

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	<small>CERTIFICADA POR</small>   <small>CO-SC 7198-1</small>
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

**Estudio del efecto del modelo termodinámico y el número de componentes sobre la estimación de costos para el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite vegetal**

PRESENTADO POR:  
Ivan Ricardo Paipilla Díaz - 82284

DIRECTOR  
Francisco Javier Vásquez Vásquez

Universidad ECCI  
Facultad de Ingeniería  
Dirección de Ingeniería Química  
Bogotá D.C., Colombia  
2024

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	<small>CERTIFICADA POR</small>   <small>CO-SC 7198-1</small>
	<b>Proceso:</b> Investigación	<b>Fecha de emisión:</b> 16-Jun-2009	<b>Fecha de versión:</b> 28-Mar-2022	

**Estudio del efecto del modelo termodinámico y el número de componentes sobre la estimación de costos para el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite vegetal**

ESTUDIANTE  
Ivan Ricardo Paipilla Diaz

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Ingeniero Químico

DIRECTOR  
Francisco Javier Vásquez Vásquez

Línea de investigación:  
Diseño e intensificación de procesos químicos y bioquímicos

Universidad ECCI  
Facultad de Ingeniería  
Dirección de Ingeniería Química  
Bogotá D.C., Colombia  
2024

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	<small>CERTIFICADA POR</small>   <small>CO-SC 7198-1</small>
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## AGRADECIMIENTOS

A la universidad ECCI por los espacios brindados para la construcción del conocimiento. A mi tutor Francisco Javier Vasquez por el apoyo, la exigencia, el compromiso que ha puesto en este proyecto, también por todas las enseñanzas que me ha transmitido durante todo el desarrollo. Al ingeniero Manuel Mayorga por todo el apoyo brindado, por siempre atender a todas y cada una de las consultas que expuse.

A mis padres y a mi hermano por siempre estar presentes para impulsarme a continuar y motivarme a dar cada paso sin importar cuánto tiempo me tomará. A Breitner Marquez y Natalia Fajardo por su apoyo incondicional y palabras de aliento, por alentarme a no rendirme.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	<small>CERTIFICADA POR</small>   <small>CO-SC-7188-1</small>
	<b>Proceso:</b> Investigación	<b>Fecha de emisión:</b> 16-Jun-2009	<b>Fecha de versión:</b> 28-Mar-2022	

## LISTA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	3
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>5</b>
LISTA DE FIGURAS.....	6
<b>RESUMEN.....</b>	<b>7</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
<b>3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>11</b>
<b>4. OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	12
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
<b>5. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
5.1. Materias Primas.....	13
5.2. Transesterificación.....	18
5.3. Separación.....	20
5.4. Métodos de predicción de propiedades.....	21
5.5. Simulación.....	25
<b>6. DISEÑO METODOLÓGICO.....</b>	<b>26</b>
6.1. Estimación de propiedades.....	26
6.2. Análisis de sensibilidad.....	27
6.3. Evaluación energética y económica.....	31
<b>7. RESULTADOS.....</b>	<b>32</b>
7.1. Estimación de propiedades.....	32
7.2. Análisis de sensibilidad.....	33
7.3. Evaluación energética y económica.....	45
<b>8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>50</b>
<b>9. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>52</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	<small>CERTIFICADA POR</small>   <small>CO-SC 7188-1</small>
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Tabla 1. Nomenclatura de ácidos grasos	14
Tabla 2. Método UNIFAC	22
Tabla 3. Método Joback-Reid	23
Tabla 4.. Método Marrero-Gani	24
Tabla 5. Método Constantinou-Gani	25
Tabla 6. Constantes cinéticas del proceso	27
Tabla 7. Energías de activación	27
Tabla 8. Porcentaje de error en estimación de propiedades: Trilinoleina	33
Tabla 9. Porcentaje de error en estimación de propiedades: Ácido Palmítico	33
Tabla 10. Porcentaje de error en estimación de propiedades: Mezcla de ésteres	34
Tabla 11. Volumen de diseño de reactor Aceite de Palma	35
Tabla 12. Volumen de diseño de reactor Aceite de Soja	35
Tabla 13. Volumen de diseño de reactor Aceite de Jatropha	36
Tabla 14. Diseño del equipo de lavado	43
Tabla 15. Diseño equipo de decantación	44
Tabla 16. Análisis Normativa NTC Biodiesel (aceite de palma)	45
Tabla 17. Análisis Normativa NTC Biodiesel (aceite de soja)	45
Tabla 18. Análisis Normativa NTC Biodiesel (aceite de jatropha)	46
Tabla 19. Comparativa del modelo de estimación en el dimensionamiento	47
Tabla 20. Comparativa del modelo de estimación de propiedades en el consumo de energía	52
Tabla 21. Costos por equipo para cada método de estimación	56

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Diagrama de bloques del proceso de producción de biodiesel	9
Ilustración 2. Composición másica de ácidos grasos de diversos aceites	15
Ilustración 3. Composición másica de triglicéridos del aceite de palma	16
Ilustración 4. Composición másica de triglicéridos del aceite de soja	17
Ilustración 5. Composición másica de triglicéridos del aceite de Jatropha	18
Ilustración 6. Reacción de transesterificación	19
Ilustración 7. Diagrama PFD del proceso	29
Ilustración 8. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 1 triglicérido (aceite de palma)	36
Ilustración 9. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 1 triglicérido (aceite de soja y jatropha)	37
Ilustración 10. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 3 triglicéridos (aceite de palma)	37
Ilustración 11. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 3 triglicéridos (aceite de soja)	38
Ilustración 12. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 3 triglicéridos (aceite de jatropha)	38
Ilustración 13. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 6 triglicéridos (aceite de palma)	39
Ilustración 14. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 6 triglicéridos (aceite de soja)	39
Ilustración 15. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 6 triglicéridos (aceite de jatropha)	40
Ilustración 16. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 9 triglicéridos (aceite de palma)	40
Ilustración 17. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 9 triglicéridos (aceite de soja)	41
Ilustración 18. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 9 triglicéridos (aceite de jatropha)	41
Ilustración 19. Flujo energético en el calentador	47
Ilustración 20. Flujo de energía en el reactor	48
Ilustración 21. Flujo energético rehervidor	48
Ilustración 22. Flujo energético en el condensador	49
Ilustración 23. Costos del Calentador	53
Ilustración 24. Costos del Reactor	53
Ilustración 25. Costos del equipo de lavado	54
Ilustración 26. Costos del decantador	54
Ilustración 27. Costos de la columna de destilación	54
Ilustración 28. Costos de capital fijo	55

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## RESUMEN

El biodiesel es un biocombustible ecológicamente aceptable para sustituir al diesel derivado del petróleo, su proceso de producción comúnmente involucra el uso de aceites vegetales y alcoholes de cadena corta como el etanol. También se emplean diversas etapas entre las cuales destacan el pre-acondicionamiento, reacción (transesterificación) y separación (lavado, decantación y destilación), en estas fases se involucran cambios físicos y químicos que producen interacciones entre las moléculas presentes en las materias mencionadas anteriormente.

En este estudio se analiza el proceso de producción de biodiesel enfocando la composición de tres aceites vegetales (palma, soja y jatropha), representando la estructura de estas materias primas en diferentes secciones para evaluar el efecto de cada selección en el proceso. Sumado a esto se evalúan tres modelos de estimación de propiedades con el fin de establecer cuál de ellos estima de forma más precisa las propiedades de los aceites vegetales y el biodiesel, para ello se analiza el porcentaje de error de cada método respecto a datos experimentales encontrados en la literatura. Adicionalmente, se emplea el software de simulación libre DWSIM para representar el proceso tomando en cuenta las estructuras y el modelo de estimación de propiedades seleccionados anteriormente además de dimensionamiento previo de los equipos. Por último, se realiza el costeo de los equipos de acuerdo a la condición específica de cada configuración, los resultados se comparan paralelamente con el número de moléculas y el tipo de aceite empleado.

A partir de estos análisis se determina que el método de menor porcentaje de error en la estimación de propiedades es el desarrollado por Constantinou-Gani, además, se evidencia que el dimensionamiento de los equipos tiene variaciones ligeras y por lo tanto las diferencias en los costos totales entre cada una de las configuraciones es menor a 3%.

**PALABRAS CLAVE:** Biodiesel, Aceite, Simulación, Termodinámica, Costos

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## 1. INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles son combustibles obtenidos a partir de materia orgánica, por ejemplo, plantas, algas, cultivos agrícolas y residuos de los mismos (Romanelli et al., 2016). Los biocombustibles se clasifican de acuerdo a la biomasa de la cual se producen siendo de primera generación los biocombustibles producidos a partir de cultivos alimenticios, la segunda generación de biocombustibles se compone de aquellos que se producen a partir de recursos como residuos de cultivos, residuos forestales, cultivos no alimenticios, por último, la tercera generación de biocombustibles se obtiene por medio de cultivos acuáticos (Cortés-Sánchez et al., 2019)

Los biocombustibles se dividen en tres categorías principales según su estado físico: líquidos, sólidos y gaseosos (Ramírez et al., 2012). Los biocombustibles líquidos, son ampliamente utilizados en vehículos y maquinaria, y se producen a partir de materias primas como aceites vegetales y cultivos ricos en azúcares o almidones siendo los más estudiados y desarrollados a nivel industrial el biodiesel y el bioetanol. Los biocombustibles sólidos se emplean en calefacción y generación de energía y se obtienen a partir de materiales orgánicos sólidos, como residuos forestales y agrícolas. Por último, los biocombustibles gaseosos, como el biogás y el biohidrógeno, son valiosos para aplicaciones industriales y de transporte, y se generan mediante procesos de fermentación anaeróbica o descomposición de biomasa (Hernández et al., 2009).

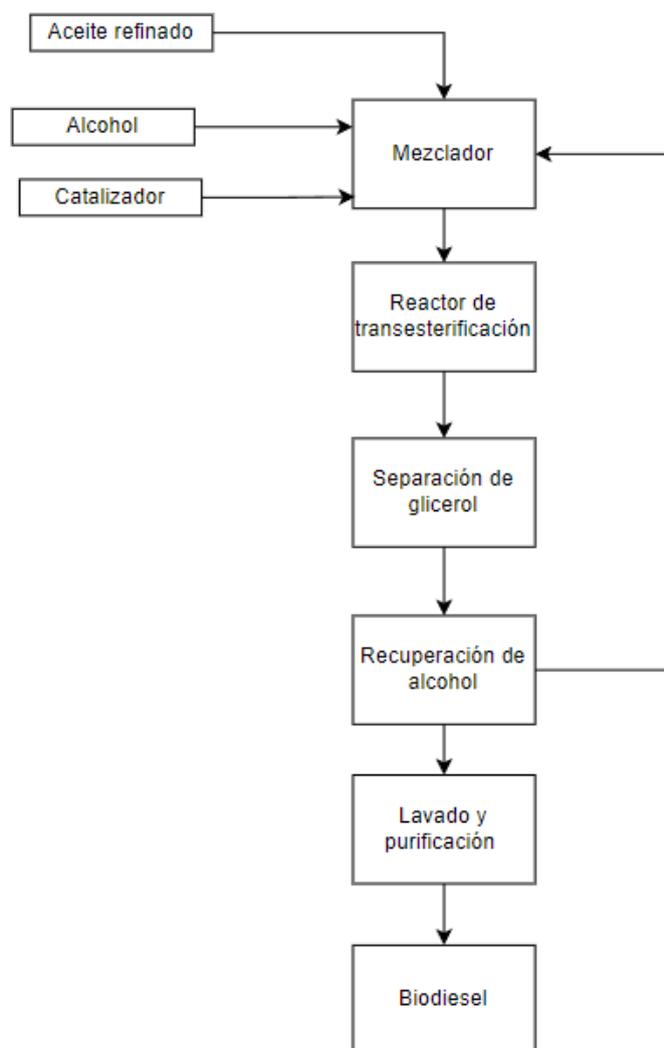
El biodiesel se define químicamente como una mezcla de ésteres de alquilo, usualmente de metilo y etilo, con cadenas largas de ácidos grasos. El biodiesel es un biocombustible producido con materias primas de origen vegetal o animal que puede reemplazar el uso de combustibles de origen fósil utilizado en motores diesel (Callejas & Quezada, 2009) es biodegradable y no es tóxico, el uso del biodiesel beneficia ampliamente al medio ambiente ya que reduce de una manera significativa la emisión de gases de efecto invernadero como los hidrocarburos resultantes de la combustión incompleta como el monóxido de carbono (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales [ASTM], 2002)

Durante el proceso de producción de biodiesel se desarrollan tres etapas principales: reacción, separación y lavado (Ilustración 1). Previo a primera etapa se lleva a cabo el pre acondicionamiento térmico de los aceites, para ello, se calienta el aceite hasta un punto cercano a la temperatura de reacción (entre 50 a 60 °C) (Ahmad et al., 2012), posteriormente tiene lugar la transesterificación en medio básico, donde los triglicéridos presentes reaccionan con un alcohol en presencia de un catalizador como hidróxido de sodio, para producir ésteres alquílicos (biodiesel) y glicerol como subproducto (Knothe et al., 2005 ; Rokhum et al., 2022).

Por otro lado, la fase de separación presenta diferentes alternativas de acuerdo a las condiciones de reacción (temperatura, catálisis, número de etapas). Los procesos comúnmente usados para la separación de biodiesel incluyen la destilación simple y al vacío empleadas para la remoción y recuperación de alcohol (Suthar et al., 2019), columnas de

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	<small>CERTIFICADA POR</small>   <small>CO-SC-7188-1</small>
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

absorción (Morais et al., 2018), decantación (Noureddin et al., 2014), coalescencia líquido-líquido (Suthar et al., 2019) empleadas para la remoción de glicerol.



*Ilustración 1. Diagrama de bloques del proceso de producción de biodiesel*

Las propiedades físicas y químicas del biodiesel lo distinguen como un combustible versátil y “respetuoso” (Ramos & Villar, 2016) con el medio ambiente. Desde el punto de vista físico, el biodiesel presenta una viscosidad similar a la del diesel convencional (Santamaría et al, 2003) lo que facilita su uso en motores diésel existentes sin necesidad de modificaciones significativas. De acuerdo a la normativa (ASTM, 2002) el biodiesel debe reportar índice de acidez máximo de 0,8 mg KOH/g y contenido de alcohol de máximo 0,2 %m/m.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

En Colombia, la producción industrial de biodiesel inició en enero de 2008 y se optó por la utilización del aceite de palma como materia prima, debido a que el país es el mayor productor de aceite de palma en latinoamérica (Delgado et al, 2015). Según Fedebiocombustibles, (2022) El sector de los biocombustibles cerró el 2022 con récord en la demanda de biodiesel de aceite de palma al llegar a las 634 miles de toneladas comercializadas, un dato que le permitió superar a su mejor año histórico y que proyecta al 2023 como otro periodo de crecimiento. En 2022 se consumieron 685 mil toneladas o 207 millones de galones de biodiésel producido a partir de aceite de palma, cada uno de estos galones de energía líquida renovable, reemplazo un galón de diésel fósil o ACPM, el sector transporte de carga, pasajeros, paqueteo y mercancías, por segundo año consecutivo rompió su registro de consumo, con un crecimiento cercano al 8% respecto del 2021, apostándole de manera concreta a la transición energética.

Actualmente, Colombia cuenta con 12 plantas que producen biodiesel, repartidas en diferentes zonas del país, principalmente instaladas en zonas productoras de aceite de palma. Las plantas productoras son: Biocombustibles sostenibles del Caribe, Oleflores, Romil de la Costa, Biodiesel de la Costa, Odín Energy, BioD (Ramírez-Camacho & Rodríguez-Pava, 2019) La planta de producción de BioD, ubicada en el municipio de Facatativá, Cundinamarca, tiene capacidad de producción de aproximadamente 200.000 toneladas por año, es una de las plantas más robustas de Colombia y suple la mayor parte del biodiesel producido en Colombia, esto corresponde alrededor del 53% de la producción del país (Fedebiocombustibles, 2022).

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La producción de biodiesel a escala industrial es un proceso que requiere la implementación de diversas operaciones con desafíos tanto en el análisis técnico de su funcionamiento como en el estudio económico de su viabilidad (Liu et al., 2021), por su parte las etapas de reacción y separación son fundamentales para determinar la eficiencia y rentabilidad del sistema global (Pasha et al., 2021). Uno de los factores determinantes para la estimación precisa de los costos es el dimensionamiento de los equipos empleados en el proceso, el diseño de estos requiere considerar diversos factores como la representación de propiedades termodinámicas, flujo volumétrico, flujo másico, flujo molar, interacciones moleculares entre otros.

