

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

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): JOSÉ LEONARDO APELLIDOS: MENESES DURAN

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): MODELO MATEMÁTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DE PALMA AFRICANA (*elaeis guineensis*) POR HIDRODESTILACIÓN ASISTIDA POR RADIACIÓN DE MICROONDAS.

La transesterificación es un proceso químico donde se hace reaccionar un aceite rico en triglicérol (que puede tener impurezas y/o características indeseadas como material particulado, humedad, alta acidez y ácidos grasos libres), en este caso, de origen vegetal (aceite de palma), con un alcohol, en presencia de un catalizador, para así obtener ésteres metílicos o etílicos (biodiesel) dependiendo del alcohol usado, glicerol (subproducto que queda de la descomposición del triglicérol) y sales neutralizadas (subproducto que queda de la reacción de los agentes reactivos con los ácidos grasos libres). En este proyecto se presenta el desarrollo del modelo matemático discontinuo o batch, que define la dinámica del proceso de transesterificación de los ácidos grasos del aceite de palma mediante una catálisis homogénea alcalina dentro un matraz, a partir del método de hidrodestilación asistida por radiación de microonda para la producción de biodiesel buscando optimizar los tiempos y costos de producción del mismo que son los principales retos en la actualidad.

PALABRAS CLAVES: Biodiésel, Hidrodestilación, Microondas, Modelo Matemático, Palma africana

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 100 PLANOS: _____ ILUSTRACIONES: _____ CD ROOM: _____

MODELO MATEMÁTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DE PALMA
AFRICANA (*elaeis guineensis*) POR HIDRODESTILACIÓN ASISTIDA POR RADIACIÓN
DE MICROONDAS

JOSÉ LEONARDO MENESES DURAN

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023

MODELO MATEMÁTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DE PALMA
AFRICANA (*elaeis guineensis*) POR HIDRODESTILACIÓN ASISTIDA POR RADIACIÓN
DE MICROONDAS

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTROMECÁNICO

JOSÉ LEONARDO MENESES DURAN

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 ELECTROMECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023



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

FECHA: 19 de mayo de 2023

HORA: 08:00 a.m.

LUGAR: LE 205 Ufps

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TITULO DEL TRABAJO DE GRADO: "MODELO MATEMÁTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DE PALMA AFRICANA (*ELAEIS GUINEENSIS*) POR HIDRODESTILACIÓN ASISTIDA POR RADIACIÓN DE MICROONDAS".

JURADOS Msc: CRISTIAN LEONARDO TARAZONA CELIS
Dph: FRANCISCO ERNESTO MORENO GARCÍA

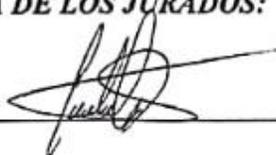
DIRECTOR: Mg: JOSE RICARDO BERMUDEZ SANTAELLA

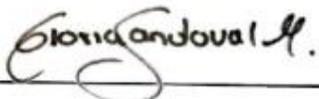
CODIRECTOR: Ing: DANIEL ANDREY HERRERA SUSANA.

APROBADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CÓDIGO	CALIFICACION
JOSÉ LEONARDO MENESES DURAN	1091164	4.4

FIRMA DE LOS JURADOS:



VOBO. COORDINADOR COMITÉ CURRICULAR 

Magdalena Ch.

DEDICATORIA.

Al principio de causalidad.

Si no fuera por esa simple ley formulada por Dios, no habría podido transformar un

tornillo en un Ferrari.

A todos los libros de aquella vieja biblioteca.

A la voluntad de mi Madre.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
INGENIERÍA CONCEPTUAL	15
1. Descripción del problema	16
1.1 Título	16
1.2 Planteamiento del problema	16
1.3 Formulación del problema	17
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos Específicos	18
1.5 Justificación	18
2. Marco referencial	20
2.1 Antecedentes	20
2.2 Marco teórico	21
2.2.1 Biodiesel	21
2.2.1.1 Ventajas del biodiesel	21
2.2.1.2 Desventajas del biodiesel	22
2.2.2 Procesos Industriales	23
2.2.2.1 Procesos discontinuos	23
2.2.2.2 Procesos continuos	24
2.2.3 Radiación de microondas	25
2.2.3.1 Aplicación de la radiación microondas	26
2.2.3.2 Calentamiento por microondas	26
2.2.4 Transesterificación	27

2.2.4.1	Modelo matemático del sistema de transesterificación	28
2.2.4.2	Cinética de la reacción	29
2.2.5	Estrategias de control	30
2.2.5.1	Control clásico	31
2.2.5.2	Control adaptativo	31
2.2.5.3	Control inteligente	31
2.3	Marco Conceptual	32
2.4	Marco legal	33
3.	Diseño metodológico	33
3.1	Tipo de investigación	33
3.1.1	Alcances	34
3.1.2	Delimitaciones	34
3.1.2.1	Delimitación temporal.	34
3.1.2.2	Delimitación conceptual.	35
3.2	Actividades y Metodologías	35
3.2.1	Objetivo 1. Contextualizar los diferentes procesos de producción de biodiesel.	35
3.2.2	Objetivo 2. Implantar el modelo matemático de la producción de biodiesel por el método de radiación por microondas utilizando la herramienta Matlab-Simulink.	35
3.2.3	Objetivo 3. Diseñar la estrategia de control de temperatura para el proceso de transesterificación que produce biodiesel, utilizando la herramienta Matlab-Simulink.	36
3.3	Técnica de recolección de datos	36
	INGENIERÍA BÁSICA	37
4.	Desarrollo del modelo matemático y los procesos que los componen	38
4.1	Recopilar la información secundaria de las bases de datos especializados.	38
4.1.1	Transesterificación	39
4.1.2	Esterificación	39

4.1.3	Pirolisis o termoconversión	40
4.1.4	Gasificación	40
4.1.5	Procesos supercríticos	40
4.1.6	Radiación Microondas	41
4.2	Contextualizar la información con referencia a los modelos matemáticos en producción de biodiesel por radiación de microondas.	41
4.3	Clasificar los tipos de modelos matemáticos existentes disponibles en la literatura.	42
4.3.1	Modelos cinéticos	42
4.3.2	Modelos de reactor	43
4.3.3	Modelos de transferencia de calor	43
4.3.4	Modelos de mezcla y separación	43
4.3.5	Modelos electromagnéticos	44
4.3.6	Modelos de optimización	44
4.4	Estructurar el modelo matemático adecuado para el proyecto.	45
4.5	Determinar las variables de estudio del fenómeno dinámico	45
4.5.1	Consideraciones Generales	45
4.5.2	Variables que afectan el proceso	46
4.5.3	Nomenclatura	47
4.5.4	Balance de masa, movimiento y energía	48
4.5.4.1	Balance de masa	49
4.5.4.2	Balance de energía	49
4.5.5	Cinética de la Reacción	50
4.5.6	Análisis Molar	51
4.6	Descripción del modelo matemático del sistema	56
4.7	Descripción del modelo matemático – transesterificación – constantes de velocidad cinética – hallar la energía de activación	57

4.7.1	Transesterificación	57
4.7.2	Transesterificación de los triglicéridos	57
4.7.3	Transesterificación de los diglicéridos	58
4.7.4	Transesterificación de los monoglicéridos	58
4.7.5	Generación de los esteres metflicos o moléculas de biodiesel	58
4.7.6	Generación de la glicerina	59
4.7.7	Velocidad cinética de reacción de transesterificación	59
4.7.8	Ecuación de la velocidad cinética de reacción en función de la velocidad de agitación y propiedades del aceite	60
4.7.9	Reducción del alcohol	61
4.7.10	Obtención de las energías de activación del sistema	61
4.8	Implantar el modelo matemático en Simulink.	62
4.9	Obtener las curvas de las variables de medición características del sistema de producción.	68
4.9.1	Producción de los esteres	68
4.9.2	Consumo del triglicérido	69
4.9.3	Consumo de los diglicéridos, monoglicéridos y generación de glicerina	71
4.9.4	Consumo del alcohol etílico	72
4.9.5	Comparativa de producción de biodiesel, glicerina y consumo del triglicérido	73
4.9.6	Comparativa de producción de biodiesel y glicerina	75
INGENIERÍA DE DETALLE		76
5.	Diseñar estrategias de control para el gobernador del proceso de producción.	77
5.1	Sistema de control en lazo cerrado	77
5.1.1	Punto de referencia	77
5.1.2	Configuraciones del controlador	78
5.1.3	Planta	80

5.1.4	Transmisor	80
5.2	Sintonización de controladores	80
5.3	Clasificar los resultados obtenidos con base en la estrategia de control y el margen de estabilidad del proceso en los escenarios simulados.	82
5.3.1	Respuesta de la reacción de producción de biodiesel	82
5.3.2	Tiempos de estabilización e índices de desempeño de las diferentes estrategias de control	83
5.3.3	Constantes de los controladores sintonizados	83
5.3.4	Respuesta del actuador	84
5.3.5	Respuesta del sistema ante una reducción del 20% de la temperatura	85
5.3.6	Respuesta del sistema ante un aumento del 20% de la temperatura	86
6.	Conclusiones	87
7.	Recursos Financieros	88
7.1	Presupuesto global	88
7.2	Gastos en personal	88
7.3	Gastos en Equipos	88
7.4	Gastos en servicios técnicos	89
7.5	Materiales e insumos	89
8.	Referencias	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Método de producción discontinua tipo batch usando microondas	24
Figura 2. Método de producción continúa usando microondas	25
Figura 3. Espectro electromagnético	26
Figura 4. Distribución de temperatura por calentamiento por microondas vs convencional	27
Figura 5. Control PID de una planta	31
Figura 6. Esfera hipotética representando los elementos de manera diferencial.	54
Figura 7. Representación de entradas y salidas de la plata del proceso de transesterificación	63
Figura 8. Transesterificación de los triglicéridos	64
Figura 9. Transesterificación de los diglicéridos	64
Figura 10. Transesterificación de los monoglicéridos	65
Figura 11. Transesterificación de la glicerina	65
Figura 12. Generación de los esteres o biodiesel	66
Figura 13. Consumo del alcohol etanol	66
Figura 14. Ecuación de velocidad cinética de reacción	67
Figura 15. Ecuación de Reynolds	67
Figura 16. Sistema de ecuación que integran todo el proceso de transesterificación	68
Figura 17. Curva de producción de esteres	68
Figura 18. Curva de consumo del triglicérido para formar diglicéridos y esteres	69
Figura 19. Curvas de la dinámica de consumo y generación de los glicéridos	71
Figura 20. Curva del consumo del alcohol para formar moléculas de esteres	72
Figura 21. Comparativa de producción de biodiesel a favor del consumo de alcohol etílico, los triglicéridos y sus derivados	73

Figura 22. Comparativa de producción de biodiesel a favor del consumo de alcohol etílico, los triglicéridos y sus derivados	75
Figura 23. Respuesta Natural del sistema	81
Figura 24. Diagrama de bloques control tradicional	81
Figura 25. Ventana de parámetros de función de bloque, Simulink	82
Figura 26. Respuesta de la temperatura de la planta ante los diferentes controladores	82
Figura 27. Comportamiento del actuador de acuerdo al controlador implementado	84
Figura 28. Respuesta del sistema con una disminución del 20% de la temperatura	85
Figura 29. Respuesta del sistema con un aumento del 20% de la temperatura	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nomenclatura utilizada.	47
Tabla 2. Análisis Molar para el proceso de transesterificación.	52
Tabla 3. Análisis Molar del aceite de palma.	52
Tabla 4. Propiedades del aceite de palma.	52
Tabla 5. Propiedades del etanol.	52
Tabla 6. Constante de velocidad cinética.	60
Tabla 7. Energías de activación.	62
Tabla 8. Parámetros para la simulación del Sistema	62
Tabla 9. Tiempos de estabilización e indicadores de desempeño de los diferentes controladores	83
Tabla 10. Constantes de los controladores sintonizados a través del PID Tune	83
Tabla 11. Presupuesto global (en COP).	88
Tabla 12. Gastos en personal (en COP).	88
Tabla 13. Gastos en equipos (en COP).	88
Tabla 14. Viáticos (en COP).	89
Tabla 15. Materiales e insumos (en COP).	89

Introducción

Los combustibles de origen fósil le han dado a la humanidad la oportunidad de desarrollar la civilización hasta el punto de ser consciente de su propia naturaleza y universo que lo rodea, ha promovido el avance de culturas y ha dado una calidad de vida al ser humano que ha experimentado a lo largo de toda su historia (Feal Vázquez, 2007). Sin embargo, la ventaja energética de los combustibles ha generado una contraprestación que con el tiempo se hace cada vez más urgente. Cantidad de muertos por cáncer pulmonar, calentamiento global, derretimiento de los casquetes polares y el aumento de los mares, son los efectos adversos que ha generado el uso excesivo de estos combustibles que han alarmado a los científicos e industrias de encontrar alternativas sostenibles antes de que los combustibles fósiles se agoten y con ello, empiece el declive del avance de la civilización humana (Peters S., 2020; Rodríguez, 2017; Solá et al., 2018; Cristina et al., 2018).

Como alternativa para la sustitución y mitigación de los combustibles fósiles se presenta el biodiesel como una solución efectiva para tender el camino al desarrollo sostenible del planeta (Borges et al., 2018), no obstante, los métodos para su producción generan un producto costoso y poco rentable, ya que dependen de la producción de las materias primas (mayormente plantas oleaginosas) que son afectadas por factores climáticos y los métodos para su producción tiene grandes pérdidas considerando las producciones industriales (Zhang et al., 2016).

De esta manera, este proyecto tiene como principal propósito el desarrollo de un modelo matemático que defina un estudio integral sobre una de las más limpias y efectivas formas de producir biodiesel incrementando los rendimientos y disminuyendo los tiempos de producción, que es el método de radiación por microondas.

El modelo matemático será estudiado a través de la herramienta Matlab/Simulink, para así determinar con la manipulación de sus variables una estrategia de control, que con su implementación prometa en el futuro, el diseño de un prototipo de producción continua de biodiesel que de importancia a la producción de este biocombustible en un producto viable, rentable y sostenible.

Se resalta aquí, la importancia que tiene el desarrollo de metodologías de producción de biodiesel en la región Nortesantandereana, al ser uno de los Departamentos con mayor producción de aceite de palma (*elaeis guineensis*) del país y así mismo, Colombia, como el primero en producción de esta materia prima en Suramérica y el cuarto a nivel mundial, otorgando así un liderazgo de carácter económico con repercusiones mundialmente importantes (Nuñez Rodríguez, 2017).

INGENIERÍA CONCEPTUAL

1. Descripción del problema

1.1 Título

Modelo matemático para la producción de biodiesel de palma africana (*elaeis guineensis*) por radiación de microondas.

1.2 Planteamiento del problema

El uso excesivo de los combustibles de origen fósil ha aumentado la demanda energética a escala global, causando al medio ambiente efectos altamente negativos (Feal Vázquez, 2007). Este factor ha generado alertas entre los científicos e industrias en todo el mundo para encontrar alternativas sustentables que mitiguen y reemplacen estos combustibles (Rocha, 2015). Los cuales, que además de ser contaminantes, sus reservas son limitadas y cada vez son más difíciles de extraer, lo cual aumenta los costos de producción (Sierra Sánchez, 2020) .

Por otra parte, países como China, India, Estados Unidos e Indonesia, que son respectivamente los 4 países más poblados del mundo, están cubiertos de contaminación en niveles considerados apocalípticos (Connelly, 2015; Licona Michel & Ramírez Zamudio, 2014; Reyes et al., 2016) (Madsen, 2015). Estos efectos medio ambientales tampoco son ajenos al territorio colombiano que año tras año son cada vez más graves (Reyes et al., 2016). En detalle, las emisiones de dióxido de azufre, dióxido y monóxido de carbono que son los emitidos al aire a causa de la quema de los combustibles fósiles, son los principales componentes que han motivado al mundo a la búsqueda, estudio y desarrollo de metodologías para reemplazar a estos combustibles dañinos y nocivos (Rocha, 2015).

Como solución inmediata a estas problemáticas, se plantea el uso del biodiesel como alternativa energética, que actualmente está dando excelentes resultados y está contribuyendo al desarrollo sostenible del planeta, sin embargo, aunque esté presentado impactos positivos en todo

el mundo en términos ambientales, técnicos y económicos, su producción en muchos aspectos presenta problemas como la dependencia de los índices de productividad agrícola (ya que las materias primas suelen tender a la alza por variables climáticas, económicas y dependencias técnicas del agricultor), el proceso de producción industrial suele ser ineficiente debido al tiempo y a las grandes pérdidas energéticas en los reactores por el calentamiento con resistencias, posee menor poder calorífico que el diésel fósil y en condiciones de bajas temperaturas suele ser inadecuado para su uso (Resendiz Vega et al., 2019).

Por esto se hace necesario la investigación en el desarrollo de metodologías que presenten mejores eficiencias y rendimientos para la producción de biodiesel que cumplan con los estándares de calidad nacional e internacional, y así mismo, impulsar la economía nortesantandereana que es reconocida como uno de los principales productores de palma africana (*elaeis guineensis*, materia prima para la producción de biodiesel) en el país y en el mundo, siendo esto una ventaja altamente competitiva para la proyección económica departamental en términos de producción de biocombustible que le aporte energía limpia y segura al país y al mundo entero.

1.3 Formulación del problema

A partir de la problemática mencionada anteriormente se puede establecer la siguiente pregunta:

¿Cómo mejorar la eficiencia y rendimiento en la producción de biodiesel utilizando el modelo matemático para el método de radiación por microondas?

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Desarrollar un modelo matemático para la producción de biodiesel de palma africana (*elaeis guineensis*) por radiación de microondas.

1.4.2 *Objetivos Específicos*

- Contextualizar los diferentes procesos de producción de biodiesel.
- Obtener un modelo matemático para la producción de biodiesel por el método de radiación microondas.
- Implantar el modelo matemático de la producción de biodiesel por el método de radiación microondas utilizando la herramienta Matlab-Simulink.
- Diseñar la estrategia de control de temperatura para el proceso de transesterificación que produce biodiesel, utilizando la herramienta Matlab-Simulink

1.5 Justificación

La importancia de este proyecto depende de cuatro ejes trascendentales; el ambiental, el técnico operativo, desarrollo académico y producción sostenible. Primeramente porque todo estudio en pro de encontrar alternativas que reemplacen los combustibles fósiles, es un avance como humanidad hacía el encuentro de un balance entre los efectos de nuestras acciones y la preservación de los ecosistemas naturales, en este caso, los estudios desarrollados para mejorar las metodologías en la producción de biodiesel, que en consecuencia con su uso, tiene como propósito principal mejorar la calidad de vida para el ser humano y para las demás especies en el planeta (Noriega Lozano, 2020).

De igual manera, el biodiesel es el único combustible alternativo que funciona en cualquier motor Diesel convencional sin hacer ninguna modificación, es un excelente lubricante,

tiene rendimientos similares a la gasolina, mejora las condiciones anti-exposición e incendio y no altera el tiempo de recarga de combustibles, resumiendo, la producción y uso de este biocombustible promete el desarrollo sostenible partiendo de que no hay cambios bruscos en los modos convencionales de operación automotriz que actualmente usamos debido a que el biodiesel es bueno para alargar la vida útil del motor sin tener que alterarlo (López Quiñones, 2017).

