se convirtieron en los factores más importantes, con condiciones de reacción favorables, mejorando la actividad de la cinética de reacción, además de aumentar los choques efectivos entre las moléculas reaccionantes, lo que permite alcanzar valores de conversión en poco tiempo. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en diferentes investigaciones (Allami et al., 2019; Hassan et al., 2020; Thirugnanasambandham et al., 2016; Thirugnanasambandham & Sivakumar, 2015).

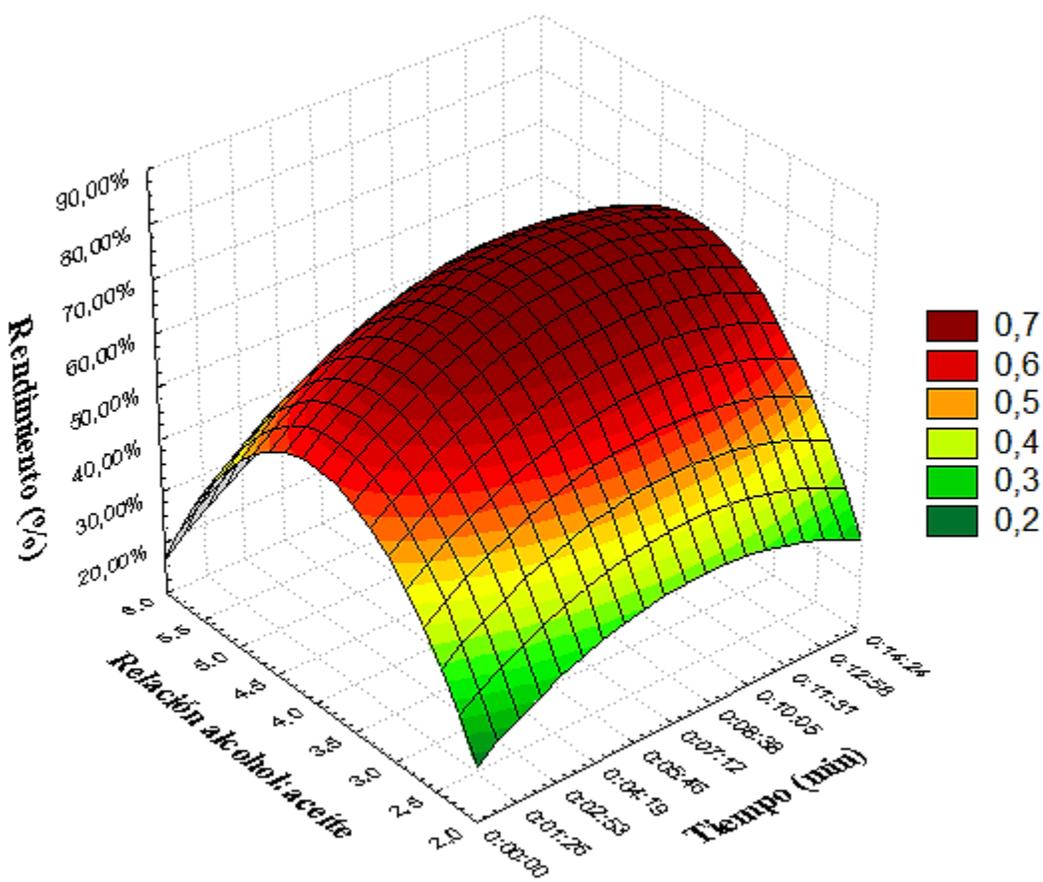
Con el fin de complementar el análisis de los resultados y optimizar las condiciones de la reacción de transesterificación empleando la tecnología de calentamiento por radiación de microondas, se estudió el impacto individual de cada variable independiente sobre la variable respuesta, además de explorar las posibles interacciones y términos cuadráticos. En este orden de ideas, se llevó a cabo un análisis de regresión múltiple utilizando el software Statistica, a partir del cual se obtuvo una ecuación empírica que describe la variación del rendimiento de ésteres de biodiesel en función de las variables independientes estudiadas.

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento (\%)}: & -0,8778 + 46,5443X + 0,7273Y - 4603,4577X^2 + 3,0862XY \\ & - 0,0922Y^2 \end{aligned} \quad (25)$$

El resultado de la expresión (25) en este trabajo mostró que el cuadrado del coeficiente de correlación múltiple ( $R^2$ ) era de 0,99, lo que indica que el 99% de la variabilidad de los datos obtenidos se explica por ella. Con este valor y sabiendo que los residuos eran aleatorios y se distribuían independientemente, la ecuación es estadísticamente coherente.

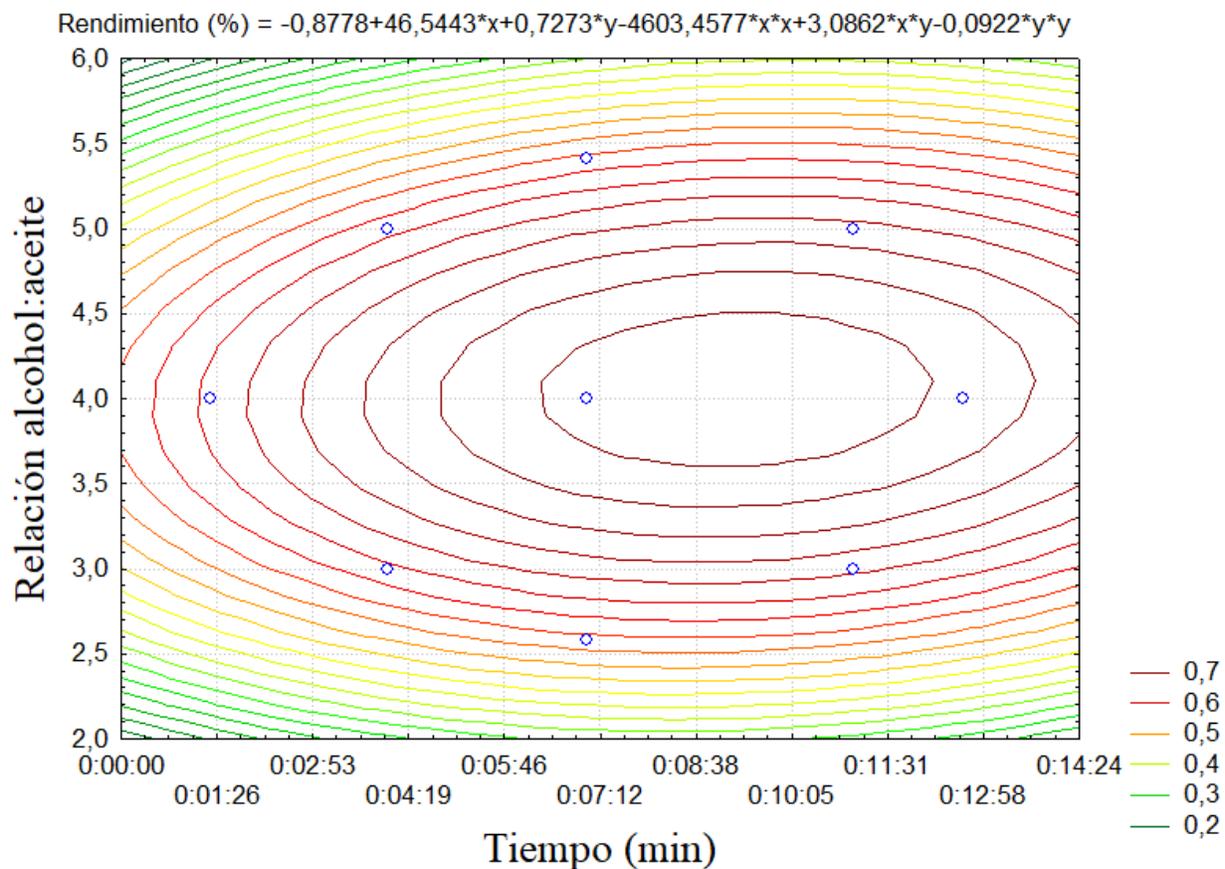
La ecuación empírica muestra que las variables tiempo de reacción (X) y relación alcohol:aceite (Y) son significativas y afectan al rendimiento de ésteres de biodiesel, al igual que la interacción entre el tiempo de reacción y relación alcohol:aceite (XY). Los valores de los coeficientes obtenidos para cada variable confirman las tendencias comentadas anteriormente. Para la variable relación aceite:alcohol (Y) se obtuvieron coeficientes positivos, al igual que para el tiempo de reacción lo que indica que afectan positivamente a la respuesta del sistema. La expresión (25) también muestra que el tiempo de reacción es la variable que más afecta el rendimiento, ya que el coeficiente obtenido fue el más elevado (46.5443).

La Figura 52 muestra la superficie de respuesta para el rendimiento de biodiésel producido en función de los factores tiempo de reacción y relación alcohol:aceite.



**Figura 52.** Superficie de Respuesta de los resultados del diseño experimental factorial.

Con la ayuda de la ecuación (25), y de la Figura 53, fue posible identificar la región de tendencia de máximo rendimiento para la reacción de transesterificación de biodiésel utilizando la tecnología de radiación por microondas, encontrándose que las relaciones comprendidas entre 1:3.5 y 1:4.5 con tiempos de 5:46 y 11:31 podrían optimizar el rendimiento de la reacción.



**Figura 53.** Gráfico de contorno obtenido para optimizar las variables tiempo de reacción y relación alcohol:aceite.

## 9. Pruebas de caracterización físico-químicas para el biodiésel y el aceite de palma.

La metodología utilizada para medir las propiedades del biodiésel, se presentan en este apartado. Para ello, se tomaron tres de las muestras de biodiésel con mejores rendimientos de la

reacción de transesterificación. Posteriormente, se midieron las características fisicoquímicas del aceite de palma (una de las materias primas utilizadas para producir biodiésel).

Las pruebas seleccionadas para la caracterización fueron realizadas siguiendo las normas correspondientes. Es importante resaltar que, al no contar con algunos equipos al interior de la universidad, se tuvieron que descartar algunas pruebas. Los procedimientos fueron en el laboratorio del Grupo de Investigación FITOBIOMOL dirigido por la docente MSc Luz Yineth Ortiz, con ayuda de la ingeniera biotecnológica Gisselle Torres.

La Tabla 33 muestra las propiedades fisicoquímicas esperadas y exigidas por las normas nacionales (NTC 5444) e internacionales (ASTM-D6751 y EN-14214) para las pruebas seleccionadas.

**Tabla 33**

*Normas de calidad del biodiésel para comercialización.*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>NTC 5444</b>	<b>ASTM D6751</b>	<b>EN 14214</b>
Densidad 15°C, min. - máx.	kg/m <sup>3</sup>	860 – 900	--	860 - 900
Viscosidad Cinemática a 40°C, min. - máx.	mm <sup>2</sup> /s	1.9 - 6,0	1,9 - 6,0	3,5 - 5,0
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,5	0,5	0,5
Índice de Yodo, máx.	g yodo/100 g	120	--	120
Contenido de esteres min.	% en masa	96,5	96,5	96,5

**Nomenclatura para las muestras caracterizadas:**

- **Tratamiento 1 (T1):** Prueba 0(x3) de biodiésel
- **Tratamiento 2 (T2):** Prueba 2 de biodiésel
- **Tratamiento 3 (T3):** Prueba 4 de biodiésel

- **Tratamiento 4 (T4):** Aceite de palma crudo

## 9.1 Pruebas de densidad y peso específico

La densidad se define como la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa. Su unidad de medida en el sistema internacional se mide en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) o gramos sobre mililitros (g/ml) y es un indicador del contenido energético del combustible y puede influir en la cantidad de energía liberada por unidad de volumen. Las densidades más altas representan una mayor energía térmica y un mejor ahorro de combustible, sin embargo, también puede causar problemas en los sistemas de inyección de los motores (Hernández Sánchez, 2021; Sánchez-Arreola et al., 2019).

**Norma:** NTC 336, NTC 907, que determinan los procedimientos para las pruebas de densidad y peso específico.

**Materiales:** Biodiésel producido, aceite crudo de palma. Esta prueba se repitió 3 veces para la validación de los resultados.

**Equipos:** Picnómetros certificado con capacidad de 1ml y balanza OHAUS Explorer de 3 dígitos decimales.

### 9.1.1 Metodología de la prueba

Se pesa inicialmente el picnómetro en vacío en la balanza de precisión, seguidamente se llena con la respectiva muestra (Biodiésel, Aceite crudo de palma) y se vuelve a pesar en la balanza de precisión. Con estos datos, se emplea la ecuación (26) y (27) para el cálculo de densidad y peso específico.

$$\rho = \frac{\text{Picnómetro con sustancia} - \text{Picnómetro vacío}}{1\text{ml}} \frac{\text{g}}{\text{ml}} \quad (26)$$

$$\rho_c = \frac{\text{Picnómetro con sustancia} - \text{Picnómetro vacío}}{\text{Picnómetro con Agua} - \text{Picnómetro vacío}} \quad (27)$$



**Figura 54.** Medición de densidad con el picnómetro.

**Tabla 34**

*Densidades y pesos específico de los tratamientos con sus correspondientes repeticiones.*

<b>Tratamiento</b>	<b>Repetición 1</b>	<b>Repetición 2</b>	<b>Repetición 3</b>	<b>Densidad Promedio</b>	<b>Peso específico promedio</b>
<b>T1</b>	0.85	0.8589	0.85	0.8529	0.756
<b>T2</b>	0.861	0.862	0.8606	0.8612	0.771
<b>T3</b>	0.859	0.862	0.868	0.8630	0.778
<b>T4</b>	0.9048	0.915	0.9246	0.9151	0.877

## 9.2 Viscosidad Cinemática

La viscosidad es una propiedad termofísica de los fluidos, definida como la resistencia de un líquido a fluir bajo gravedad debido a la fricción interna. El valor de viscosidad de fluidos es utilizado como referencia en procesos experimentales e industriales como el mezclado, bombeo, extrusión, entre otros. En el caso de los combustibles, la viscosidad es una propiedad importante que puede influir en su fluidez y comportamiento en diversas aplicaciones, como la inyección en motores de combustión interna. La viscosidad de los combustibles afecta la atomización y la mezcla del combustible con el aire en el proceso de combustión (Hernández Sánchez, 2021).