En la literatura, se han desarrollado diferentes alternativas para el dimensionamiento de equipos que se ajustan a diversas situaciones y necesidades, así mismo, se han propuesto modelos para la determinación de las propiedades termodinámicas de una sustancia o compuesto. Sin embargo, en el caso particular de la producción de biodiésel no se ha establecido claramente el ensamble de factores que permita representar el sistema desde una perspectiva amplia abarcando la forma más real del sistema y así implementar estrategias para optimizar el consumo energético, el diseño de equipos y por ende los costos asociados a la producción de este biocombustible. A pesar de que diversos autores como Avinash & Murugesan (2017), Liu et al., (2021), Arenas Sánchez (2021), Zapata (2007) han estudiado la viabilidad económica de la producción de biodiesel, el enfoque de estos estudios deja de lado la composición de triglicéridos de los aceites vegetales, simplificando su estructura a moléculas representativas (Zapata, 2007) o evaluando otros aspectos dentro del proceso (Arenas Sánchez, 2021).

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

### 3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El aumento en la demanda mundial de combustibles fósiles (La república, 2024) ha producido la liberación de una considerable cantidad de contaminantes y la reducción de los recursos disponibles. Como resultado, las alternativas a los combustibles fósiles, tales como el biodiésel, el biogás y los bioalcoholes, se han vuelto indispensables para la conservación de los recursos existentes y la reducción de la contaminación ambiental.

El biodiésel, un biocombustible producido a partir de materias primas de origen vegetal o animal, es biodegradable y no tóxico, puede reemplazar el uso de combustibles fósiles en motores diésel (ASTM D 6751:2002). El uso de biodiésel ofrece numerosos beneficios ambientales. Principalmente, reduce de manera significativa la emisión de gases de efecto invernadero, especialmente el CO<sub>2</sub>, con una disminución de aproximadamente el 80% en comparación con los combustibles fósiles (Castro-Martínez, C. et al., 2012). Además, elimina el 100% de las emisiones de óxidos de azufre debido a la ausencia de este elemento en su estructura (Tickell, J., 2006). El biodiésel también mejora la salud pública al reducir las enfermedades respiratorias asociadas a la degradación de combustibles fósiles, gracias a la disminución del material particulado en aproximadamente un 70% (Zhang, Y., 2003).

En este contexto, es importante resaltar que la producción de biocombustibles está alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU (Organización de las Naciones Unidas, 2015). En particular, la producción de biodiésel está directamente relacionada con los objetivos 7 y 12, que se refieren a la energía no contaminante y a la producción y consumo responsables. Estos objetivos establecen metas específicas para la transición de combustibles fósiles a fuentes de energía renovables, sostenibles y de bajo impacto ambiental en 2015.

Por otro lado, se ha evidenciado que para considerar viable la producción de biodiesel como alternativa sostenible es necesario optimizar los aspectos del proceso de producción, fundamentalmente los costos asociados, particularmente en las etapas de reacción y separación que representan una parte importante del costo total (Farouk et al., 2024).

El presente estudio tiene como objetivo abordar el costeo de las etapas anteriormente mencionadas involucrando la composición teórica de los aceites vegetales reportada en la literatura disponible así como la selección de un modelo de contribución de grupos que estime de manera precisa las propiedades termodinámicas de las sustancias puras y las mezclas. Con este enfoque se contrastan diversas configuraciones y su efecto en el dimensionamiento de equipos, consumo energético y estimación de costos.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	<small>CERTIFICADA POR</small>   <small>CO-SC-7188-1</small>
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. OBJETIVO GENERAL

Identificar el efecto de diversas combinaciones de factores en la estimación de costos de las etapas de reacción y separación del proceso de producción de biodiesel.

### 4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el modelo de contribución de grupos que estima de forma más precisa las propiedades termodinámicas de las sustancias puras más representativas (tripalmitina, trioleína, trilinoleína) y sus derivados.
- Establecer la combinación de factores (el modelo de contribución de grupos y número de componentes) que representa de mejor forma las propiedades termodinámicas de las mezclas.
- Contrastar la variación en el dimensionamiento de equipos, el consumo energético y la estimación de costos en las etapas de transesterificación, decantación y destilación para la combinación de factores seleccionada.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. Materias Primas

Los aceites son sustancias líquidas que se obtienen a partir de plantas, semillas, nueces o frutas (Durán Agüero et al., 2015). Desde un punto de vista físico, los aceites son líquidos a temperatura ambiente y su consistencia puede variar desde fluida y ligera hasta espesa y viscosa, dependiendo de su origen y composición. Tienen una baja densidad, lo que les permite flotar en el agua, y su color puede oscilar desde transparente hasta amarillo o verdoso (Hernández et al., 2009).

Los aceites se componen principalmente por triglicéridos, que son ésteres formados por glicerol y ácidos grasos (Durán Agüero et al., 2015), estos ácidos grasos pueden ser saturados como el ácido láurico y el ácido palmítico o insaturados como los ácido oleico, linoleico y linolénico (Pons, 2015), los ejemplos más comunes de aceites utilizados industrialmente son el aceite de coco, aceite de palma, aceite de oliva, aceite de canola, aceite de maíz y el aceite de girasol (Pons, 2015).

La mezcla de ácidos grasos que componen un triglicérido puede presentar diferentes configuraciones de acuerdo a su linealidad y homogeneidad. En primer lugar respecto a la linealidad de las cadenas, los triglicéridos pueden ser totalmente lineales o presentar enlaces dobles. Por otro lado, respecto a la uniformidad de las moléculas, cuando el triglicérido se forma por una sola especie de ácido graso se conoce como triglicérido simple (Litchfield, 2012), mientras que cuando se componen de dos o más cadenas diferentes de ácidos grasos en la estructura se conoce como triglicérido mixto.

Los triglicéridos suelen nombrarse mediante diferentes nomenclaturas. En primer lugar, teniendo en cuenta el nombre de cada ácido sustituyendo por el sufijo -oil o el sufijo -o y la posición en la cadena (Litchfield, 2012), por ejemplo, un triglicérido compuesto por los ácidos grasos palmítico, oleico y esteárico se nombra como 1-palmitoil-2-oleoil-3-estearoil. Otra alternativa para nombrar triglicéridos, emplea algunas abreviaciones para simplificar la nomenclatura, para ello se usa una letra mayúscula asignada a cada ácido graso (Litchfield, 2012) como se muestra a continuación:

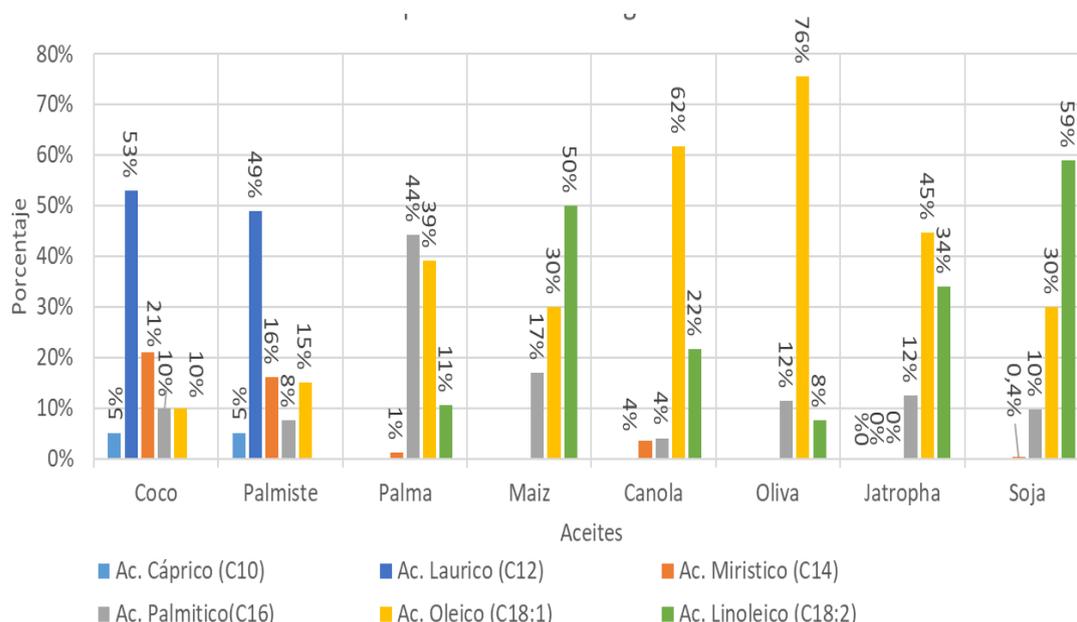
*Tabla 1. Nomenclatura de ácidos grasos*

Ácido graso	Abreviatura	Acido Graso	Abreviatura
Decanoico	D	Esteárico	S
Láurico	La	Oleico	O
Mirístico	M	Linoleico	L
Palmítico	P	Linolénico	Ln

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

En el proceso de fabricación de biodiesel, se requieren concentraciones relativamente bajas de ácidos grasos libres en los aceites previo a la etapa de transesterificación, para ello se lleva a cabo la reacción de esterificación con el fin que las moléculas de ácidos libres reaccionan con un alcohol para producir ésteres que pueden separarse del resto del aceite, este proceso preliminar favorece la transesterificación ya que puede aumentar la velocidad de reacción y disminuir las reacciones no deseadas como la formación de jabón (Sarín, 2012).

Las composiciones de diferentes aceites comúnmente usados en la industria como el aceite de palma, aceite de coco, aceite de palmiste, aceite de soja, aceite de maíz, aceite de canola, aceite de oliva y aceite de jatropha se presentan a continuación (Scrimgeour, 2005; Przybylski et al., 2005; Chen et al., 2007; Deen et al., 2021):



*Ilustración 2. Composición de ácidos grasos de diversos aceites*

Como se mencionó anteriormente, cada aceite se compone de una mezcla específica de triglicéridos que pueden ser saturados o presentar desde una hasta nueve insaturaciones. Esta variabilidad en la composición de triglicéridos también impacta en la versatilidad de los aceites en aplicaciones industriales, por lo tanto la selección adecuada de aceites basada en su composición de triglicéridos es esencial para satisfacer las necesidades específicas de procesamiento industrial.

Este estudio plantea la selección de tres aceites (palma, soja y jatropha) para la producción de biodiesel tomando en cuenta diversos factores tales como el uso a gran escala, la composición de triglicéridos, la producción y el costo de cada materia prima, la competencia con otras aplicaciones relacionados al sector alimenticio y la eficiencia reportada en la literatura.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	<small>CERTIFICADA POR</small>   <small>CO-SC 7188-1</small>
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

### 5.1.1. Aceite de palma

El aceite de palma es una de las principales materias primas empleadas para la producción de biodiesel debido a su bajo costo de adquisición y amplio comercio a nivel internacional (Dey et al., 2021). En la estructura de este aceite predominan los ácidos grasos palmítico y oleico por lo tanto la mezcla de triglicéridos presenta saturaciones e insaturaciones) esta combinación confiere al biodiesel derivado del aceite de palma propiedades específicas, tales como una mayor fluidez a bajas temperaturas (Koushki et al., 2015), mejorando así su capacidad para funcionar en una variedad de condiciones climáticas. La Ilustración 3, muestra la composición porcentual de triglicéridos en el aceite de palma (Tan & Nehdi, 2012).

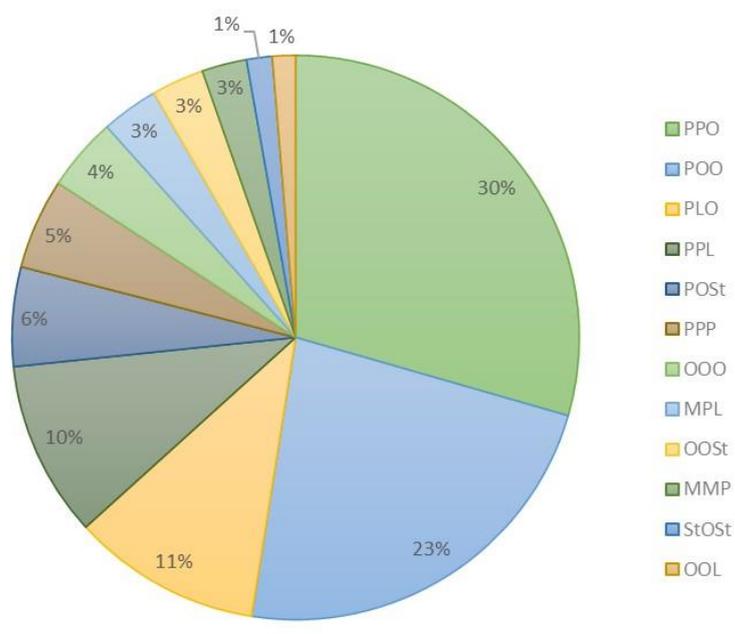
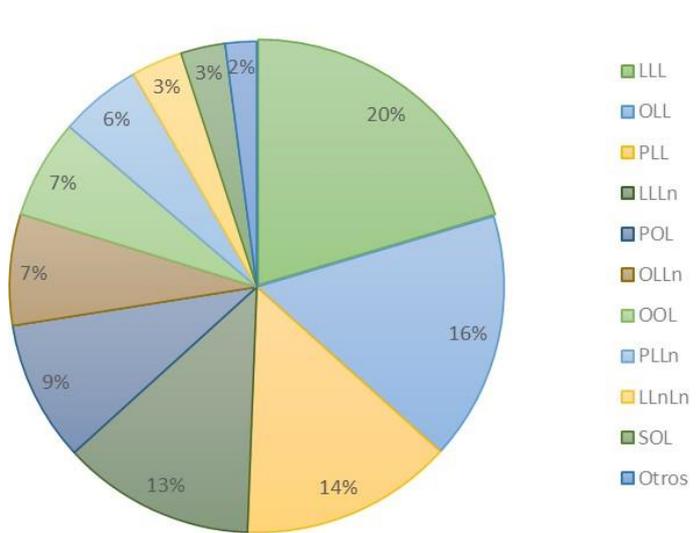


Ilustración 3. Composición másica de triglicéridos del aceite de palma

### 5.1.2. Aceite de Soja

El aceite de soja es uno de los tres principales insumos para la producción de biodiesel puesto que el cultivo de soja es practicado en diversas regiones por lo tanto es un grano abundante (Machado et al., 2013). El aceite de soja se caracteriza por su composición, donde los ácidos oleico y linoleico son los componentes principales. Esta característica significa que las insaturaciones predominan en las cadenas de triglicéridos que conforman el aceite (Ndiaye et al., 2005). La presencia de estas insaturaciones confiere al biodiesel derivado del aceite de soja propiedades favorables, como una mayor biodegradabilidad y una menor viscosidad, mejorando así su desempeño como combustible. En la Ilustración 4 se presenta la composición de triglicéridos establecida por Laghari et al., (2020).

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	



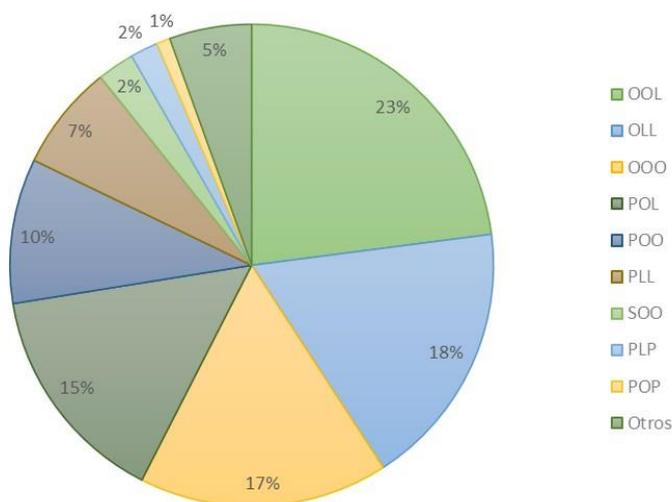
*Ilustración 4. Composición másica de triglicéridos del aceite de soja*

### **5.1.3. Aceite de *Jatropha***

En Colombia, el aceite de *Jatropha* ha sido considerado como una alternativa al uso de especies que compiten con cultivos alimenticios en la producción de biodiesel, debido a que este aceite es altamente nocivo al consumo humano (Ramón et al., 2018), lo que lo hace especialmente apto para su aplicación en la generación de biocombustibles sin interferir en la seguridad alimentaria.