Por otro lado, considerando los métodos de producción, el avance en el estudio de procesos que disminuyan los costos y que aumenten los rendimientos es clave para que el biodiesel sea viable y rentable en su distribución y uso, factores que se desenvuelven con el método de producción por radiación de microondas, que disminuye los tiempos de producción en un 80% y que no presenta grandes pérdidas de energía comparada con los métodos industriales por calentamientos con resistencias (Herrera Susa, 2019). A la par, existen pocos estudios en el desarrollo de modelos matemáticos relacionados a la producción de biodiesel por el método de radiación por microondas con el propósito de establecer una dinámica que estudie el mejoramiento de los rendimientos de producción proponiendo el uso de control de sus variables sensibles (Zhang et al., 2016).

En conjunto, se concluye en la importancia de establecer un estudio concreto y vigoroso de las líneas de investigación de control y energía del Grupo de Investigación en Desarrollo en Procesos Industriales (GIDPI) de la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS). Que a su vez que le otorgue al departamento y al país el liderazgo que necesita más allá de ser el primer país suramericano y el cuarto en el mundo en producir una de las principales materias primas para la producción de biodiesel que es la palma africana (*elaeis guineensis*).

2. Marco referencial

En este apartado, se definen los conceptos relevantes para el desarrollo de este proyecto investigativo, para clarificar las ideas que posteriormente serán mencionadas en los capítulos siguientes.

2.1 Antecedentes

En la realización de este proyecto de investigación titulado “Modelo matemático para la producción de biodiesel de palma africana (*elaeis guineensis*) por radiación de microondas”, es fundamental conocer un sistema de producción de biodiesel usando radiación microondas efectivo que se haya aplicado con anterioridad en el ámbito de investigación, y de esto hablan a profundidad Chun Zhang, Junqing Lan, Tao Hong, Tushar Gulati, Huacheng Zhu, Yang Yang y Kama Huang en su artículo titulado “dynamic analysis and simulation on continuous flow processing of biodiesel production in single mode microwave cavity” siendo precisos en los aspectos que involucran la producción de biodiesel de forma eficiente y continua con el uso de las microondas, mostrando resultados efectivos de producción con respecto a las variables involucradas en el proceso.

De la misma manera, es de gran importancia contextualizar todo lo relacionado al proceso de transesterificación que es la reacción clave en la producción de biodiesel y esto lo define en gran detalle Ávila Adrián, Bula Antonio, Sanjuán Homero en su artículo “cinética de la transesterificación de la oleína de palma africana con etanol” que han sido fuertemente referenciados respecto al estudio de producción de biodiesel y su modelamiento cinético.

Así mismo, se resalta el trabajo de la doctora Gloria Martínez Vicente en su libro “obtención de biodiésel por transesterificación de aceites vegetales. Nuevos métodos de síntesis. Catálisis heterogénea. Radiación microondas” donde refuerza los conocimientos relacionados a

las diferentes catálisis o medios involucrados en la transesterificación y como difieren entre ellas, como también imparte el estudio de modalidades continuas y discontinuas de producción así mismo como de darle uso al calentamiento por microondas mostrando una conclusión de la efectividad de la radiación por microondas (Martínez Vicente, 2012).

Por último, es importante mencionar los estudios de J.P Castillo, M. Adam, P.E Álvarez, B. López Zapata con el desarrollo de un sistema de “control predictivo de la producción de biodiesel en un reactor por lotes por transesterificación de aceite soya” que presenta una modalidad en el tratamiento del modelo matemático desarrollado por (Nouredduni H. & Zhu D., 1997) usando un control predictivo que utiliza una linealización del modelo de la transesterificación para predecir las salidas futuras del sistema y su desempeño, demostrando optimizar la producción (Castillo et al., 2015)

2.2 Marco teórico

2.2.1 Biodiesel

El biodiesel es un combustible que es producido a partir de esteres o grasas obtenidas por vegetales o animales. Su principal reconocimiento se debe a que es un producto que puede reemplazar al tradicional combustible fósil, Diesel o ACPM. Las razones para su uso en motores de combustión interna alternativos de encendido por compresión (Diesel) son varias presentadas como ventajas (Martínez Vicente, 2012).

2.2.1.1 Ventajas del biodiesel

- Es biodegradable y renovable, lo que lo convierte en una excelente alternativa para el desarrollo sostenible mundial.
- En su aplicación, no necesita modificar el motor Diesel convencional para que pueda usarse normalmente.

- Es obtenido a partir de aceites vegetales, totalmente renovables y en otros casos, de aceites reutilizados.
- Posee una gran propiedad de lubricación y minimiza el desgaste del motor ampliando su vida útil.
- Puede usarse en mezclas con gasolina o el mismo Diesel obtenidos de petróleo.
- Reduce en gran medida los humos visibles durante el arranque.
- Su transporte y almacenamiento es altamente seguro debido a su flash point.
- La mezcla con otros combustibles es estable y no se separa en fases.
- La mezcla con otros combustibles se puede hacer en el momento de carga o previamente.
- No contiene azufre por lo que no genera SO_2
- Incrementa la combustión de los motores Diesel, reduciendo la formación de ceniza.
- El dióxido de carbono generado durante la combustión del biodiesel es totalmente reabsorbido por las plantas.
- Permite a países agrícolas como el territorio colombiano de independizarse de los países productores de petróleo

2.2.1.2 Desventajas del biodiesel

- La materia prima depende del alza de los productores agrícolas que dependen de factores ambientales y climáticos.
- Su combustión puede conducir a un aumento de óxidos de nitrógeno.
- Presenta problemas de fluidez a bajas temperaturas (a $4^{\circ}C$ comienza a solidificarse) pero esto tiene solución con la aplicación de aditivos.
- Su poder solvente lo hace incompatible con una serie de plásticos y elementos obtenidos del caucho natural lo que obliga a cambiar estos conductos en el motor.

- Posee una menor estabilidad a la oxidación, aspecto que es importante para el proceso de almacenamiento que es inferior a los 6 meses.
- Su costo aun no es tan competitivo respecto al Diesel convencional debido a la materia prima y a los procesos de producción industrial que suelen tener muchas perdidas

2.2.2 Procesos Industriales

Las tecnologías usadas para la producción de biodiesel son relativamente simples y permiten modificación en función de las condiciones de operación y el tipo de materia prima empleada en el proceso (Martínez Vicente, 2012).

El método discontinuo por lotes es el más usado con respecto a los sistemas continuos puesto que estos requieren una alimentación más uniforme, algo que es difícil de conseguir debido a las características de la materia prima (López Quiñones, 2017).

2.2.2.1 Procesos discontinuos

La producción mediante procesos discontinuos el alcohol y el catalizador se mezclan previamente en una unidad precedente, luego, el aceite y la mezcla alcohol – catalizador son enviados al reactor donde la mezcla es expuesta a una agitación (esto es para la separación de las moléculas) que puede durar aproximadamente 1 hora por lo general a 60°C. Esto puede ser en dos etapas, pero la mayoría de los productores lo hacen en una, luego de este proceso donde ocurre la transesterificación, la mezcla es llevada a un filtrado y secado para luego entrar al proceso de decantación, donde será separado el biodiesel del subproducto glicerina que sería destinado para otro tipo de utilidades (Suryanto et al., 2015).

Este proceso discontinuo también puede ser sometido a radiación microondas donde se establecen las condiciones de estudio para la misma, pero en este caso, en un proceso discontinuo por lotes.

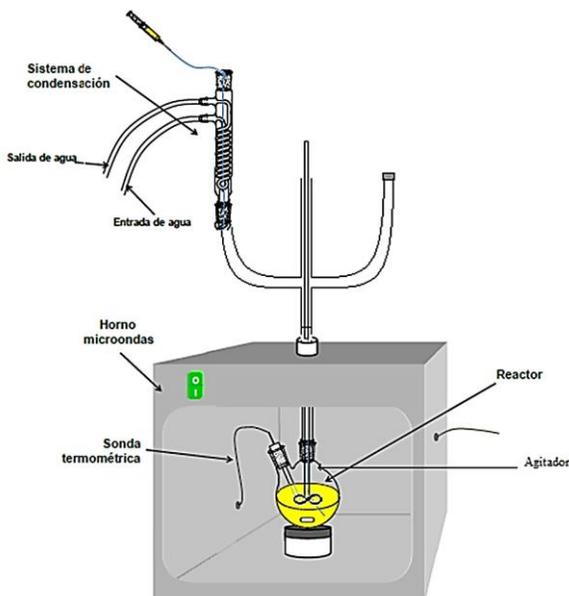


Figura 1. Método de producción discontinua tipo batch usando microondas

Nota. La figura muestra el proceso de producción discontinua de biodiesel mediante el uso de radiación microondas para el calentamiento. adaptado de (Martínez Vicente, 2012).

2.2.2.2 Procesos continuos

En este tipo de procesos, los tanques agitados estén en continuo (continuos stirred – tank reactors, CSTRs), de a 2 o 3 en cascada. En el primer tanque se encarga del proceso de esterificación y la mezcla es expuesta por más tiempo en el calor y agitación, tras separarse la glicerina en este proceso, la reacción será mucho más rápida en el siguiente reactor obteniendo rendimientos hasta del 98% (Guayara & Angie, 2019).

También, para los sistemas continuos se han propuesto aplicaciones con reactores especiales, donde la mezcla avanza a través del conducto y los reactivos se mezclan más

eficientemente, este proceso también ha sido motivo de estudio mediante el uso de radiación microondas que pretende mejorar los rendimientos y efectividad de producción (Salinas Saavedra, 2020).

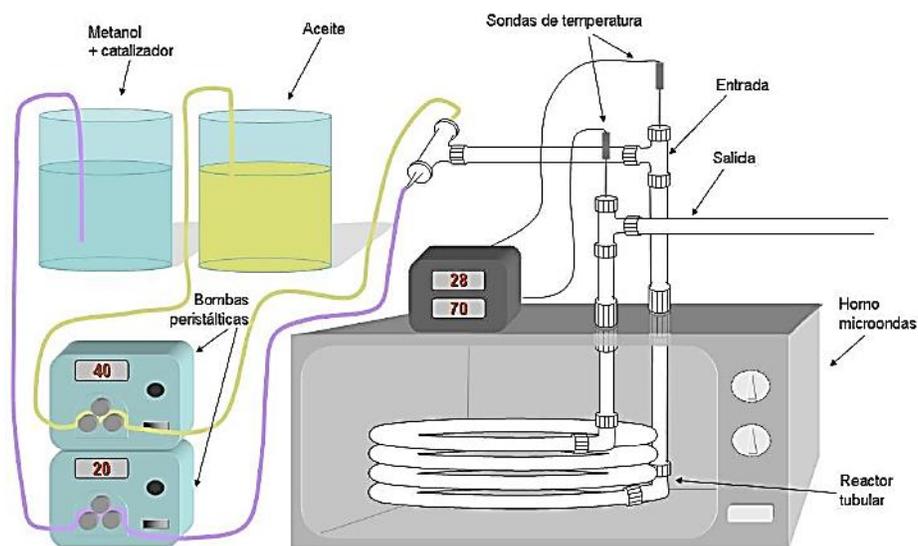


Figura 2. Método de producción continua usando microondas

Nota. La figura muestra el proceso de producción Continua de biodiesel mediante el uso de radiación microondas para el calentamiento. Adaptado de (Martínez Vicente, 2012).

2.2.3 Radiación de microondas

El uso de la radiación microondas en los últimos 23 años ha encontrado diversos campos de aplicación en la industria donde los mecanismos de calentamiento convencionales (conducción y convección) no permiten conseguir de forma eficaz y rápida un incremento homogéneo de la temperatura. En comparación con la mayoría de los métodos de calentamiento, las principales ventajas de esta tecnología es la penetración inmediata y la alta rapidez de calentamiento, el ahorro de energía, mejora en la calidad y generalmente obtención de productos limpios (Krishnan & Rajan, 2017).

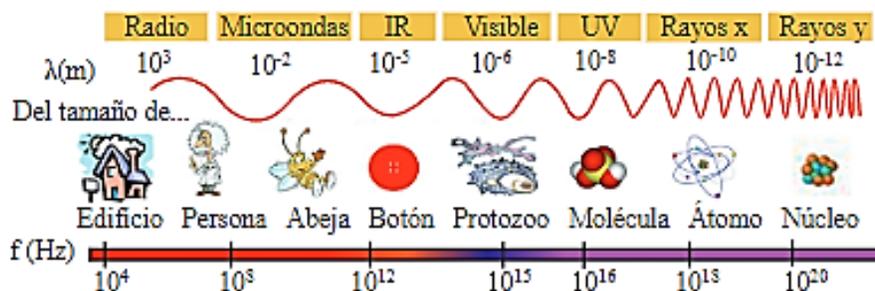


Figura 3. *Espectro electromagnético*

Nota. La figura muestra los diferentes tamaños dependiendo del tamaño de onda y su frecuencia. Adaptado de (Prado-Gonjal & Morán, 2011).

2.2.3.1 *Aplicación de la radiación microondas*

El proceso para la obtención de biodiesel por microondas ha sido objeto de estudio por sus ventajas en la facilidad de operación, ahorro de consumo energético, altos rendimientos de producción, una gran reducción en el tiempo de reacción y la rapidez de calentamiento en comparación con los sistemas convencionales.

El calentamiento de líquidos usando microondas puede explicarse por la interacción de la materia con el campo eléctrico de la radiación incidente, causando el movimiento con dipolos permanentes o inducidos. Esto ha dado un enfoque de alto interés en la producción de biodiesel al ser efectivo y ahorrrativo respecto al consumo energético (Zhang et al., 2016).

2.2.3.2 *Calentamiento por microondas*

Al aplicar un campo magnético correspondiente a la frecuencia de las microondas aquellas moléculas que presentan momento dipolar tienden a alinearse con el campo electromagnético aplicado, esto provoca una rotación que a su vez genera una fricción y colisión entre las moléculas y en efecto generan calor (calentamiento dieléctrico) que es una de las variables esenciales para la producción de biodiesel (Zhang et al., 2016).

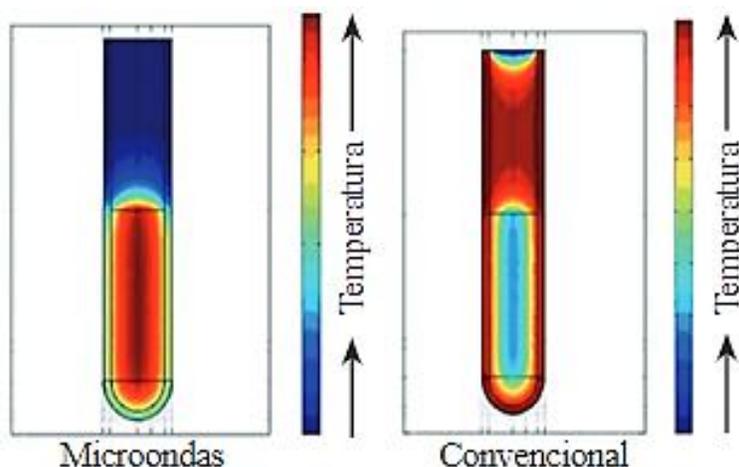


Figura 4. *Distribución de temperatura por calentamiento por microondas vs convencional*

Nota. La figura muestra la comparación en la distribución de temperatura entre la aplicación de calor mediante el calentamiento por microondas y el convencional. Adaptado de (Prado-Gonjal & Morán, 2011).

2.2.4 Transesterificación

Es un proceso químico donde se hace reaccionar un aceite rico en triglicéridos (que puede tener impurezas y/o características indeseadas como material particulado, humedad, alta acidez y ácidos grasos libres), con un alcohol, en presencia de un catalizador para así obtener ésteres metílicos o etílicos (según el alcohol usado), glicerol (subproducto que queda de la descomposición del triglicéridos) y sales neutralizadas (subproducto que queda de la reacción de los agentes reactivos con los ácidos grasos libres) (Arbelaez Marin & Rivera Quiroz, 2007).

La transesterificación es un proceso de equilibrio, los triglicéridos (TG) reaccionan con el alcohol, de tal manera que el alcohol reactante, desplaza el grupo alcóxido del éster original y se lleva a cabo en tres reacciones que son reversibles donde se descomponen los triglicéridos en diglicéridos (DG), los diglicéridos en monoglicéridos (MG), y, por último, los monoglicéridos en glicerol (GL) (Nouredduni H. & Zhu D., 1997). La reacción ocurre en serie con respecto al aceite (triglicéridos) y en paralelo con respecto al alcohol (los ésteres descompuestos reaccionan con el

resto del alcohol). Al ser una reacción reversible, el alcohol es puesto en exceso en proporción con la cantidad de aceite, esto garantiza que los ésteres metílicos producidos (biodiesel), no regresen su grupo alcóxido y no puedan volverse triglicéridos, diglicéridos o monoglicéridos nuevamente (David Zapata et al., 2007).

Este proceso puede realizarse sin necesidad de otorgarle calor a la reacción gracias al catalizador, sin embargo, de esta forma, la reacción ocurre muy lentamente y con bajo rendimiento. Es por eso que se le agrega calor para aumentar la velocidad de transferencia de materia y obtener la transesterificación más eficiente, no obstante, en los primeros momentos de reacción, con la temperatura otorgada se obtiene una velocidad cinética de forma exponencial, esto es debido a que el aceite es parcialmente soluble con el alcohol, y a medida que los triglicéridos se van descomponiendo y se van generando los ésteres metílicos, la reacción va mejorando en términos de velocidad cinética. Para mejorar la difusión del aceite con el alcohol, los reactivos son sometidos a altas velocidades de agitación, de esta forma, la reacción deja de ser dependiente de la transferencia de materia y pasa a estar en función de la velocidad de agitación (Lopez Quiñones, 2017).

2.2.4.1 Modelo matemático del sistema de transesterificación

El reactor de transesterificación se alimenta de alcohol y el aceite usado como materia prima. La composición del aceite se compone mayormente en triglicéridos por lo que se supone una alimentación de trioleína pura.

En el proceso de transesterificación los aceites reaccionan con los alcoholes de cadena corra carbonada. Las ecuaciones 1, 2 y 3 muestran el conjunto de ecuaciones reversibles y consecutivas que ocurren en el reactor. El triglicérido (T) reacciona con el alcohol (A) para formar diglicérido (D), y el diglicérido reacciona con el alcohol (A) para formar monoglicérido

(M) y por último, el monoglicérido (M) reacciona con el alcohol (A) para formar glicerol (G). En cada reacción se forma un mol del biodiesel (E) (Nouredduni H. & Zhu D., 1997).



Las variables que afectan la reacción de transesterificación son:

- Tipo de aceite.
- Relación molar alcohol: aceite.
- Tipo de alcohol.
- Tiempo de la reacción.
- Tipo y concentración del catalizador.
- Temperatura de la reacción.
- Intensidad del mezclado.
- Contenido de ácidos grasos libres (AGL).
- Índice de acidez.
- Humedad en el aceite.

2.2.4.2 Cinética de la reacción

La cinética química de una reacción, define la velocidad de las transformaciones que ocurren en un proceso a lo largo del tiempo, preocupándose por conocer cuáles son sus mecanismos o etapas que llevan a los reactivos desde su condición inicial, a la de productos.