Generalmente, se prefiere que los combustibles tengan una viscosidad relativamente baja para asegurar una mezcla adecuada y una combustión eficiente en motores, ya que, una alta viscosidad en los combustibles puede dar lugar a problemas como la formación de depósitos en el motor y pérdidas de combustible en sistemas de inyección mecánica, lo que afecta el rendimiento y la eficiencia del motor (LIZARDI et al., 2016).

**Norma:** ASTM D445 para viscosímetros giratorios.

**Materiales:** Biodiésel producido, aceite crudo de palma y el patrón de verificación (ácido Oleico). Esta prueba se repitió 3 veces para la validación de los resultados.

**Equipos:** Viscosímetro Rotacional VCPL 1008 de la marca Cole-Palmer. El viscosímetro funciona por el principio de rotación de un cilindro. El cilindro o Husillo giratorio, está acoplado con un muelle al motor que gira a una velocidad determinada. Los cálculos se basan en las mediciones de la fuerza de torsión, la velocidad del eje y las características del equipo. El equipo cuenta con múltiples husillos y permite ajustar la velocidad, lo que influye en el rango de proporción de la viscosidad. Además, es esencial ingresar el valor de la densidad.



**Figura 55.** Viscosímetro rotacional Cole-Parmer utilizado en las mediciones.

### 9.2.1 Metodología de la prueba

Se parte de la condición de total limpieza del accesorio LCP seleccionado del viscosímetro, en este caso fue el de 20ml. Se emplearon los valores de densidades calculadas anteriormente y se procedió a regular la velocidad al inicio de la prueba, es importante verificar el porcentaje de medición, que debe estar en el rango de 70 a 90%, para una buena lectura, de lo contrario se debe regular las rpm del motor, hasta que este porcentaje cumpla con este rango.

**Tabla 35**

*Resultados de las pruebas de viscosidad cinemática.*

Modo viscosímetro (adaptador)	Tratamiento	RPM	% medida	Densidad (gr/ml)	Tiempo (minutos)	Viscosidad A 23°C (mm <sup>2</sup> /s)
LCP	T1	100	80,5	0.8529	5	5.82
LCP	T2	100	84	0.8612	5	5.44

LCP	T3	100	82,1	0.8630	5	5,32
LCP	T4	5	88	0.9151	7	102.11

---

### 9.3 Índice de acidez

Si el resultado de la determinación se reporta con base al ácido oleico, la acidez se expresa como porcentaje de acidez. Mientras que, si la muestra contiene ácidos minerales, por convención, se determinan ácidos grasos o número de miligramos de hidróxido de potasio requeridos para neutralizar los ácidos grasos libres en un gramo de grasa, cuando se determina de acuerdo con el procedimiento especificado en la norma NTC 218.

Para la determinación del índice de Acidez de las soluciones de biodiésel y aceite crudo de palma, se usó titulación con KOH, seguido de la ecuación (28) que establece la norma.

$$I_A = \frac{V_{KOH} \cdot c \cdot 56.10}{Peso} \text{ mgKOH/g} \quad (28)$$

Donde:

$V_{KOH}$ : volumen gastado de KOH al 0.1N

$c$ : concentración del KOH (0,1)

$Peso$ : peso en gramos de la muestra utilizada

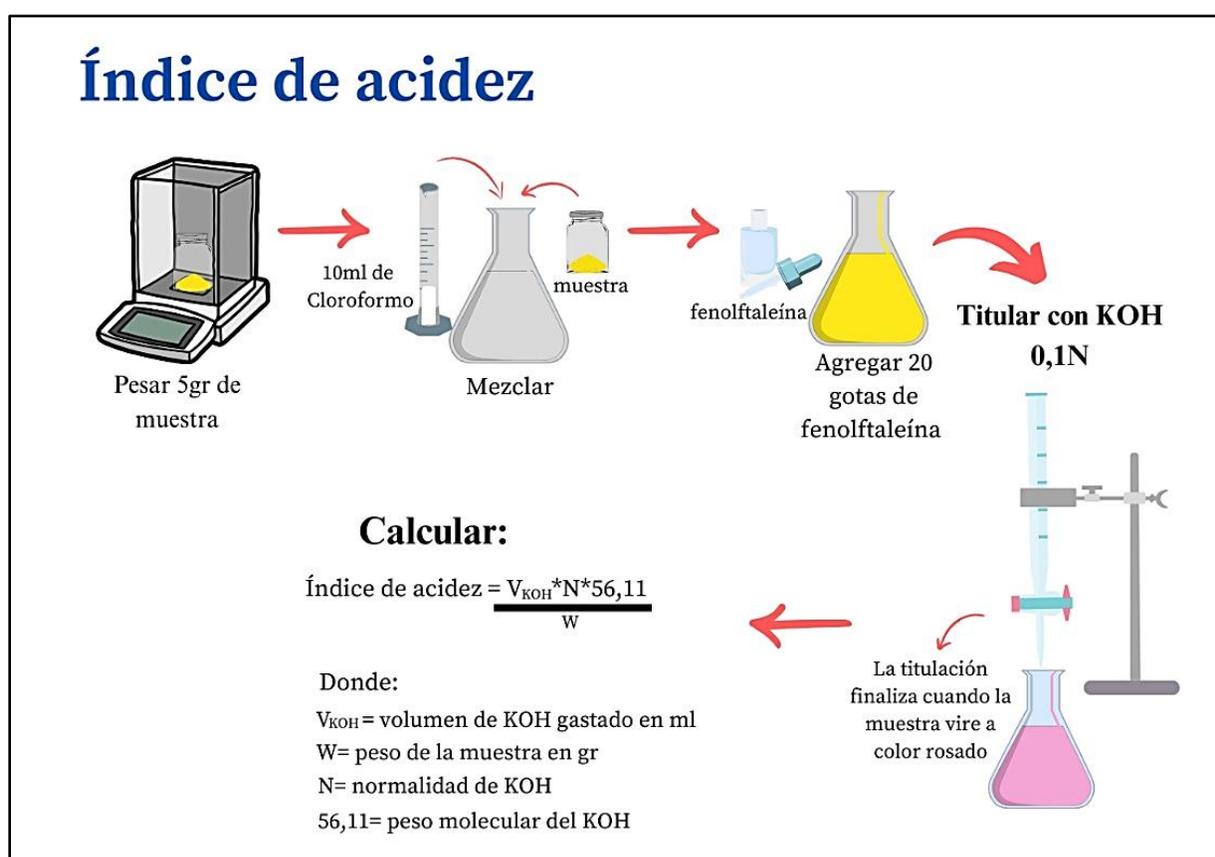
56.10: peso molecular del KOH

**Norma:** NTC 218 para índice de acidez con KOH.

**Materiales:** Biodiésel producido, aceite crudo de palma y el patrón de verificación (ácido Oleico). Esta prueba se repitió 3 veces para la validación de los resultados

**Equipos:** Erlenmeyer de 250ml, probetas de 50ml, probetas de 10ml, soporte universal, pinzas para bureta, bureta de 25ml, 3 beakers de 100ml; Cloroformo (CHCl<sub>3</sub>), fenolftaleína y solución de hidróxido de potasio al 0.1N.

Siguiendo la metodología planteada en la Figura 56, se obtienen los índices de acidez para cada uno de los tratamientos y que se presentan en la Tabla 36. Estos resultados se encuentran dentro de los exigidos por las normas y los obtenidos por (Inayat et al., 2018).



**Figura 56.** Metodología y paso a paso para realizar el índice de acidez.

**Tabla 36**

*Índice de acidez de los tratamientos.*

Tratamiento	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
-------------	--------------	--------------	--------------	----------

<b>T1</b>	0.4488	0.4488	0.561	0.4862
<b>T2</b>	0.4488	0.3366	0.2244	0.3366
<b>T3</b>	0.3366	0.3366	0.3366	0.3366
<b>T4</b>	7.854	7.7418	7.7418	7.7792

#### 9.4 Índice de Yodo

El índice de yodo (o valor de adsorción de yodo o número de yodo, comúnmente abreviado como IY) se considera un parámetro crucial en la evaluación de la calidad de aceites y sustancias derivadas de cadenas compuestas por ácidos grasos (García Muentes et al., 2018). Este valor determina el grado de insaturaciones o el número promedio de dobles enlaces en estos compuestos, lo que se relaciona directamente con la pureza. Cuanto mayor sea el número de dobles enlaces por unidad de grasa, mayor será el valor del IY, lo que lo convierte en una herramienta útil para verificar la pureza y la identidad de las grasas. Además, a través del análisis del IY de ácidos grasos insaturados, se pueden detectar otras sustancias insaturadas, como los esteroides (Gonzalez-Diaz et al., 2022).

La reacción para determinar el índice de yodo implica la adición de halógenos, como bromo o halogenuros mixtos como ICl o IBr, a los dobles enlaces. El método adopta diferentes nombres según el reactivo utilizado, y la adición de halógenos a los dobles enlaces depende de la constitución y configuración de los compuestos insaturados, así como de factores como el tipo de halógeno, el disolvente y las condiciones externas. Es importante destacar que esta reacción no es cuantitativa, por lo que se requiere la estandarización de las condiciones de trabajo y la indicación de la metodología utilizada para garantizar la repetibilidad de los resultados.

**Norma:** NTC 238, mediante el método de Friedmann modificado.

**Materiales:** Biodiésel producido, aceite crudo de palma. Esta prueba se realizó una vez por la cantidad de algunos reactivos.

**Equipos:** Erlenmeyer de 500ml, probetas de 50ml, Beaker de 100ml, balanza OHAUS Explorer de 3 dígitos decimales, plancha de agitación magnética, soporte universal con pinza, bureta de 25ml

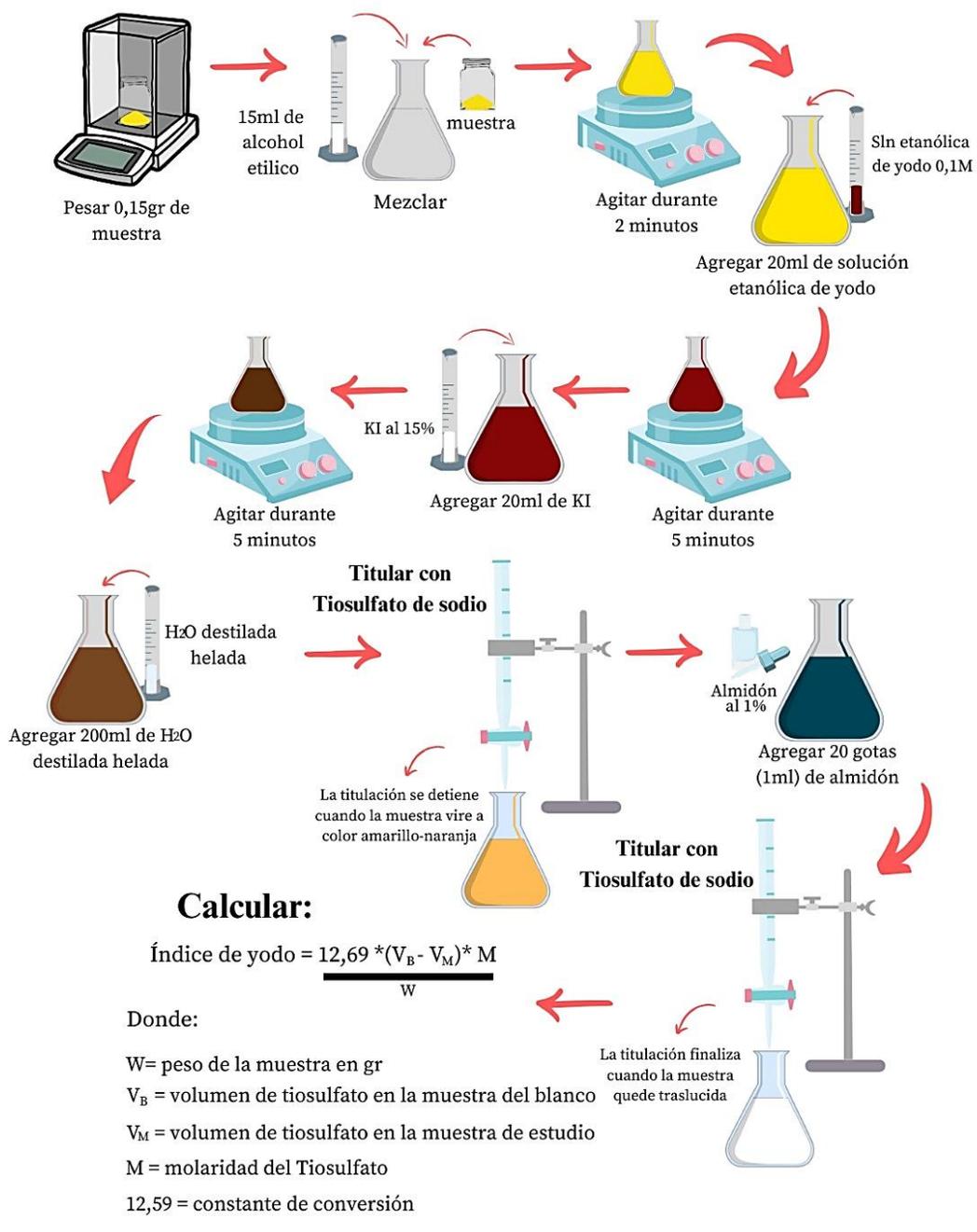
#### ***9.4.1 Metodología de la prueba***

En la Figura 57 se presenta esquemáticamente la metodología para la realización de la prueba de Índice de Yodo.