Su composición es rica en ácidos grasos de cadena mediana como el ácido palmítico, además, de ácidos insaturados como los ácidos oléico y linoléico (Akbar et al., 2009) , esto añade flexibilidad al biocombustible, mejorando sus características de fluidez y adaptabilidad a diversas condiciones de temperatura. En la Ilustración 5 se resume la composición de triglicéridos presentes en el aceite de *Jatropha* reportadas por Akbar et al.,(2009)

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	



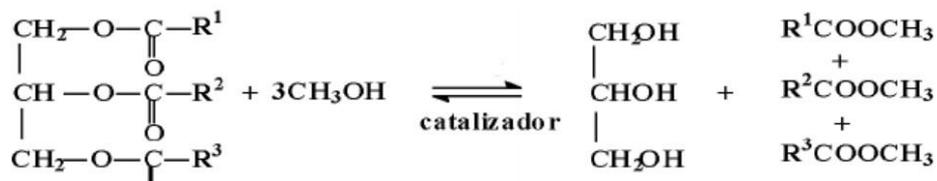
*Ilustración 5. Composición másica de triglicéridos del aceite de Jatropha*

## 5.2. Transesterificación

La transesterificación comprende el proceso de transformación de un éster y un alcohol, en el cual se produce un intercambio del grupo funcional del éster con el grupo funcional del alcohol, esto quiere decir, que se produce un éster diferente y un alcohol como subproducto (Patel & Shah, 2015)

En la producción de biodiesel la transesterificación es la reacción principal del proceso, en este caso, los ésteres presentes en los aceites, es decir triglicéridos, reaccionan con un alcohol siendo comúnmente usados el alcohol etílico y el alcohol metílico (Patel & Shah, 2015). La relación estequiométrica de esta reacción indica que una molécula de triglicérido reacciona con 3 moléculas de alcohol para producir tres moléculas de alquil-éster (biodiesel) y una molécula de glicerol (Atadashi et al., 2011). Sin embargo, en el transcurso de reacción se producen subproductos no deseados específicamente monoglicéridos y diglicéridos formados en las primeras etapas de la reacción. Debido a estos subproductos la producción de biodiesel mediante transesterificación requiere diversas etapas posteriores a la reacción como separación de glicerol, neutralización y separación de metanol, separación de ácidos grasos libres, lavado y secado (Pasha et al., 2021).

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	



*Ilustración 6. Reacción de transesterificación (Torossi & Sanchez)*

Las condiciones de esta reacción han sido estudiadas por diversos autores los cuales sugieren que se debe vigilar el contenido de humedad presente en el alcohol y la composición de ácidos grasos libres debido a que estos factores pueden favorecer la hidrólisis de triglicéridos a ácidos grasos libres (Romano et al., 2011). Además se ha reportado que la temperatura de reacción adecuada para este proceso es de 60°C y se sugiere que la relación molar alcohol:aceite debe ser al menos de 6:1 para favorecer la conversión en biodiesel (Pasha et al., 2021). Por otro lado, comúnmente se emplea un set de dos reactores continuos de tanque agitado (CSTR) con una etapa de decantación y filtración de glicerol entre ellos.

La reacción de transesterificación se favorece mediante el uso de catálisis externa, la cual puede ser implementada como catálisis homogénea, heterogénea, nano-heterogénea, enzimática o por superfluidos. El primer caso se refiere al uso de impulsores en la misma fase que los reactivos, comúnmente en fase líquida siendo los catalizadores más usados los alcóxidos de metales alcalinos (metóxidos de sodio y potasio), ácidos (sulfúrico y sulfónico), bases (hidróxidos de sodio y potasio) (Thangaraj et al., 2019). Esta catálisis requiere etapas de separación y recuperación del catalizador posteriores a la producción, lo cual genera costos adicionales al proceso.

Por otro lado, la catálisis heterogénea, en el caso específico de la producción de biodiesel, requiere el uso de catalizadores en fase sólida, comúnmente se emplean catalizadores básicos como los óxidos de calcio, magnesio y potasio. En este caso, la recuperación del catalizador no requiere procesos extra por lo cual se reduce el costo de esta etapa y se generan menos contaminantes (Mukhtar et al., 2022).

El uso de enzimas en la producción de biodiesel se ha estudiado como alternativa a la catálisis básica empleada tradicionalmente para las reacciones de transesterificación, el biocatalizador de interés en esta técnica son las lipasas (Morell et al, 2018), un tipo de enzimas empleadas para el catabolismo de triglicéridos, estos catalizadores se extraen de microorganismos como levaduras u otros hongos filamentosos.

El proceso de producción de biodiesel mediante transesterificación catalizada con enzimas requiere condiciones de operación más bajas respecto a presión y temperatura (Ramírez et al., 2012) además, se reduce la formación de subproductos y en algunos casos produce un

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

producto con características mejoradas como estabilidad oxidativa. Otro de los beneficios de este método de producción se encuentra en la resistencia de las lipasas al contacto con agua lo cual disminuye costos de recuperación del catalizador (Hama & Kondo, 2013). Sin embargo, a pesar de las ventajas expuestas anteriormente la catálisis enzimática presenta una desventaja significativa respecto a la catálisis tradicional: elevados costos de producción, esto se debe a que su proceso de fabricación usualmente requiere cultivar los microorganismos portadores de las enzimas lipasas.

### 5.3. Separación

#### 5.3.1. Decantación

La decantación es una operación unitaria que consiste en la separación de líquidos inmiscibles basándose en la diferencia de densidades y el efecto de la gravedad sobre las sustancias (López, J. C, 2013).

El proceso implica verter cuidadosamente una mezcla heterogénea en un recipiente previamente diseñado y permitir que las fases se separen naturalmente debido a la diferencia en sus densidades (Harriott et al., 1991). Durante este proceso, las partículas sólidas o líquidas más densas se sedimentan en el fondo del recipiente, mientras que la fase menos densa se acumula en la parte superior.

Es un proceso relativamente simple y económico que se utiliza en una variedad de aplicaciones (Foust et al., 1987). Para el caso particular del biodiesel, la decantación se emplea para reducir el contenido de glicerina o glicerol en el producto final, además, eliminar los excesos de agua (Ahmad et al., 2012).

#### 5.3.2. Lavado

El proceso de lavado consiste en aprovechar la diferencia de solubilidad de los componentes de una mezcla en un solvente. Según Drapcho et al. (2008) para esta operación es común el uso de agua, sin embargo, su aplicación no se reduce únicamente a este solvente, un ejemplo de esto es el uso de soluciones alcalinas y ácidas como hidróxido de sodio y ácido fosfórico (Predojević, 2008) respectivamente, esto con el fin de neutralizar y remover los componentes no deseados o en exceso dentro de la mezcla.

Sumado a esto, se han desarrollado diferentes técnicas para la aplicación del lavado, por ejemplo, lavado con burbujas donde se agrega un solvente a la solución problema mientras una corriente de aire enviada por una bomba atraviesa la mezcla hasta formar una separación de fases clara (Zuñiga et al., 2020). Otra técnica de lavado descrita por Ortiz et al., (2020) consiste en pulverizar un volumen determinado de agua a una distancia de 10 cm sobre la muestra de biodiesel durante 5 minutos.

En el caso particular del proceso productivo, la etapa de lavado busca retirar la mayor parte de glicerina producida durante la reacción de transesterificación junto con los ácidos grasos libres y las impurezas. Diversos estudios señalan el uso de agua como solvente para esta etapa debido a la solubilidad del glicerol en este líquido (Bateni et al., 2019; Lam et al., 2019;

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Cruz et al., 2021), mientras otros sugieren el uso de soluciones ácidas o incluso columnas con minerales para la remoción de componentes no deseados en el producto final (Predojević, 2008).

### 5.3.3. Destilación

El proceso de destilación comprende la separación de sustancias con base en la diferencia de sus puntos de ebullición, con el fin de purificar uno o varios componentes de la mezcla base. Esta operación requiere calentar la mezcla hasta que uno de los componentes alcance su punto de ebullición y se convierta en vapor, luego se recoge y condensa este vapor para obtener el componente puro.

El equipo empleado para esta operación en escala industrial suele ser una torre de destilación, dicha torre puede tener forma cilíndrica o cónica. Para su operación se requieren diversos accesorios como: hervidor, condensador, platos, desfuegos entre otros. El hervidor tiene la función de calentar la mezcla para generar vapores, estos se desplazan por la torre a través de bandejas o platos diseñados para evitar el paso de líquido mientras el vapor asciende hasta llegar al condensador donde se enfría para recuperar el componente de interés.

La destilación se utiliza en una amplia gama de aplicaciones industriales, como la producción de petróleo y gas, la purificación de agua, la fabricación de productos químicos y farmacéuticos, y la producción de bebidas alcohólicas como el whisky, el vodka y el ron. En el caso particular del biodiesel se emplea para recuperar el alcohol en exceso que no reaccionó durante la etapa de transesterificación

### 5.4. Métodos de estimación de propiedades

Los modelos termodinámicos son desarrollos matemáticos de gran utilidad para predecir las propiedades y el comportamiento de una sustancia en relación con la temperatura y presión a la cual están sometidos (Arenas, 2021). La diversidad de modelos presentes en la literatura para la estimación y determinación de propiedades termodinámicas refleja la complejidad y variedad de sistemas que se encuentran en la naturaleza y la ingeniería. La selección de un modelo particular depende de diversos factores, como la robustez requerida para las condiciones específicas del sistema (Carlson, 1996), su aplicabilidad a una amplia gama de sustancias, así como la disponibilidad y confiabilidad de los datos experimentales necesarios para su aplicación.

Estos modelos se utilizan comúnmente para establecer características que dependen de la temperatura, la presión y/o el volumen, desempeñando un papel fundamental en la comprensión detallada de los procesos termodinámicos. Algunos modelos, incluso, tienen la capacidad de calcular simultáneamente estas tres propiedades en condiciones específicas (Poling, 2004), como el punto crítico de una sustancia, para lo cual se emplean parámetros adicionales como la temperatura de ebullición. La aplicabilidad de estos modelos va más allá de la simple determinación de propiedades, ya que constituyen herramientas teóricas esenciales para la termodinámica (Smith et al., 2007). Facilitan la comprensión de procesos complejos que involucran conversiones de materia y energía, proporcionando a los

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

investigadores y profesionales de la ingeniería una base sólida para el diseño y análisis de sistemas termodinámicos en una variedad de aplicaciones industriales y científicas.

Los métodos de estimación de propiedades se pueden agrupar en diversas categorías de acuerdo su estructura y aplicación. En primer lugar, los métodos basados en ecuaciones de estado o métodos teóricos que emplean parámetros y coeficientes para determinar y relacionar propiedades como presión, volumen y temperatura, por ejemplo, las ecuaciones de estado de Peng-Robinson, Soave-Redlich-Kwong o el modelo NRTL (Dahm & Visco, 2014). Por otro lado, el método de dinámica molecular que permite estudiar el comportamiento de un sistema a través del tiempo mediante ecuaciones de movimiento. Finalmente los métodos de contribución de grupos determinan las propiedades de una molécula a partir de los grupos funcionales que la componen. Este último grupo de métodos no requiere información específica más allá de la estructura del compuesto por lo tanto ofrecen una alternativa para la descripción de moléculas complejas que no reportan parámetros experimentales.

#### *Glosario de términos*

- T<sub>b</sub>: Temperatura de ebullición
- T<sub>m</sub>: Temperatura de congelación
- T<sub>c</sub>: Temperatura crítica
- P<sub>c</sub>: Presión crítica
- V<sub>c</sub>: Volumen crítico
- ΔH<sub>f</sub><sup>°</sup>: Entalpía de formación
- ΔG<sub>f</sub><sup>°</sup>: Energía libre de Gibbs de formación
- ΔH<sub>hv</sub>: Entalpía de vaporización

#### **5.4.1. Parámetros del Método UNIFAC**

Este método fue desarrollado por un grupo de investigadores de la Universidad de California. Este método propone que las interacciones moleculares en un sistema multicomponente se pueden predecir en base a las interacciones que manifiestan los grupos funcionales presentes en cada sustancia que participa en la mezcla. Para ello se definen diferentes grupos basados en la distribución de compuestos orgánicos por ejemplo hidrocarburos saturados e insaturados, hidroxilos, ésteres, cetonas, éter, nitrilos, ácidos entre otros (Fredenslund et al., 1975).

La descripción de propiedades desarrollada por este método asigna a cada grupo funcional parámetros específicos de área y volumen, además se establece parámetros en relación con el comportamiento de un grupo funcional con otros grupos de la mezcla. El modelo matemático de se describe a continuación:

*Tabla 2. Ecuaciones empleadas en el Método UNIFAC*

Propiedad	Fórmula
Área relativa de la mezcla	$q_k = v_{k,i} * Q_{k,i} \quad (1)$
Volumen molecular relativo	$r_{ki} = R_{k,i} * v_{k,i} \quad (2)$

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

*i, j: Componente específico de la mezcla*  
*R<sub>k</sub>: Volumen de un grupo funcional k*  
*v<sub>k</sub>: Número de veces que el grupo funcional k se encuentra en la molécula*  
*Q<sub>k</sub>: Área superficial de un grupo funcional k*

#### 5.4.2. Método de contribución de grupos Joback-Reid (JR)

El método Joback-Reid fue desarrollado en 1987 por Kevin G. Joback y Robert Reid. Este método se emplea para la estimación de propiedades de una molécula a partir de los grupos funcionales y el número de átomos (Joback & Reid, 1987).

Este desarrollo matemático se emplea para predecir propiedades como la temperatura crítica, la entalpía de vaporización y de fusión, la presión crítica, la capacidad calorífica entre otras propiedades termodinámicas. Este modelo calcula propiedades al establecer valores constantes e incluir coeficientes, lo que contribuye a obtener una estimación más precisa. El modelo matemático y las constantes empleadas se describen a continuación:

Tabla 3. Método Joback-Reid

Propiedad	Ecuación
T <sub>b</sub> (K)	198,2 + $\Sigma T_{b,i}$ (3)
T <sub>m</sub> (K)	122,5 + $\Sigma T_{m,i}$ (4)
T <sub>c</sub> (K)	$T_b (0,584 + 0,965 * \Sigma T_{ci} - (\Sigma T_{ci})^2)^{-1}$ (5)
P <sub>c</sub> (bar)	$(0,113 - \Sigma P_{ci} + 0,0032n_A)^{-2}$ (6)
V <sub>c</sub> (cm <sup>3</sup> /mol)	17,5 + $\Sigma V_{ci}$ (7)
$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)	68,29 + $\Sigma H_{fi}^\circ$ (8)
$\Delta G_f^\circ$ (kJ/mol)	53,88 + $\Sigma G_{fi}^\circ$ (9)
$\Delta H_{hv}$ (kJ/mol)	15,30 + $\Sigma H_{hvi}$ (10)
$\Delta H_{fus}$ (kJ/mol)	-0,88 + $\Sigma H_{fus,i}$ (11)

El subíndice *i* refiere al grupo funcional específico de la molécula

#### 5.4.3. Método de contribución de grupos Marrero-Gani (MG)

Este método fue desarrollado por Jorge Marrero y Rafiqul Gani. El modelo emplea tres tipos de grupos para describir la estructura molecular de un compuesto, nombrados como primer

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

orden, segundo orden y tercer orden (Marrero & Gani, 2001). Los grupos de primer orden se emplean para dar una aproximación inicial de una amplia variedad de estructuras, sin embargo, esta estimación preliminar puede no tener en cuenta algunas contribuciones de grupos funcionales presentes en la molécula (Marrero & Gani, 2001).