Incluyendo todos los conocimientos de forma detallada, se consiguen determinar los posibles intermediarios que pueden formarse durante la reacción, así como también conocer los factores que son relevantes y controlan la velocidad del proceso. El conocimiento detallado de dichos factores (concentración de reactivos, productos, temperatura, presión, características y propiedades del medio donde ocurre la reacción, etc.) es importante para el control cinético de los procesos aplicados (Salinas Saavedra, 2020).

Partiendo en las ecuaciones anteriormente expuestas, todas estas reacciones se denominan como de segundo orden (dependiendo de la relación molar alcohol / aceite) donde la ecuación que define la velocidad cinética de la reacción en función de la temperatura (la variable $K_{(i)}$ mostrada en las ecuaciones) se representa mediante la ecuación modificada de Arrhenius, ecuación derivada de la teoría del estado de transición, y es la siguiente:

$$k_i(T) = A_i T^n e^{-\frac{E_i}{RT}} \quad (4)$$

Donde K_i es la constante de velocidad de la reacción, A_i es el factor de frecuencia o factor multiplicador (en las mismas unidades que la constante de velocidad), E_i es la energía de activación de la reacción en KJ/mol, R es la constante de los gases ideales y T , la temperatura en grados kelvin (Castillo et al., 2015).

2.2.5 Estrategias de control

Son las metodologías que son aplicadas a los modelos matemáticos o datos empíricos que representan la dinámica de un proceso, esto permiten regular la operación de un sistema en un punto previamente definido llamado set point. Existen diferentes modos para controlar un sistema dinámico invariante en el tiempo, y de ello depende la utilización de un determinado algoritmo que puede ser del tipo:

2.2.5.1 Control clásico

Utiliza algoritmos con estructuras sencillas como sistemas de atraso o adelanto, en su aplicación los reguladores de tipo proporcional-integrativo-derivativo (PID) son los más utilizados, el diseño los controladores son basados en análisis frecuenciales y la aplicación de los diagramas de Bode.

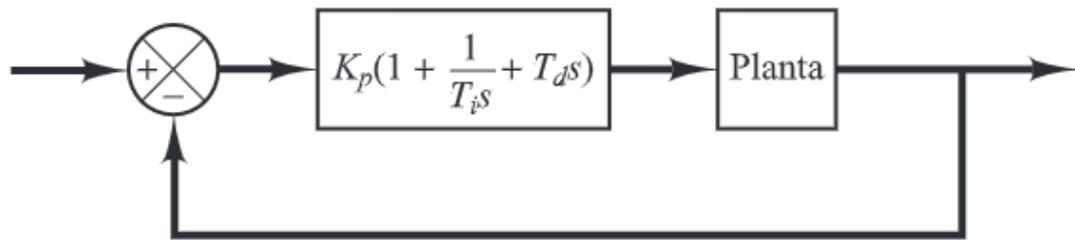


Figura 5. Control PID de una planta

Nota. La figura muestra el control PID de lazo retroalimentado aplicado al modelo de una planta conocida. Adaptado de (Ogata, 2010)

2.2.5.2 Control adaptativo

Estos controladores poseen se caracterizan por modificar su operación con cambios en la dinámica del proceso o en presencia de perturbaciones. La más usadas en este tipo de control son las basadas en un modelo de referencia, ya que estabiliza las características dinámicas de un sistema retroalimentado ante variaciones de los parámetros del sistema

2.2.5.3 Control inteligente

Es basado en técnicas de procesamiento lógico de datos o también llamado inteligencia artificial, estos sistemas permiten el trabajo con problemas de control difíciles de resolver con los métodos clásicos, como los comportamientos impredecibles provocados por las fallas de los sistemas a controlar. Entre esta metodología de control se destacan:

- **Sistemas Expertos:** Es necesario el material humano, donde se recopila información sobre los criterios de interpretación del estado del proceso y los criterios para determinar las acciones del actuador.
- **Lógica Difusa:** Utiliza técnicas de uso lógico - estadístico para manejar los eventos imprecisos, el criterio de las acciones es basado en la experiencia del operador del proceso.
- **Redes Neuronales:** Son usadas por su capacidad de “aprender” el comportamiento no lineal de las variables a controlar, característica muy útil en aplicaciones relacionadas con la realidad. Dicha capacidad se puede utilizar para diseñar sistemas de simulación, identificación o control.

2.3 Marco Conceptual

- **Cinética Química:** Es un área de la fisicoquímica encargada del estudio de la rapidez con la que cambian las condiciones, variables y que sucesos actúan en una reacción general.
- **Transesterificación:** Es el proceso de intercambio de un grupo orgánico propio de un éster con el grupo orgánico de un alcohol. Estas reacciones recurrentemente son catalizadas por condiciones básicas o acidad.
- **Biodiesel:** Es un combustible que se obtiene a partir de aceites y grasas de origen vegetal y animal, no es tan contaminante como el gasóleo.
- **Estrategia de control:** Es la técnica o metodología aplicada a los modelos matemáticos o datos experimentales que representan la dinámica de un proceso determinado, que permiten regular o poner la operación de un sistema en un punto previamente definido
- **Modelo Matemático:** Es la descripción teórica de un esquema simplificado e idealizado de la dinámica de algún fenómeno científico.

- Eficiencia: se suele definir como la relación de la razón de la energía útil que se extrae del fluido y la energía bruta total.
- Estabilidad: Es la capacidad de un sistema dinámico de mantener la salida en el mismo estado ante la presencia de perturbaciones

2.4 Marco legal

- Acuerdo 11 del 23 de abril de 2020, “Lineamientos con ocasión del nuevo Coronavirus (Covid-19)”(Consejo Superior Universitario, 2020). Establece las modificaciones realizadas al Estatuto Estudiantil UFPS.
- Acuerdo 065 del 26 de agosto de 1996, “Estatuto Estudiantil, Universidad Francisco de Paula Santander”, Art 136-157 (Estatuto Estudiantil, 2014). En estos artículos la universidad define y estipula el trabajo de grado, tipo de trabajos y las funciones de los entes involucrados en el desarrollo de estos.

3. Diseño metodológico

3.1 Tipo de investigación

El proyecto de investigación tendrá un enfoque enmarcado en un estudio descriptivo, el cual según (Abreu, 2012) lo define como un estudio que puede emplear varios métodos de análisis para determinar las correlaciones existentes entre las variables, y en ocasiones va más allá de la descripción con el fin de sacar conclusiones.

Con respecto a lo anterior y ampliando el concepto de este estudio, se puede afirmar que además de emplear métodos de análisis de correlaciones, también busca establecer la estructura y comportamiento del fenómeno, así como la descripción de las tendencias con bases en los resultados obtenidos dentro de la investigación(Gallardo Echenique, 2017, p. 53).

Con base en lo anterior, se puede constatar que el concepto de estudio descriptivo se ajusta al tipo de investigación que se pretende realizar, realizando el modelo matemático del proceso de producción de biodiesel asistida por radiación de microondas.

Por lo tanto, estableciendo la pregunta de investigación y con el estudio descriptivo que responde a los interrogantes que contienen un quién, que, cuando, donde y como, se puede establecer si un determinado modelo matemático describe la dinámica del proceso de producción de biodiesel mediante el uso de radiación microondas para ejercer un estudio para mejorar la eficiencia y el rendimiento de la misma, brindando información relevante a la UFPS sobre el contexto del funcionamiento del método de producción de biocombustibles usando radiación microondas y su capacidad de mejorar los estándares de calidad, ahorro energético, mejora en los rendimientos y eficiencias de producción.

3.1.1 Alcances

Este proyecto utilizará una metodología para desarrollar el modelo matemático para la producción de biodiesel a partir del método de radiación microondas, que contribuya al estudio para mejorar los rendimientos de producción por medio de la utilización del software Matlab/Simulink.

3.1.2 Delimitaciones

3.1.2.1 Delimitación temporal.

La duración de este proyecto de investigación se estipula en un periodo de 6 meses, a partir de la aprobación del comité curricular de ingeniería electromecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander.

3.1.2.2 *Delimitación conceptual.*

- Simulación de procesos.
- Monitoreo de Sistemas.
- Estrategias de Control.

3.2 **Actividades y Metodologías**

Para el desarrollo de este proyecto, enmarcado en el cumplimiento de los objetivos específicos planteados, se organizan las siguientes actividades:

3.2.1 Objetivo 1. Contextualizar los diferentes procesos de producción de biodiesel.

Actividad: A partir de la base teórica recopilada y con los debidos conocimientos, estructurar el modelo matemático que describa el proceso de producción de biodiesel con el uso de radiación microondas.

Metodología: Determinar los parámetros y variables del proceso, de igual forma, como las leyes físicas y químicas que describen la dinámica del mismo. A partir de la metodología de construcción de modelos matemáticos (balance de masas y energía) obtener la estructura del modelo.

3.2.2 Objetivo 2. Implantar el modelo matemático de la producción de biodiesel por el método de radiación por microondas utilizando la herramienta Matlab-Simulink.

Actividad: Implantar las ecuaciones del modelo matemático seleccionado a la interfaz de simulación del software MATLAB.

Metodología: Determinar los parámetros utilizados por el modelo matemático que representan las características de la producción de biodiesel. Configurar los parámetros y magnitud de las variables dentro del software que permitan dimensionar adecuadamente los resultados de las simulaciones.

3.2.3 Objetivo 3. Diseñar la estrategia de control de temperatura para el proceso de transesterificación que produce biodiesel, utilizando la herramienta Matlab-Simulink.

Actividad: Establecer los parámetros del sistema de control para el modelo de producción.

Metodología: Desarrollar las diversas estrategias de control utilizando los toolboxes existentes en la herramienta Matlab/Simulink, según las metodologías para el diseño de controladores.

3.3 Técnica de recolección de datos

Fuentes: para el desarrollo de proyecto de investigación se contará con los textos educativos y artículos científicos que se pueden encontrar en las bases de datos que tiene acceso por medio de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus de la Universidad Francisco de Paula Santander, así mismo con los trabajos de grados disponibles en los repositorios institucionales de las universidades nacionales e internacionales relacionados con modelamiento de sistemas químicos y físicos en la producción de biodiesel con uso de radiación de microondas.

INGENIERÍA BÁSICA

4. Desarrollo del modelo matemático y los procesos que los componen

4.1 Recopilar la información secundaria de las bases de datos especializados.

El biodiesel se presenta como una solución prometedora frente a los desafíos ambientales y energéticos que enfrenta el mundo actualmente (David Zapata et al., 2007). Con el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y la creciente conciencia sobre los impactos ambientales y climáticos de la quema de combustibles fósiles, la necesidad de alternativas sostenibles y renovables es evidente. El biodiesel es un biocombustible producido principalmente a partir de aceites vegetales o grasas animales. Este combustible es biodegradable, no tóxico y tiene emisiones significativamente más bajas de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles diésel convencionales. Además, puede utilizarse en motores diésel convencionales con pocos o ningún ajuste, lo que facilita su adopción (López Quiñones, 2017; Suryanto et al., 2015).

En el escenario más conveniente, el biodiesel podría contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, ayudar a la diversificación de las fuentes de energía y fomentar el desarrollo económico, especialmente en las zonas rurales donde se pueden cultivar los cultivos oleaginosos necesarios para su producción. Además, dado que se produce a partir de materias primas renovables, la producción de biodiesel podría ser más resiliente a las fluctuaciones de los precios de los combustibles fósiles (Mat Yasin et al., 2017).

En comparación con otras alternativas de energía sostenible, como la energía solar, eólica o hidroeléctrica, el biodiesel tiene la ventaja de ser compatible con la infraestructura y la tecnología existentes. No se requiere una transformación masiva de los motores de los vehículos ni de las estaciones de servicio para acomodar el biodiesel. Sin embargo, en términos de eficiencia energética y sostenibilidad a largo plazo, estas otras fuentes de energía renovable

pueden tener una ventaja, ya que no dependen de la disponibilidad de una materia prima que podría ser limitada o competir con la producción de alimentos (Mat Yasin et al., 2017; Zhang et al., 2016).

A continuación, se presenta la recopilación de los procesos de producción de biodiesel más competitivos y convencionales:

4.1.1 Transesterificación

La transesterificación es el método más comúnmente utilizado para producir biodiesel. Implica la reacción de un aceite o grasa (como aceite vegetal usado o grasa animal) con un alcohol (generalmente metanol o etanol) en presencia de un catalizador, que suele ser una base fuerte como hidróxido de sodio o hidróxido de potasio. Esta reacción química convierte los triglicéridos presentes en el aceite o grasa en ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos, que son el componente principal del biodiesel. Junto con los ésteres, se produce también glicerol como subproducto. El biodiesel resultante puede utilizarse como combustible en motores diésel sin necesidad de modificaciones significativas en el motor (Borges et al., 2018).

4.1.2 Esterificación

La esterificación es un proceso utilizado cuando el aceite o la grasa contienen altos niveles de ácidos grasos libres (FFA). Los ácidos grasos libres son compuestos indeseables en la producción de biodiesel, ya que pueden causar la formación de subproductos no deseados durante la transesterificación. En el proceso de esterificación, los ácidos grasos libres reaccionan con un alcohol (generalmente metanol o etanol) en presencia de un catalizador ácido, como ácido sulfúrico o ácido clorhídrico, para formar ésteres de ácidos grasos. Estos ésteres pueden luego ser utilizados como biodiesel después de una purificación adicional (Borges et al., 2018).

4.1.3 Pirolisis o termoconversión

El pirólisis es un proceso de descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno. En este método, la biomasa (como aceites vegetales, residuos agrícolas o madera) se calienta a altas temperaturas, generalmente entre 400 y 600 grados Celsius, lo que provoca la descomposición de los componentes orgánicos en forma de vapores. Estos vapores se condensan y se recogen como bio-oil, un aceite crudo que contiene una mezcla compleja de compuestos orgánicos. El bio-oil puede ser sometido a procesos adicionales de refinamiento, como la destilación o el hidrotratamiento, para convertirlo en biodiesel (Hincapié et al., 2014; Nouredduni H. & Zhu D., 1997).

4.1.4 Gasificación

La gasificación es un proceso en el cual la biomasa se convierte en gas de síntesis mediante la aplicación de calor en un ambiente con bajo contenido de oxígeno. En este método, la biomasa se somete a temperaturas elevadas, generalmente entre 700 y 1,200 grados Celsius, en presencia de vapor de agua o vapor de gasificación. Esto provoca la descomposición térmica de la biomasa en sus componentes gaseosos, principalmente hidrógeno y monóxido de carbono. (Salinas Saavedra, 2020) El gas de síntesis resultante, una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, se puede utilizar para producir combustibles, productos químicos y otros productos, incluyendo biodiesel, a través de procesos adicionales, como la síntesis de Fischer-Tropsch. En el proceso de Fischer-Tropsch, el gas de síntesis se somete a reacciones químicas para convertirlo en hidrocarburos líquidos, incluido el biodiesel.

4.1.5 Procesos supercríticos

En condiciones supercríticas, que implican altas temperaturas y presiones, los aceites y grasas pueden reaccionar con alcoholes sin necesidad de catalizadores. En este método, se utiliza

un reactor de alta presión para someter la mezcla de aceite o grasa y alcohol a condiciones supercríticas. Esto permite que los ácidos grasos y el alcohol se mezclen y reaccionen para formar los ésteres de ácidos grasos que componen el biodiesel. Los procesos supercríticos son capaces de manejar materias primas con altos niveles de ácidos grasos libres y agua, lo que simplifica la etapa de purificación. Sin embargo, estos métodos requieren equipos especializados y condiciones de operación rigurosas, lo que puede resultar en costos más altos (Lopez Quiñones, 2017).

4.1.6 Radiación Microondas

Este enfoque relativamente nuevo utiliza microondas para calentar la mezcla de reacción durante la transesterificación. La radiación microondas proporciona una forma eficiente de transferencia de calor, lo que acelera la reacción de transesterificación y mejora la eficiencia de conversión del biodiesel. Al aplicar microondas a la mezcla de aceite o grasa, alcohol y catalizador, se puede lograr una temperatura más rápida y uniforme en comparación con los métodos convencionales de calentamiento. Esto puede resultar en tiempos de reacción más cortos y una producción más eficiente de biodiesel (Fernandez Diez, 2010; Morales et al., 2016).

4.2 Contextualizar la información con referencia a los modelos matemáticos en producción de biodiesel por radiación de microondas.

Los modelos matemáticos desempeñan un papel crucial en la optimización y el diseño de los procesos que buscan optimizar la producción de biodiesel por radiación de microondas. Estos modelos se utilizan para predecir, controlar y entender diversos parámetros y variables que afectan la eficiencia, rendimiento y comportamiento del proceso (Lopez Becerra & Cantero Vergara, 2006).

En primer lugar, para describir la cinética de la reacción de transesterificación, que es el proceso químico principal involucrado en la producción de biodiesel, es necesario entender la naturaleza de los fenómenos químicos, físicos y mecánicos que lo afectan. Para el planteamiento del modelo se debe basar en los principios de la cinética química y las ecuaciones diferenciales para predecir la velocidad de reacción y las conversiones de los reactantes en función de factores como la temperatura, la concentración de reactantes y la radiación de microondas aplicada (Martínez Vicente, 2012). El modelo debe tener en cuenta factores como el tamaño y la geometría del reactor, los parámetros de radiación de microondas (potencia, frecuencia, tiempo de exposición, etc.), y las propiedades físicas y termodinámicas de los reactivos y productos. Con estos factores, es posible evaluar diferentes configuraciones de reactor y condiciones de operación para maximizar la eficiencia y la producción de biodiesel.

Es importante resaltar que el desarrollo de la metodología que usa la radiación microondas para la transesterificación y desarrollo de modelos matemáticos para esto, es muy escaso y superficialmente avanzados (David Zapata et al., 2007).

4.3 Clasificar los tipos de modelos matemáticos existentes disponibles en la literatura.

Los diferentes tipos de modelos matemáticos existentes que describen el comportamiento del proceso de producción de biodiesel con el uso de radiación microondas se pueden clasificar con los siguientes ítems:

4.3.1 Modelos cinéticos

Se basan en principios de la cinética química y las ecuaciones diferenciales para describir la velocidad de reacción de transesterificación. Estos modelos consideran parámetros como la temperatura, la concentración de reactantes y la radiación de microondas aplicada para predecir

la velocidad de conversión de los triglicéridos en biodiesel. Además, pueden ayudar a estimar la formación de subproductos no deseados.(Ávila et al., 2008)

4.3.2 Modelos de reactor

Simulan y optimizan el diseño de los reactores utilizados en la producción de biodiesel por radiación de microondas. Estos modelos tienen en cuenta factores como el tamaño y la geometría del reactor, los parámetros de radiación de microondas (potencia, frecuencia, tiempo de exposición, etc.) y las propiedades físicas y termodinámicas de los reactivos y productos. A través de simulaciones numéricas, estos modelos pueden evaluar diferentes configuraciones de reactor y condiciones de operación para maximizar la eficiencia y el rendimiento del proceso(Salinas Saavedra, 2020).

4.3.3 Modelos de transferencia de calor

Son fundamentales para comprender y controlar los efectos de la radiación de microondas en la distribución de temperatura dentro del reactor. Estos modelos consideran los mecanismos de transferencia de calor, como la conducción, la convección y la radiación, para predecir y optimizar la eficiencia de transferencia de calor durante la reacción de transesterificación. Esto permite mantener una temperatura adecuada para la reacción y evitar la formación de puntos calientes o la degradación de los reactivos y productos (Borges et al., 2018).