Dado que el reactivo de Wijs no estaba disponible al momento de llevar a cabo la titulación, se optó por emplear el método modificado de Friedmann para determinar el índice de yodo. En este procedimiento, se tomó una muestra de 0,15 g que se disolvió en 15 ml de alcohol etílico. Posteriormente, se agitó utilizando un agitador magnético durante 2 minutos, seguido, se adicionaron 20 ml de una solución etanólica de yodo al 0,1M. A continuación, el matraz Erlenmeyer se sometió a una nueva agitación durante 5 minutos y se incorporaron 200 ml de agua destilada fría. La solución resultante se tituló utilizando una solución de tiosulfato sódico 0,1 M estandarizada hasta que adquirió un color amarillo característico. Luego, se añadió 1 ml (20 gotas) de una solución de almidón al 1% para completar el procedimiento.

Se observó el color azul-verdoso característico y se valoró la solución hasta que apareció un color blanco translucido, punto final de la valoración. Posteriormente se procedió a realizar el cálculo empleando la expresión (29). En la Tabla 37 se puede apreciar los distintos cambios por los que pasa la solución para el índice de Yodo.

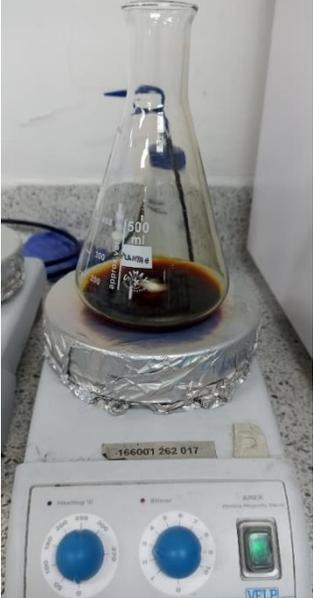
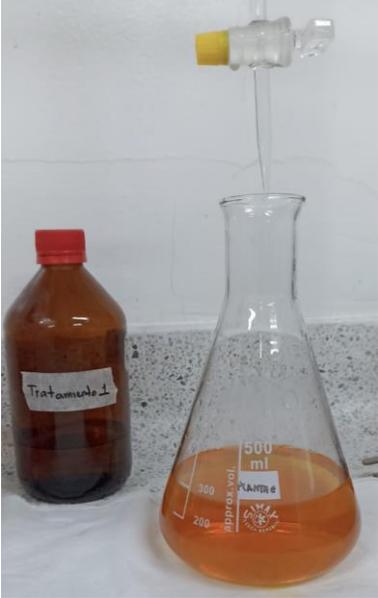
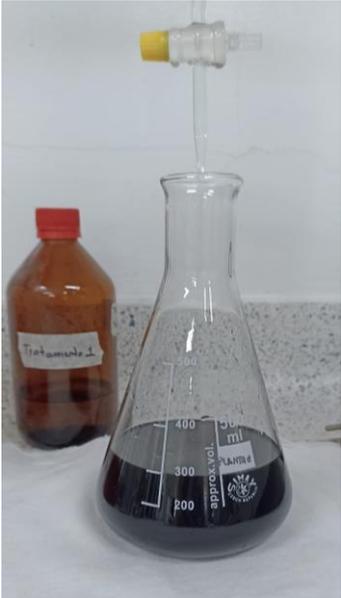
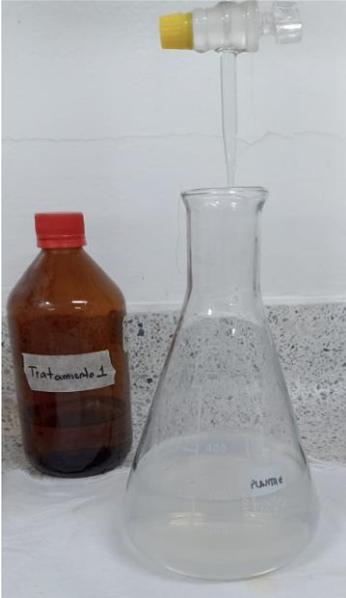
## Índice de yodo



**Figura 57.** Metodología y paso a paso para realizar la prueba de Índice de Yodo.

Tabla 37

*Viraje de color que presenta la solución durante la prueba para el índice de Yodo.*

Muestra sin titular con solución etanólica de yodo y KI	Muestra sin titular con solución etanólica de yodo, KI y Agua destilada helada	Muestra después de la primera titulación con tiosulfato de sodio (Color amarillo-naranja)
		
Muestra con 1ml de almidón al 1% (Color azul verdoso)	Muestra después de la segunda titulación con tiosulfato de sodio (Color blanco traslucido)	
		

$$I_Y = \frac{12.69 * (V_B - V_M) * N}{g \text{ muestra}} \quad (29)$$

Donde:

12.69: Constante de conversión

$V_B$ : volumen de tiosulfato gastado en la muestra del blanco

$V_m$ : volumen de tiosulfato gastado en la muestra de estudio

$N$ : Normalidad del Tiosulfato (0.1)

**Tabla 38**

*Índice de yodo de los tratamientos.*

<b>Tratamiento</b>	<b>Índice de Yodo Calculado</b>
T1	55.32
T2	56.14
T3	52.15
T4	43.11

### **9.5 Cromatografía de capa fina (TLC)**

La cromatografía en capa fina o TLC (Thin Layer Chromatography), es una técnica analítica rápida y sencilla utilizada para separar los componentes de una muestra. Esto se logra mediante su migración diferencial a través de una capa delgada de adsorbente, típicamente soportada por una superficie plana inerte. Esta técnica se basa en el principio de adsorción entre dos fases, lo que permite la separación de las moléculas de la muestra según sus coeficientes de reparto. TLC es ampliamente empleada en diversas aplicaciones, incluyendo la determinación del grado de pureza de un compuesto, la identificación y comparación de analitos, así como el

seguimiento de reacciones químicas como la transesterificación de biodiésel, diglicéridos, triglicéridos. Su facilidad de interpretación y ejecución la convierte en una herramienta versátil de bajo costo que permite realizar separaciones en corto tiempo. La fase estacionaria en este proceso suele ser una placa de silica gel (Francia Yanguas, 2015; Vallejo-Rosero et al., 2021).

Es de suma importancia para el proyecto identificar en los resultados de la cromatografía en capa fina cualquier indicio de la presencia de biodiésel, lo cual se reflejaría en la detección de marcas en la sección de ácidos grasos libres. Las muestras se dispusieron en secuencia según sus repeticiones

**Materiales:** Biodiésel producido, aceite crudo de palma, solución de hexano, dietileter, Ácido Acético en partes (70:30:1), yodo puro perlado.

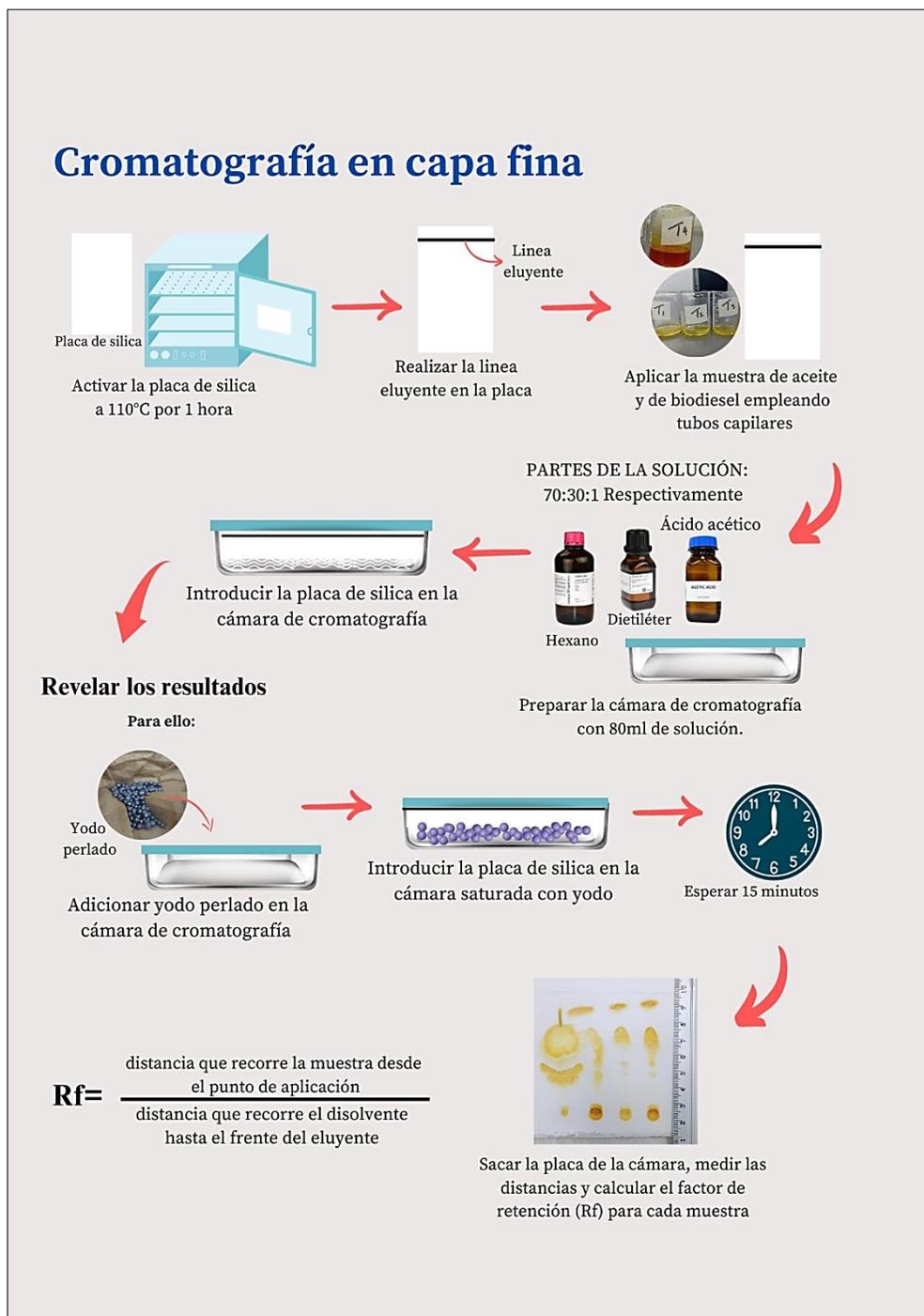
**Equipos:** Placa de vidrio 10x20cm con silica gel, horno, cámara cromatográfica, cámara de revelación con yodo.

### ***9.5.1 Metodología de la prueba***

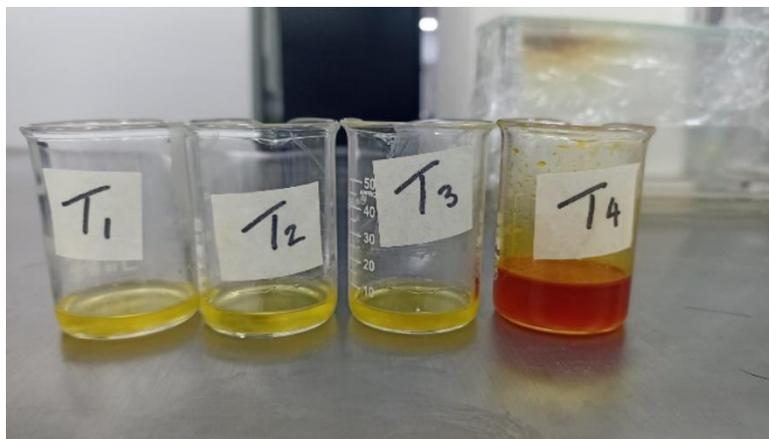
En la Figura 58 se presenta esquemáticamente la metodología para la realización de la prueba de cromatografía.

Se preparó una placa de vidrio de 10x20 cm con silica gel en su superficie, se activó por 6 horas en un horno a 90 °C. Después se preparó la cámara de cromatografía con 80 ml de solución en partes (70:30:1) hexano, Dietiléter, Ácido Acético y se dejó saturar por 2 horas, luego se aplicaron las muestras, como patrón se empleó el ácido esteárico. La aplicación fue de 5 gotas por sustancia con ayuda de tubos capilares en la placa ya activada, con una separación entre muestras de 2 cm y desde el borde inferior de 1 cm; se dejó secar unos segundos y se procedió a introducirla en la cámara cromatografía, se esperó hasta que la fase móvil llegase al

borde superior de la placa, para retirar la placa de la cámara cromatográfica e ingresarla a la cámara de revelación con yodo.