En estos casos se ocupan los grupos de segundo orden los cuales proveen información de las propiedades de las secciones de la molécula que no han sido descritas por los grupos de primer orden. Para moléculas complejas, cuya estructura no puede ser descrita por los grupos de primer y segundo orden, los grupos de tercer orden tienen como función mejorar la predicción de propiedades debido a la comprensión de grandes fragmentos en un único grupo (Marrero & Gani, 2001). El modelo matemático desarrollado por Marrero-Gani y los parámetros de ajuste para cada propiedad se describen a continuación:

Tabla 4.. Método Marrero-Gani

Propiedad	Parámetro de ajuste	Ecuación
$T_b$ (K)	222,543	$T_{b0} * Ln(\sum N_i T_{b1i} + \sum M_j T_{b2j} + \sum O_k T_{b3k})$ (12)
$T_m$ (K)	147,450	$T_{m0} * Ln(\sum N_i T_{m1i} + \sum M_j T_{m2j} + \sum O_k T_{m3k})$ (13)
$T_c$ (K)	231,239	$T_{c0} * Ln(\sum N_i T_{c1i} + \sum M_j T_{c2j} + \sum O_k T_{c3k})$ (14)
$P_c$ (bar)	$P_{c1}=5,9827$ $P_{c2}=0,108998$	$((\sum N_i P_{c1i} + \sum M_j P_{c2j} + \sum O_k P_{c3k}) + P_{c2})^{-2} + P_{c1}$ (15)
$V_c$ (cm <sup>3</sup> /mol)	7,95	$(\sum N_i V_{c1i} + \sum M_j V_{c2j} + \sum O_k V_{c3k}) + V_{c0}$ (16)
$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)	-34,967	$(\sum N_i H_{f1i} + \sum M_j H_{f2j} + \sum O_k H_{f3k}) + H_{f0}$ (17)
$\Delta G_f^\circ$ (kJ/mol)	5,549	$(\sum N_i G_{f1i} + \sum M_j G_{f2j} + \sum O_k G_{f3k}) + G_{f0}$ (18)
$\Delta H_{hv}$ (kJ/mol)	11,733	$(\sum N_i H_{v1i} + \sum M_j H_{v2j} + \sum O_k H_{v3k}) + H_{v0}$ (19)

Los subíndices  $i, j, k$  refieren al orden del grupo funcional establecido, siendo  $i$  primer orden,  $j$  segundo orden y  $k$  tercer orden. Por otro lado el subíndice 0 indica el parámetro de ajuste de cada propiedad.

#### 5.4.4. Método de contribución de grupos Constantinou-Gani

Este método desarrollado por Leonidas Constantinou y Rafiqul Gani establece que las propiedades termodinámicas de una sustancia se pueden predecir considerándola como una agrupación de dos tipos de grupos (Constantinou & Gani, 1994). Inicialmente, los grupos de primer orden son agrupaciones de elementos sencillas que no consideran la isomería o los efectos de proximidad entre moléculas. Mientras que los grupos de segundo orden entregan

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

información detallada de las interacciones moleculares que no alcanzan a ser descritas por los grupos de primer orden, esto con el fin de aumentar la exactitud de las predicciones y ampliar la aplicabilidad de este método (Constantinou & Gani, 1994). Este modelo emplea constantes para dar un punto de inicio a la estimación de cada propiedad como se muestra a continuación:

Tabla 5. Método Constantinou-Gani

Propiedad	Parámetro de ajuste	Ecuación
$T_b$ (K)	204,359	$T_{b0} * Ln(\sum N_i T_{b1i} + \sum M_j T_{b2j})$ (20)
$T_m$ (K)	102,425	$T_{m0} * Ln(\sum N_i T_{m1i} + \sum M_j T_{m2j})$ (21)
$T_c$ (K)	181,128	$T_{c0} * Ln(\sum N_i T_{c1i} + \sum M_j T_{c2j})$ (22)
$P_c$ (bar)	$P_{c1} = 1,3705$ $P_{c2} = 0,100220$	$((\sum N_i P_{c1i} + \sum M_j P_{c2j}) + P_c 2)^{-2} + P_{c1}$ (23)
$V_c$ ( $m^3/Kmol$ )	-0,004350	$(\sum N_i V_{c1i} + \sum M_j V_{c2j}) + V_{c0}$ (24)
$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)	-14,828	$(\sum N_i H_{f1i} + \sum M_j H_{f2j}) + H_{f0}$ (25)
$\Delta G_f^\circ$ (kJ/mol)	10,835	$(\sum N_i G_{f1i} + \sum M_j G_{f2j}) + G_{f0}$ (26)
$\Delta H_{nv}$ (kJ/mol)	6,829	$(\sum N_i H_{v1i} + \sum M_j H_{v2j}) + H_{v0}$ (27)
$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\Delta v_i = A_i + B_i T + C_i T^2$	$\rho = \frac{M}{\sum n_i \Delta v_i}$ (28)

Los subíndices  $i, j$  refieren al orden del grupo funcional establecido, siendo  $i$  primer orden,  $j$  segundo orden. Por otro lado el subíndice 0 indica el parámetro de ajuste de cada propiedad. Las constantes  $A, B$  y  $C$  son específicas de cada grupo funcional,  $n$  es el número de grupos y  $\Delta v_i$  es volumen molar de grupo dependiente de la temperatura.

## 5.5. Simulación

DWSIM es un simulador de procesos químicos de código abierto que sigue el estándar Cape-Open. Este estándar es fundamental en la ingeniería, ya que permite que distintos programas

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

y software de modelado sean interoperables entre sí. DWSIM es pionero en el uso de este estándar dentro del mundo del código abierto y ofrece la flexibilidad de combinar interfaces de modelado de diferentes programas.

Este simulador se desarrolló desde 2004 empleando un código simple de macros de Excel VBA, siendo Daniel Wagner Oliveira de Medeiros el programador principal y creador del mismo. El código inicial contenía un algoritmo de cálculo Flash y la ecuación de estado de Peng-Robinson (PR), posteriormente Wagner diseñó la interfaz conocida actualmente como Process Flowsheet (Medeiros, DWSIM About, 2024).

Este software provee diferentes alternativas para el modelamiento y simulación de procesos aplicados a diversas industrias. Estas opciones incluyen equipos como torres de destilación, reactores, tanques, intercambiadores de calor, válvulas y tuberías entre otros, permitiendo establecer parámetros de operación como presión, temperatura, flujo molar y másico, entre otros. Además, la selección de modelos termodinámicos como las ecuaciones de estado de Peng-Robinson, Soave-Redlich-Kwong, NTRL, UNIFAC, los cuales permiten modelar y analizar detalladamente los sistemas propuestos.

A su vez, DWSIM provee la herramienta “Crear compuestos” la cual permite cargar datos originales de diferentes moléculas, esto permite ampliar el catálogo de compuestos presentes en la base de datos del simulador. Esta herramienta emplea la contribución de grupos por los métodos Unifac y Joback para la estimación de propiedades termodinámicas iniciales, sin embargo, es flexible para modificar los parámetros establecidos, permite cargar bases de datos con modelos de cálculo diferentes a los integrados en el código del simulador.

Otra herramienta que provee DWSIM es el modelamiento dinámico, este apartado permite involucrar el tiempo como una dimensión de análisis del sistema, facilitando el modelamiento del estado transitorio, así mismo, posibilita el diseño de procesos batch, análisis de seguridad, ajuste de datos y estimación de parámetros a partir de datos en estado transitorio entre otras funciones (DWSIM About, 2024).

Por otro lado, este simulador presenta la ventaja de integrarse a herramientas externas como hojas de cálculo de Excel o codificación desarrollada en Python, esto aumenta la capacidad de trabajo del simulador y permite diseñar operaciones más complejas, implementar cálculos basados en modelos matemáticos no integrados en el simulador. Por último, DWSIM se complementa por diferentes módulos de utilidades especiales para diferentes necesidades, por ejemplo, el módulo de optimización, módulos de muestras con procesos industriales de gran relevancia, entre otros.

A cada una de las etapas del proceso descrito previamente, corresponde un equipo descrito en DWSIM. En primer lugar, para el volumen del reactor de transesterificación se emplea la siguiente ecuación:

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

$$V_{reactor} = \frac{(v_{producción} * t_{ciclo})}{(C_{A0}(\theta_c + \frac{X_A}{a})} \quad (29)$$

Donde :

$V_{reactor}$ : Volumen del reactor (L)

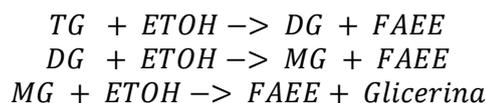
$v_{producción}$ : Velocidad de producción (mol/min)

$t_{ciclo}$ : Tiempo de ciclo (min)

$C_{A0}$ : Concentración del aceite en la entrada

$X_A$ : Conversión de aceite en la reacción.

Paralelamente se establecen las cinéticas de reacción teniendo en cuenta tres etapas según lo descrito por Narváez et al., 2015. Estas etapas son:



TG: Triglicérido, DG: Diglicérido, MG: Monoglicérido, ETOH: Etanol, FAEE: Etil-ésteres de ácidos grasos.

A continuación se presentan los parámetros cinéticos extraídos del modelo desarrollado en "Kinetics of palm oil ethanolysis", estas constantes se aplicaron en todos los aceites estudiados con el fin de analizar los sistemas en igualdad de condiciones

*Tabla 6. Constantes Cinéticas del proceso*

$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_{-1}$	$k_{-2}$	$k_{-3}$
7.73	8.32	5.83	0.02	0.67	0.02

*Tabla 7. Energías de activación*

E1	E2	E3	$E_{-1}$	$E_{-2}$	$E_{-3}$
12.65	8.34	7.59	8.39	6.73	15.1

## 5.6. Estimación de Costos

La evaluación de costos es una herramienta fundamental para el planteamiento de presupuestos aproximados en el desarrollo de un proceso. Comúnmente se compone de 4 factores principales: inversión de capital fijo, costos externos, costos de ingeniería y gastos imprevistos o de contingencia. El primer factor incluye los costos de adquisición e instalación de la mayoría de equipos necesarios para la planta diseñada, debido a esto suele ser el factor

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

con mayor extensión de cálculo, puesto que es necesario considerar tanto los materiales de construcción como los costos de obra civil y la supervisión de instalación. (Towler, G., & Sinnott, R, 2021)

El segundo factor corresponde con los costos relacionados a infraestructura por ejemplo estaciones de electricidad, tuberías de agua, procesos de acondicionamiento de aguas, secadores, servicios de emergencia, entre otros. Diversos métodos de estimación suelen calcular este factor con una constante agregada a la inversión de capital fijo (Towler, G., & Sinnott, R, 2021). Por otro lado, el costo de ingeniería refiere al diseño de equipos, control de sistemas, automatización, construcción y supervisión, beneficios de contratista entre otros (Ray & Das, 2020).

Finalmente, los costos de contingencia comprenden el dinero añadido al presupuesto para prevenir y/o mitigar eventos en los que la estimación de costos realizada previamente pueda verse afectada por variaciones en precios de materiales, cambios en el alcance del proceso, modificaciones en valor de divisas, entre otros. Este factor también se añade a la inversión de capital fijo mediante la suma de un valor constante.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## 6. DISEÑO METODOLÓGICO

De acuerdo con el problema de investigación y los objetivos expuestos anteriormente, se desarrollan las etapas de trabajo definidas a continuación. En primer lugar, se lleva a cabo revisión bibliográfica referente a la producción de biodiesel, etapas empleadas industrialmente, materias primas, propiedades reglamentadas para el producto final. Se desarrolla esta revisión mediante libros, guías, manuales, tesis y demás publicaciones que permitan contextualizar el proceso a estudiar, sus componentes y principales características.

Así mismo, se realiza un estudio de la producción nacional de biocombustibles y la distribución de los mismos, además, revisión de la normativa colombiana aplicable al biodiesel, así como el contexto de este biocombustible específico en el panorama colombiano, con el fin de establecer la producción estimada para la etapa de diseño y simulación del proceso.

### 6.1. Estimación de propiedades

Se emplearon los modelos Joback-Reid (JR), Marrero-Gani(MG) y Constantinou-Gani (CG) para determinar las propiedades termodinámicas constantes de las moléculas, comparando las variaciones presentadas por cada método con el fin de establecer un modelo para el desarrollo de la etapa de simulación.

En primer lugar, se evaluó cada modelo con un par de moléculas cuyas propiedades son conocidas experimentalmente, descritas en la literatura consultada para determinar el error que presenta respecto a valores reales y posteriormente aplicar los resultados obtenidos a las componentes que no presentan con estudios referentes a propiedades experimentales, las moléculas seleccionadas para este fin son el ácido palmítico y el triglicérido trimiristina, los valores experimentales de estos compuestos se obtuvieron de Bogatishcheva et al., (2017) y Aca-Aca (2009) respectivamente. El porcentaje de error de cada estimación respecto a los datos experimentales se determinó con la siguiente ecuación:

$$\%Error = \frac{|Valor\ experimental - Valor\ estimado|}{|Valor\ estimado|} * 100\%$$

A continuación, se emplearon los tres métodos de estimación para predecir las propiedades de la mezcla de etil-ésteres resultante de la reacción de transesterificación, con el fin de comparar las propiedades establecidas por la normativa colombiana NTC 100-04 junto con datos experimentales. Para ello, se establece la composición esperada del biodiesel al final de acuerdo las reportadas por Alonso Castro (2014) y Rodríguez et al., (2011), se seleccionan las propiedades de densidad, temperatura de ebullición y temperatura de fusión se comparan contra los datos experimentales reportados por Ali, E. N., & Tay, C. I. (2013), Yang et al., (2011) y Edith et al., (2012).

Posteriormente, de acuerdo con el porcentaje de error absoluto promedio presentado por cada método de estimación de propiedades, se selecciona uno de estos tres desarrollos para extrapolar sus los resultados y el margen de error a las moléculas que no disponen de

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	<small>CERTIFICADA POR</small>   <small>CO-SC 7188-1</small>
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

información experimental y componen los aceites empleados como materia prima en el proceso de producción de biodiesel.

## 6.2. Análisis de sensibilidad

Una vez seleccionado el modelo de predicción de propiedades, se inicia la etapa de simulación del proceso empleando el software de acceso libre DWSIM. Para ello se requieren diversas acciones previas a la puesta en marcha de este simulador las cuales se describen a continuación:

### Diagrama del proceso

Tomando como base la revisión bibliográfica del proceso de producción de biodiesel a escala industrial, se realiza el diagrama del sistema específicamente de las etapas de reacción y separación de acuerdo con la simbología y descripción de equipos detallada por Turton et al., (2008) y la norma ISA para diagramas PFD. La Ilustración 7 presenta las etapas de proceso descritas anteriormente.

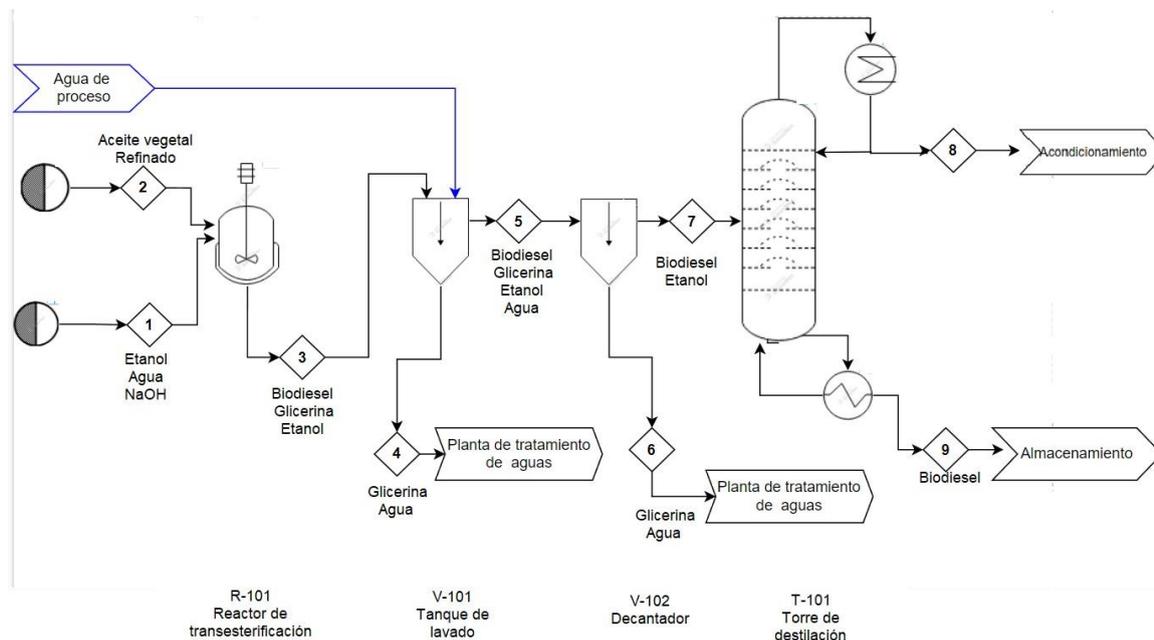


Ilustración 7. Diagrama del proceso

### Creación de moléculas

A pesar de la amplia gama de moléculas incluidas en DWSIM, la mayor parte de los triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos y etil-ésteres involucrados en la reacción de transesterificación no se encontraban incluidos en las bibliotecas de moléculas al momento de iniciar este estudio por lo tanto se requiere la creación de estos compuestos. Con este fin, se emplean las propiedades estimadas por el modelo seleccionado en la etapa anterior,

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

además, de los parámetros de área molecular relativa (Q) y volumen molecular relativo (R) determinados por el método UNIFAC los cuales facilitan el cálculo de interacciones moleculares establecido por el simulador.