4.3.4 Modelos de mezcla y separación

Se utilizan para predecir la distribución de los componentes y la separación de biodiesel y subproductos durante el proceso de producción. Estos modelos consideran factores como la solubilidad, la temperatura, la presión y las propiedades físicas de los componentes para diseñar y optimizar los procesos de mezcla y separación. Esto es esencial para obtener un biodiesel de alta pureza y una glicerina separada de calidad.

4.3.5 Modelos electromagnéticos

Se centran en el análisis y la optimización de los campos electromagnéticos generados por la radiación de microondas. Estos modelos se basan en ecuaciones electromagnéticas, como las ecuaciones de Maxwell, para calcular la distribución de campo electromagnético dentro del reactor y evaluar su interacción con los reactores y las sustancias presentes. Esto ayuda a comprender la forma en que la radiación de microondas afecta la reacción y proporciona información valiosa para el diseño y control del proceso. Los modelos electromagnéticos permiten analizar parámetros como la intensidad del campo electromagnético, la distribución espacial de la radiación y la absorción de energía por parte de los reactantes. Con esta información, es posible optimizar la configuración de las fuentes de microondas, la ubicación de los reactores y otros aspectos relacionados con la radiación, para maximizar la eficiencia y uniformidad de la transferencia de energía y, por ende, la eficacia del proceso de producción de biodiesel (Fernandez Diez, 2010; Martínez Vicente, 2012; Morales et al., 2016; Prado-Gonjal & Morán, 2011).

4.3.6 Modelos de optimización

Se utilizan para encontrar las condiciones óptimas de operación y diseño del proceso de producción de biodiesel por radiación de microondas. Estos modelos tienen en cuenta múltiples variables y restricciones, como la temperatura, la potencia de radiación, la relación de reactantes y las propiedades de los reactivos y productos. Utilizando algoritmos y técnicas de optimización, estos modelos buscan maximizar la eficiencia y el rendimiento del proceso, minimizar los costos o cumplir con ciertos criterios específicos, como la pureza del biodiesel o la reducción de subproductos no deseados.

4.4 Estructurar el modelo matemático adecuado para el proyecto.

Un modelo matemático se define como un tipo de modelo fundamentado en principios matemáticos, donde los elementos clave son variables y funciones. Estos elementos se vinculan a través de relaciones matemáticas (ecuaciones, inecuaciones, operadores lógicos, etc.) que replican las interacciones del mundo real que están siendo modeladas, como las leyes físicas (Krishnan & Rajan, 2017; Lopez Becerra & Cantero Vergara, 2006).

Este modelo matemático es de vital importancia en nuestro proyecto, ya que facilita la simulación de procesos industriales incluso antes de disponer de un prototipo físico. Con la información recolectada de estas simulaciones, podemos anticipar y determinar ciertos aspectos del proceso real, lo que resulta útil para optimizar el diseño de los prototipos. En este capítulo, se lleva a cabo la secuencia de pasos necesaria para realizar el modelado matemático de los procesos industriales cubiertos por este proyecto, basándose en fundamentos matemáticos, leyes físicas y conceptos relevantes para este análisis (Nouredduni H. & Zhu D., 1997).

Para la construcción del modelo matemático de este proyecto, se consideraron aspectos como el balance de masa, energía y movimiento.

4.5 Determinar las variables de estudio del fenómeno dinámico

4.5.1 Consideraciones Generales

Para simplificar la creación de modelos matemáticos que reflejan el comportamiento de los procesos industriales, se toman en cuenta los siguientes puntos

1. Se usará como referencia de alcohol el etanol (C_2H_6O), (la temperatura del sistema no debe superar los $78,37\text{ }^{\circ}C$ ya que a esta temperatura se evapora el etanol)
2. Como catalizador el hidróxido de potasio (KOH)

3. Exceso de alcohol muy por encima de la estequiométrica con respecto al aceite (lo que haría considerar el alcohol como una constante durante la reacción y volverla de carácter irreversible).
4. El catalizador no se tiene en consideración en este estudio, pues su proporción con respecto a los demás reactivos es muy pequeña, normalmente de 1 a 1.5% en peso. Además, el catalizador se regenera al final del proceso.
5. Se considera un aceite de alta pureza (alto contenido de ésteres triglicéridos) con cantidades despreciables de ácidos grasos libres, humedad y acidez, esto, para simplificar la ecuación que incluiría la obtención de ácidos neutralizados (jabones), que es un producto indeseable en el proceso para producir el biodiesel.
6. Se considera al reactor como un volumen de control adiabático e isotérmico.
7. No existirá entrada ni salida de materia al reactor durante el proceso de transesterificación.
8. El número de moles totales y el volumen de la mezcla reaccionante en el reactor serán constantes, por lo que la concentración total también lo será.
9. Las concentraciones de cada componente variarán con el tiempo.

4.5.2 Variables que afectan el proceso

A continuación, se definen las variables que están involucradas dentro del proceso:

- Tipo de aceite
- Relación molar alcohol: aceite
- Tipo de alcohol
- Tiempo de la reacción
- Tipo y concentración del catalizador
- Temperatura de la reacción
- Intensidad del mezclado

- Contenido de ácidos grasos libres (AGL)
- Índice de acidez
- Humedad en el aceite

4.5.3 Nomenclatura

Tabla 1.

Nomenclatura utilizada.

Símbolo	Definición	Unidades en SI
<i>TG</i>	Triglicérido	<i>mol/litro</i>
<i>DG</i>	Diglicérido	<i>mol/litro</i>
<i>MG</i>	Monoglicérido	<i>mol/litro</i>
<i>GL</i>	Glicerina	<i>mol/litro</i>
<i>E</i>	Ester - biodiesel	<i>mol/litro</i>
<i>A</i>	Alcohol	<i>mol/litro</i>
<i>AGL</i>	Ácido Graso Libre	<i>mol/litro</i>
<i>k_i</i>	Constante de velocidad de reacción	<i>L/mol*s</i>
<i>k₁</i>	Constante directa TG a DG	<i>L/mol*s</i>
<i>k₂</i>	Constante Inversa DG a TG	<i>L/mol*s</i>
<i>k₃</i>	Constante directa DG a MG	<i>L/mol*s</i>
<i>k₄</i>	Constante indirecta MG a DG	<i>L/mol*s</i>
<i>k₅</i>	Constante directa MG a GL	<i>L/mol*s</i>
<i>k₆</i>	Constante indirecta GL a MG	<i>L/mol*s</i>
<i>d_a</i>	Densidad del aceite	<i>g/m³</i>
<i>t</i>	Tiempo	<i>s</i>
<i>T</i>	Temperatura	<i>°C</i>

E_i	Energía de activación	KJ/mol
C_i	Concentración	mol/L
PM	Peso Molecular	kg/mol
MM	Masa Molecular	g/mol
X	Fracción Molar	%
N_{re}	Núm. De Reynolds	--
N	Velocidad de rotación aspa agitador	rpm
Da	Área del agitador	m^2
p	Densidad	kg/m^3
u	Viscosidad	m^2/s

4.5.4 Balance de masa, movimiento y energía

Los balances de materia y energía son fundamentales en la ingeniería de procesos, ya que nos permiten analizar y gestionar de manera eficiente los flujos de materiales y energía en diversas situaciones industriales. Estas herramientas desempeñan un papel crucial al contabilizar las entradas y salidas de materia y energía en un proceso determinado, ya sea en relación con el entorno o entre las diferentes etapas operativas que conforman dicho proceso (Zhang et al., 2016).

En este sentido, los balances de materia y energía nos brindan una comprensión profunda de las corrientes de materiales presentes en el proceso industrial, permitiéndonos cuantificar los caudales másicos y evaluar su comportamiento en función del tiempo y de las condiciones específicas. Asimismo, nos proporcionan información valiosa sobre las necesidades energéticas del proceso en cuestión, lo que a su vez se traduce en la determinación de los requisitos de

servicios auxiliares necesarios para su correcto funcionamiento, tales como el suministro de vapor o refrigeración (Sierra Rubio & Casas Pachon, 2011).

4.5.4.1 Balance de masa

Los balances de masa se fundamentan en la ley de conservación de la materia, que debe aplicarse rigurosamente al conjunto de materia y energía en lugar de considerarlos por separado. No obstante, en los procesos industriales analizados mediante modelos matemáticos, a excepción de los reactores nucleares, no se produce una conversión directa de materia a energía ni viceversa (Zhang et al., 2016). Por lo tanto, la forma general del balance de masa TOTAL para un sistema en estas condiciones será la siguiente:

$$\textit{Entrada de materia} = \textit{Salida de materia} + \textit{Acumulacion de materia} \quad (5)$$

4.5.4.2 Balance de energía

Los balances de energía suelen ser más complejos que los de masa debido a las diversas formas en que la energía puede transformarse (mecánica, térmica, química, etc.). Esto requiere tener en cuenta este aspecto en las ecuaciones. En términos generales, en el modelado, los balances de energía son esenciales en equipos donde el intercambio de energía es determinante, como en intercambiadores de calor, evaporadores, columnas de destilación, entre otros (Zhang et al., 2016). Es decir, cuando se requiere calentar o enfriar un fluido. En estos casos, los balances de energía son fundamentales para comprender y optimizar el rendimiento de dichos equipos.

$$\textit{Entrada de energía} = \textit{Salida de energía} + \textit{Acumulacion de energía} \quad (6)$$

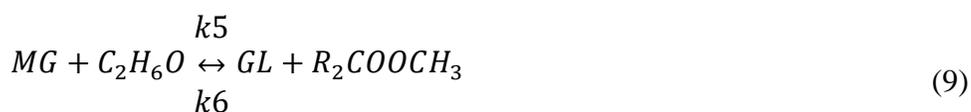
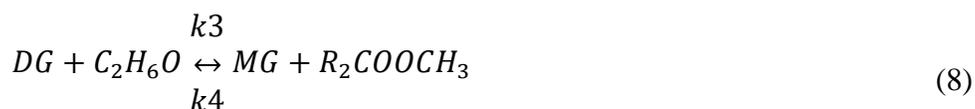
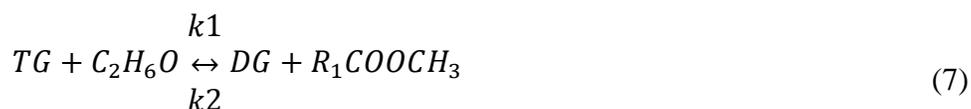
4.5.5 Cinética de la Reacción

La cinética química de una reacción, define la velocidad de las transformaciones que ocurren en un proceso a lo largo del tiempo, preocupándose por conocer cuáles son sus mecanismos o etapas que llevan a los reactivos desde su condición inicial, a la de productos. Incluyendo todos los conocimientos de forma detallada, se consiguen determinar los posibles intermediarios que pueden formarse durante la reacción, así como también conocer los factores que son relevantes y controlan la velocidad del proceso. El conocimiento detallado de dichos factores (concentración de reactivos, productos, temperatura, presión, características y propiedades del medio donde ocurre la reacción, etc.) es importante para el control cinético de los procesos aplicados.

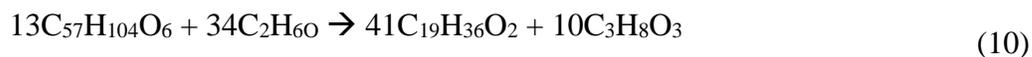
Generalmente, los métodos con los cuales se estudia la cinética en este proceso, se han caracterizado por tener dos enfoques distintos y que se complementan entre ellos, el empírico; en el que a partir de una serie de datos experimentales se obtiene el orden de la reacción, y el teórico, en el que se proponen los mecanismos de la reacción y se derivan las series de ecuaciones que las definen. Ambos enfoques son necesarios para establecer un modelo predictivo, por lo que, en los inicios de este proyecto, se tomaron los valores obtenidos por diferentes autores (Evangelista Florez et al., 2014; Noureduni H. & Zhu D., 1997; Salinas Saavedra, 2020; Zhang et al., 2016).

Teniendo en cuenta los objetivos de esta investigación, las ecuaciones diferenciales que describen la cinética en los mecanismos de transesterificación seleccionadas para este estudio son las desarrolladas por Nouredini y Zhu, al ser las ecuaciones que mejor describen el proceso teniendo en cuenta la relación molar que usa en este estudio.

La reacción de transesterificación en sus tres mecanismos puede describirse mediante la siguiente ecuación, donde TG, DG, MG y GL son los triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos y glicerol respectivamente. k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 y k_6 son las constantes cinéticas que determinan la velocidad de la reacción. R1, R2 y R3 son cadenas alifáticas y COOCH₃ es el éster metílico (biodiesel). El proceso debe estar compuesto por 3 moléculas de alcohol y una de aceite para obtener 3 moléculas de ésteres metílicos y una molécula de glicerina.



Dentro de los componentes físicos del aceite usado como materia prima, los ácidos grasos saturados (triglicéridos) vienen dados por la cantidad de tripalmitina, trioleina y trilinoleina (Cristina et al., 2018). Químicamente la reacción se puede representar mediante el modo molecular como se muestra a continuación, en este caso solo se tomó el éster de la trioleina (C₅₇H₁₀₄O₆):



4.5.6 Análisis Molar

Balanceando la ecuación 3 bajo los pesos moleculares según una relación balanceada estequiométrica de 34:13 (alcohol: trioleina) para determinar la cantidad de masa de los compuestos. Resumiendo, en la siguiente tabla.

Tabla 2.*Análisis Molar para el proceso de transesterificación.*

Componentes	Estructura Molecular	Pesos Moleculares
<i>Aceite (Trioleina)</i>	$C_{57}H_{104}O_6$	11511 g/mol
<i>Etanol</i>	C_2H_6O	1566 g/mol
<i>Metil Estér (Biodiesel)</i>	$C_{19}H_{36}O_2$	12156 g/mol
<i>Glicerina</i>	$C_3H_8O_3$	921 g/mol

Se estima como aceite, el obtenido a partir de la fruta de palma *Elaeis guineensis*, altamente producida en el Catatumbo, y el etanol con una pureza del 99%. En las siguientes tablas se detallan sus características más importantes para el proceso de transesterificación.

Tabla 3.*Análisis Molar del aceite de palma.*

Componentes	Fracción Molar	Peso molecular (Kg/mol)
<i>Tripalmitina</i>	0.47	807.49
<i>Trioleina</i>	0.37	885.61
<i>Trilinoleina</i>	0.112	879.55
<i>Ácido palmítico</i>	0.038	256.48

Nota: Adaptado de (Morales et al., 2016)

Tabla 4.*Propiedades del aceite de palma.*

Componentes	Fracción Molar	Peso molecular (Kg/mol)
<i>Aceite de palma</i>	2829	880

Nota: Adaptado de (Morales et al., 2016)

Y para el alcohol etílico:

Tabla 5.*Propiedades del etanol.*

Componentes	Masa Molecular g/mol	Densidad kg/m ³
<i>Alcohol</i>	46.08	789

Nota: Adaptado de (Morales et al., 2016)

Teniendo en cuenta las composiciones físicas del aceite de palma mostradas en la tabla 3, se obtienen las ecuaciones para las concentraciones de las mismas:

$$C_{\text{Tripalmitina}} = X_{\text{Tripalmitina}} \frac{C_{tg}}{X_{tg}} = \frac{0.47}{0.89} C_{tg} \quad (11)$$

$$C_{\text{Trioleina}} = X_{\text{Trioleina}} \frac{C_{tg}}{X_{tg}} = \frac{0.37}{0.89} C_{tg} \quad (12)$$

$$C_{\text{Trilinoleina}} = X_{\text{Trilinoleina}} \frac{C_{tg}}{X_{tg}} = \frac{0.11}{0.89} C_{tg} \quad (13)$$

Donde X es la fracción molar de los triglicéridos en el aceite de palma.

Realizando el análisis de tal forma que se considera el volumen dentro del matraz como una esfera hipotética que representa un elemento diferencial de la mezcla puesta en reacción. En $t=0$, solo estarán presente los triglicéridos y el alcohol, siendo la concentración inicial de los demás componentes igual a cero. Para $t=t$, la esfera contendrá todos los componentes involucrados en el proceso de transesterificación (Figura 6)

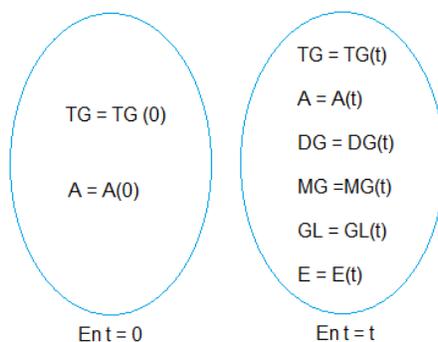


Figura 6. *Esfera hipotética representando los elementos de manera diferencial.*

Sea el volumen total de la mezcla:

$$V_{mezcla} = V_{aceite} + V_{alcohol} \quad (14)$$

Y el volumen y masa expresados a partir de la fórmula de la densidad:

$$V_{aceite} = \frac{M_{aceite}}{D_{aceite}} \quad (15)$$

La masa del aceite se puede representar como se muestra a continuación:

$$M_{aceite} = N_{aceite} * P_{M_{aceite}} \quad (16)$$

Reemplazando (15) en (16):

$$V_{aceite} = \frac{N_{aceite} * P_{M_{aceite}}}{D_{aceite}} \quad (17)$$

Donde **M** aceite, **P** aceite, **N** aceite y **PM** aceite son la masa, densidad, número de moles y peso molecular del aceite de palma.

El número de moles del soluto también se puede expresar en función de su fracción molar y número del solvente de la siguiente manera:

$$N_{tg} = X_{tg} * N_{aceite} \quad (18)$$

Reemplazando *N* aceite en la ecuación (16), se obtiene:

$$V_{aceite} = \frac{N_{tg} * P_{Maceite}}{X_{tg} * P_{aceite}} \quad (19)$$

De la misma manera con el alcohol etílico:

$$V_{alcohol} = \frac{N_{alcohol} * P_{Malcohol}}{P_{alcohol}} \quad (20)$$

Y considerando la relación molar entre el alcohol y el aceite de 3:1:

$$N_{alcohol} = 3N_{tg} \quad (21)$$

Por lo tanto, la ecuación (19) quedaría:

$$V_{alcohol} = \frac{3N_{tg} * P_{Malcohol}}{P_{alcohol}} \quad (22)$$

Reemplazando las ecuaciones (18) y (20) en (13):

$$V_{mezcla} = \frac{N_{tg} * P_{Maceite}}{X_{tg} * P_{aceite}} + \frac{3N_{tg} * P_{Malcohol}}{P_{alcohol}} \quad (23)$$

Despejando los términos de concentración:

$$\frac{N_{tg}}{V_{mezcla}} = \frac{1}{\left(\frac{P_{Maceite}}{X_{tg} * P_{aceite}} + \frac{3P_{Malcohol}}{P_{alcohol}}\right)} \quad (24)$$

La concentración inicial de los triglicéridos estará dada por la siguiente ecuación:

$$C_{tg}(0) = \frac{1}{\left(\frac{PM_{aceite}}{X_{tg} * P_{aceite}} + \frac{3PM_{alcohol}}{P_{alcohol}}\right)} \quad (25)$$

Y la concentración inicial del alcohol:

$$C_{alcohol} = 3C_{tg}(0) \quad (26)$$

Aplicando el sistema de ecuaciones 16 y 17, con los datos propuestos en la tabla 2 para la trioleína y en la tabla 5 para el etanol, se obtiene las siguientes condiciones iniciales.

$$C_{tripalmitina}(0) = 0.1058 \frac{mol}{Litro} \quad (27)$$

$$C_{alcohol}(0) = 0.3174 \frac{mol}{Litro} \quad (28)$$

4.6 Descripción del modelo matemático del sistema

El modelo matemático se elaboró considerando la dinámica de las variables cinéticas y químicas de cada componente y luego integrando los conocimientos en una base teórica basada en procesos de retroalimentación. En otras palabras, las variables de entrada de un proceso son las variables de salida del proceso anterior, lo que resulta en un sistema interconectado y lo más cercano posible a la realidad. Esta metodología permite obtener un modelo correlacional que refleja el comportamiento del sistema.