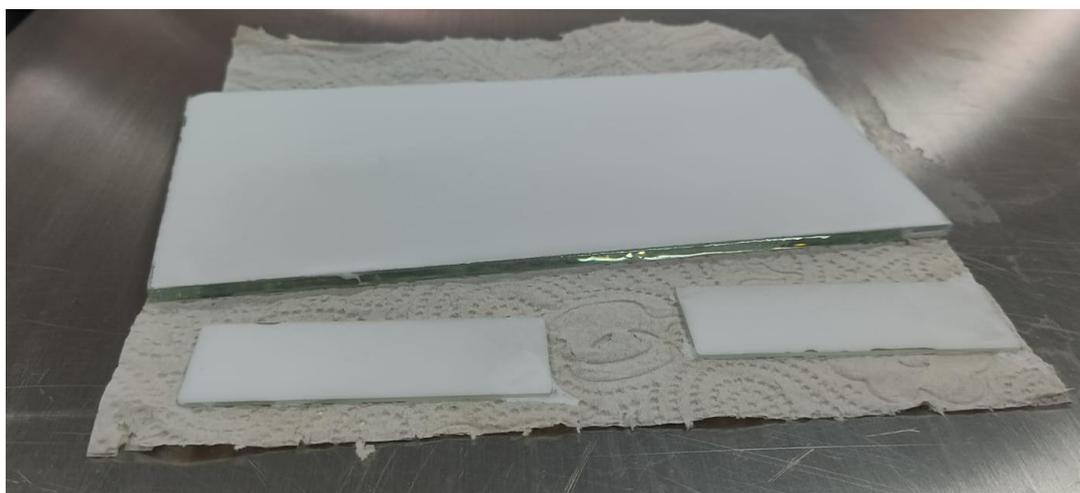


**Figura 58.** Metodología y paso a paso para realizar la prueba de cromatografía.



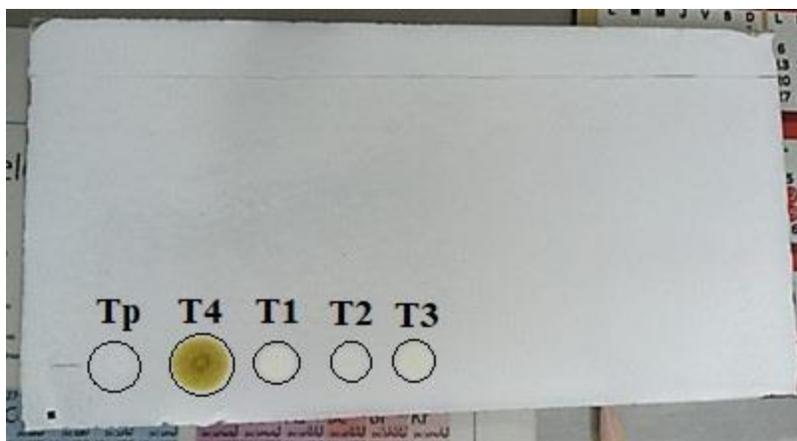
**Figura 59.** *Tratamientos para la cromatografía.*

**Paso 1:** Preparación de la placa de vidrio con la Silica Gel



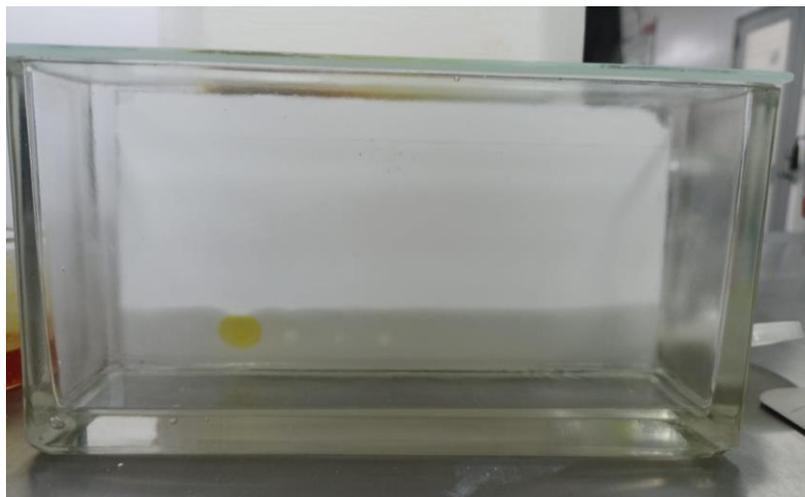
**Figura 60.** *Placa de Silica gel.*

**Paso 2:** Aplicación de las muestras en la placa para la cromatografía



**Figura 61.** *Muestras de los tratamientos en la placa de silica gel.*

**Paso 3:** Se ingresa la placa con las muestras a la cámara cromatográfica.



**Figura 62.** *Cámara cromatográfica con la placa de silica gel.*

**Paso 4:** Se ingresa la placa con las muestras a la cámara de revelación de yodo.



**Figura 63.** Revelación de la cromatografía en la cámara de yodo.

### **9.5.2 Resultados de la Cromatografía de Capa Fina**

Después de la revelación de los resultados de la cromatografía en la cámara con Yodo, se procedió a calcular los Rf de cada muestra para conocer que sustancias se encuentran presentes.

En la Figura 64, se enmarcan las muestras que presentaron transesterificación, esto quiere decir que para esas muestras hay presencia de biodiésel. En la inspección de la placa, pasado el tiempo de reacción y revelado en la cámara de Yodo, se observa cualitativamente la presencia de las cadenas de ácidos grasos como triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos y los esteres de biodiésel (enmarcados en rojo). Se observa una mejor transesterificación en las muestras 2 y 3, que corresponden a las relaciones aceite:alcohol 1:3 para 11 y 4 minutos respectivamente, mientras que la muestra 1 presenta mayor presencia de cadenas de ácidos grasos sin transesterificar. La muestra patrón no tuvo revelación con la cámara de yodo.



**Figura 64.** Resultados de la cromatografía de capa fina.

#### 9.5.2.1 Cálculo de la Relación de Frente de las muestras

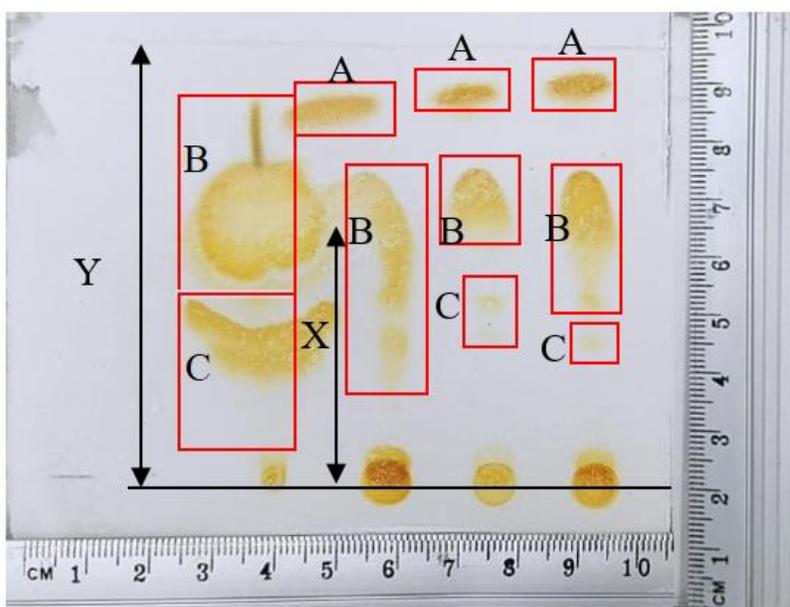
El símbolo  $R_f$ , que representa la "Relación de frentes", es una relación de distancias que se expresa como el cociente entre la distancia recorrida por la sustancia y la distancia recorrida por el disolvente hasta el frente del eluyente. El valor de  $R_f$  está sujeto a variaciones dependiendo de las condiciones en las cuales se realiza el análisis, tales como el tipo de adsorbente, eluyente y las condiciones de la placa, incluyendo la temperatura y la saturación de vapor, entre otros factores. (Vallejo-Rosero et al., 2021)

En la cromatografía en capa fina, se emplea una placa que lleva una capa delgada de adsorbente como fase estacionaria, la cual está adherida a un soporte rígido, como una placa de vidrio, aluminio o poliéster. Algunos adsorbentes incluso incluyen un indicador de fluorescencia para facilitar la identificación de las muestras. En caso de que no se utilice un indicador y los

componentes carezcan de color, se requerirán otras técnicas de revelado para su detección y análisis (Cenis, 2019).

Para el cálculo de este parámetro, se procede a marcar los resultados de la placa como se muestra en la Figura 65, y se emplea la formula (30).

$$R_f = \frac{(X) \text{ distancia que recorre desde el punto de aplicación}}{(Y) \text{ distancia que recorre el disolvente hasta el frente del eluyente}} \quad (30)$$



**Figura 65.** Identificación de los valores de X-Y para la Rf.

**Tabla 39**

Valores de distancia X-Y y Rf.

Tratamiento	Y (cm)	Valores de X (cm)			Valores de Rf		
		A	B	C	A	B	C
<i>T1</i>	7.5	6.5	5.3	-	0.866	0.706	-
<i>T2</i>	7.5	6.8	5.4	3.3	0.906	0.72	0.44
<i>T3</i>	7.5	6.8	5.4	2.5	0.906	0.72	0.33

<b>T4</b>	7.5	-	5.7	3.0	-	0.76	0.4
<b>Tp</b>	7.5	-	-	-	-	-	-

Los resultados obtenidos para los factores de frente (Fr) se compararon con los datos de otras investigaciones, que en sus trabajos de caracterización de biodiésel obtuvieron valores similares en los Rf con respecto a los de este trabajo (Herrera Susa, 2019; Polo Rodriguez et al., 2018; Salamanca Izaguirre et al., 2021; Sánchez Calderón, 2016); confirmando la presencia de biodiésel en las muestras de los tratamientos 1, 2 y 3; y la presencia de triglicéridos y diglicéridos sin transesterificar en estas muestras. En el caso del aceite de palma crudo, se informa la presencia de triglicéridos en mayor proporción, diglicéridos y ácidos grasos libres.

## 9.6 Índice de Refracción

El índice de refracción, que depende de la composición de la muestra, la temperatura y la longitud de onda de la radiación utilizada, generalmente se mide a 20, 25 o 40 grados. Su utilidad radica en casos como la identificación y caracterización de líquidos puros, grasas y aceites, entre otras aplicaciones, pero no es un factor crítico en términos de su calidad como combustible o como producto químico. Se utiliza a menudo para identificar sustancias y determinar su pureza. Al comparar el índice de refracción de una muestra de biodiésel con los valores de referencia, se puede verificar si el producto es lo que se pretende y si está libre de impurezas (Saavedra et al., 2019; Sanaguano Salguero et al., 2019).

**Norma:** NTC 289

**Materiales:** microtubos viales de 2ml, pipeta, biodiésel producido, aceite crudo de palma. Esta prueba se repitió 3 veces para la validación de los resultados.

**Equipos:** plancha de calentamiento, refractómetro digital y analógico



**Figura 66.** Equipos utilizados para calcular el índice de refracción.

### 9.6.1 Metodología de la prueba

Para realizar la prueba, se debe limpiar primero la superficie de muestreo del refractómetro, a continuación, se procede de depositar con una pipeta una gota de la muestra a analizar, debe caer en todo el centro de la superficie para una correcta medición. Debido a que los equipos miden grados Brix, se hizo necesario realizar la conversión a índices de refracción a través de una tabla estandarizada oficialmente por ICUMSA (Comité Internacional de Método Uniforme de Análisis de Azúcar realizado en 1974).

En la Tabla 40 se presentan las mediciones del refractómetro y sus respectivas conversiones.

**Tabla 40**

*Resultados para el índice de refracción de los tratamientos.*

Equipo	Tratamiento	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio (%Brix)	Índice de Refracción
Digital	T1	24.5	24.6	24.1	24.4	1.37060

	<b>T2</b>	21.4	21.4	21.5	21.43	1.36551
	<b>T3</b>	22.3	22.6	22.4	22.43	1.36720
	<b>T4</b>	63.6	68.9	70.0	67.5	1.45822
	<b>T1</b>	23	22.5	22.5	22.66	1.36720
<b>Analógico</b>	<b>T2</b>	20	20.5	20	20.16	1.36384
	<b>T3</b>	22.5	22.0	21.5	22.00	1.36720
	<b>T4</b>	66.5	67	66.5	64.66	1.45113

Los resultados obtenidos para el aceite de palma crudo y las muestras de biodiésel se encuentran en los valores conseguidos por otros estudios (Herrera Susa, 2019; Saavedra et al., 2019; Sanaguano Salguero et al., 2019), y cumplen con los valores establecidos por las normas de biodiésel.

## 10. Conclusiones

Con el objetivo de analizar experimentalmente la producción de biodiésel por radiación de microondas, se desarrolló un banco experimental en el Grupo de Investigación en Desarrollo de Procesos Industriales (GIDPI). Teniendo como resultado, un sistema de producción con la instrumentación y el monitoreo de las variables de temperatura, velocidad, humedad y presencia de alcohol; con la capacidad de visualizar en tiempo real las condiciones de cada experimento de producción.

Se evidenció que el controlador PI seleccionado para el control de velocidad del agitador mecánico soporta perturbaciones elevadas de hasta el 80% manteniendo el valor de referencia sin ocasionar la saturación del actuador (12V), situación que no se presenta en la respuesta en lazo abierto, que ante perturbaciones sostenidas el sistema no tiene la capacidad de estabilizar su velocidad en un valor fijo.

El diseño experimental factorial en estrella resultó ser una herramienta muy importante para el estudio objetivo de la producción de biodiésel por radiación de microondas. Permitiendo analizar no solo los efectos de los factores tiempo de reacción y relación alcohol:aceite a nivel individual, sino también el efecto que tiene la interacción de estos sobre el rendimiento de producción. En donde el tiempo de reacción resultó tener gran influencia sobre los resultados de cada experimento, como se evidencia en los rendimientos de los experimentos 2 y 4 que corresponden a tiempos de 4 y 11 minutos, presentando rendimientos de 81.32 y 73.14 % respectivamente.

Se eligieron tres de las mejores reacciones para la cromatografía de capa fina, con el fin de analizar cualitativamente la composición de los resultados de biodiésel obtenidos. El biodiésel

0(x3) (relación aceite:alcohol 1:4, tiempo 7 minutos y rendimiento 70.15%), mostro una transesterificación incompleta por la presencia de cadenas de ácidos grasos (enmarcados como B); mientras que, el biodiésel 2 y 4 (relación aceite:alcohol 1:3, tiempo 11 minutos y rendimiento 73,14% y relación aceite:alcohol 1:3, tiempo 4 minutos y rendimiento 81,32%), mostraron transesterificación completa con presencia mínima de cadena de ácidos grasos enmarcados como B y C; resultados que concuerdan con los valores de rendimientos calculados.

Las propiedades fisicoquímicas de densidad, viscosidad, índice de acidez, índice de yodo e índice de refracción de las pruebas 0(x3), 2 y 4 (1:4 a 7min, 1:3 a 11min, 1:3 a 4min) que presentaron mejor rendimiento, estuvieron dentro de los límites establecidos por las normas NTC 5444, ASTM D6751 y EN 14214; favoreciendo de forma segura su aplicación y el desempeño en una cámara de combustión.