### 6.2.1. Simulación de etapas

Las moléculas creadas se integran al simulador para su análisis dentro del proceso. A partir del diagrama PFD presentado anteriormente se construye el sistema de equipos dentro del simulador. En primer lugar, se establece que la producción esperada de biodiesel sea de aproximadamente 112 kg por cada ciclo de producción de acuerdo con datos reportados por Varón, V. (2023), de la empresa Bio D, la principal productora de biodiesel en Colombia. Sumado a esto se establecen las condiciones de reacción tales como temperatura, presión, pureza y relación molar de los reactivos, estos parámetros se ajustan de acuerdo a la literatura consultada: temperatura de reacción 60 °C (Bulla-Pereira et al., 2015; Liu et al., 2021; Arenas, 2021) presión de trabajo de 1,01325 bar (Arenas 2021; Muñoz et al., 2018), la pureza del etanol, considerando los costos de producción, es de 90% mientras la relación molar se establece en 8:1 etanol/aceite (Narváez et al., 2015).

En este punto se establece además la cantidad de moléculas a tener en cuenta para el análisis de las variaciones energéticas, en primer lugar, se llevará a cabo el proceso de simulación empleando un único triglicérido representativo por cada aceite. Posteriormente aumenta la cantidad de triglicéridos en intervalos de 3 moléculas hasta la representación completa del aceite en la simulación.

Tomando en cuenta la producción esperada, se determinó, por medio de estequiometría, que la carga de aceite para la reacción es de aproximadamente 103 kg por ciclo, a su vez, de acuerdo con la relación molar de etanol/aceite determinado anteriormente se establece que el consumo de etanol es aproximadamente 42 kg por ciclo esta carga presenta variaciones en base a la composición molar de aceite debido al análisis de diferentes cantidades de moléculas.

Para efectos de la simulación se emplea un mezclador y un calentador previo a la entrada del reactor con el fin de acondicionar las sustancias a los parámetros de reacción, por ende, el calentador se programa a temperatura de salida de 60 °C. El reactor empleado es tipo batch, por ende, es necesario utilizar la edición DWSIM Pro junto al modo dinámico.

Para el diseño del reactor se toman en cuenta las siguientes consideraciones:  $\theta_c$  es igual a la concentración inicial de etil-éster dividida la concentración de aceite a la entrada ( $C_{C0}/C_{A0}$ ) por tanto es un valor nulo (0), por otro lado, la relación estequiométrica (c/a) es igual a 1 mientras que el tiempo de ciclo es de 171.43 minutos, la duración del ciclo se establece de acuerdo con lo descrito por Restrepo et al., (2021).

Los parámetros cinéticos (energía de activación y constante de velocidad) descritas en "Kinetics of palm oil ethanolysis", se extraen y se adaptan a las unidades definidas por el simulador. Posteriormente se describe en el simulador la ecuación química y estequiométrica para cada etapa de reacción y las constantes cinéticas.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Dentro del simulador se establece la carga de entrada, las condiciones de temperatura y presión, además, el volumen del reactor. Seguidamente, se establece como parámetro de control del modo dinámico la fracción molar con el fin de evidenciar el consumo de los reactivos y generación de productos dentro del reactor, mientras que el tiempo de operación se establece en 1 hora, finalmente se gráfica el cambio del parámetro de control en el tiempo.

Una vez concluido el tiempo de reacción se crea una corriente de salida del reactor la cual ingresa al equipo separador de compuestos con el fin de emular la etapa de lavado, tomando como referencia la eficiencia reportada por Predojević, (2008), las ecuaciones de diseño sugeridas por Harriott et al., (2007) presentadas a continuación.

Adicionalmente, se diseña la etapa de decantación de acuerdo con la corriente ligera producto del lavado, se emplean las mismas ecuaciones de diseño (Harriott et al., 2007), en este caso la eficiencia se basa en los experimentos y resultados reportados por Noureddin et al., (2014) agregando un factor de seguridad de 3% debido al uso de etanol en lugar de metanol para la reacción de transesterificación.

$$V_T = \frac{V_m}{0.95} \quad (30)$$

Tomando en cuenta que es un cilindro el volumen se obtiene de:

$$V_T = V = \pi * r^2 * h \quad (31)$$

Donde  $r = d/2$ . De acuerdo a los parámetros de diseño  $h = \pm 5d$ . Entonces:

$$V = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * 5d \quad (32)$$

$$V = \pi * \frac{d^2}{4} * 5d \quad (33)$$

$$V = \frac{5\pi d^3}{4} \quad (34)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4V}{5\pi}} \quad (35)$$

Donde  $V_m$  es el flujo de entrada al equipo de separación,  $V_T$  es el volumen total del equipo,  $d$  es el diámetro y  $h$  es la longitud del tanque.

Finalmente, la etapa de destilación, para ello, en primer lugar, se utiliza la columna de destilación de cálculo corto o acceso directo (shortcut) con el fin de establecer la relación de reflujo mínima, el mínimo número de etapas y la etapa de alimentación óptima con base en parámetros de entrada como el componente ligero y pesado de interés las fracciones molares esperadas de estos en las corrientes de fondos y cimbras respectivamente.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Una vez determinadas las especificaciones de la columna mediante el uso de shortcut, se procede a utilizar la columna de cálculo detallado Cape-Open/Chemsep, en la cual se configuran las especificaciones mencionadas anteriormente junto con el método de cálculo (Newton por defecto), el número de iteraciones, los componentes involucrados en el proceso y sus propiedades termodinámicas correspondientes.

De este modo se obtienen las corrientes de cima y fondos de la torre de destilación, en primer lugar la corriente de cima es rica en etanol y posee trazas de triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos, además de una fracción del agua de proceso. Por otro lado, la corriente de fondos es rica en etil-ésteres, posee trazas de las moléculas presentes en el aceite, agua, glicerol y etanol.

### 6.3. Evaluación energética y económica

#### *Energías*

Basado en los resultados obtenidos en la simulación del flujo energético durante el proceso, se procede a comparar el consumo energético en cada etapa para las diferentes composiciones de la materia prima principal. Para ello, se generan gráficos comparativos de cada configuración seleccionada de manera individual y en conjunto con los tres aceites estudiados.

#### *Costos*

A partir de las dimensiones obtenidas en la etapa de simulación, se lleva a cabo el costeo de los equipos presentados empleando el índice CEPCI y la estimación de costos descrita por Towler, G., & Sinnott, R., (2021) en "Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design." Se emplea la siguiente ecuación para determinar el costo de adquisición de cada uno de los equipos:

$$C_e = a + bS^n \quad (36)$$

Posteriormente se determina el costo total (ISBL, C) empleando los factores típicos para la estimación de coste de capital fijo (Towler, G., & Sinnott, R, 2021) y la siguiente ecuación

$$C = \sum C_{e,i,CS} [(1 + f_p)f_m + (f_{er} + f_{el} + f_i + f_c + f_s + f_i)] \quad (37)$$

Cuyos valores en orden de aparición son: 0.8, 1.0, 0.3, 0.2, 0.3, 0.3, 0.2, 0.1. Posteriormente se calcula el costo de capital fijo mediante la ecuación:

$$C_{FC} = C(1 + OS)(1 + D\&E + X) \quad (38)$$

Siendo OS el factor de instalaciones externas, D & E corresponde a ingeniería y diseño mientras X se refiere al factor de contingencia.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Estimación de propiedades

El error de cada método respecto a los datos experimentales de moléculas puras se representa a continuación.

*Tabla 8. Porcentaje de error en estimación de propiedades: Trimiristina*

Propiedad/ Método	Exp	JR	MG	CG
Tm (K)	321.90	50.10 %	6.14 %	15.31 %
Tb (K)	864.55	32.12 %	68.13 %	14.11 %
Tc (K)	899.0	50.21 %	7.21 %	1.20 %
Pc (bar)	6.50	59.00 %	22.10 %	33.73 %
Vc (cm <sup>3</sup> /mol)	2285.0	0 %	0 %	0 %
Error absoluto promedio	-	38.20%	20.60%	12.60 %

*Tabla 9 . Porcentaje de error en estimación de propiedades: Ácido Palmítico*

Propiedad/ Método	Exp	JR	MG	CG
Tm (K)	334.90	29.20 %	8.14 %	2.13 %
Tb (K)	624.60	14.10 %	1.30 %	3.04 %
Tc (K)	767.10	16.11 %	7.01 %	2.11 %
Pc (bar)	12.50	12.10 %	23.21 %	14.07 %
Vc (cm <sup>3</sup> /mol)	1013.50	6.11 %	6.31 %	6.08 %
Error absoluto promedio	-	15.42 %	9.20 %	5.48 %

Posteriormente se determina el porcentaje de error para la mezcla de etil-ésteres presentado a continuación:

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

*Tabla 10. Porcentaje de error en estimación de propiedades: Mezcla de ésteres*

Propiedad	Especie de biodiesel	Experimental	CG	MG*	JR*
Densidad a 15 °C (NTC: 860-900 kg/m <sup>3</sup> )	Palma	864.42	0.42%	N/A*	N/A*
	Soja	880.9	0.85%	N/A*	N/A*
	Jatropha	879.15	0.85%	N/A*	N/A*
Temperatura de ebullición (NTC: 310-360 °C)	Palma	325.33	1.78%	3.35%	22.27%
	Soja	355.24	9.81%	19.46%	18.44%
	Jatropha	331.36	2.93%	10.65%	22.86%
Temperatura de Fusión (°C)	Palma	14.4	15.69%	73.49%	78.88%
	Soja	10.86	20.61%	30.78%	84.66%
	Jatropha	11.52	16.03%	18.30%	83.35%

**\*El método no permite la estimación de la propiedad estudiada**

A partir de los porcentajes de error y el error absoluto promedio presentados en las tablas 8, 9 y 10 y el anexo 1 (Comparativa de los modelos de estimación de propiedades en triglicéridos), se selecciona el método de Constantinou-Gani para estimar las propiedades termodinámicas de los etil-ésteres, triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos que participan en el proceso de producción de biodiesel.

## **7.2. Análisis de sensibilidad**

### **7.2.1. Simulación de etapas**

La metodología descrita en el numeral 6.2.1 se aplica a los tres aceites empleando 4 o 5 representaciones diferentes de la composición. En primer lugar, un único triglicérido, posteriormente tres moléculas, seis moléculas y nueve moléculas, en este punto la composición del aceite de jatropha se representa en su totalidad, sin embargo, los aceites de soya y palma presentan composiciones más extensas por lo cual se llevó a cabo el proceso con diez y doce moléculas respectivamente.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

### Reactor

A partir de la ecuación de volumen del reactor presentada en la sección 6.2, se determina la dimensión de cada reactor debido a las variaciones en la concentración inicial de aceite

*Tabla 11. Volumen de diseño de reactor Aceite de Palma*

Aceite de palma				
# triglicéridos	$V_{\text{producción}}$ (mol/min)	$C_{A0}$ (mol/L)	$X_A$	$V$ (m <sup>3</sup> )
1	8.08	0.79	0.9	1.95
3	8.08	0.71	0.9	2.14
6	8.08	0.82	0.9	1.88
9	8.08	0.75	0.9	2.05

*Tabla 12. Volumen de diseño de reactor Aceite de Soya*

Aceite de soya				
# triglicéridos	$V_{\text{producción}}$ (mol/min)	$C_{A0}$ (mol/L)	$X_A$	$V$ (m <sup>3</sup> )
1	8.08	0.70	0.9	2.18
3	8.08	0.72	0.9	2.13
6	8.08	0.76	0.9	2.01
9	8.08	0.74	0.9	2.07

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Tabla 13. Volumen de diseño de reactor Aceite de Jatropha

Aceite de jatropha				
# triglicéridos	$V_{\text{producción}}$ (mol/min)	$C_{A0}$ (mol/L)	$X_A$	$V$ (m <sup>3</sup> )
1	8.08	0.70	0.9	2.18
3	8.08	0.76	0.9	2.01
6	8.108	0.71	0.9	2.16
9	8.08	0.72	0.9	2.02

Posteriormente, se establecen las gráficas de fracción molar contra tiempo de reacción para cada una de las configuraciones de moléculas. En el caso del aceite de jatropha y soya para la configuración inicial de una molécula se estableció la trioleína, así como sus diglicéridos y monoglicéridos derivados por lo tanto la gráfica de tiempo vs fracción es la misma.

1 molécula  
Aceite de palma

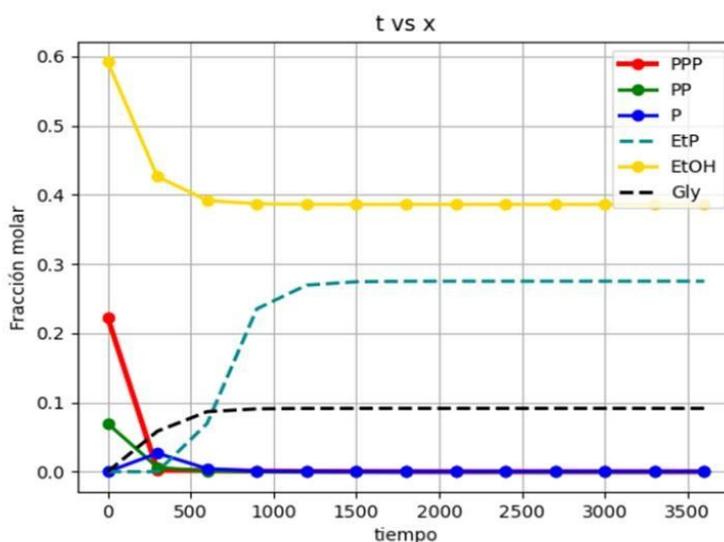
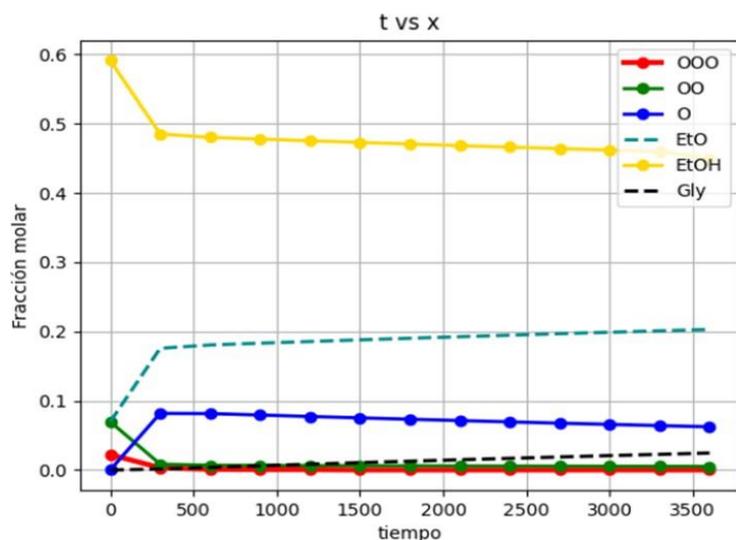


Ilustración 8. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 1 triglicérido (aceite de palma)

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	CERTIFICADA POR   CO-SC 7188-1
	<b>Proceso:</b> Investigación	<b>Fecha de emisión:</b> 16-Jun-2009	<b>Fecha de versión:</b> 28-Mar-2022	