4.7 Descripción del modelo matemático – transesterificación – constantes de velocidad cinética – hallar la energía de activación

4.7.1 Transesterificación

Todas las reacciones del proceso de transesterificación se denominan como de segundo orden (dependiendo de la relación molar alcohol: aceite) y la forma general del grupo de ecuaciones diferenciales que modelan paso a paso las reacciones tanto en serie (con los glicéridos) y en paralelo (con el alcohol), a partir del concepto de velocidad de reacción. Se debe tener en cuenta que, dependiendo de las temperaturas y la agitación, el sistema de ecuaciones tiende a la inversa. Se representan en las siguientes ecuaciones:

4.7.2 Transesterificación de los triglicéridos

La transesterificación de triglicérido a un diglicérido es una reacción química en la que se produce la modificación de un triglicérido, compuesto por tres ácidos grasos unidos a una molécula de glicerol, para obtener un diglicérido y una molécula de biodiesel, que contiene dos ácidos grasos unidos a una molécula de glicerol. Esta transformación implica la sustitución de uno de los ácidos grasos del triglicérido por una molécula de alcohol. Este mismo proceso ocurre con los diglicéridos y los monoglicéridos (Nouredduni H. & Zhu D., 1997).

La transesterificación de los triglicéridos se presenta por la reacción con el alcohol y que en su reacción inversa aumenta cuando los diglicéridos reaccionan con las moléculas de biodiesel:

$$\frac{d[TG]}{dt} = -k_1[TG][A] + k_2[DG][E] \quad (29)$$

4.7.3 *Transesterificación de los diglicéridos*

La transesterificación de los diglicéridos se presenta por la reacción con el alcohol y que en su reacción inversa aumenta cuando los monoglicéridos reaccionan con las moléculas de biodiesel. Las condiciones iniciales de la cantidad de diglicéridos son representadas por la reacción de los triglicéridos con el alcohol (Nouredduni H. & Zhu D., 1997):

$$\frac{d[DG]}{dt} = k_1[TG][A] - k_2[DG][E] - k_3[DG][A] + k_4[MG][E] \quad (30)$$

4.7.4 *Transesterificación de los monoglicéridos*

La transesterificación de los monoglicéridos se presenta por la reacción con el alcohol y que en su reacción inversa aumenta cuando la glicerina reacciona con las moléculas de biodiesel. Las condiciones iniciales de la cantidad de monoglicéridos son representadas por la reacción de los diglicéridos con el alcohol (Nouredduni H. & Zhu D., 1997):

$$\frac{d[MG]}{dt} = k_3[DG][A] - k_4[MG][E] - k_5[MG][A] + k_6[GL][E] \quad (31)$$

4.7.5 *Generación de los esteres metílicos o moléculas de biodiesel*

Los esteres metílicos se generan cada vez que ocurre la transesterificación de los triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos, generándose una molécula por reacción en serie. La reacción inversa de los esteres metílicos se genera cada vez que el biodiesel reacciona con los triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos y glicerina

$$\frac{d[E]}{dt} = k_1[TG][A] - k_2[DG][E] + k_3[DG][A] - k_4[MG][E] + k_5[MG][A] - k_6[GL][E] \quad (32)$$

4.7.6 Generación de la glicerina

La glicerina se genera cuando los monoglicéridos se transesterifican en su totalidad, en otras palabras, cuando cada monoglicérido reacciona con el alcohol siendo un residuo del proceso.

$$\frac{d[GL]}{dt} = k_5[MG][A] - k_6[GL][E] \quad (33)$$

4.7.7 Velocidad cinética de reacción de transesterificación

La ecuación que define la velocidad cinética de la reacción en función de la temperatura se representa mediante la ecuación de modificada de Arrhenius, ecuación derivada de la teoría del estado de transición, y es la siguiente.

$$k_i(T) = A_i T^n e^{-\frac{E_i}{RT}} \quad (34)$$

Donde K_i es la constante de velocidad de la reacción, A_i es el factor de frecuencia o factor multiplicador (en las mismas unidades que la constante de velocidad), E_i es la energía de activación de la reacción en KJ/mol, R es la constante de los gases ideales y T , la temperatura en grados kelvin. Esta ecuación se utiliza generalmente para hallar la energía de activación.

Se debe tener en cuenta que, para obtener los valores de K_i del proceso, la toma de valores experimentales es necesario para dicho fin y de acuerdo con la tabla expuesta en seguida, tomada de los estudios realizados por Ávila, Bula y Sanjuán, se tomarán las constantes cinéticas de las temperaturas a 30, 40 50 y 60 °C.

Tabla 6.*Constante de velocidad cinética.*

Componentes	30°C	40°C	50°C	60°C
<i>k</i> 1	0,5189	0,37	0,028	0,2274
<i>k</i> 2	0,4043	0,327	0,0682	0,2008
<i>k</i> 3	0,4475	0,469	0,3214	0,3252
<i>k</i> 4	1,0377	1,204	0,8884	0,464
<i>k</i> 5	0,0319	0,026	0,0356	0,0283
<i>k</i> 6	0,0048	0,002	0,0021	0,0041

Nota: Adaptado de (Nouredduni H. & Zhu D., 1997).

Debemos tener en cuenta que las constantes de velocidad cinética se obtienen a partir de un proceso experimental. Comenzando con establecer una temperatura de estudio y una velocidad de agitación, seguidamente una vez comenzado el proceso, se toman muestras periódicamente a lo largo del experimento. Estas muestras reflejarán las proporciones de triglicérido, diglicérido, monoglicérido, glicerina y metil éster a través del tiempo de reacción, y así poder determinar sus constantes de conversión o constantes de cinética química. Luego, esas constantes son ajustadas a la ecuación de Arrhenius, para así poder hallar la Energía de activación. La energía de activación nos dice la cantidad de energía que se necesita para que haya una transformación de triglicérido a diglicérido y etc. Luego, ya obtenida la energía de activación se puede usar la temperatura como variable para así poder hacer los estudios del sistema pertinentes.

4.7.8 Ecuación de la velocidad cinética de reacción en función de la velocidad de agitación y propiedades del aceite

Se incluye la ecuación del número de Reynolds y se despeja para reemplaza la constante adimensional en la ecuación y poder incluir en el modelo las propiedades de la densidad del aceite, la viscosidad cinemática, la velocidad de agitación del agitador y el área de las aspas del agitador.

$$A_i = \frac{N_{re}}{\rho} * A_2 \left(\frac{1}{s} \right) = A_2 \left(\frac{1}{s} \right) \frac{nDa^2}{u} \left(\frac{L}{Kg} \right) \quad (35)$$

$$ki(T) = A_2 \frac{NDa^2}{u} * e^{-\frac{Ei}{RT}} \quad (36)$$

4.7.9 Reducción del alcohol

El alcohol es consumido por el proceso al reemplazar el ácido graso en la cadena carboxílica para cada reacción de transesterificación, este proceso genera una molécula de biodiesel por reacción, por lo que la ecuación se puede expresar como la inversa de la producción de biodiesel.

$$\frac{d[A]}{dt} = -\frac{d[E]}{dt} \quad (37)$$

4.7.10 Obtención de las energías de activación del sistema

Para hallar las energías de activación de cada constante de velocidad cinética de reacción, se despeja la variable de la ecuación y se reemplazan los valores de K según la temperatura con la que se hizo el muestreo.

$$Ei = \frac{Ln(K)RT}{Ai} \quad (38)$$

Se obtienen los resultados de energía de activación para las constantes de velocidad cinética de reacción. Obteniendo el análisis de rendimiento, que es 7 veces mayor con el calentamiento microondas que el calentamiento convencional (Herrera Susa, 2019), se extrapolan las constantes y se reemplazan en la ecuación y obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 7.*Energías de activación.*

Energía de activación	60°C
<i>E1</i>	264,4269
<i>E2</i>	365,0128
<i>E3</i>	324,0942
<i>E4</i>	-14,9106
<i>E5</i>	1388,6112
<i>E6</i>	2152,0080

4.8 Implantar el modelo matemático en Simulink.

El software Simulink de MATLAB® fue utilizado para la simulación de los procesos, una etapa que se distingue por varios ajustes en las condiciones operativas y cuyo propósito central es lograr una estimación de la dinámica de las variables de los procesos que conforman el sistema de producción de biodiesel a partir de aceite de palma y etanol. Estos se exponen a condiciones estables y transitorias con el objetivo de examinar su comportamiento.

Los datos característicos de las constantes de velocidad cinética de reacción fueron obtenidos por (Martínez Vicente, 2012) y las energías activación fueron extrapoladas basándonos en este.

Tabla 8.*Parámetros para la simulación del Sistema*

Sigla	Descripción	Valor	Unidad
<i>TG</i>	Triglicérido	0.0000109	<i>Mol/litro</i>
<i>A</i>	Alcohol	865.9	<i>Kg/m³</i>
<i>E_i</i>	Energías de activación	Tabla 7	<i>m/s²</i>
<i>A₂</i>	Área de las aspas	0.025	<i>m²</i>
<i>R</i>	Constante de los gases ideales	0.005	<i>m³</i>
<i>N</i>	Revoluciones del agitador	0.0001	— —
<i>u</i>	Viscosidad cinemática del aceite	0.0043	<i>m²</i>

Se introdujeron cambios en los parámetros de diseño para simular los procesos del sistema de producción de biodiesel mediante el uso de aceite de palma y etanol, los cuales se incorporaron en cada uno de los pasos etiquetados. De esta manera, el proyecto en Simulink cuenta con todos los datos requeridos para su correcto funcionamiento.

A continuación, se muestran las ecuaciones que describen el proceso dinámico del modelo descrito, tal como se registraron en el entorno de Matlab/Simulink.

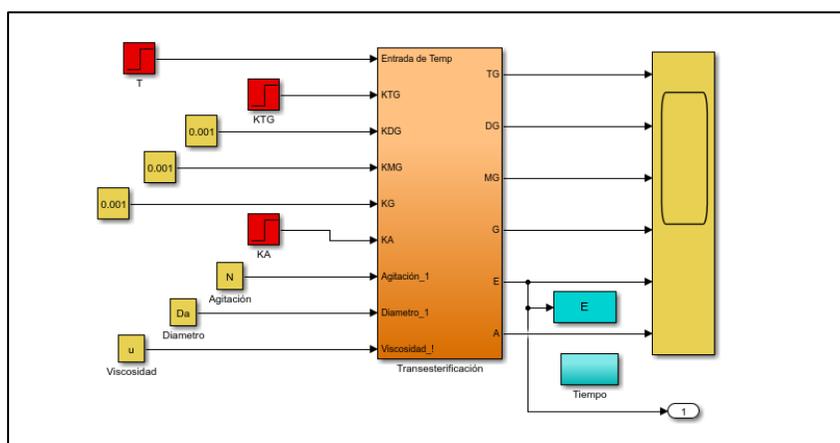


Figura 7. Representación de entradas y salidas de la plata del proceso de transesterificación