La producción de biodiésel mediante la tecnología de radiación por microondas, presentada con diferentes relaciones alcohol:aceite y tiempos de reacción, mostró que es posible llevar a cabo la transesterificación para tiempos de 1:21 minutos, tal como se observó en la prueba 6 del diseño experimental, teniendo como resultado un rendimiento de 49.11% para una relación alcohol:aceite de 1:4. Lo que evidencia un buen funcionamiento del banco de producción desarrollado.

## 11. Recursos Financieros

### 11.1 Presupuesto global por fuente de financiación

**Tabla 41**

*Presupuesto global del proyecto por fuentes de financiación (en COP).*

Rubro	Fuentes						Subtotal Por Rubro
	Estudiante		UFPS		UFU		
	Efectivo	Especie	Efectivo	Especie	Efectivo	Especie	
Personal	2.000.000	0	3.000.000	0	3.000.000	0	8.000.000
Equipos	0	2.900.000	0	54.077.292	0	0	56.977.292
Viáticos	2.073.600	0	0	576.000	0	0	2.649.600
Materiales	850.000	0	0	200.000	0	0	1.050.000
Imprevistos	1.000.000	0	0	0	0	0	1.000.000
<b>Subtotal Por Fuente</b>	5.923.600	2.900.000	3.000.000	54.853.292	3.000.000	0	
<b>Total</b>							<b>69.676.892</b>

### 11.2 Gastos de personal

**Tabla 42**

*Descripción de los gastos en personal (en COP).*

Nombre de involucrados	Función Dentro del Proyecto	# de Meses	Fuente			Subtotal Por Involucrado
			Estudiante	UFPS	UFU	
Wilson Norbey Romano Torres	Investigador y Ejecutor	8	2.000.000	0	0	2.000.000
José Ricardo Bermúdez Santaella	Director	8	0	3.000.000	0	3.000.000
Daniel Andrey Herrera Susa	Codirector	8	0	0	3.000.000	3.000.000
<b>Subtotal Por Fuente</b>			2.000.000	3.000.000	3.000.000	
<b>Total</b>						<b>8.000.000</b>

### 11.3 Equipos y software

**Tabla 43**

*Descripción de los equipos de uso propio (en COP).*

Descripción	Cantidad	Justificación	Fuente		Subtotal Por Equipo
			Estudiante	UFPS	
Computador	1	Investigación, simulación y análisis de datos.	2.900.000	0	2.900.000
Licencia estándar de SOLIDWORKS	1	Diseño de piezas y elementos	0	34.725.436	34.725.436
Licencia básica LABVIEW	1	Diseño de interfaz HDMI	0	15.000.000	15.000.000
Licencia Anual MATLAB	1	Simulación, análisis de datos y graficas	0	4.351.856	4.351.856
<b>Subtotal Por Fuente</b>			2.900.000	54.077.292	
<b>Total</b>					<b>56.977.292</b>

### 11.4 Viáticos

**Tabla 44**

*Viáticos (en COP).*

Ítem	Justificación	Costo diario	\$/s	# de Meses	Fuente		Subtotal Por Viáticos
					Estudiante	UFPS	
Transporte	Pago de pasajes ida y vuelta durante el desarrollo del proyecto.	4.800	28.800	8	921.600	0	921.600
Alimentación	Desayuno y almuerzo durante la fase de desarrollo del proyecto.	10.000	54.000	8	1.152.000	576.000	1.728.000
<b>Subtotal Por Fuente</b>					2.073.600	576.000	

<b>Total</b>	<b>2.649.600</b>
--------------	------------------

### 11.5 Materiales e insumos

**Tabla 45**

*Descripción de los materiales e insumos (en COP).*

Descripción	Cantidad	Valor	Fuente		Subtotal Por Materiales o Insumos
			Estudiante	UFPS	
Materiales de instrumentación del prototipo	-	300.000	300.000		300.000
Insumos fabricación de Biodiésel	-	500.000	500.000		500.000
Termómetro infrarrojo (pistola)	1	200.000		200.000	200.000
Motobomba de agua sumergible	1	50.000	50.000		50.000
<b>Subtotal Por Fuente</b>			850.000	200.000	
<b>Total</b>					<b>1.050.000</b>

## 12. Referencias

- Abrar, I., & Bhaskarwar, A. N. (2018). Formulation and Extension of Diesel-Based Microemulsion Fuels for Compression Ignition Engines. *INAE Letters*, 3(1), 33-39. <https://doi.org/10.1007/s41403-018-0037-0>
- Abyaz, A., Afra, E., & Saraeyan, A. (2020). Improving technical parameters of biofuel briquettes using cellulosic binders. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 00(00), 1-12. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1806955>
- Acevedo, J. C., Hernández, J. A., Valdés, C. F., & Khanal, S. K. (2015). Analysis of operating costs for producing biodiesel from palm oil at pilot-scale in Colombia. *Bioresource Technology*, 188(2015), 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.071>
- Akkarawatkhoosith, N., Bangjang, T., Kaewchada, A., & Jaree, A. (2023). Biodiesel production from rice bran oil fatty acid distillate via supercritical hydrolysis–esterification–transesterification in a microreactor. *Energy Reports*, 9, 5299-5305. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.348>
- Akkarawatkhoosith, N., Kaewchada, A., & Jaree, A. (2019). Production of Biodiesel from Palm Oil under Supercritical Ethanol in the Presence of Ethyl Acetate [Research-article]. *Energy & Fuels*, 33(6), 5322-5331. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00641>
- Allami, H. A., Tabasizadeh, M., Rohani, A., Farzad, A., & Nayebzadeh, H. (2019). Precise evaluation the effect of microwave irradiation on the properties of palm kernel oil

- biodiesel used in a diesel engine. *Journal of Cleaner Production*, 241(117777), 1-11.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117777>
- Amaris, J. M., Manrique, D. A., & Jaramillo, J. E. (2015). Biocombustibles Líquidos en Colombia y su Impacto en Motores de Combustión Interna: Una Revisión. *El Reventón Energético*, 13(2), 12.  
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/5236/5538>
- Anatolii, S., Naung, Y., Oo, H. L., Khaing, Z. M., & Ye, K. Z. (2017). The comparative analysis of modelling of Simscape physical plant system design and armature-controlled system design of DC motor. *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 998-1002.  
<https://doi.org/10.1109/EIConRus.2017.7910725>
- Anawe, P. A. L., & Folayan, J. A. (2018). Data on physico-chemical, performance, combustion and emission characteristics of Persea Americana Biodiesel and its blends on direct-injection, compression-ignition engines. *Data in Brief*, 21, 1533-1540.  
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.10.166>
- Aneesh, V. N., Saravanan, R., Jerin, A., Malladi, A., Amuthan, T., Anbuhezhiyan, G., & Uday Ranjan Goud, N. (2023). Synthesis of biodiesel from the pyrolysis process with different condition of temperature boundary. *Materials Today: Proceedings*, xxxx.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.248>
- Anwar, M. (2021). Biodiesel feedstocks selection strategies based on economic, technical, and sustainable aspects. *Fuel*, 283, 119204. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119204>

- Apaza Mamani, D. F., & la Torre Javier, I. J. (2017). *Diseño e implementación de un sistema automatizado para riego tecnificado basado en el balance de humedad de suelo con tecnología Arduino en el laboratorio de control y automatización EPIME 2016* [Tesis de grado, Universidad Nacional Del Altiplano].  
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5970>
- Arce Saavedra, T., Bueno-Borges, L. B., Sangaletti-Gerhard, N., de Alencar, S. M., & Regitano-d'Arce, M. A. B. (2022). Optimized conventional and ultrasound-assisted ethyl transesterification of jatropha (*Jatropha curcas*) and palm (*Elaeis guineensis*) oil mixtures. *Chemical Engineering Communications*, 209(11), 1482-1495.  
<https://doi.org/10.1080/00986445.2021.1977925>
- Arismendi Londoño, J. P., Avendaño Avendaño, A. J., Parra Llanos, J. W., & Rodríguez Ordoñez, D. C. (2021). Aprovechamiento de aceites vegetales usados para la obtención de biodiésel de segunda generación: una revisión. *ConBRepro*, 1-10.  
[https://aprepro.org.br/conbrepro/2021/anais/arquivos/09272021\\_220941\\_61526cf9343f5.pdf](https://aprepro.org.br/conbrepro/2021/anais/arquivos/09272021_220941_61526cf9343f5.pdf)
- Arpia, A. A., Chen, W.-H., Lam, S. S., Rousset, P., & de Luna, M. D. G. (2021). Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 403, 126233. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126233>
- Athar, M., Imdad, S., Zaidi, S., Yusuf, M., Kamyab, H., Jaromír Klemeš, J., & Chelliapan, S. (2022). Biodiesel production by single-step acid-catalysed transesterification of

- Jatropha oil under microwave heating with modelling and optimisation using response surface methodology. *Fuel*, 322, 124205. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124205>
- Ávila Ávila, W., Medina Vargas, O. J., Moreno Bastidas, L. M., Ávila Ávila, W., Medina Vargas, O. J., & Moreno Bastidas, L. M. (2019). Aplicación de un diseño factorial 23 en la extracción asistida por microondas y evaluación de la actividad antioxidante de los compuestos presentes en frutos de *Vaccinium meridionale*. *Revista Colombiana de Ciencias Químico - Farmacéuticas*, 48(3), 643-661. <https://doi.org/10.15446/RCCIQUIFA.V48N3.84983>
- Betiku, E., Osunleke, A. S., Odude, V. O., Bamimore, A., Oladipo, B., Okeleye, A. A., & Ishola, N. B. (2021). Performance evaluation of adaptive neuro-fuzzy inference system, artificial neural network and response surface methodology in modeling biodiesel synthesis from palm kernel oil by transesterification. *Biofuels*, 12(3), 339-354. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1472980>
- Binnal, P., Amruth, A., Basawaraj, M. P., Chethan, T. S., Murthy, K. R. S., & Rajashekhara, S. (2021). Microwave-assisted esterification and transesterification of dairy scum oil for biodiesel production: kinetics and optimisation studies. *Indian Chemical Engineer*, 63(4), 374-386. <https://doi.org/10.1080/00194506.2020.1748124>
- Buasri, A., Rattanapan, T., Boonrin, C., Wechayan, C., & Loryuenyong, V. (2015). Oyster and *Pyramidella* Shells as Heterogeneous Catalysts for the Microwave-Assisted Biodiesel Production from *Jatropha curcas* Oil. *Journal of Chemistry*, 2015, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2015/578625>

- Canal, I. P., Valdiero, A. C., & Pérez Reibold, M. (2017). Modelagem Matemática de Motor de Corrente Contínua e Análise Dinâmica. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, 5(1), 1-6.  
<https://doi.org/10.5540/03.2017.005.01.0178>
- Carvalho, A. K. F., Bento, H. B. S., Izário Filho, H. J., & de Castro, H. F. (2018). Approaches to convert *Mucor circinelloides* lipid into biodiesel by enzymatic synthesis assisted by microwave irradiations. *Renewable Energy*, 125, 747-754.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.012>
- Carvalho, A. K. F., Rivaldi, J. D., Barbosa, J. C., & de Castro, H. F. (2015). Biosynthesis, characterization and enzymatic transesterification of single cell oil of *Mucor circinelloides* – A sustainable pathway for biofuel production. *Bioresource Technology*, 181, 47-53. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.110>
- Casas-Jiménez, P. M., Escudero-González, C. A., Martínez-Guerrero, T. Z., Mendoza-Díaz, M. del C., Ramírez-Borroso, C., Gutiérrez-Ortega, N. L., & Ramos-Ramírez, E. (2021). Procesos sustentables para la producción de biocombustibles: a review. *Jóvenes En La Ciencia*, 10, 1-15.  
<https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3454/2949>
- Cenis, J. B. (2019). *Determinación de monoglicéridos en biodiesel tipo ésteres metílicos de ácidos grasos mediante cromatografía de capa fina avanzada* [Tesis de Grado, Universidad de Zaragoza]. <https://zagan.unizar.es/record/87434/files/TAZ-TFG-2019-2664.pdf>

- Chuah, L. F., Klemeš, J. J., Yusup, S., Bokhari, A., & Akbar, M. M. (2017). A review of cleaner intensification technologies in biodiesel production. *Journal of Cleaner Production*, 146, 181-193. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.017>
- Comisión Nacional Para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2016). Derivados Del Petróleo. *Movilidad y transporte*, 1-4. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/241728/DieselFT.pdf>
- Cooper, N. S. (2020). Microwave ovens. En *Development of Packaging and Products for Use in Microwave Ovens* (Número 46, pp. 177-199). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102713-4.00004-9>
- Deepak, B., & Mohamed Ibrahim, M. (2023). Microemulsion fuel formulation from used cooking oil with carbinol as the dispersion phase. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 45(2), 4107-4126. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2202624>
- Dhingra, S., Bhushan, G., & Dubey, K. K. (2016). Validation and enhancement of waste cooking sunflower oil based biodiesel production by the trans-esterification process. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(10), 1448-1454. <https://doi.org/10.1080/15567036.2013.871610>
- Esteban Nieto, N. T. (2018). *Tipos de investigación* (pp. 1-4). Universidad Santo Domingo de Guzmán.
- Fadhil, A. B., & Ahmed, A. I. (2018). Production of mixed methyl/ethyl esters from waste fish oil through transesterification with mixed methanol/ethanol system. *Chemical*

- Engineering Communications*, 205(9), 1157-1166.  
<https://doi.org/10.1080/00986445.2018.1434514>
- Fedepalma, F. N. de C. de P. de A. (2023a). *Informe de Gestión Fedepalma 2022: Desempeño del sector palmero en 2022 y perspectivas 2023*. <https://fedepalma.org/wp-content/uploads/2023/06/6D26-Informe-Fedepalma-2022.pdf>
- Fedepalma, F. N. de C. de P. de A. (2023b). *Fedepalma*. <https://fedepalma.org/>
- Fernández Bao, S. (2020). *DISEÑO DE EXPERIMENTOS: DISEÑO FACTORIAL* [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña].  
[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/339723/TFM\\_Fernandez\\_Bao\\_Sheila.pdf?sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/339723/TFM_Fernandez_Bao_Sheila.pdf?sequence=1)
- Folayan, A. J., Anawe, P. A. L., & Ayeni, A. O. (2019). Synthesis and characterization of *Salicornia bigelovii* and *Salicornia brachiata* halophytic plants oil extracted by supercritical CO<sub>2</sub> modified with ethanol for biodiesel production via enzymatic transesterification reaction using immobilized *Candida antarctica*. *Cogent Engineering*, 6(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1625847>
- Francia Yanguas, R. (2015). *Identificación y cuantificación de isómeros posicionales del ácido palmitoleico (16:1n-7) en muestras biológicas por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas* [Trabajo de Grado, Universidad de Valladolid].  
<https://digital.csic.es/bitstream/10261/158288/1/TFGpalmitoleico.pdf>
- Fuller, R., Landrigan, P. J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., Caravanos, J., Chiles, T., Cohen, A., Corra, L., Cropper, M., Ferraro, G., Hanna, J., Hanrahan, D., Hu, H., Hunter, D., Janata, G., Kupka, R., Lanphear, B., ... Yan, C.