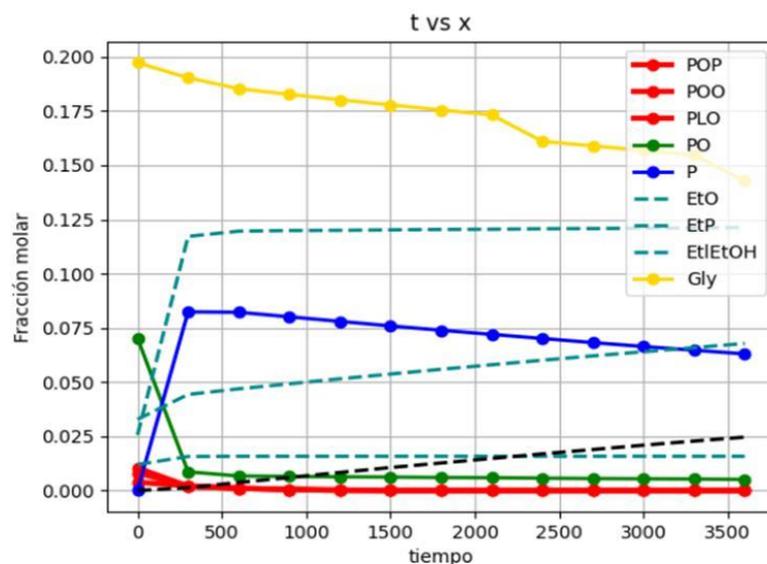
*Aceite de soya / Aceite de jatropa*



*Ilustración 9. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 1 triglicérido (aceite de soya y jatropa)*

3 moléculas

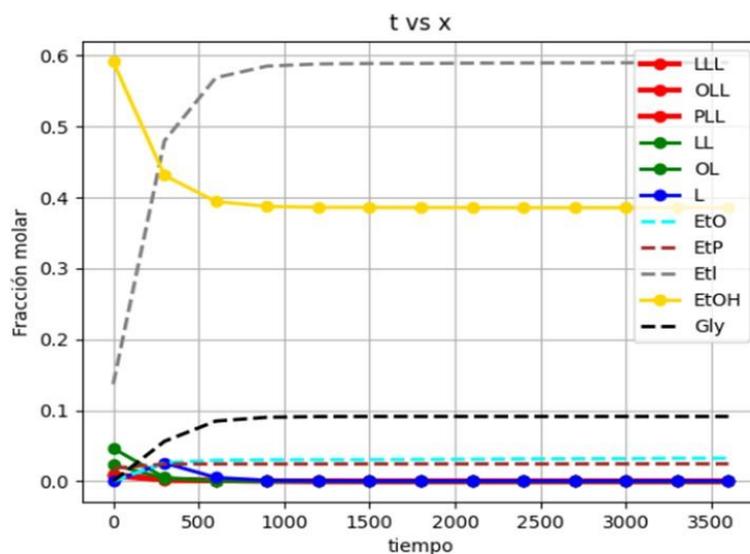
*Aceite de palma*



*Ilustración 10. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 3 triglicéridos (aceite de palma)*

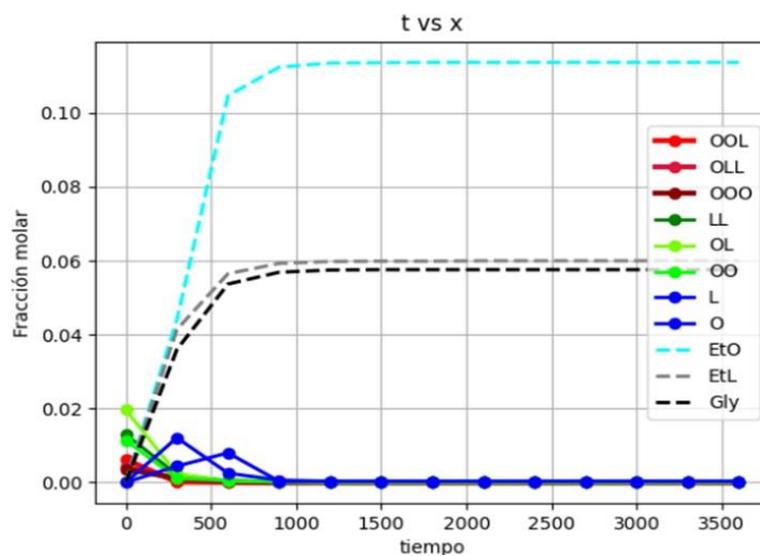
	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	 
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

*Aceite de soya*



*Ilustración 11. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 3 triglicéridos (aceite de soya)*

*Aceite de jatropha*



*Ilustración 12. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 3 triglicéridos (aceite de jatropha)*

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	 
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## 6 moléculas

### Aceite de Palma

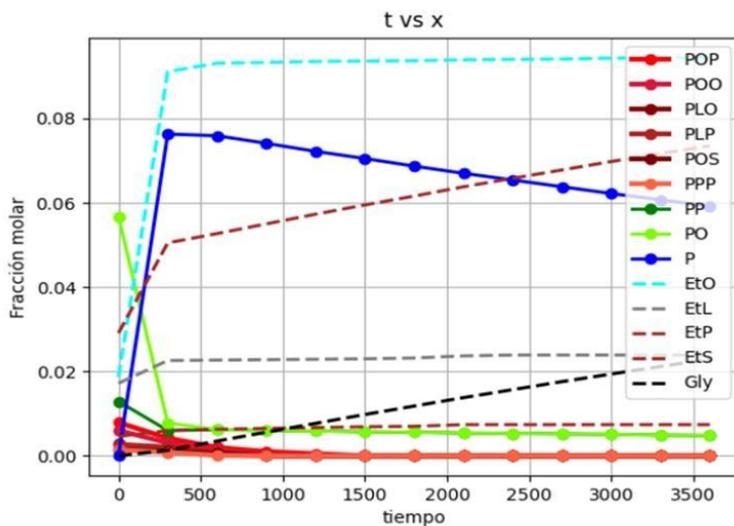


Ilustración 13. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 6 triglicéridos (aceite de palma)

### Aceite de soya

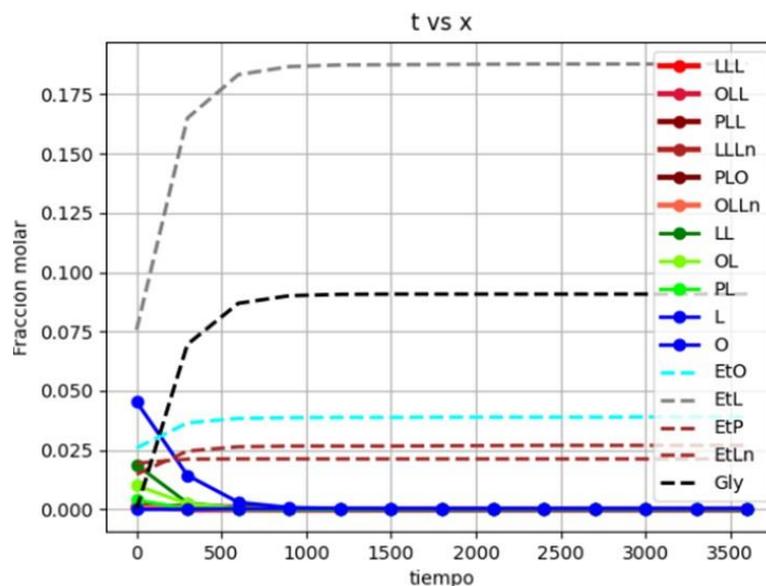


Ilustración 14. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 6 triglicéridos (aceite de soya)

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

*Aceite de Jatropha*

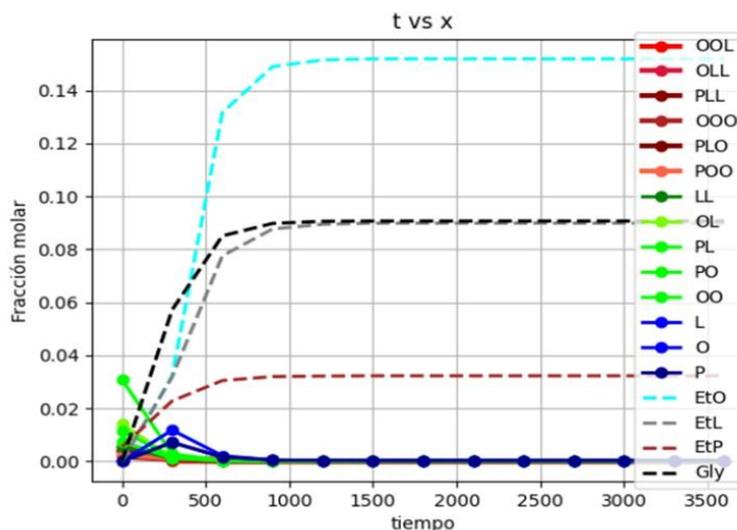


Ilustración 15. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 6 triglicéridos (aceite de jatropha)

9 moléculas

*Aceite de palma*

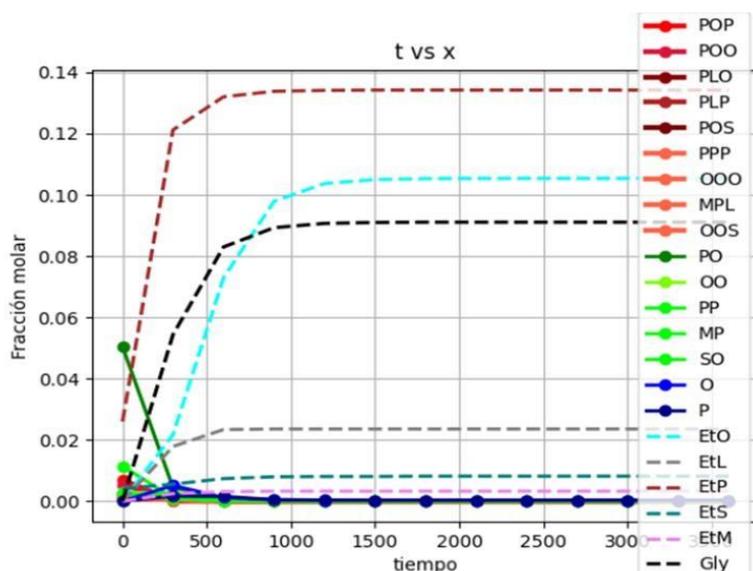
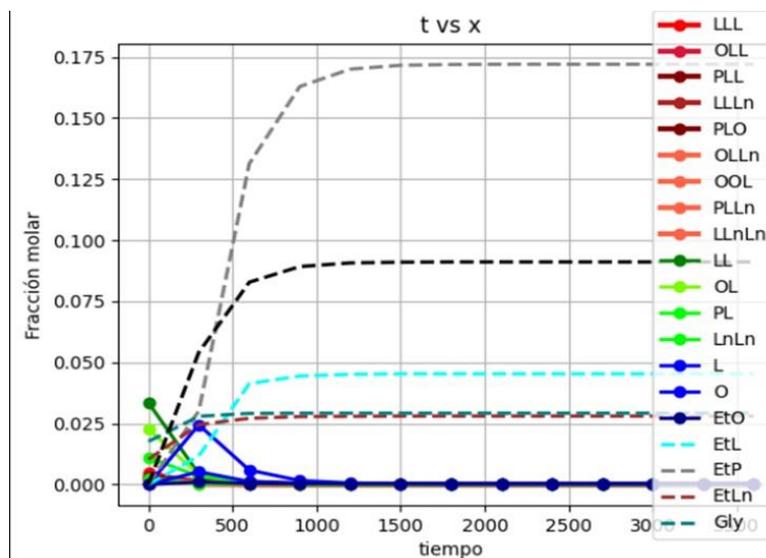


Ilustración 16. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 9 triglicéridos (aceite de palma)

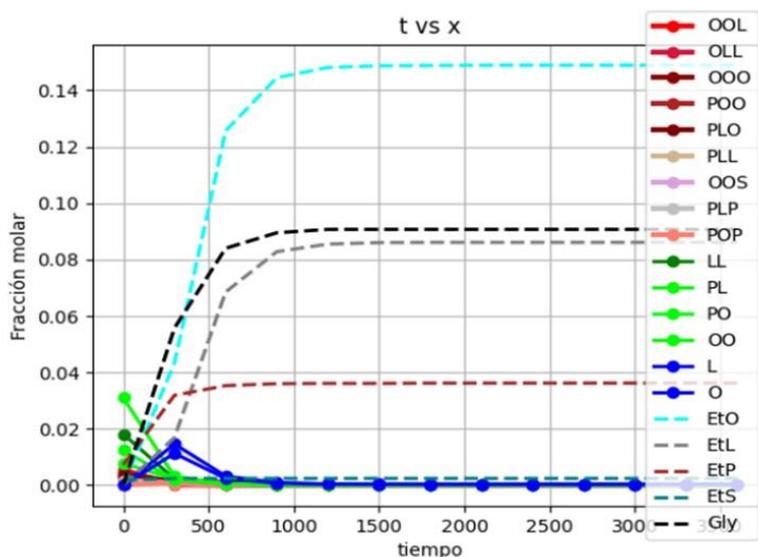
	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	 
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

*Aceite de soya*



*Ilustración 17. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 9 triglicéridos (aceite de soya)*

*Aceite de jatropha*



*Ilustración 18. Comportamiento de la fracción molar en el reactor con 9 triglicéridos (aceite de jatropha)*

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

A partir de las gráficas 8-18 se evidencia que la concentración de triglicéridos se reduce hasta su punto más bajo aproximadamente 8 minutos después de iniciar la reacción. Alrededor de este tiempo de reacción las fracciones de diglicéridos y monoglicéridos alcanzan su punto máximo y posteriormente disminuye hasta estabilizarse en un punto cercano a cero. La formación de etil-ésteres se evidencia a partir de los primeros 5 minutos de reacción, crece gradualmente hasta el tiempo de 30 minutos esto concuerda con la descripción de proceso presentada por Narváez et al.,(2015) la cual indica que los etil-esteres se producen hasta 15 min después de iniciada la reacción, en este punto se evidencia crecimiento mínimo en la fracción molar.

En el aceite de palma se evidencia que en las configuraciones de 1, 6 y 9 moléculas el etil-éster predominante en la composición es el palmitato de etilo superando el 45.98%, es decir, el valor experimental reportado por Alonso (2014), se evidencia que las configuraciones de 6 y 9 moléculas presentan variaciones en la composición de este etil-éster de 11% y 2% respectivamente. Sin embargo, en la configuración de 3 moléculas se evidencia mayor presencia del ácido oleico y por consecuencia mayor formación de oleato de etilo, esto se debe a la representación específica de este análisis (POO, PPO y PLO).

Para el aceite de soya la reacción muestra que predomina la producción de linoleato de etilo a partir de la configuración de 3 moléculas, en todos los casos la composición de este etil-éster supera el dato experimental establecido por Alonso (2014), estimado en 48.95% en peso, los datos obtenidos muestran errores de 34.81% (3 moléculas), 28.01% (6 moléculas) y 22.05% (9 moléculas), lo cual muestra que la producción de este etil-éster mientras que los otros etil-ésteres como palmitato, oleato y linoleato apenas alcanzan el 20% de la composición másica previo a la purificación de biodiesel.

Finalmente, en el aceite de jatropa el etil-éster de mayor participación finalizada la reacción de transesterificación es el oleato de etilo en todas las simulaciones representando más del 40% en masa de la corriente de salida del reactor, sin embargo, esto contrasta con datos experimentales, según Rodríguez et al., (2012) el etil ester dominante en el biodiesel producido a partir de jatropa es el linoleato de etilo representando entre 48% y 50% en peso, mientras que en las simulaciones presentadas el ester mencionado entre el 31% y el 40% en peso, esto se debe a la presencia de ácido oleico en todos los trigliceridos que componen el aceite de jatropa. Mientras que los etil-ésteres de menor representación en la composición son el palmitato de etilo y estearato de etilo.