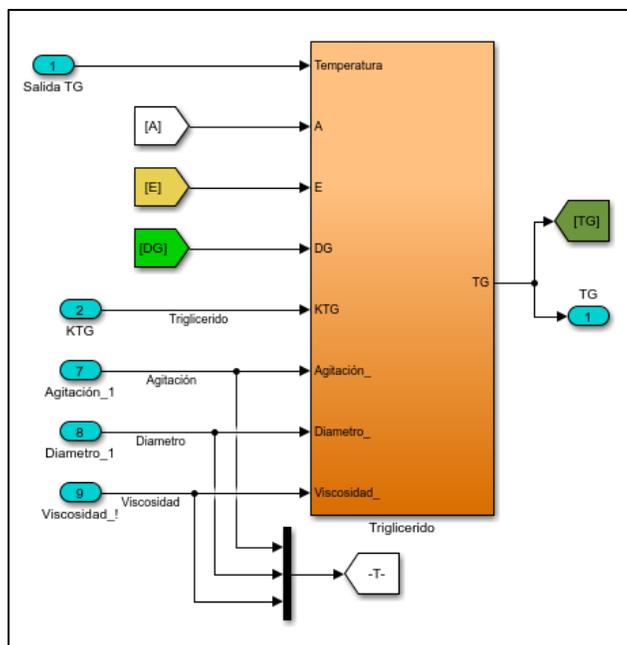


Figura 8. *Transesterificación de los triglicéridos*

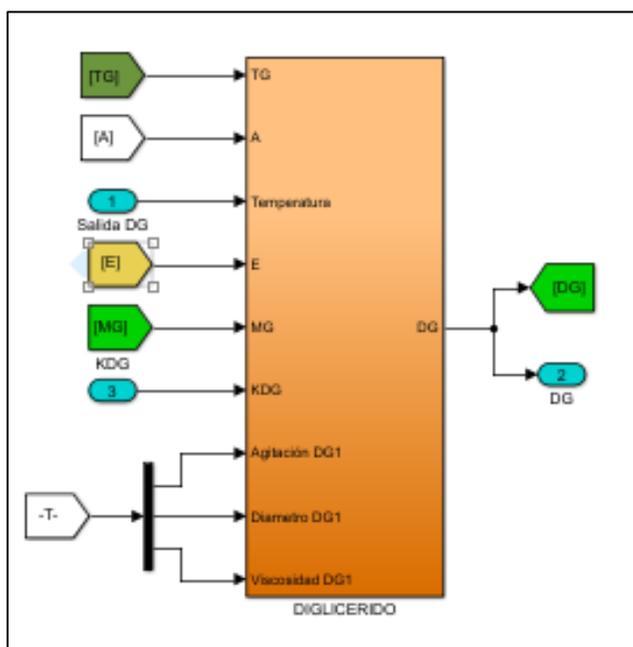


Figura 9. *Transesterificación de los diglicéridos*

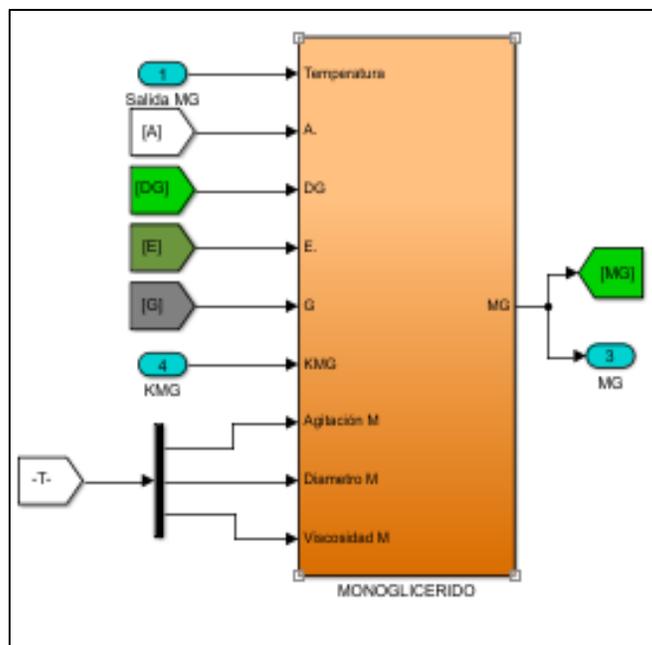


Figura 10. *Transesterificación de los monoglicéridos*

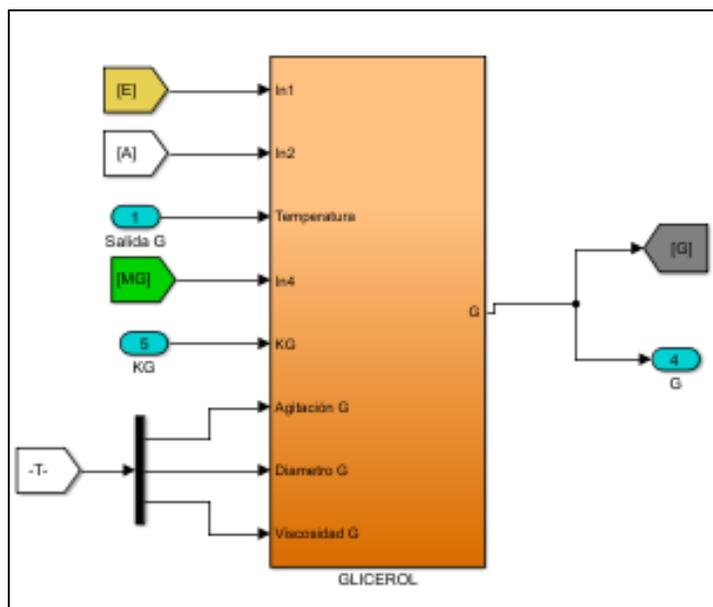


Figura 11. *Transesterificación de la glicerina*

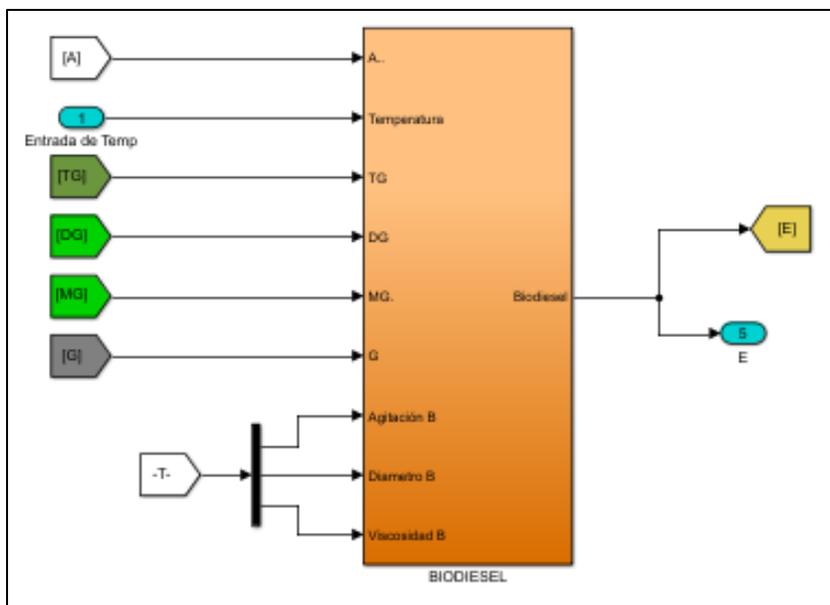


Figura 12. *Generación de los esteres o biodiesel*

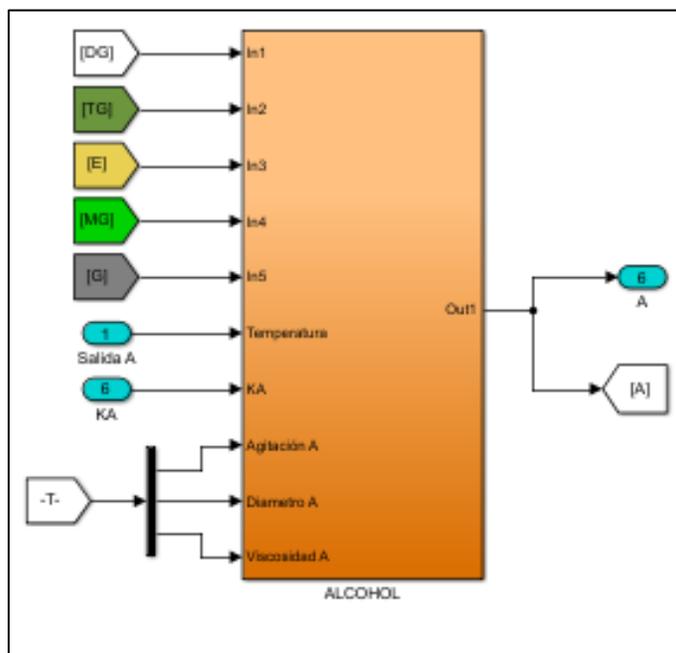


Figura 13. *Consumo del alcohol etanol*

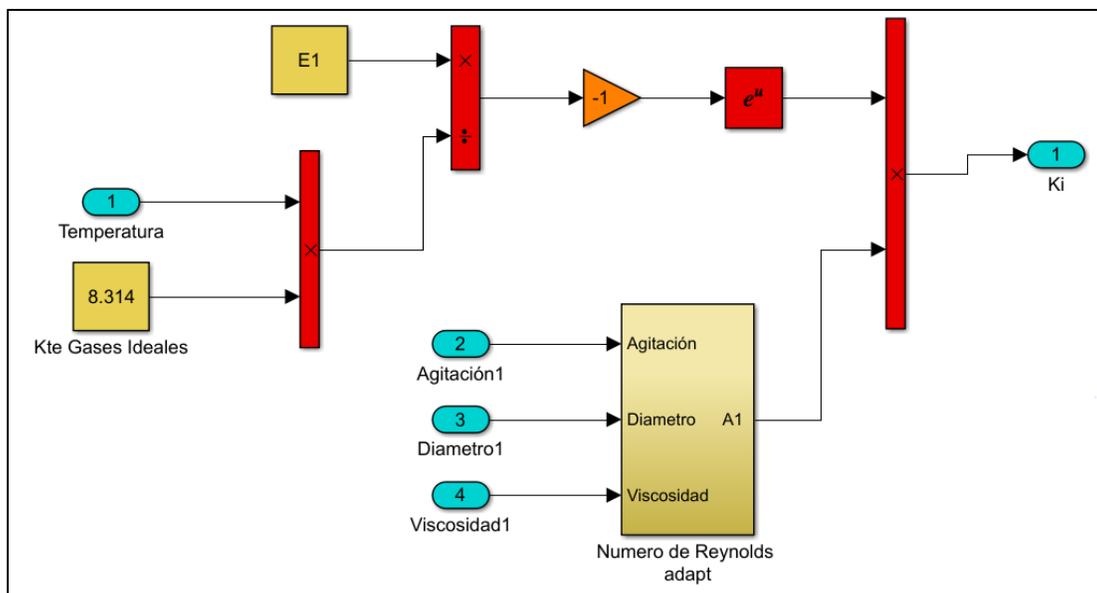


Figura 14. Ecuación de velocidad cinética de reacción

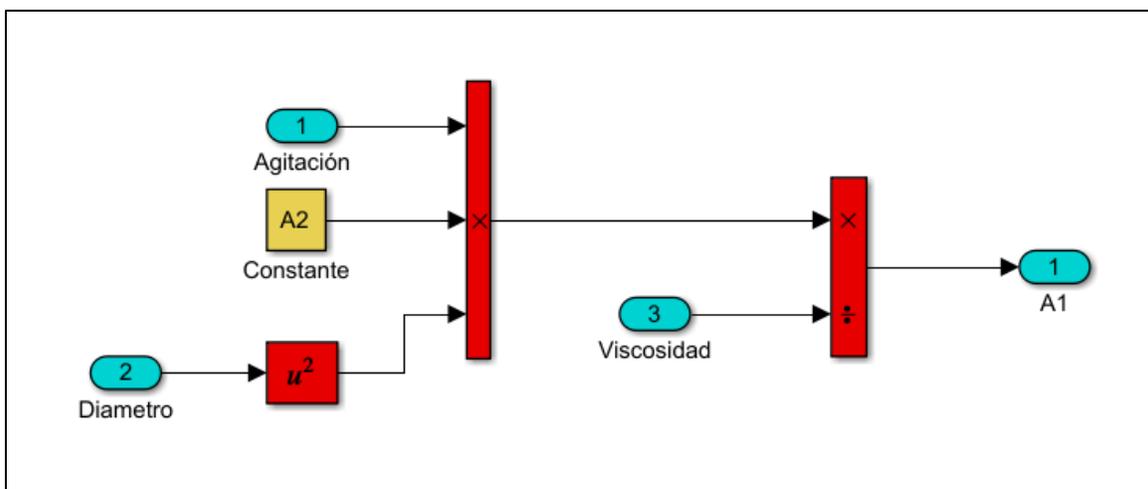


Figura 15. Ecuación de Reynolds

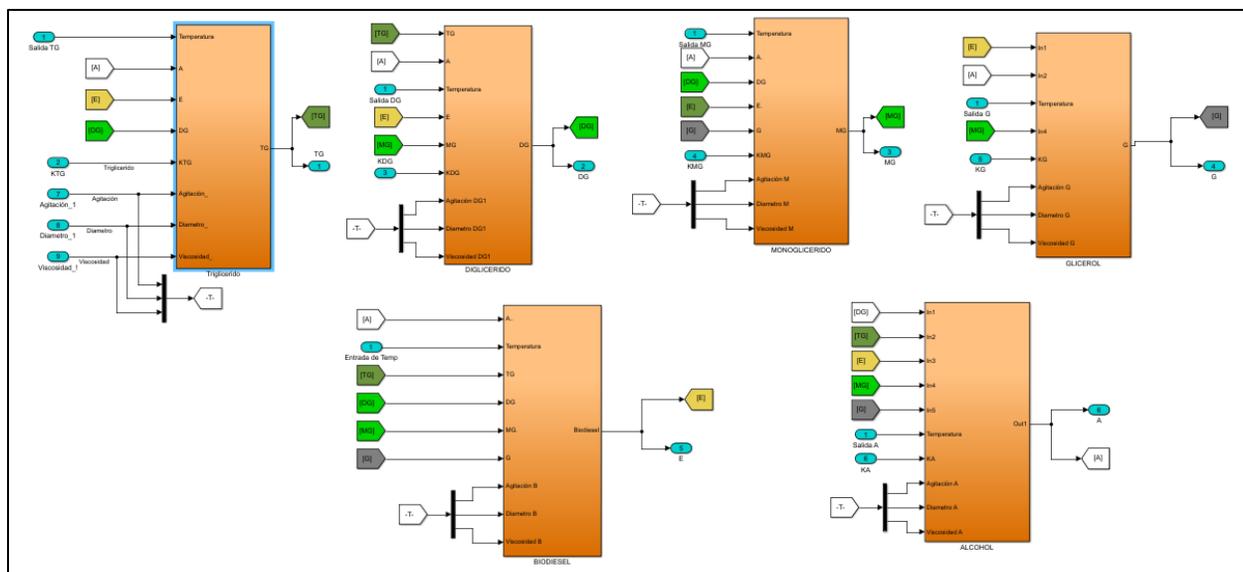


Figura 16. Sistema de ecuación que integran todo el proceso de transesterificación

4.9 Obtener las curvas de las variables de medición características del sistema de producción.

4.9.1 Producción de los esteres

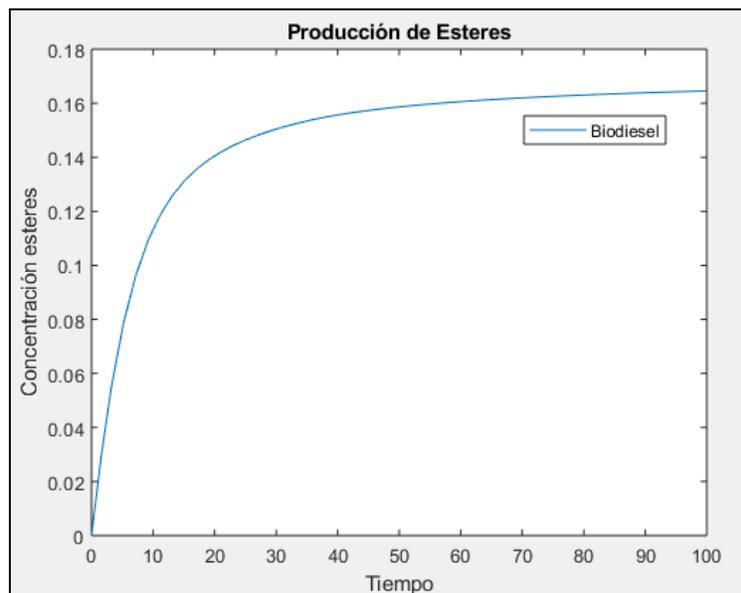


Figura 17. Curva de producción de esteres

La curva de producción de las moléculas de biodiesel en el proceso de transesterificación exhibe un patrón característico a medida que se desarrolla la reacción química. Inicialmente, al comenzar la transesterificación, la producción de biodiesel es baja y la curva muestra un crecimiento gradual. Esto se debe a que la reacción necesita tiempo para que los reactivos se mezclen y reaccionen entre sí.

A medida que el tiempo avanza, la curva de producción comienza a aumentar de manera más pronunciada, indicando un aumento en la formación de las moléculas de biodiesel. Esto se debe a que la reacción de transesterificación se acelera a medida que las moléculas de ácidos grasos y alcohol (generalmente metanol) interactúan con el catalizador (generalmente un álcali como el hidróxido de potasio) para formar ésteres metílicos, que son los componentes principales del biodiesel. A medida que la reacción continúa, la curva de producción alcanza su punto máximo, donde la producción de biodiesel alcanza su valor máximo. En este punto, la mayoría de los reactivos se han consumido y la formación de biodiesel se encuentra en su nivel más alto.

4.9.2 Consumo del triglicérido

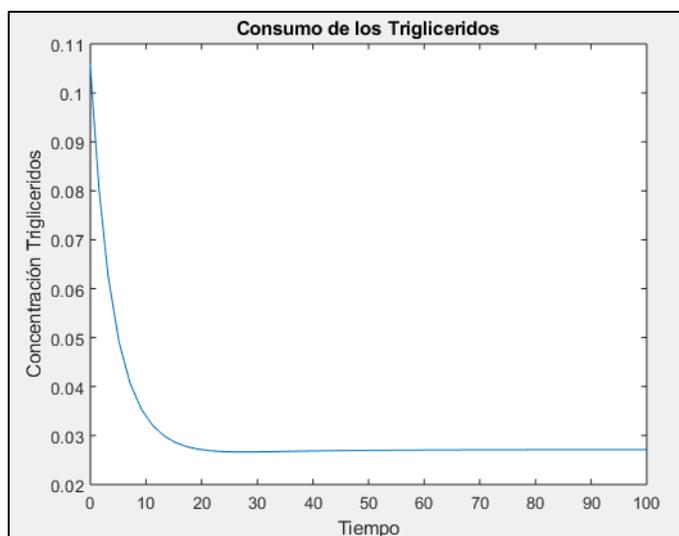


Figura 18. *Curva de consumo del triglicérido para formar diglicéridos y ésteres*

La gráfica del consumo de los triglicéridos durante el proceso de transesterificación muestra cómo disminuye la concentración de triglicéridos a lo largo del tiempo a medida que se produce la reacción química.

Al comienzo de la reacción, la concentración de triglicéridos es alta y la curva muestra un valor inicial. A medida que avanza la transesterificación, la concentración de triglicéridos disminuye de manera gradual. Esto se debe a que los triglicéridos se convierten en ésteres metílicos (biodiesel) mediante la ruptura de los enlaces éster en la estructura de los triglicéridos y la formación de nuevos enlaces éster con el metanol. A medida que transcurre el tiempo, la curva de consumo de triglicéridos se vuelve más pronunciada, lo que indica una disminución más rápida de la concentración de triglicéridos. Esto se debe a que la reacción de transesterificación avanza y se consumen más triglicéridos para formar biodiesel.

En algún punto, la curva alcanza un punto de inflexión, donde la disminución de la concentración de triglicéridos se vuelve más lenta. Esto puede indicar que la reacción de transesterificación está llegando a su etapa final, donde quedan pocos triglicéridos por consumir.

Finalmente, la curva de consumo de triglicéridos se estabiliza cerca de cero, lo que significa que la mayoría de los triglicéridos se han convertido en biodiesel. En esta etapa, la reacción ha alcanzado su estado final y se han consumido la mayor parte de los triglicéridos presentes en la mezcla inicial.

4.9.3 Consumo de los diglicéridos, monoglicéridos y generación de glicerina

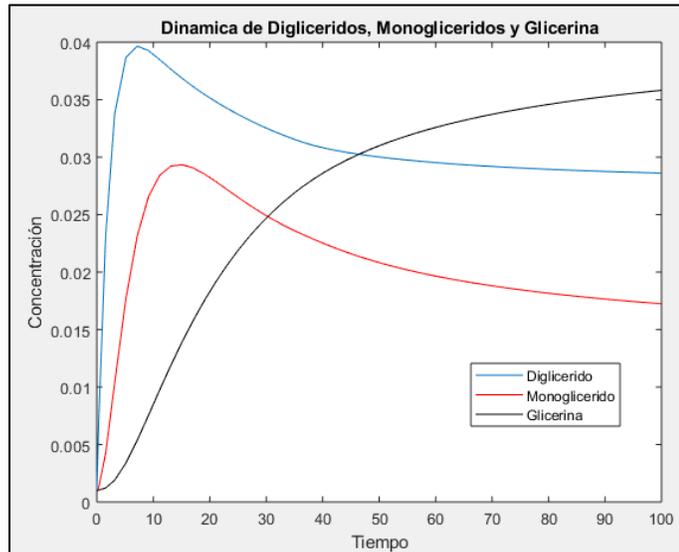


Figura 19. Curvas de la dinámica de consumo y generación de los glicéridos

Al inicio de la reacción, las concentraciones de diglicéridos y monoglicéridos son altas, mientras que la concentración de glicerina es baja. La curva correspondiente a los diglicéridos y monoglicéridos muestra valores iniciales elevados, lo que indica una abundancia de estos compuestos en la mezcla inicial. A medida que avanza la transesterificación, las concentraciones de diglicéridos y monoglicéridos disminuyen progresivamente. Esto se debe a que estos compuestos se convierten en ésteres metílicos (biodiesel) mediante la reacción de transesterificación. La curva de consumo de diglicéridos y monoglicéridos muestra una disminución gradual, ya que estos compuestos se consumen y se convierten en biodiesel.

Simultáneamente, la producción de glicerina muestra un aumento en su concentración a medida que progresa la reacción. La curva correspondiente a la producción de glicerina muestra un crecimiento gradual, ya que los triglicéridos se descomponen en glicerina y tres moléculas de ácidos grasos durante la transesterificación. La glicerina se acumula a medida que los triglicéridos se descomponen, lo que resulta en un aumento en su concentración.

A medida que la reacción se acerca a su etapa final, las curvas de consumo de diglicéridos y monoglicéridos alcanzan un punto de inflexión, donde la disminución en las concentraciones se ralentiza. Esto puede indicar que la mayor parte de los diglicéridos y monoglicéridos han sido consumidos y convertidos en biodiesel. La producción de glicerina continúa aumentando, pero eventualmente alcanza un punto máximo. Después de este punto, la concentración de glicerina puede mantenerse estable o comenzar a disminuir, dependiendo de las condiciones de reacción y la separación de los productos.

4.9.4 Consumo del alcohol etílico

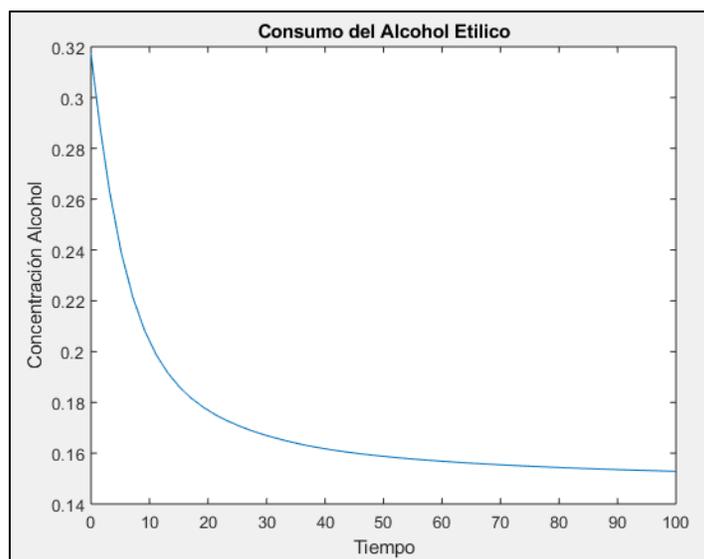


Figura 20. *Curva del consumo del alcohol para formar moléculas de esteres*

Al analizar la gráfica del consumo de alcohol durante la transesterificación, podemos observar ciertas similitudes con la curva de consumo de triglicéridos. Ambas curvas muestran una disminución gradual en las concentraciones a medida que avanza la reacción química.

Al igual que el consumo de triglicéridos, el consumo de alcohol comienza con concentraciones iniciales elevadas y experimenta una disminución progresiva a lo largo del

tiempo. Ambas curvas muestran una disminución más pronunciada a medida que la reacción se acelera y más moléculas de triglicéridos y alcohol se consumen para formar biodiesel. Además, ambas curvas alcanzan un punto de inflexión donde la disminución en las concentraciones se ralentiza, lo que indica que la reacción está llegando a su etapa final.

Sin embargo, también hay diferencias notables entre las curvas de consumo de alcohol y triglicéridos. Mientras que el consumo de alcohol tiende a disminuir más rápidamente debido a su reactividad y a que se utiliza en exceso en relación con los triglicéridos, el consumo de triglicéridos puede prolongarse más en comparación. Además, la producción de subproductos y la presencia de efectos secundarios pueden influir en la forma precisa de estas curvas, lo que puede diferir según las condiciones de reacción específicas.