- (2022). Pollution and health: a progress update. *The Lancet Planetary Health*, 6(6), e535-e547. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0)
- Gad, M. S., Panchal, H., & Ağbulut, Ü. (2022). Waste to Energy: An experimental comparison of burning the waste-derived bio-oils produced by transesterification and pyrolysis methods. *Energy*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122945>
- García Jaimes, L. E. (2010). *Control Digital Teoría y Práctica* (3ra Edición).
- García Muentes, S. A., Lafargue Pérez, F., Labrada Vázquez, B., Díaz Velázquez, M., & Del Campo Lafita, A. E. S. (2018). Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 142-158. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-54212018000100012&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-54212018000100012&script=sci_arttext&tlng=en)
- García-Muentes, S. A., Sánchez del Campo-Lafita, A. E., Labrada-Vázquez, B., Lafargue-Pérez, F., & Díaz-Velázquez, M. (2018). Cinética de la reacción de transesterificación para la producción de biodiesel a partir del aceite de *Jatropha curcas* L., en la provincia de Manabí, Ecuador. *Tecnología Química*, 38(2), 281-297. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852018000200007](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200007)
- García-Núñez, J. A., Chaparro T., D. C., Ramírez C., N. E., Caballero B., K., Díaz, C. A., Cortés, I. L., Munar, D. A., González, A., Mondragón, A., Cala, S., Guerrero, A., Sierra, S., Albarracín, J. A., & Cuellar, M. (2022). Productividad y calidad de aceite, retos para el sector palmero colombiano. *Palmas*, 43(1), 64-75.

- Gonzalez-Diaz, A., García-Núñez, J. A., Cortes Barreto, I. L., Diaz Oviedo, J. S., & Dueñas Solarte, J. (2022). Indicadores composicionales en la química de los ácidos grasos en el aceite de palma. ¿Qué tan relevante es el índice de yodo? *Palmas*, 43(2), 26-39.
- Gutiérrez Escribano, L. J. (2018). *Estudio De Viabilidad Para Una Planta Productora De Biodiesel Y Metanol a Partir De Syngas* [Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales]. [https://www.itap.uva.es/wp-content/uploads/2019/04/TFG\\_01169.pdf](https://www.itap.uva.es/wp-content/uploads/2019/04/TFG_01169.pdf)
- Hassan, A. A., Alhameedi, H. A., & Smith, J. D. (2020). Using ethanol for continuous biodiesel production with trace catalyst and CO<sub>2</sub> co-solvent. *Fuel Processing Technology*, 203(September 2019), 106377. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106377>
- Hernández Paredes, J. M., Muñoz Barrón, B., & Rodríguez Abreo, O. (2019). Sistema de identificación paramétrica para motores de corriente directa. *La Mecatrónica en México*, 8(3), 115-130. <http://www.mecamex.net/revistas/LMEM/revistas/LMEM-V08-N03-02.pdf>
- Hernández Sánchez, M. J. (2021). *Predicción de densidad y viscosidad del biodiésel a partir de redes neuronales artificiales* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana]. <https://scholar.archive.org/work/dxrjftz2izg6dizzjrkmxnvntm/access/wayback/http://biandani.izt.uam.mx/downloads/5q47rn983>
- Herrera Susa, D. A. (2019). *Análisis experimental de la eficiencia de un motor monocilindrico funcionando con mezclas de diésel y biodiesel de palma* [Tesis de

Grado, Universidad Francisco de Paula Santander].

<https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/3395>

Hsiao, M.-C., Kuo, J.-Y., Hsieh, S.-A., Hsieh, P.-H., & Hou, S.-S. (2020). Optimized conversion of waste cooking oil to biodiesel using modified calcium oxide as catalyst via a microwave heating system. *Fuel*, 266(January), 117114.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117114>

Huang, R., Cheng, J., Qiu, Y., Li, T., Zhou, J., & Cen, K. (2015). Using renewable ethanol and isopropanol for lipid transesterification in wet microalgae cells to produce biodiesel with low crystallization temperature. *Energy Conversion and Management*, 105, 791-797. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.036>

Inayat, A., Ghani, C., Jamil, F., Alobaidli, A. S., Bawazir, H. M., & Ali, N. A. A. (2018). Biodiesel production from date seeds via microwave assisted technique. *2018 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA), 2018-Janua*, 61-63. <https://doi.org/10.1109/ICREGA.2018.8337617>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). World energy transitions outlook 2022. En *World Energy Transitions*. <https://irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022%0Ahttps://irena.org/publications/2021/March/World-Energy-Transitions-Outlook>

Iqbal, N., Sogan, N., Patanjali, N., Narayan Naik, S., Pant, M., & Dubey, S. (2019). Preparation of neem oil microemulsion using biodiesel waste for larvae control. *International Journal of Mosquito Research*, 6(1), 104-108.

- Jamoussi, B., Chakroun, R., & Al-Mur, B. (2022). Assessment of Total Petroleum Hydrocarbon Contamination of the Red Sea with Endemic Fish from Jeddah (Saudi Arabia) as Bioindicator of Aquatic Environmental Pollution. *Water (Switzerland)*, *14*(11). <https://doi.org/10.3390/w14111706>
- Jar-Jin, L., & Yu-Wen, C. (2017). Production of biodiesel by transesterification of Jatropha oil with microwave heating. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *75*, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.03.034>
- Jeevahan, J., Lakshmi Sankar, S., Karthikeyan, P., Sriram, V., & Britto Joseph, G. (2020). Comparative investigation of the effects of lower and higher alcohols/bio-diesel blends on engine performance and emissions characteristics of a diesel engine. *International Journal of Ambient Energy*, *41*(6), 652-658. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1484809>
- Kalinke, I., Kubbutat, P., Taghian Dinani, S., Ambros, S., Ozcelik, M., & Kulozik, U. (2022). Critical assessment of methods for measurement of temperature profiles and heat load history in microwave heating processes—A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *21*(3), 2118-2148. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12940>
- Kara, K., Ouanji, F., El Mahi, M., Lotfi, E. M., Kacimi, M., & Mahfoud, Z. (2021). Biodiesel synthesis from vegetable oil using eggshell waste as a heterogeneous catalyst. *Biofuels*, *12*(9), 1083-1089. <https://doi.org/10.1080/17597269.2019.1580972>
- Khan, I. A., Prasad, N., Pal, A., & Yadav, A. K. (2020). Efficient production of biodiesel from Cannabis sativa oil using intensified transesterification (hydrodynamic cavitation)

- method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 42(20), 2461-2470. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1607946>
- Khedri, B., Mostafaei, M., & Safieddin Ardebili, S. M. (2019a). A review on microwave-assisted biodiesel production. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 41(19), 2377-2395. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1563246>
- Khedri, B., Mostafaei, M., & Safieddin Ardebili, S. M. (2019b). Flow-mode synthesis of biodiesel under simultaneous microwave–magnetic irradiation. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(10), 2551-2559. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.03.010>
- Khuenkaeo, N., & Tippayawong, N. (2018). Bio-oil Production from Ablative Pyrolysis of Corncob Pellets in a Rotating Blade Reactor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 159(1), 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/159/1/012037>
- Lin, J.-J., & Chen, Y.-W. (2017). Production of biodiesel by transesterification of Jatropha oil with microwave heating. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 75, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.03.034>
- LIZARDI, A., LÓPEZ, R., TERRES, H., & RESENDIZ, O. (2016). Producción de biodiesel por cavitación hidrodinámica. *Revista de Sistemas Experimentales*, 3(9), 16-23. [www.ecorfan.org/bolivia](http://www.ecorfan.org/bolivia)
- López Aldea, E. (2016). *Arduino. Guía práctica de fundamentos y simulación* (RA-MA Editorial, Ed.).

<https://books.google.com.co/books?id=Wo6fDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

López Jiménez, S., & Rodríguez Cañón, D. M. (2017). *Situación socioambiental del biodiesel en Colombia* [Fundación Universidad de América].

<http://52.0.229.99/bitstream/20.500.11839/7124/1/787171-2017-I-GE.pdf>

Mani Rathnam, V., Modak, J. M., & Madras, G. (2020). Non-catalytic transesterification of dry microalgae to fatty acid ethyl esters using supercritical ethanol and ethyl acetate.

*Fuel*, 275(April), 117998. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117998>

Martinez-Guerra, E., & Gude, V. G. (2016). Alcohol effect on microwave-ultrasound enhanced transesterification reaction. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 101, 1-7.

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.12.003>

Marwaha, A., Rosha, P., Mohapatra, S. K., Mahla, S. K., & Dhir, A. (2019). Biodiesel production from *Terminalia bellerica* using eggshell-based green catalyst: An

optimization study with response surface methodology. *Energy Reports*, 5, 1580-1588.

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.022>

Mishra, V. K., & Goswami, R. (2018). A review of production, properties and advantages of biodiesel. *Biofuels*, 9(2), 273-289.

<https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1336350>

Mohammadi, N., Ostovar, N., Niromand, R., & Absalan, F. (2023). Advancing biodiesel production from *Pyrus glabra* seed oil: Kinetic study and RSM optimization via microwave-assisted transesterification with biocompatible hydroxyapatite catalyst.

*Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 36(April), 101272.

<https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101272>

- Nabi, M. N., & Rasul, M. G. (2018). Influence of second generation biodiesel on engine performance, emissions, energy and exergy parameters. *Energy Conversion and Management*, 169(May), 326-333. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.066>
- Nations United. (2015, diciembre 12). *Acuerdo de París*.  
[https://unfccc.int/files/meetings/paris\\_nov\\_2015/application/pdf/paris\\_agreement\\_spanish.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish.pdf)
- Nations United. (2022). *Trabajar en beneficio de las personas y el planeta / Naciones Unidas*. United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/cop27>
- Nayak, M. G., & Vyas, A. P. (2019). Optimization of microwave-assisted biodiesel production from Papaya oil using response surface methodology. *Renewable Energy*, 138, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.054>
- Nayak, S. N., Bhasin, C. P., & Nayak, M. G. (2019). A review on microwave-assisted transesterification processes using various catalytic and non-catalytic systems. *Renewable Energy*, 143, 1366-1387. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.056>
- Niayeshnia, P., Damavandi, M. R., & Gholampour, S. (2020). Classification, prioritization, efficiency, and change management of EPC projects in Energy and Petroleum industry field using the TOPSIS method as a multi-criteria group decision-making method. *AIMS Energy*, 8(5), 918-934. <https://doi.org/10.3934/ENERGY.2020.5.918>
- Nikkhah, A., Bagheri, I., Psomopoulos, C., Payman, S. H., Zareiforoush, H., El Haj Assad, M., Bakhshipour, A., & Ghnimi, S. (2023). Sustainable second-generation biofuel production potential in a developing country case study. *Energy Sources, Part A:*

- Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(3), 7785-7798.  
<https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1677805>
- Nomanbhay, S., & Ong, M. (2017). A Review of Microwave-Assisted Reactions for Biodiesel Production. *Bioengineering*, 4(2), 57.  
<https://doi.org/10.3390/bioengineering4020057>
- Odekanle, E. L., Bakut, C. B., Olalekan, A. P., Ogundokun, R. O., Aremu, C. O., Sonibare, J. A., Akande, O. T., Olayanju, A. T., & Fakinle, B. S. (2021). Assessment of the contribution of TEX air pollutants from Nigeria's petroleum refineries to the ambient air quality: Part II. *Cogent Engineering*, 8(1).  
<https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1947007>
- OMS. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire Resumen ejecutivo*. 1-16.
- Padovani, C. R. (2014). *Delineamento de Experimentos*. Cultura Acadêmica.  
<https://www.culturaacademica.com.br/catalogo/delineamento-de-experimentos/>
- Pandya, H. N., Parikh, S. P., & Shah, M. (2019). Comprehensive review on application of various nanoparticles for the production of biodiesel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(1), 1945-1958.  
<https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1648599>
- Parandi, E., Safaripour, M., Mosleh, N., Saidi, M., Rashidi Nodeh, H., Oryani, B., & Rezania, S. (2023). Lipase enzyme immobilized over magnetic titanium graphene oxide as catalyst for biodiesel synthesis from waste cooking oil. *Biomass and Bioenergy*, 173(April), 106794. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106794>

Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2021a). *Definición de escala - Qué es, Significado y*

*Concepto*. Definicion.de. <https://definicion.de/escala/>

Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2021b). *Definición de metodología - Qué es, Significado y*

*Concepto*. Definicion.de. <https://definicion.de/metodologia/>

Peters, Stefan. (2020). I can't live with or without you: Los desafíos de la transformación ambiental para las sociedades dependientes del petróleo. *Identidades*, 19, 41-58.