## Separación

### Lavado

Tal como sucede con el reactor de transesterificación los equipos de separación varían su diseño de acuerdo con el número de moléculas que se emplean en la simulación. En primer lugar, para la etapa de lavado se utiliza una relación agua/biodiesel de 1:1 y tiempo de lavado de 25.71 minutos de acuerdo con lo descrito por Restrepo et al., (2021). Las dimensiones obtenidas en el diseño de este equipo se evidencian a continuación

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

*Tabla 14. Diseño del equipo de lavado*

Aceite	# moléculas	$V_m$ (m <sup>3</sup> )	$V_T$ (m <sup>3</sup> )	d (m)	h (m)	Zt (m)
Palma	1	0.253	0.267	0.408	2.040	0.367
	3	0.250	0.263	0.406	2.031	0.366
	6	0.249	0.262	0.406	2.028	0.365
	9	0.246	0.259	0.404	2.021	0.364
Soya	1	0.245	0.258	0.403	2.017	0.363
	3	0.249	0.262	0.405	2.027	0.365
	6	0.247	0.260	0.405	2.023	0.364
	9	0.247	0.260	0.404	2.022	0.364
Jatropha	1	0.245	0.258	0.403	2.017	0.363
	3	0.254	0.268	0.408	2.042	0.368
	6	0.251	0.264	0.407	2.033	0.366
	9	0.249	0.262	0.405	2.027	0.365

### ***Decantación***

El segundo equipo de separación presenta ecuaciones de diseño similares a la etapa de lavado sin embargo en este caso se requiere un volumen menor del equipo y se emplea un tiempo de operación de 8.5 min (Noureddin et al., 2014).

*Tabla 15. Diseño equipo de decantación*

Aceite	# moléculas	$V_m$ (m <sup>3</sup> )	$V_T$ (m <sup>3</sup> )	d (m)	h (m)	Zt (m)
Palma	1	0.143	0.151	0.337	1.687	0.304
	3	0.145	0.152	0.339	1.693	0.305
	6	0.141	0.148	0.335	1.676	0.302
	9	0.139	0.146	0.334	1.670	0.301
	1	0.134	0.141	0.330	1.649	0.297
	3	0.138	0.145	0.333	1.665	0.300

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Soja	6	0.137	0.145	0.333	1.664	0.299
	9	0.137	0.144	0.332	1.662	0.299
Jatropha	1	0.134	0.141	0.330	1.649	0.297
	3	0.142	0.150	0.337	1.683	0.303
	6	0.142	0.150	0.337	1.684	0.303
	9	0.137	0.144	0.332	1.661	0.299

### **Destilación**

Para la columna de destilación se emplea la corriente ligera obtenida en la decantación la cual es rica en etil-ésteres y etanol principalmente. A partir del funcionamiento de la columna, se separa el etanol como componente ligero de la mezcla de etil-ésteres, dicha mezcla se retira por la corriente de fondos. La composición de esta corriente se analiza en las tablas 16, 17 y 18 con base en la norma NTC 100-04 con el fin de establecer el cumplimiento de especificaciones para uso de estos etil-ésteres como combustible en motores diésel.

*Tabla 16. Análisis Normativa NTC Biodiesel (aceite de palma)*

Aceite de Palma						
Parámetro	Valor	Unidad	1 molécula	3 moléculas	6 moléculas	9 moléculas
Triglicéridos	0,2%	masa (máximo)	0,00006%	0,00019%	0,0004%	0,0006%
Diglicéridos	0,2%	masa (máximo)	0,017%	0,017%	0,040%	0,073%
Monoglicéridos	0,8%	masa (máximo)	0,130%	0,119%	0,159%	0,259
Glicerina total	0,25 %	masa (máximo)	0,069%	0,025%	0,056%	0,057%
Contenido de Alquil éster Ln	12,0 %	masa (máximo)	N/A	N/A	N/A	N/A
Contenido de Ésteres	96,5 %	masa (mínimo)	99,745%	99,833%	99,734%	99,600%
Contenido de alcohol	0,2%	masa (máximo)	0,00690%	0,00019%	0,00040%	0,00035%

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Aceite de Palma						
Parámetro	Valor	Unidad	1 molécula	3 moléculas	6 moléculas	9 moléculas
Contenido de Agua	500	mg/kg	287,69	250,46	77,77	80,08

*Tabla 17. Análisis Normativa NTC Biodiesel (aceite de soja)*

Aceite de Soja						
Parámetro	Valor	Unidad	1 molécula	3 moléculas	6 moléculas	9 moléculas
Triglicéridos	0,2%	masa (máximo)	0,006%	0,0002%	0,0003%	0,0006%
Diglicéridos	0,2%	masa (máximo)	0,018%	0,036%	0,071%	0,071%
Monoglicéridos	0,8%	masa (máximo)	0,129%	0,130%	0,379%	0,259%
Glicerina total	0,25%	masa (máximo)	0,068%	0,063%	0,068%	0,063%
Contenido de Alquil éster Ln	12,0%	masa (máximo)	N/A	N/A	7,72%	10,585%
Contenido de Ésteres	96,5%	masa (mínimo)	99,740%	99,756%	99,446%	99,591%
Contenido de alcohol	0,2%	masa (máximo)	0,0068%	0,0004%	0,0076%	0,0004%
Contenido de Agua	500	mg/kg	370,36	127,08	247,76	128,25

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

*Tabla 18. Análisis Normativa NTC Biodiesel (aceite de jatropha)*

Aceite de Jatropha						
Parámetro	Valor	Unidad	1 molécula	3 moléculas	6 moléculas	9 moléculas
Triglicéridos	0,2%	masa (máximo)	0,0067%	0,0002%	0,0004%	0,0006%
Diglicéridos	0,2%	masa (máximo)	0,018%	0,044%	0,084%	0,072%
Monoglicéridos	0,8%	masa (máximo)	0,129%	0,212%	0,356%	0,261%
Glicerina total	0,25%	masa (máximo)	0,062%	0,019%	0,021%	0,072%
Contenido de Alquil éster Ln	12,0%	masa (máximo)	N/A	N/A	N/A	N/A
Contenido de Ésteres	96,5%	masa (mínimo)	99,763%	99,723%	99,527%	99,546%
Contenido de alcohol	0,2%	masa (máximo)	0,00712%	0,00005%	0,00047%	0,00710%
Contenido de Agua	500	mg/kg	204,76	15,83	106,9	405,01

A partir de cada una de las etapas descritas anteriormente se realizó la comparación del dimensionamiento de cada equipo al emplear los modelos de estimación de propiedades descritos anteriormente para representar el sistema de 1 triglicérido. Este análisis busca contrastar el comportamiento de todos los modelos en el diseño metodológico aplicado al caso base, los resultados de esta comparativa se presentan en la tabla 19.

*Tabla 19. Comparativa del modelo de estimación en el dimensionamiento*

Método	Aceite	Volumen Reactor (m <sup>3</sup> )	Volumen total Lavado (m <sup>3</sup> ) (d (m), h (m))	Volumen total Decantador (m <sup>3</sup> ) (d (m), h (m))
Joback-Reid	Palma	2.09	0.251 (0.4, 1.90)	0.210 (0.37, 1.87)
	Soya	2.15	0.368 (0.45, 2.30)	0.269 (0.41, 2.05)
	Jatropha	2.15	0.368 (0.45, 2.30)	0.269 (0.41, 2.05)
	Palma	2.69	0.267 (0.41, 2.04)	0.148 (0.34, 1.68)

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Marrerro-Gani	Soya	2.11	0.238 (0.39, 1.96)	0.125 (0.32, 1.58)
	Jatropha	2.11	0.238 (0.39, 1.96)	0.125 (0.32, 1.58)
Constantinou-Gani	Palma	1.95	0.267 (0.41, 2.04)	0.151 (0.33, 1.69)
	Soya	2.18	0.258 (0.40, 2.02)	0.141 (0.33, 1.65)
	Jatropha	2.18	0.258 (0.40, 2.02)	0.141 (0.33, 1.65)

De acuerdo a la información presentada, se evidencia que el volumen del reactor tiene variaciones notables en el aceite de palma, esto se debe principalmente a los datos obtenidos del simulador referentes a la concentración de la materia prima en la corriente de ingreso al reactor, al emplearse el desarrollo de Constantinou-Gani el simulador provee un dato de concentración mayor al obtenido con los otros modelos, lo cual resulta en una diferencia de aproximadamente 38% y 7 % con los modelos de Marrero-Gani y Joback-Reid respectivamente. Para los aceites de soya y jatropha el cambio no excede el 4% por lo tanto la concentración en estos casos no se ve afectada por el modelo de estimación de propiedades.

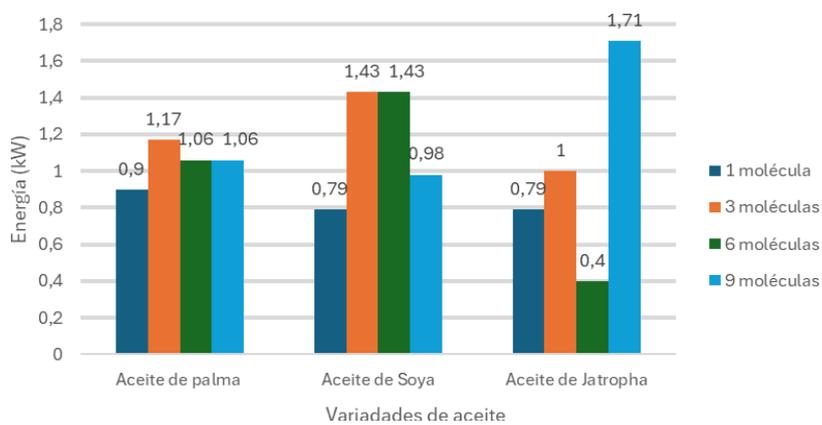
En los equipos de lavado y decantación, las variaciones entre modelos están asociadas principalmente a la producción en la etapa de reacción debido a que este volumen determina la cantidad de agua empleada en el lavado y afecta a la etapa posterior. En el modelo de Joback-reid se evidencian los volúmenes más elevados, sin embargo, esto no necesariamente implica una producción mayor de etil-ésteres, en cambio, sugiere mayor contenido de glicerina teniendo en cuenta que el volumen de los dos equipos en conjunto, si se considera que el 89% del agua y glicerina se retira en la etapa de lavado, un volumen elevado en la etapa de decantación indica que a pesar de la eficiencia de lavado el contenido de estos dos componentes es mayor que en los demás sistemas.

### 7.3. Evaluación energética y económica

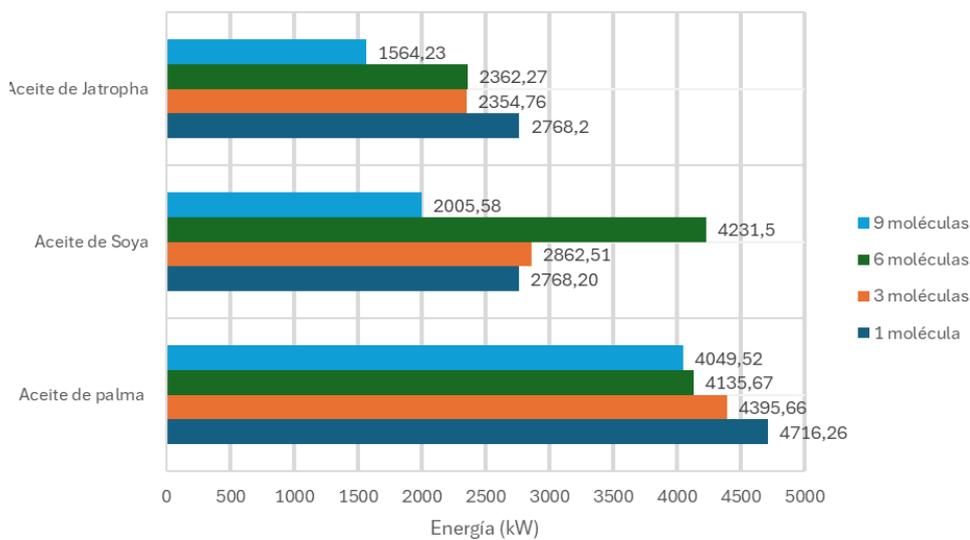
#### *Energía*

De acuerdo con la simulación desarrollada en DWSIM, se evidencian cambios en el flujo energético de los equipos de calentamiento, reacción y destilación de acuerdo al número de componentes simulados. La comparativa de energías se presenta por cada equipo a continuación:

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

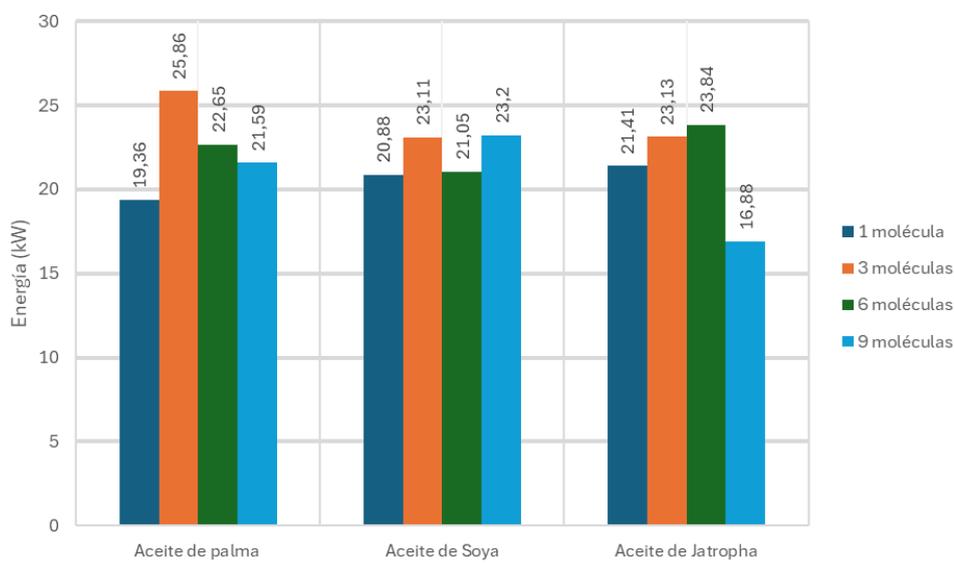


*Ilustración 19. Flujo energético en el calentador*

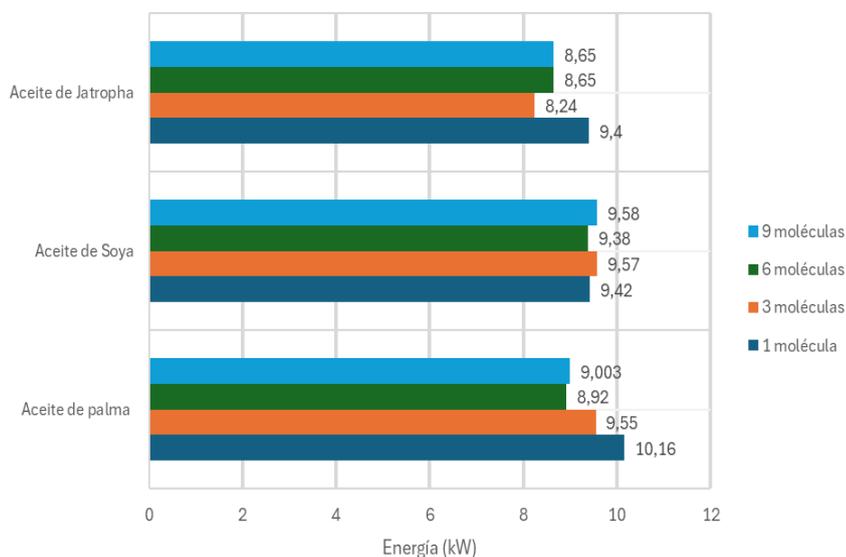


*Ilustración 20. Flujo energético en el reactor*

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	



*Ilustración 21. Flujo energético en el rehervidor*



*Ilustración 22. Flujo energético en el condensador*

De acuerdo con la información presentada en las gráficas se evidencia que las variaciones en la energía son diferentes para cada aceite estudiado.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

### Aceite de palma

El proceso simulado con aceite de palma evidencia que en el calentador se produce una variación apreciable entre las configuraciones de 1 y 3 triglicéridos presentando aumento de 30%, mientras que entre la representación de 1 triglicérido y los sistemas de 6 y 9 componentes la variación de energía es de 14%. Estas variaciones pueden estar relacionadas con la capacidad calorífica de la mezcla, a partir de los datos obtenidos del simulador se evidencia que el calor específico para la mezcla de reactivos cuando se emplea un triglicérido es de 2.29 kJ/kgK mientras que con 3 triglicéridos es de 2.34 kJ/kgK, en las configuraciones de 6 y 9 triglicéridos la capacidad calorífica de la mezcla previo al calentador es de 1.99 y 1.98 kJ/kgK respectivamente lo cual se refleja en requerimientos energéticos similares y menores a las otras configuraciones para alcanzar y mantener la temperatura requerida en la reacción

Por otro lado, en el equipo de reacción se presenta una relación inversamente proporcional entre el número de moléculas representadas y la energía empleada para esta operación. En este caso al emplear 1 triglicérido se presenta el mayor consumo energético (4716.26 kW) mientras que las configuraciones de 3, 6 y 9 triglicéridos presentan consumos menores (4395.66 kW, 4135.67 kW, 4049.52 kW respectivamente). En este caso un mayor número de moléculas permite una mejor distribución de la energía dentro del sistema, además, como se evidencia en las ilustraciones 10, 13 y 16 correspondientes a las configuraciones de 3, 6 y 9 triglicéridos respectivamente, la reacción no se estanca en ningún punto, a pesar de que la fracción molar del etil-éster principal se estabiliza, la producción de los demás ésteres continua, empleando la energía que no es requerida para el etil-éster de mayor participación y a su vez reduciendo el gasto energético al disminuir el número de reacciones simultáneas.