4.9.5 Comparativa de producción de biodiesel, glicerina y consumo del triglicérido

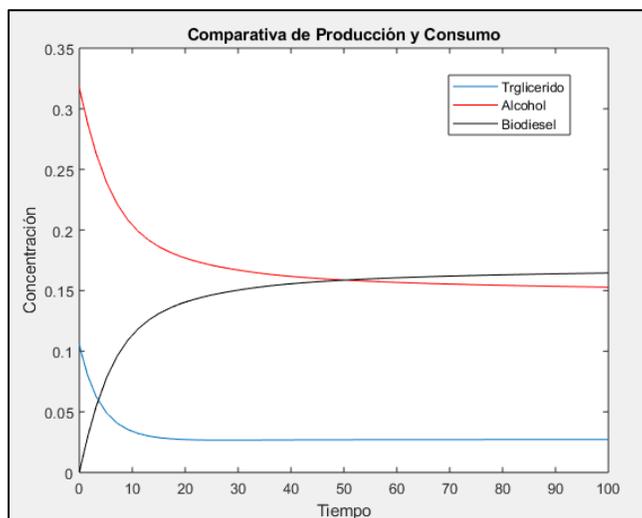


Figura 21. Comparativa de producción de biodiesel a favor del consumo de alcohol etílico, los triglicéridos y sus derivados

La comparación de las gráficas de producción de biodiesel, consumo de alcohol y consumo de triglicéridos en el proceso de transesterificación revela una dinámica interconectada

y complementaria. Estas curvas representan los cambios en las concentraciones de diferentes compuestos a lo largo del tiempo y ofrecen una visión clara de la evolución de la reacción química.

En primer lugar, la curva de producción de biodiesel muestra un crecimiento gradual, alcanzando un punto máximo y luego disminuyendo. Este patrón refleja la transformación de los triglicéridos en ésteres metílicos, que son los componentes principales del biodiesel. A medida que los triglicéridos se consumen, la producción de biodiesel aumenta hasta alcanzar su nivel máximo y luego disminuye a medida que la reacción se ralentiza y los reactivos se agotan.

Por otro lado, las curvas de consumo de alcohol y triglicéridos presentan una disminución gradual a medida que avanza la transesterificación. El consumo de alcohol refleja su reacción con los triglicéridos para formar biodiesel, mientras que el consumo de triglicéridos representa la transformación de los lípidos en biodiesel y glicerina. Estas curvas muestran una disminución progresiva de las concentraciones, con una mayor velocidad al inicio de la reacción y un ritmo más lento a medida que la reacción alcanza su etapa final. La interacción entre estas curvas es evidente. A medida que los triglicéridos se consumen, el consumo de alcohol también disminuye, ya que se requiere menos alcohol para reaccionar con los triglicéridos restantes. Al mismo tiempo, la producción de glicerina aumenta, ya que se genera como subproducto de la transesterificación de los triglicéridos.

Esta comparación nos permite apreciar la complejidad y la interdependencia de los procesos químicos involucrados en la transesterificación. Cada curva representa una parte esencial de la transformación de los triglicéridos en biodiesel, y entender su dinámica nos ayuda a optimizar el proceso y mejorar la eficiencia de producción.

4.9.6 Comparativa de producción de biodiesel y glicerina

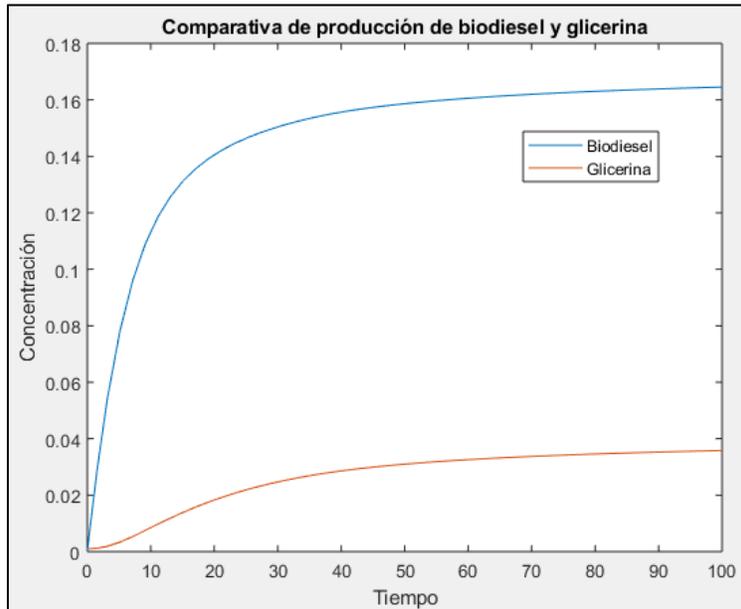


Figura 22. *Comparativa de producción de biodiesel a favor del consumo de alcohol etílico, los triglicéridos y sus derivados*

La comparación de estas curvas revela una relación inversa entre la producción de biodiesel y la producción de glicerina. A medida que la producción de biodiesel aumenta, la producción de glicerina también aumenta. Esto se debe a que ambos productos son generados a partir de la misma fuente, los triglicéridos, durante la transesterificación. A medida que se consumen los triglicéridos, se forma biodiesel y se produce más glicerina como subproducto.

Esta relación inversa entre la producción de biodiesel y la producción de glicerina tiene implicaciones importantes para el proceso de transesterificación. La optimización de la producción de biodiesel implica controlar y aprovechar eficientemente la generación de glicerina como subproducto. La separación y purificación de la glicerina son aspectos clave para obtener tanto biodiesel de alta calidad como glicerina de grado comercial.

INGENIERÍA DE DETALLE

5. Diseñar estrategias de control para el gobernador del proceso de producción.

5.1 Sistema de control en lazo cerrado

La representación de un sistema de control debe estar compuesta por un mínimo de elementos característicos de una configuración de lazo cerrado o retroalimentado, tales como:

- Un punto de referencia o set point SP.
- Un comparador entre el SP y el valor del proceso PV.
- Un controlador.
- Un elemento final de control o actuador.
- El proceso por controlar o planta
- La medición de la salida del proceso o transmisor.

Estos elementos pueden ser detallados en la imagen representativa del sistema de control de la temperatura de la planta (figura 25) implementado en Matlab/Simulink para el estudio del comportamiento de la planta. A continuación, definiremos cada componente del sistema de control y las consideraciones utilizadas para modelarlo en el entorno Simulink.

5.1.1 Punto de referencia

El sistema de control requirió de establecer un punto de referencia para la mayor producción de concentración de biodiesel, para el caso de estudio este parámetro se encuentra determinado por un valor de 0.1713 mol/litro, que con los datos de (Nouredduni H. & Zhu D., 1997) para las constantes de velocidad cinética de reacción, sería el máximo producido al ser los datos extrapolados a favor del mejoramiento de la velocidad de rendimiento que expone (Herrera Susa, 2019).

Para efectos de simulación, fue necesario linealizar o normalizar el bloque de referencia en el rango de 0 a 1, que es lo pertinente para el estudio de estos sistemas como se observó en las fuentes (Bao et al., 2009; Diyorov et al., 2016; Giosio et al., 2017; Hongqing Fang et al., 2008; Murat et al., 2015; Storli & Nielsen, 2018; Vytvytskyi & Lie, 2018).

5.1.2 Configuraciones del controlador

Como se ha mencionado anteriormente, el controlador modifica las características de respuesta del sistema bajo la modalidad de ajuste de ganancia, más conocido como control proporcional, sin embargo, para Hernández Gaviño (2010) este tipo de configuración presenta una respuesta pobre en el tiempo transitorio por lo cual es necesario agregar un componente que modifique la respuesta en este lapso, por lo cual, existen diversas configuraciones, tales como:

- Proporcional – Integral (PI).
- Proporcional – Derivativo (PD).
- Proporcional – Integrativo – Derivativo (PID).

A función de las anteriores configuraciones, se definen las ecuaciones de la salida del controlador en función de la señal de error, como se muestran a continuación:

Proporcional (P):

$$v(t) = K_p e(t) \quad (39)$$

Donde, el factor de K_p es el valor de ganancia que ajusta la respuesta del sistema.

Integral (I):

$$v(t) = K_i \int e(t) dt \quad (40)$$

Donde, el factor de K_i es la ganancia integrativa, la cual se puede escribir en función de la ganancia proporcional K_p y el tiempo de integración T_i .

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (41)$$

Derivativo(D):

$$v(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (42)$$

Donde, el factor de K_d es la ganancia derivativa, la cual se puede escribir en función de la ganancia proporcional K_p y el tiempo de derivación T_d .

$$K_d = K_p T_d \quad (43)$$

Teniendo presente que los diferentes tipos de controladores se pueden mezclar para conseguir las mejores características de ellos para el proceso, se procedió a realizar la metodología correspondiente para la sintonización del controlador sobre el horno microondas

Horno microondas

Este sistema consta de una caja de resonancia magnética que mantiene las ondas electromagnéticas dentro de sí con la función de hacer mover las moléculas dieléctricas para que con su fricción se produzca el calentamiento esperado.

El mecanismo principal es el magnetrón, un transductor que transforma la corriente eléctrica en ondas de alta frecuencia. Esta frecuencia debe ser compatible con el componente dieléctrico para que se genere la rotación esperada.

Para efectos de simulación, se manejó un sistema de primer orden, simplificando la complejidad del estudio matemático electromagnético y su fenómeno de calentamiento dieléctrico. Este sistema funcionaría como un emisor de calor que provoca el calentamiento homogéneo en toda la planta, los límites del actuador se definieron teniendo un mínimo de 0.01 y un máximo de 0.9, donde este valor corresponde a la temperatura óptima para la producción de biodiesel.

5.1.3 Planta

El proceso que se desea controlar se basa principalmente en el matraz donde ocurre la reacción de transesterificación de los ácidos grasos, para ellos, se implementó un sistema de ecuación interdependientes descrito anteriormente, que admite un valor de temperatura y registra como salida la cantidad de concentración de biodiesel en mol/litro

5.1.4 Transmisor

Se establece un instrumento hipotético que mide la concentración del biodiesel, la acondiciona y envía al controlador mediante el lazo de retroalimentación para ser comparada con el set point definido para el proceso.

5.2 Sintonización de controladores

Con base en la acción de control que se definió para el gobernador de la planta, que consiste en la variación de la temperatura, se pudo obtener la curva de reacción al escalón

unitario con la cual se puede determinar las características del sistema que permitieron la sintonización de los controladores.

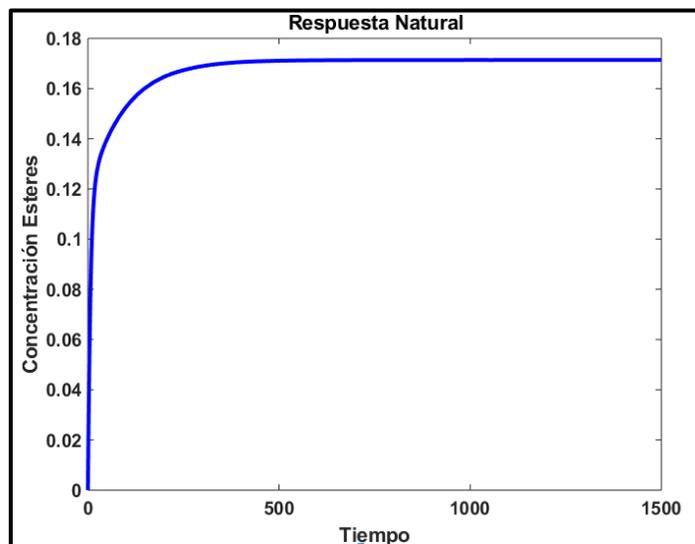


Figura 23. Respuesta Natural del sistema

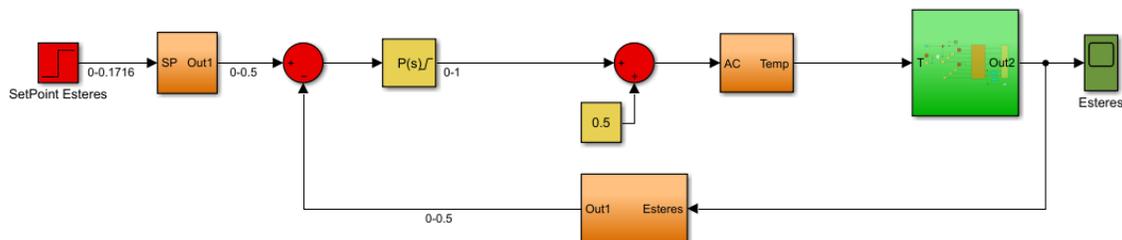


Figura 24. Diagrama de bloques control tradicional

Una vez armado el diagrama de bloques del control tradicional se abre la pestaña del controlador y se selecciona el botón “Tune”

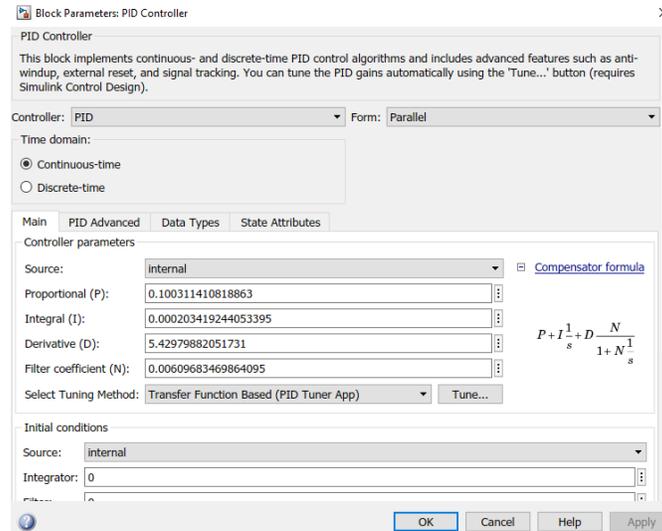


Figura 25. Ventana de parámetros de función de bloque, Simulink

5.3 Clasificar los resultados obtenidos con base en la estrategia de control y el margen de estabilidad del proceso en los escenarios simulados.

5.3.1 Respuesta de la reacción de producción de biodiesel

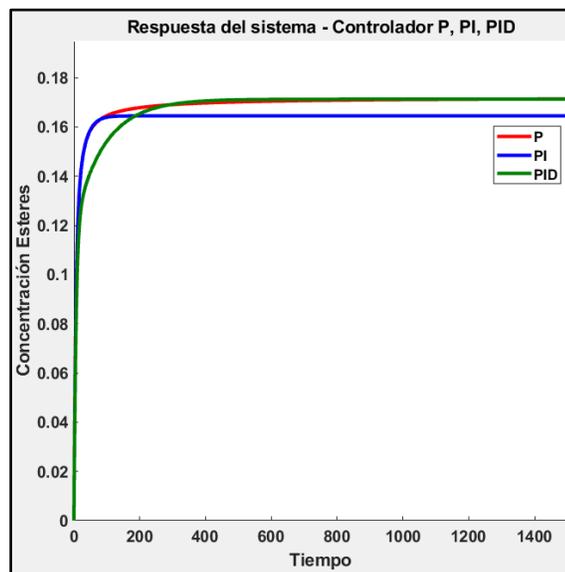


Figura 26. Respuesta de la temperatura de la planta ante los diferentes controladores

Como primera instancia es necesario conocer qué tipo de controlador es el más adecuado para el comportamiento natural del proceso a controlar, por lo tanto, se prueba con cada uno de los tipos de controladores disponibles en el bloque de Control PID de Simulink, y se realiza una gráfica comparativa con el fin de analizar el mejor tiempo de respuesta y robustez entre los controladores.

5.3.2 Tiempos de estabilización e índices de desempeño de las diferentes estrategias de control

En la siguiente tabla se presentan el tiempo de estabilización y los índices de desempeño presentados por las diferentes estrategias de control P, PI, PID.

Tabla 9.

Tiempos de estabilización e indicadores de desempeño de los diferentes controladores

Controlador	Tiempo Estabilización (5%)	Valor de Estabilización	Error de posición	Índices de desempeño		
				ISE	ITSE	IAE
P	85.38 segundos	0.1711	0.11675%	1.286	18.41	11.52
PI	79.86 segundos	0.1645	3.96964%	2.062	806.6	45.23
PID	168.3 segundos	0.1712	0.05837%	2.062	52.4	16.32

5.3.3 Constantes de los controladores sintonizados

Tabla 10.

Constantes de los controladores sintonizados a través del PID Tune

Estrategia de Control	Constante
Proporcional	P: 7.9639
Proporcional-Integral	P: 0.0934
	I: 0.2329
Proporcional-Integral-Derivativa	P: 0.1003
	I: 0.0002
	D: 5.4297

5.3.4 Respuesta del actuador

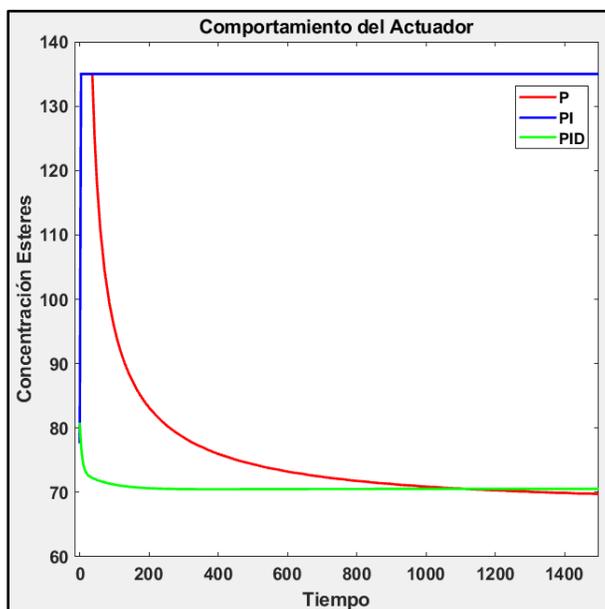


Figura 27. Comportamiento del actuador de acuerdo al controlador implementado

De lo anterior se determina lo siguiente:

Las características de comportamiento dinámico y estático de las diferentes estrategias de control conllevan a errores de posición por debajo del 5%, lo cual se encuentra en los límites permitidos para la concentración final de Esteres de biodiesel producido. Sin embargo, es posible evidenciar a través del índice de desempeño de la Integral del Error al Cuadrado (ISE) que el controlador proporcional (P) tiene una respuesta rápida en régimen transitorio, lo cual puede constatararse a través de la curva presentada en la Figura x1 y los datos registrados en la tabla #1, conllevando a que la estrategia de control sea la más óptima de las tres. Así mismo, desde el punto de vista de la exigencia operativa del actuador, es posible descartar al controlador PI debido a que en todo momento satura al actuador ya que no es capaz de llevar a la referencia al sistema, provocando que el dispositivo tenga un alto grado de exigencia operativa y un

funcionamiento poco óptimo, lo que a su vez se aprecia por medio del índice de Integral del Error Cuadrado Multiplicado por el Tiempo (ITSE), el cual es mayor en comparación con el valor de los otros dos controladores (P, PID). Finalmente, el controlador PID establece una operación de trabajo para el actuador con un mínimo de exigencia, provocando que este trabaje en un rango no superior al 60%, presentando una respuesta ligeramente lenta respecto al controlador proporcional, pero, alcanzando el valor de referencia establecido con un error inferior al 0.1% y valores aceptables en los índices de desempeño para este controlador.