<https://ourworldindata.org/grapher/global-fossil-fuel-consumption>

Phromphithak, S., Meepowpan, P., Shimpalee, S., & Tippayawong, N. (2020).

Transesterification of palm oil into biodiesel using ChOH ionic liquid in a microwave heated continuous flow reactor. *Renewable Energy*, 154, 925-936.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.080>

Polo Rodriguez, L., Fontalvo Gomez, M. D. R., & Mendoza Meza, D. L. (2018).

Producción de biodiesel mediante transesterificación enzimática de aceite extraído de residuos de la industria de alimentos. *Prospectiva*, 16(1), 26-33.

<https://doi.org/10.15665/rp.v16i1.1164>

Prajapati, N., Oza, S., Kodgire, P., & Singh Kachhwaha, S. (2022). Microwave assisted

biodiesel production: Assessment of optimization via RSM techniques. *Materials*

*Today: Proceedings*, 57, 1637-1644. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.243>

Promraksa, A., Rakmak, N., & Schneider, P. A. (2023). Continuous flow extraction of

biodiesel produced in a packed-bed reactor using supercritical carbon dioxide and tetrahydrofuran as solvents. *Energy*, 280(May), 128244.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128244>

- Rafaj, P., Kiesewetter, G., Gül, T., Schöpp, W., Cofala, J., Klimont, Z., Purohit, P., Heyes, C., Amann, M., Borcken-Kleefeld, J., & Cozzi, L. (2018). Outlook for clean air in the context of sustainable development goals. *Global Environmental Change*, 53(August), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.008>
- Rajan, K., Rajaram Narayanan, M., Suresh Kumar, S., Parthasarathi, R., & Mohanavel, V. (2022). A detailed study on improving the properties and performance aspects of biodiesel. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 1949-1953. <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1725634>
- Ramírez Betancour, R., Valenzuela Murillo, F. A., Martínez Solís, F., Castañeda Hernández, C. E., Morfin Garduño, O. A., & Olmos Lopez, J. A. (2018). Control de velocidad de un motor de CD basado en mediciones de la corriente de armadura. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 19(4), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n4.039>
- Ramos-Galarza, C. A. (2020). Alcances de una investigación. *CienciAmérica*, 9(3), 1-6. <https://doi.org/10.33210/ca.v9i3.336>
- Real Academia Española [RAE]. (2014a). *Dieléctrico*. Diccionario de la lengua española. <https://dle.rae.es/dieléctrico>
- Real Academia Española [RAE]. (2014b). *Implementar*. Diccionario de la lengua española. <https://dle.rae.es/implementar>
- Real Academia Española [RAE]. (2014c). *Metodología*. Diccionario de la lengua española. <https://dle.rae.es/metodología?m=form>

- Real Academia Española [RAE]. (2014d). *Monitorear*. Diccionario de la lengua española.  
<https://dle.rae.es/monitorear?m=form>
- Real Academia Española [RAE]. (2014e). *Sistema*. Diccionario de la lengua española.  
<https://dle.rae.es/sistema?m=form>
- Reséndiz-Vega, M., Mendoza-Schroeder, R., & Bravo-López, P. (2019). Biodiesel & combustóleo, alternativa sostenible. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 6(11), 16-19. <https://doi.org/10.29057/estr.v6i11.3820>
- Rincón-Romero, V. O., Molina-Villarreal, A., Zabala-Quimbayo, A., Barrera-Agudelo, O. R., & Luis, T.-L. J. (2023). El catastro de la palma de aceite en Colombia. *Palmas*, 44(2), 8-24.  
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/14003/13888>
- Rocha, P. D., Oliveira, L. S., & Franca, A. S. (2019). Sulfonated activated carbon from corn cobs as heterogeneous catalysts for biodiesel production using microwave-assisted transesterification. *Renewable Energy*, 143, 1710-1716.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.070>
- Rodriguez, G., & Beckman, E. J. (2020). Modelling phase behavior of triglycerides, diglycerides and monoglycerides related to biodiesel transesterification in mixtures of alcohols and CO<sub>2</sub> using a polar version of PC-SAFT. *Fluid Phase Equilibria*, 503, 112303. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2019.112303>
- Rojas Reyes, N. R., Alvarez Gil, L. C., & Guerra Sandoval, J. (2017). Diseño factorial 2k aplicado a la caracterización reológica de suspensiones de caolín. *Prospectiva*, 16(1), 18-25. <https://doi.org/10.15665/rp.v16i1.1115>

- Rokni, K., Mostafaei, M., Dehghani Soufi, M., & Kahrizi, D. (2022a). Microwave-assisted intensification of transesterification reaction for biodiesel production from camelina oil: Optimization by Box-Behnken Design. *Bioresource Technology Reports*, 17(November 2021), 100928. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100928>
- Rokni, K., Mostafaei, M., Dehghani Soufi, M., & Kahrizi, D. (2022b). Microwave-assisted intensification of transesterification reaction for biodiesel production from camelina oil: Optimization by Box-Behnken Design. *Bioresource Technology Reports*, 17(November 2021), 100928. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100928>
- Saavedra, R. M., García, H. J., Sánchez de Pinto, M. I., & Baigorí, M. D. (2019). Biodiesel a partir de aceite usado de locales gastronómicos: efecto de la temperatura de reacción. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 5, 320. <https://doi.org/10.30972/eitt.503767>
- Saka, S., & Kusdiana, D. (2001). Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel*, 80(2), 225-231. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00083-1)
- Salamanca Izaguirre, K. J., Villanueva Vega, E., Ocampo, R. V., Armendáriz, O. D., & Sánchez Díaz, M. R. (2021). Aceites potenciales para la generación de biodiésel. *Revista Ingeniantes*, 2(2), 36-45. [https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes8no2vol2/5 Aceites potenciales para la generación de biodiésel.pdf](https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes8no2vol2/5%20Aceites%20potenciales%20para%20la%20generaci%C3%B3n%20de%20biodi%C3%A9sel.pdf)

- Samboko, P. C., Kabisa, M., & Henley, G. (2019). Constraints to biofuel feedstock production expansion in Zambia. *Development Southern Africa*, 36(2), 198-212. <https://doi.org/10.1080/0376835X.2018.1508988>
- Sami, S. S., Obaid, Z. A., Muhssin, M. T., & Hussain, A. N. (2021). Detailed modelling and simulation of different dc motor types for research and educational purposes. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 12(2), 703-714. <https://doi.org/10.11591/IJPEDS.V12.I2.PP703-714>
- Sanaguano Salguero, H., Bayas Morejón, F., & Cabrera Carranza, C. (2019). Componentes presentes en el aceite de fritura usado y determinantes previos a su conversión en biodiesel. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 22(44), 33-38. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v22i44.17283>
- Sánchez Calderón, L. A. (2016). *Reacción de producción de biodiésel de soya catalizada por óxidos metálicos* [Tesis de Grado, Universidad San Francisco de Quito]. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/6018>
- Sánchez-Arreola, E., Bach, H., & Hernández, L. R. (2019). Biodiesel production from *Cascabela ovata* seed oil. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100220. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2019.100220>
- Soltani, S., Rashid, U., Yunus, R., & Taufiq-Yap, Y. H. (2015). Synthesis of Biodiesel through Catalytic Transesterification of Various Feedstocks using Fast Solvothermal Technology: A Critical Review. *Catalysis Reviews - Science and Engineering*, 57(4), 407-435. <https://doi.org/10.1080/01614940.2015.1066640>

- Souza, L. T. A., Mendes, A. A., & Castro, H. F. de. (2016). Selection of Lipases for the Synthesis of Biodiesel from Jatropha Oil and the Potential of Microwave Irradiation to Enhance the Reaction Rate. *BioMed Research International*, 2016, 1-13.  
<https://doi.org/10.1155/2016/1404567>
- Sridhar, L. N., & Kazi, S. (2022). Multiobjective non linear model predictive control of transesterification and lipid oil production. *Biofuels*, 13(7), 885-894.  
<https://doi.org/10.1080/17597269.2021.2008201>
- Thirugnanasambandham, K., Shine, K., Agatheeshwaren, A., & Sivakumar, V. (2016). Biodiesel production from castor oil using potassium hydroxide as a catalyst: Simulation and validation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(19), 2898-2905.  
<https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1179363>
- Thirugnanasambandham, K., & Sivakumar, V. (2015). Investigation on biodiesel production from cotton seed oil using microwave irradiated transesterification process. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(4), 1229-1235.  
<https://doi.org/10.1002/ep.12094>
- Tobar, M., & Núñez, G. A. (2018). Supercritical transesterification of microalgae triglycerides for biodiesel production: Effect of alcohol type and co-solvent. *Journal of Supercritical Fluids*, 137(November 2017), 50-56.  
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.03.008>

- Tran, D. T., Chang, J. S., & Lee, D. J. (2017). Recent insights into continuous-flow biodiesel production via catalytic and non-catalytic transesterification processes. *Applied Energy*, *185*, 376-409. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.006>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2020). Plan Energético Nacional 2020-2050. En *Plan Energético Nacional 2020-2050*. [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN\\_2020\\_2050/Plan\\_Energetico\\_Nacional\\_2020\\_2050.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf)
- Vallejo-Rosero, Y., Barrios-Correa, L., & Anaya-Gil, J. (2021). La cromatografía en capa fina: una alternativa vigente en la industria farmacéutica. *Revista de Química*, *35*(2), 19-25. <https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes8no2vol2/5 Aceites potenciales para la generación de biodiésel.pdf>
- Wang, L., Wang, H., Fan, J., & Han, Z. (2023). Synthesis, catalysts and enhancement technologies of biodiesel from oil feedstock – A review. *Science of The Total Environment*, *904*(August), 166982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166982>
- Waudby, H., & Zein, S. H. (2021). A circular economy approach for industrial scale biodiesel production from palm oil mill effluent using microwave heating: Design, simulation, techno-economic analysis and location comparison. *Process Safety and Environmental Protection*, *148*, 1006-1018. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.02.011>
- Wong, S. F., Tiong, A. N. T., & Chin, Y. H. (2023). Pre-treatment of waste cooking oil by combined activated carbon adsorption and acid esterification for biodiesel synthesis via two-stage transesterification. *Biofuels*, *0*(0), 1-11. <https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2196804>

- Wulandani, D., & Ibrahim, Z. A. (2022). Design and performance test of biodiesel reactor using hellical screw agitator and baffles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1038(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1038/1/012024>
- Zamberi, M. M., Haminudin, N. F., Ani, F. N., Said, M. F. M., Bakri, H., & Anuar, F. S. (2021). Conversion of Crude Hevea brasiliensis Oil to Biodiesel Utilizing Perna viridis Waste Shells as Solid Catalysts. *Proceedings of the 2nd International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2021)*, 207(Issat), 498-504. <https://doi.org/10.2991/aer.k.211106.078>
- Zhang, C., Zhu, H. C., Hong, T., & Huang, K. M. (2016). Multiphysics modeling on continuous production of biodiesel. *2016 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*, 75-77. <https://doi.org/10.1109/COMPEM.2016.7588579>
- Zhang, M., Ramya, G., Brindhadevi, K., Alsehli, M., Elfasakhany, A., Xia, C., Lan Chi, N. T., & Pugazhendhi, A. (2022). Microwave assisted biodiesel production from chicken feather meal oil using Bio-Nano Calcium oxide derived from chicken egg shell. *Environmental Research*, 205(November 2021), 112509. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112509>

### 13. Anexos

#### Anexo 1: Proceso de fabricación del banco de pruebas



**Figura 67.** *Fabricación del banco de pruebas.*

#### Anexo 2: Proceso de producción

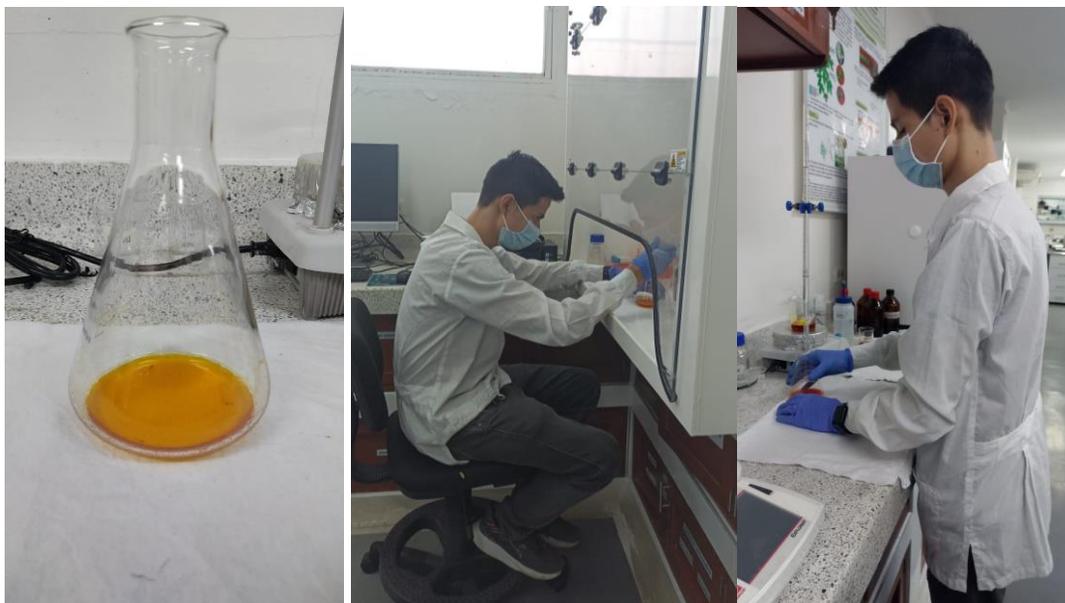


**Figura 68.** *Etapa de producción y separación del biodiesel y la glicerina.*

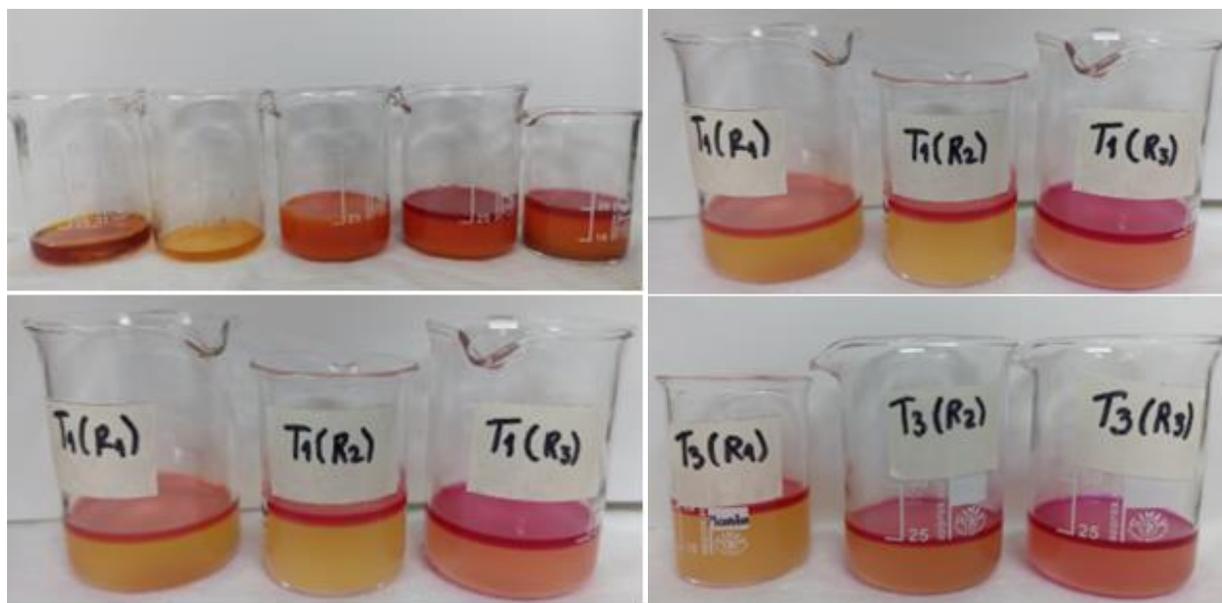
#### Anexo 3: Proceso de caracterización del biodiesel



**Figura 69.** Prueba de densidad: aceite y biodiesel.



**Figura 70.** Índice de acidez: titulación.

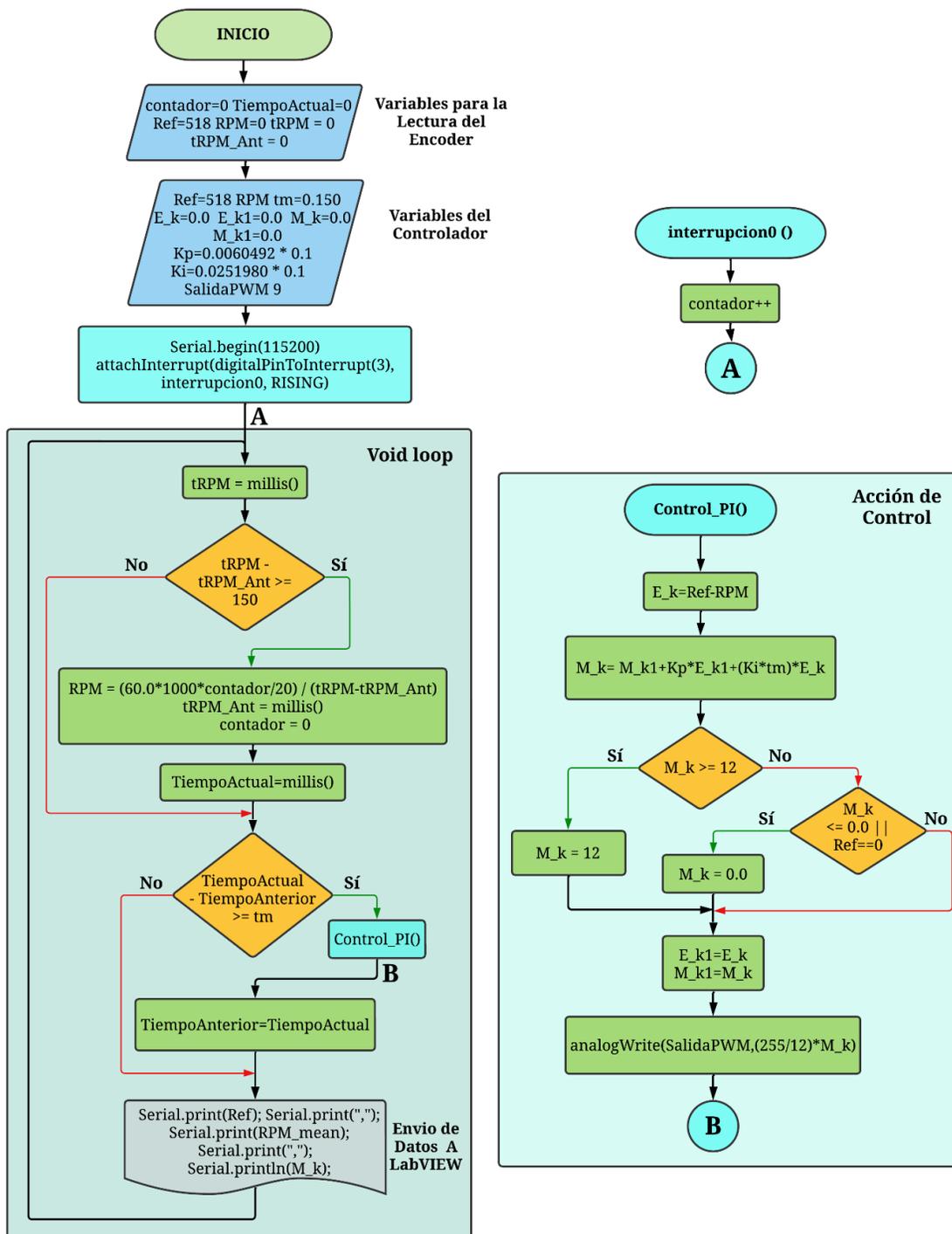


**Figura 71.** Índice de acidez: tratamientos titulados con viraje de color en cada repetición.



**Figura 72.** Índice de Yodo.

### Anexo 4: Control de velocidad del agitador mecánico



**Figura 73.** Esquema en diagrama de flujos de la programación del control PI discreto del agitador mecánico.

Anexo 5: Divulgación científica del proyecto de investigación

LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
Y  
LA UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA

CERTIFICAN QUE

**WILSON NORBEY ROMANO  
TORRES**

Participó como **PONENTE** en el **II CONGRESO INTERNACIONAL EN INGENIERÍA AMBIENTAL**, que se desarrolló del 29 al 31 de marzo del año 2023 en San José de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia, con el trabajo de investigación titulado "ENFOQUE DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL: METODOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ETANOL Y KOH MEDIANTE HIDRODESTILACIÓN ASISTIDA POR MICROONDAS A TRAVÉS DE UN MODELO MATEMÁTICO DE LA CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN".

*Dorance Becerra M.*

DORANCE BECERRA MORENO  
DIRECTOR PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL,  
UFPS

*Victor Fabian Forero*

VICTOR FABIÁN FORERO  
LÍDER NACIONAL DE LA CADENA DE FORMACIÓN  
AMBIENTAL, UNAD





**CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC EMPLEADO COMO AGITADOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL POR RADIACIÓN DE MICROONDAS.**  
**SPEED CONTROL OF A DC MOTOR USED AS A STIRRER FOR MICROWAVE RADIATION BIODIESEL PRODUCTION.**

Wilson Norbey Romano Torres<sup>1</sup>, José Ricardo Bermúdez Santaella<sup>2</sup>, Daniel Andrey Herrera Susa<sup>3</sup>

1. Estudiante de Ingeniería Electromecánica, Universidad Francisco De Paula Santander, Programa de Ingeniería Electromecánica, Grupo de Investigación en Desarrollo de Procesos Industriales (GIDPI), <https://orcid.org/0009-0009-6538-9399>, San José de Cúcuta, Colombia., [wilsonnorbeyrt@ufps.edu.co](mailto:wilsonnorbeyrt@ufps.edu.co)
2. Maestría en Automatización e Instrumentación, Universidad Francisco De Paula Santander, Departamento de Electricidad y Electrónica, Grupo De Investigación En Desarrollo De Procesos Industriales (GIDPI), <https://orcid.org/0000-0001-9265-0083>, San José de Cúcuta, Colombia, [joserocardobs@ufps.edu.co](mailto:joserocardobs@ufps.edu.co)
3. Maestría en Ingeniería Mecánica, Universidad Federal de Uberlândia, Laboratorio de Energía, Sistemas Térmicos y Nanotecnología LEST-NANO, <https://orcid.org/0000-0002-2710-7778>, Uberlândia, MG - Brasil, [daniel.susa@ufu.br](mailto:daniel.susa@ufu.br)

**Resumen:**

El biodiesel como biocombustible presenta características similares a las del diésel fósil, su fabricación se realiza por ruta química de transesterificación, en donde se emplean como principales materias primas; los aceites de origen vegetal, grasas de origen animal, alcoholes de cadena corta etanol y metanol, una problemática es, la baja miscibilidad entre estas sustancias aun con la presencia de un catalizador, la transferencia de masa entre los reactivos se desarrolla de forma lenta, ocasionando que la velocidad de la reacción disminuya y aumenten los tiempos de producción; como solución se emplean agitadores con el objetivo de aumentar la miscibilidad y conseguir un mezclado homogéneo entre las materias primas. En este contexto, los dispositivos de agitación deben trabajar bajo condiciones de velocidad y régimen de flujo específicas, con el fin de garantizar una mezcla homogénea facilitando la reacción de transesterificación. Razón por la cual, en el presente trabajo se desarrolló el control de velocidad de un motor DC empleado como agitador mecánico en un prototipo de producción de biodiesel a través de radiación de microondas, con la finalidad de mantener constantes las características de agitación sin importar los cambios ocasionados por perturbaciones externas bajo condiciones reales de operación. La metodología de diseño e implementación del sistema de control, parte inicialmente con el desarrollo del modelo matemático del motor DC, el cual fue validado empleando el software Simulink® a partir de los datos experimentales obtenidos del motor en físico. Seguidamente, se realizó la sintonización de las constantes del controlador y se implementó la estrategia de control en un dispositivo digital. Finalizando con el desarrollo de una interfaz de monitoreo en LabVIEW para la visualización de las variables importantes durante el proceso de reacción, entre ellas la velocidad del agitador.

**Palabras clave:** Biodiesel, Agitación, Motor DC, Modelo matemático, Estrategia de Control.

**Abstract:** Biodiesel, as a biofuel, exhibits similar characteristics to fossil diesel. Its production is carried out through the chemical process of transesterification, using key raw materials such as vegetable oils, animal fats, and short-chain alcohols like ethanol and methanol. One challenge is the low miscibility among these substances even in the presence of a catalyst, resulting in slow mass transfer between the reactants. This leads to reduced reaction rates and prolonged production times. To address this, agitators are employed to enhance miscibility and achieve homogeneous mixing of the raw materials. In this context, agitation devices need to operate under specific speed and flow conditions to ensure uniform mixing, thus facilitating the transesterification reaction. Therefore, this study focuses on developing speed control for a DC motor used as a mechanical agitator in a biodiesel production prototype, achieved through microwave radiation. The goal is to maintain consistent agitation characteristics despite external disturbances in real operating conditions. The design and implementation methodology for the control system begins with developing the mathematical model of the DC motor. This model was validated using Simulink® software, based on experimental data obtained from the physical motor. Subsequently, controller

Ciencia e Ingeniería Neogranadina

## **DINÁMICA DE UN AGITADOR MECÁNICO PARA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL**

### **DYNAMICS OF A MECHANICAL STIRRER FOR BIODIESEL PRODUCTION**

Wilson Norbey Romano Torres

Grupo de Investigación en Desarrollo de Procesos Industriales (GIDPI), Universidad Francisco de  
Paula Santander  
Cúcuta, Colombia,  
wilsonnorbeyrt@ufps.edu.co  
ORCID: 0009-0009-65389399

José Ricardo Bermúdez Santaella

Grupo de Investigación en Desarrollo de Procesos Industriales (GIDPI), Universidad Francisco de  
Paula Santander  
Cúcuta, Colombia,  
joserocardobs@ufps.edu.co  
ORCID: 0000-0001-9265-0083

Daniel Andrey Herrera Susa

Laboratorio de Energía, Sistemas Térmicos y Nanotecnología LEST-NANO, Universidad de  
Federal de Uberlândia  
Uberlândia, MG - Brasil,  
daniel.susa@ufu.br  
ORCID: 0000-0002-2710-7778

#### **RESUMEN**

Una problemática presente en la producción de biodiesel por transesterificación es la baja miscibilidad entre el aceite vegetal y el alcohol. Aun con la presencia de un catalizador, la transferencia de masa entre los reactivos se desarrolla de forma lenta, ocasionando que la velocidad de la reacción disminuya y aumenten los tiempos de producción; como solución se emplean agitadores para aumentar la miscibilidad y conseguir un mezclado homogéneo entre las materias primas. En este contexto, los dispositivos de agitación deben trabajar bajo condiciones de velocidad y régimen de flujo específicas, con el fin de garantizar una mezcla homogénea facilitando la reacción de transesterificación. Razón por la cual, en el presente trabajo se desarrolló el control de velocidad de un agitador mecánico en un prototipo de producción de biodiesel a través de radiación de microondas. La

ISSN: 0124-8170 | e-ISSN: 1909-7735