Ahora con la sintonización del controlador proporcional integrativo en el proceso, es necesario observar la respuesta del mismo a diferentes perturbaciones internas que se aplican disminuyendo y aumentando un 20% la temperatura

5.3.5 Respuesta del sistema ante una reducción del 20% de la temperatura

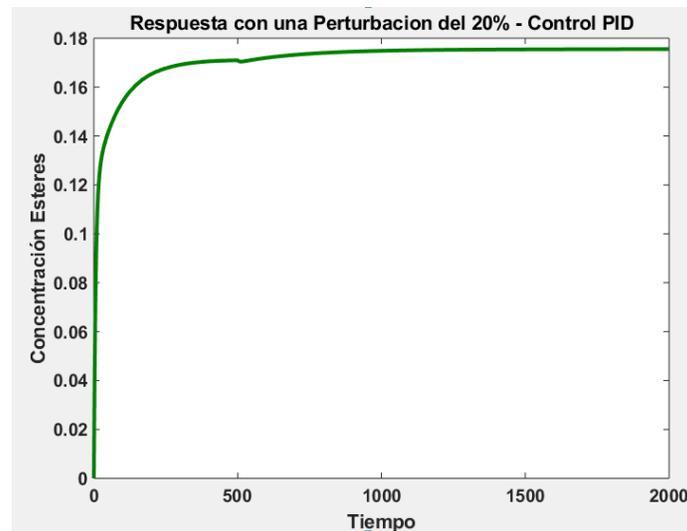


Figura 28. Respuesta del sistema con una disminución del 20% de la temperatura

Se puede apreciar que el sistema se recupera continuando la trayectoria de producción esperada, hasta alcanzar la concentración de esteres establecidos para la producción.

5.3.6 Respuesta del sistema ante un aumento del 20% de la temperatura

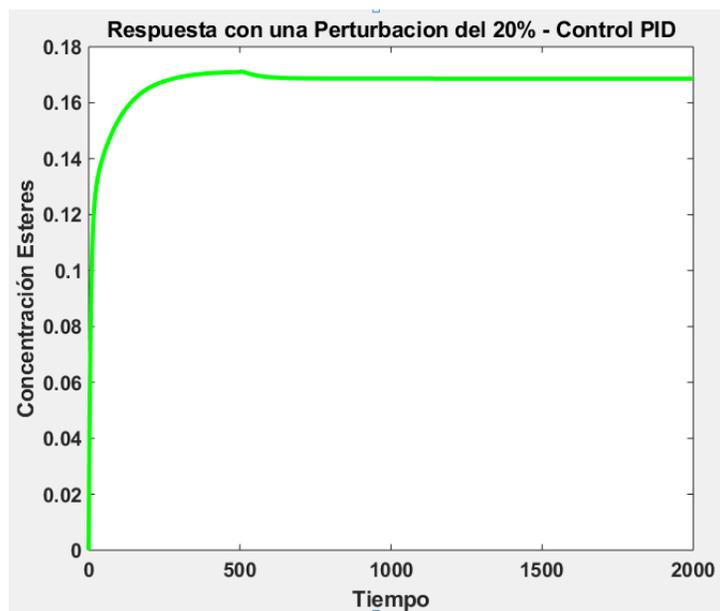


Figura 29. Respuesta del sistema con un aumento del 20% de la temperatura

Se puede apreciar que el sistema reduce el incremento, recuperándose en torno a la trayectoria de producción esperada hasta alcanzar la concentración de esteres establecidos para la producción.

6. Conclusiones

El desarrollo del modelo matemático que describe el proceso transesterificación del aceite de palma para la producción de biodiesel mediante el uso del método de destilación por radiación microondas demuestra mediante la simulación de la reacción una mejor comprensión y predicción de los parámetros clave del proceso.

El modelo matemático desarrollado ha arrojado resultados que describen con precisión las interacciones entre el uso de la radiación de microondas y los componentes activos del aceite de palma para la producción efectiva de biodiesel, proporcionando una representación precisa del proceso de transesterificación.

La implementación del modelo en Matlab-Simulink ha permitido simular y validar su desempeño en diversas condiciones, proporcionando una herramienta práctica para futuras investigaciones y aplicaciones industriales.

Se ha desarrollado una estrategia de control de temperatura efectiva que garantiza condiciones óptimas para la reacción de transesterificación, mejorando la eficiencia del proceso y la calidad del biodiesel producido.

7. Recursos Financieros

7.1 Presupuesto global

Tabla 11.

Presupuesto global (en COP).

Ítem	Rubro	Contrapartida			Fuente externa	Total
		Estudiantes	UFPS	GIDPI		
1	Gastos en personal	2'000.000	3'000.000	0	5'000.000	
2	Gastos en equipos	2'700.000	0	0	2'700.000	
3	Gastos en servicios técnicos	800.000	0	0	800.000	
4	Gastos en infraestructura	0	1'000.000	0	1'000.000	
5	Otros	2'950.000	1'100.000	0	4'050.000	
	Subtotal	8'450.000	5'100.000	0		
	Total				13'550.000	

Nota. Descripción detalla del presupuesto global

7.2 Gastos en personal

Tabla 12.

Gastos en personal (en COP).

Ítem	Personal	Función	Contrapartida			Fuente externa	Total
			Estudiantes	UFPS	GIDPI		
1	José Leonardo Meneses Duran	Investigador	2'000.000	0	0	2'000.000	
2	José Ricardo Bermúdez Santaella	Director	0	3'000.000	0	3'000.000	
		Subtotal	2'000.000	3'000.000	0		
		Total				5'000.000	

Nota. Descripción detalla de los gastos en personal

7.3 Gastos en Equipos

Tabla 13.

Gastos en equipos (en COP).

Ítem	Equipo	Cantidad	Contrapartida			Fuente externa	Total
			Estudiantes	UFPS	GIDPI		
1	Computador	1	2'700.000	0	0	2'700.000	

Subtotal	2'700.000	0	0
Total			2'700.000

Nota. Descripción detalla de los gastos en equipos

7.4 Gastos en servicios técnicos

Tabla 14.

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
Subtotal Por Fuente					2.073.600	576.000	
Total							2.649.600

7.5 Materiales e insumos

Tabla 15.

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
Subtotal Por Fuente			850.000	200.000	
Total					1.050.000

8. Referencias

- Abreu, J. L. (2012). Hipótesis, Método & Diseño de Investigación. *International Journal of Good Conscience*, 7(2), 187-197.
- Arbelaez Marin, A. M., & Rivera Quiroz, M. P. (2007). *Diseño conceptual de un proceso para la obtención de biodiesel a partir de algunos aceites vegetales colombianos*. Universidad EAFIT.
- Ávila, A., Bula, A., & Homero. (2008). Cinética de la transesterificación de la oleína de Palma africana con etanol. *Interciencia*, 33(3), 232-236.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933314>
- Bao, H., Yang, J., & Fu, L. (2009). Study on Nonlinear Dynamical Model and Control Strategy of Transient Process in Hydropower Station with Francis Turbine. *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918827>
- Borges, V., Kuczko, N., Lanterna, A., & Muñoz, C. (2018). *Diseño del proceso de producción de biodiesel y glicerina a partir de una oleagionosa*. Universidad Tecnológica Nacional.
- Castillo, J. P., Adam, M., Álvarez, P. E., & López-Zapata, B. (2015). *Control Predictivo De La Producción De Biodiesel En Un Reactor Por Lotes Por Transesterificación De Aceite De Soya*. https://doi.org/10.0/Linux-x86_64
- Connelly, M. (2015). Problemas de contaminación y respuesta del Estado chino y organizaciones sociales. *Sociedad y Ambiente*, 1(6), 28-47.

Estatuto Estudiantil, Pub. L. No. 065 (2014).

Consejo Superior Universitario. (2020, abril 23). *Acuerdo N° 11 del 2020*.

<https://ww2.ufps.edu.co/public/archivos/reglamentacion/3c526fe3f51093a221798ae3333a09b4.pdf>

Cristina, D., Arévalo, S., & Rodríguez, C. M. (2018). Estudio de caso derrames de petróleo y la necesidad de su atención desde una salud. 1 2. *Universidad de Amazonía*, 10(1), 26-29.

David Zapata, C., Martinez, I. D., Arenas Castiblanco, E., & Henao Uribe, C. A. (2007).

Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: 1. Diseño y simulación de dos procesos continuos. *Universidad Pontifice Bolivariana*, 71-82.

Diyorov, R., Glazyrin, M., & Sultonov, S. (2016). Mathematical model of francis turbines for small hydropower plants. *2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, 255-257. <https://doi.org/10.1109/IFOST.2016.7884241>

Evangelista Florez, A., Alcantar Gonzales, F. S., Ramirez de Arellano Aburto, N., Cohen Barki, A., Robledo Perez, J. M., & Cruz Gomez, M. J. (2014). Diseño de un proceso continuo de producción de biodiesel. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(2), 1-10. <https://www.researchgate.net/publication/275354168>

Feal Vázquez, J. (2007). *El mundo actual del petróleo*.

Fernandez Diez, Y. (2010). *Tratamientos Termicos Asistidos con Microondas En Proceso de Valoración Energetica*. Universidad de Oviedo.

- Gallardo Echenique, E. E. (2017). *Metodología de la Investigación: Manual Autoformativo Interactivo* (E. Barrios Ipenza, E. Gallardo Echenique, & M. A. Córdova Solís, Eds.; 1.^a ed.). Universidad Continental. <http://www.continental.edu.pe/>
- Giosio, D. R., Henderson, A. D., Walker, J. M., & Brandner, P. A. (2017). Physics Based Hydraulic Turbine Model for System Dynamics Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(2), 1-1. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2574330>
- Abreu, J. L. (2012). Hipótesis, Método & Diseño de Investigación. *International Journal of Good Conscience*, 7(2), 187-197.
- Arbelaez Marin, A. M., & Rivera Quiroz, M. P. (2007). *Diseño conceptual de un proceso para la obtención de biodiesel a partir de algunos aceites vegetales colombianos*. Universidad EAFIT.
- Ávila, A., Bula, A., & Homero. (2008). Cinética de la transesterificación de la oleína de Palma africana con etanol. *Interciencia*, 33(3), 232-236.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933314>
- Bao, H., Yang, J., & Fu, L. (2009). Study on Nonlinear Dynamical Model and Control Strategy of Transient Process in Hydropower Station with Francis Turbine. *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918827>
- Borges, V., Kuczko, N., Lanterna, A., & Muñoz, C. (2018). *Diseño del proceso de producción de biodiesel y glicerina a partir de una oleagionosa*. Universidad Tecnológica Nacional .

Castillo, J. P., Adam, M., Álvarez, P. E., & López-Zapata, B. (2015). *Control Predictivo De La Producción De Biodiesel En Un Reactor Por Lotes Por Transesterificación De Aceite De Soya*. https://doi.org/10.0/Linux-x86_64

Connelly, M. (2015). Problemas de contaminación y respuesta del Estado chino y organizaciones sociales. *Sociedad y Ambiente*, 1(6), 28-47.

Estatuto Estudiantil, Pub. L. No. 065 (2014).

Consejo Superior Universitario. (2020, abril 23). *Acuerdo N° 11 del 2020*.

<https://ww2.ufps.edu.co/public/archivos/reglamentacion/3c526fe3f51093a221798ae3333a09b4.pdf>

Cristina, D., Arévalo, S., & Rodríguez, C. M. (2018). Estudio de caso derrames de petróleo y la necesidad de su atención desde una salud. 1 2. *Universidad de Amazonía*, 10(1), 26-29.

David Zapata, C., Martínez, I. D., Arenas Castiblanco, E., & Henao Uribe, C. A. (2007). Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: 1. Diseño y simulación de dos procesos continuos. *Universidad Pontificia Bolivariana*, 71-82.

Diyorov, R., Glazyrin, M., & Sultonov, S. (2016). Mathematical model of francis turbines for small hydropower plants. *2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, 255-257. <https://doi.org/10.1109/IFOST.2016.7884241>

Evangelista Florez, A., Alcantar Gonzales, F. S., Ramirez de Arellano Aburto, N., Cohen Barki, A., Robledo Perez, J. M., & Cruz Gomez, M. J. (2014). Diseño de un proceso

- continuo de producción de biodiesel. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(2), 1-10. <https://www.researchgate.net/publication/275354168>
- Feal Vázquez, J. (2007). *El mundo actual del petróleo*.
- Fernandez Diez, Y. (2010). *Tratamientos Termicos Asistidos con Microondas En Proceso de Valoración Energetica*. Universidad de Oviedo.
- Gallardo Echenique, E. E. (2017). *Metodología de la Investigación: Manual Autoformativo Interactivo* (E. Barrios Ipenza, E. Gallardo Echenique, & M. A. Córdova Solís, Eds.; 1.^a ed.). Universidad Continental. <http://www.continental.edu.pe/>
- Giosio, D. R., Henderson, A. D., Walker, J. M., & Brandner, P. A. (2017). Physics Based Hydraulic Turbine Model for System Dynamics Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(2), 1-1. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2574330>
- Guayara, M., & Angie, B. (2019). *Diseño, montaje y puesta en marcha de un sistema de reacción de lecho fijo y flujo continuo para la producción de biodiésel*.
- Hernández Gaviño, Ricardo. (2010). *Introducción a los sistemas de control : conceptos, aplicaciones y simulación con Matlab*. Prentice Hall.
- Herrera Susa, A. (2019). *Análisis experimental de la eficiencia de un motor monocilindrico funcionando con mezclas de diesel y biodiesel de palma* [Tesis]. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Hincapié, G. M., Valange, S., Barrault, J., Moreno, J. A., & López, D. P. (2014). Effect of microwave-assisted system on transesterification of castor oil with ethanol. *Universitas Scientiarum*, 19(3), 193-200. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC19-3.emas>

- Hongqing Fang, Long Chen, Dlakavu, N., & Zuyi Shen. (2008). Basic Modeling and Simulation Tool for Analysis of Hydraulic Transients in Hydroelectric Power Plants. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(3), 834-841.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2008.921560>
- Krishnan, R. Y., & Rajan, K. S. (2017). Influence of microwave irradiation on kinetics and thermodynamics of extraction of flavonoids from *Phyllanthus emblica*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 34(3), 885-899. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170343s20150628>
- Licona Michel, Á., & Ramírez Zamudio, E. (2014). China y Estado Unidos, compromisos para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero China and USA, commitments to mitigate emissions of greenhouse gases. *Revista CIMEXUS*, IX(1), 91-104.
- Lopez Becerra, M. E., & Cantero Vergara, M. K. (2006). *Diseño y simulación de un control de modelo predictivo tipo dmc (dynamic matrix control) en un proceso continuo de producción de biodiesel*. Fundacion Universidad del Norte.
- Lopez Quiñones, A. (2017). *Obtención de biodiésel a partir de residuos de aguacate producido mediante el método de transesterificación en un reactor tipo batch*. Universidad Libre.
- López Quiñones, D. A. (2017). *Obtención de biodiésel a partir de residuos de aguacate producido mediante el método de transesterificación en un reactor tipo batch*. [Energías Alternativas, Biocombustibles]. Universidad Libre.
- Madsen, M. (2015). *Respirando mejor: Indonesia trabaja por un aire más limpio*.

- Martínez Vicente, G. (2012). *Obtención de biodiésel por transesterificación de aceites vegetales. Nuevos métodos de síntesis. Catálisis heterogénea. Radiación microondas*. Universidad de Extremadura.
- Mat Yasin, M. H., Mamat, R., Najafi, G., Ali, O. M., Yusop, A. F., & Ali, M. H. (2017). Potentials of palm oil as new feedstock oil for a global alternative fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1034-1049.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.186>
- Morales, W. G., Roggero Nazareno, L., Sequeira, A., & Chamorro, E. (2016). Estudio de las Variables de Reacción de la Transesterificación Asistida por Microondas. *Centro de Investigación en Química Orgánica Biológica*, 31, 38-46.
- Murat, D., Kosalay, I., Gezer, D., & Sahin, C. (2015). Validation of hydroelectric power plant model for speed governor development studies. *2015 4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 278-282.
<https://doi.org/10.1109/ICRERA.2015.7418709>
- Noriega Lozano, J. (2020). La importancia de la composición química en los biocombustibles de aceite de colza y ricino en la generación de agua durante la combustión. *Desarrollo e Invación en Ingeniería*, 533-541.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4031208>
- Nouredduni H., & Zhu D. (1997). Kinetics of Transesterification of Soybean. *Biocatalysis Articles*, 74(11), 1457-1463.

- Nuñez Rodriguez, J. (2017). Potencialidades de las energías alternativas en el Desarrollo del departamento Norte de Santander, Colombia. *Universidad de Santander (UNDES)*, 2(4), 7-14.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (M. Martín-Romo & E. Martín, Eds.; 5.^a ed.). Pearson Educación.
- Peters S. (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>
- Prado-Gonjal, J., & Morán, E. (2011). Síntesis asistida por microondas de sólidos inorgánicos Investigación Química Introducción. *An Quim*, 107(2), 129-136.
www.rseq.org
- Resendiz Vega, M., Mendiza Schroeder, R., & Bravo Lopez, P. (2019). Biodiesel & Combustóleo, Alternativa Sostenible. *Escuela Superior Tepeji del Río*, 11, 16-19.
<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/tepexi/issue/archive>
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77.
- Rocha, F. (2015). *Recursos naturales como alternativa para la innovación tecnológica: petróleo y gas en Brasil* (C. Baría, Ed.; Primera, Vol. 1). Banco de Desarrollo de América Latina. www.triangulo.co

- Rodríguez, G. A. (2017). Conflictos ambientales amenazan la salud de la población y la biodiversidad del planeta*. *Revista de Derecho, 1*, 327-345.
- Salinas Saavedra, J. R. (2020). Diseño y control óptimo de un reactor CSTR de transesterificación para la producción de biodiésel. *Universidad de los Andes, 1*, 1-21.
- Sierra Rubio, C., & Casas Pachon, J. M. (2011). *Análisis exergético de una planta de producción de biodiesel*. Universidad Industrial de Santander.
- Sierra Sánchez, C. (2020). Energías alternativas como agente de transformación desde el contexto educativo. *Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano*, 1-11.
<http://hdl.handle.net/20.500.12010/16062>
- Solá, A. Z., Martínez Menéndez, J., Rivas Pérez, P., Gómez Iglesias, S., Borrás, A. S., Iglesias, S. G., & Sanz Borrás, A. (2018). Literature Review on the Harmful Effects of Occupational Exposure to Hydrocarbons on Workers in External Environments. En *Med Segur Trab (Internet)* (Vol. 64, Número 252).
- Storli, P.-T., & Nielsen, T. K. (2018). Simulation and Discussion of Models for Hydraulic Francis Turbine Simulations. *IFAC-PapersOnLine, 51*(2), 109-114.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.03.019>
- Suryanto, A., Suprpto, S., & Mahfud, M. (2015). Production biodiesel from coconut oil using microwave: Effect of some parameters on transesterification reaction by NaOH Catalyst NaOH catalyst. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & amp; Catalysis, 10*(2), 162-168. <https://doi.org/10.9767/bcrec.10.2.8080.162-168>

Vytvytskyi, L., & Lie, B. (2018). Mechanistic model for Francis turbines in Open Modelica.

IFAC-PapersOnLine, 51(2). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.03.018>

Zhang, C., Lan, J., Hong, T., Gulati, T., Zhu, H., Yang, Y., & Huang, K. (2016). Dynamic

analysis and simulation on continuous flow processing of biodiesel production in

single-mode microwave cavity. *International Journal of Applied Electromagnetics and*

Mechanics, 51(2), 199-213. <https://doi.org/10.3233/JAE-160007>