Finalmente, en la torre de destilación se evidencian dos comportamientos distintos. En primer lugar, el rehervidor presenta su punto de menor energía en la configuración de 1 triglicérido, aumenta considerablemente en la siguiente distribución de componentes y desciende en los dos últimos arreglos. Mientras que en el condensador la primera representación tiene el punto de mayor consumo de energía y en las demás configuraciones el gasto energético disminuye. Para este equipo se evidencia que el consumo energético más bajo en el rehervidor también sugiere menor eficiencia en la separación de las sustancias, como se evidencia en la tabla 16, en la configuración de una molécula se presenta la mayor composición de agua al final mientras que en configuraciones donde el consumo energético aumenta también mejora la eficiencia de separación y el contenido de sustancias con puntos de ebullición bajos respecto al biodiesel se reduce.

### Aceite de soya

Al igual que el aceite de palma, cuando se representa el aceite con una única molécula representativa en el equipo de calentamiento se evidencia el menor consumo el menor consumo energético (0.79 kW), sin embargo, en este caso el aumento entre la primera y la segunda configuración es aproximadamente de 81% y se mantiene para la siguiente distribución de componentes, mientras que en la última configuración el consumo energético desciende en 31.5%. En este caso el comportamiento también depende de la capacidad calorífica, en las configuraciones de 1 y 9 moléculas el consumo bajo corresponde con un

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

calor específico de mezcla bajo (1.95 y 2.21 kJ/kgK respectivamente) mientras que en las configuraciones de 3 y 6 moléculas la capacidad calorífica es más alta en comparación (2.34 y 2.42 kJ/kgK respectivamente).

En el reactor se evidencian consumos menores a los presentados por el aceite de palma en 3 de las 4 configuraciones presentadas, siendo el ensamble con 6 triglicéridos el único punto fuera de la tendencia, como se evidencia en la figura. esta configuración consume 4231.5 kW en la etapa de reacción mientras que al simular esta fase con 1, 3 y 9 triglicéridos se gastan 2768.20 kW, 2862.51 y 2005.58 kW, lo que implica una diferencia entre 1300 y 2200 kW aproximadamente. Esto puede implicar una menor eficiencia en la configuración de 6 moléculas que puede ser causada por la presencia de insaturaciones provenientes de la cadena de los ácido oleico y linoleico.

Para el último proceso, tanto el rehervidor como el condensador presentan una dispersión relativamente baja en el consumo de energía. Para el condensador el rango de los datos es de 0.20 mientras que en el rehervidor los datos se presentan en un campo de 2.24 entre el dato menor (20.88 kW) y el dato mayor (23.12 kW). El bajo rango de dispersión indica que el funcionamiento de la torre de destilación para esta materia prima no se ve afectado por variaciones en la representación del aceite, la operación de la torre es estable.

### Aceite de *jatropha*

El proceso de producción de biodiesel empleando aceite de *jatropha* se evidencia un comportamiento atípico en el equipo de calentamiento respecto a los otros aceites presentados anteriormente debido a que ninguna de las configuraciones presenta una tendencia clara, desde la representación de un triglicérido el consumo de energía es 0.79 kW, posteriormente se evidencia un aumento considerable en la segunda configuración con 1.002 kW, mientras que en la tercera configuración, con 6 moléculas, se muestra que el consumo de este equipo disminuye hasta 0.40 kW, posteriormente el ensamble con 9 triglicéridos el consumo energético aumenta a 1.71 kW. Del mismo modo que los aceites de soya y palma, el comportamiento en este equipo refleja las variaciones en la capacidad calorífica de la mezcla, desde la configuración de 6 moléculas que presenta el menor calor específico (1.89 kJ/kgK), las representaciones de 1 y 3 moléculas evidencian capacidades caloríficas similares a los otros aceites analizados anteriormente ( 2.22 y 2.39 kJ/kgK en el orden dado), finalmente la configuración de 9 moléculas es el dato que presenta mayor desviación de todos los sistemas estudiados (2.63 kJ/kgK) esto muestra que los triglicéridos añadidos en el esta representación a pesar de tener baja participación en la estructura producen un aumento considerable en la capacidad calorífica del aceite y dificultan el proceso de alcanzar y mantener la temperatura requerida.

En la fase reactiva se evidencia un comportamiento descendente a partir del sistema con una molécula (2768.2 kW), tres moléculas (2354.6 kW), se evidencia un leve aumento en la configuración de seis moléculas (2362.27 kW) mientras la última simulación presenta el menor consumo energético (1564.23 kW), este es el menor consumo energético en todas las simulaciones. Tal como se mencionó en el aceite de palma el comportamiento descendente

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

puede indicar mejor distribución de energía a medida que aumenta el número de moléculas presentes en las reacciones.

Finalmente, en la torre de destilación el rehervidor presenta un comportamiento similar a una parábola que inicia con el punto de 1 molécula en 20.88 kW, aumenta el consumo energético hasta 23.13 kW (3 moléculas) y 23.89 kW (6 moléculas), para la última configuración el gasto de energía es de 16.88 kW siendo nuevamente el menor consumo energético. Por otro lado, en el condensador se evidencia que el punto mayor pertenece al proceso con una molécula (9.42 kW) mientras que el punto menor corresponde a la configuración de 9 moléculas (7.08 kW) lo cual muestra un rango de 2.34 y una dispersión moderada. En este caso, el aumento en el consumo energético del rehervido muestra una mayor eficiencia de separación siendo la configuración de 3 moléculas el punto de mayor separación de agua y etanol, en comparación con la representación completa de este aceite (9 triglicéridos) en la cual el contenido de agua se acerca al límite y coincide con un gasto energético menor, lo anterior podría mostrar un punto óptimo de relación entre el consumo de energía y la separación de sustancias.

El consumo energético se comparó entre el modelo de Constantinou-Gani y modelos descartados debido a los porcentajes de error. Este análisis busca contrastar el comportamiento de todos los modelos en el caso base de 1 triglicérido representativo, los resultados de esta comparativa se presentan en la tabla 20.

*Tabla 20. Comparativa del modelo de estimación de propiedades en el consumo de energía*

Método	Aceite	Calentador (kW)	Reactor (kW)	Rehervidor (kW)	Condensador (kW)
Joback-Reid	Palma	1.59	4897.84	30.53	10.45
	Soya	2.37	5198.46	26.60	10.29
	Jatropha	2.37	5198.46	26.60	10.29
Marrero-Gani	Palma	1.10	4832.45	30.1	10.53
	Soya	1.15	3289.21	22.35	9.14
	Jatropha	1.15	3289.21	22.35	9.14
	Palma	0.9	4716.26	19.36	10.16

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Constantinou-Gani	Soya	0.79	2768.20	20.88	9.42
	Jatropha	0.79	2768.20	20.88	9.42

El menor consumo energético se evidencia en el modelo de Constantinou-Gani, esto se debe a que en los modelos de Joback-Reid y Marrero-Gani las propiedades de relacionadas con directamente con energía como energía libre de Gibbs de formación ( $\Delta G_f^\circ$ ), entalpía de formación ( $\Delta H_f^\circ$ ) y entalpía de vaporización ( $\Delta H_{lv}$ ) son más elevadas en la mayoría de las moléculas respecto al valor de Constantinou-Gani por ende requieren mayor energía para llevar a cabo los mismos procesos.

#### Costos

A partir de las ecuaciones presentadas en la sección 6.3 se evaluó el costo de cada equipo utilizado en las 12 simulaciones realizadas. Los costos por equipo se presentan en las ilustraciones 23 a 27

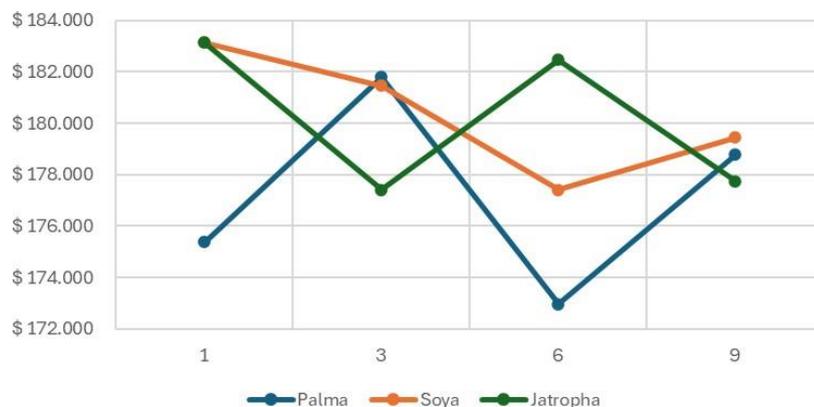
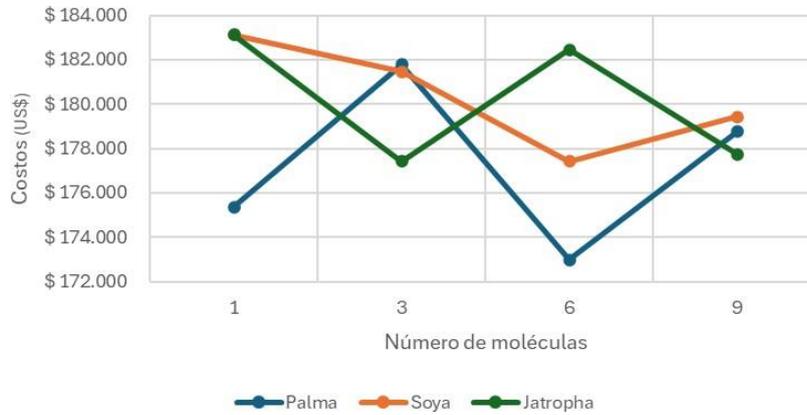
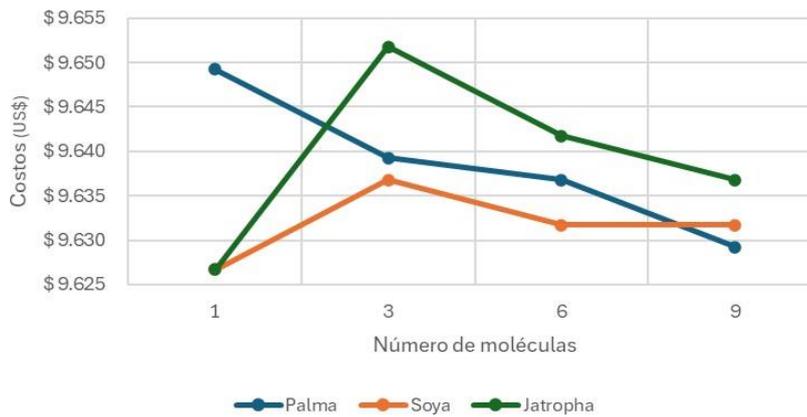


Ilustración 23. Costos del Calentador

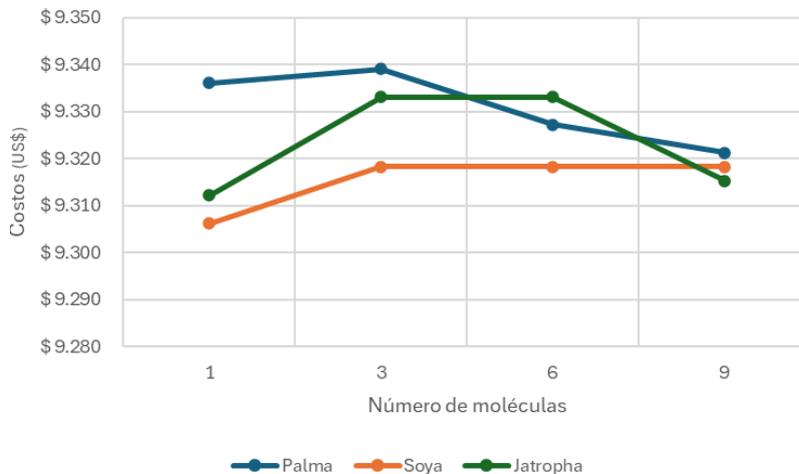
	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	<small>CERTIFICADA POR</small>   <small>CO-SC-7198-1</small>
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	



*Ilustración 24. Costos del Reactor*

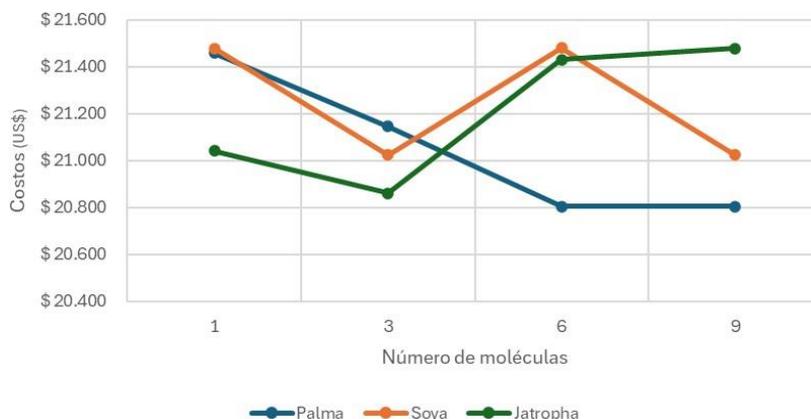


*Ilustración 25. Costos del equipo de lavado*



*Ilustración 26. Costos del Decantador*

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

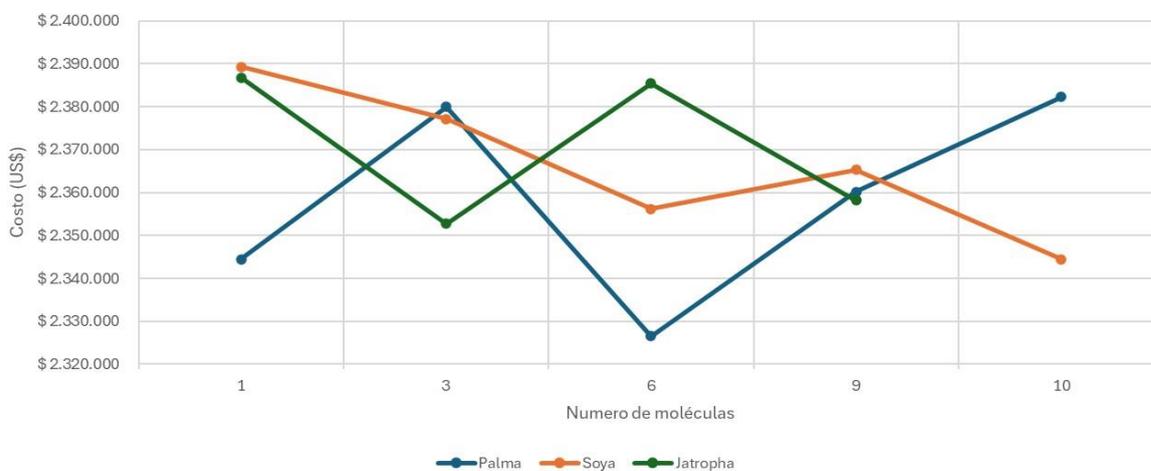


*Ilustración 27. Costos de la columna de destilación*

De acuerdo con los costos individuales se evidencia que el calentador de mayor costo se encuentra en la configuración de 1 molécula para el aceite de palma. Así mismo, el reactor más costoso pertenece a la configuración de una molécula para los aceites de soya y jatropha, mientras que los tanques de lavado y decantación de mayor precio de adquisición corresponden a las representaciones con 3 triglicéridos de los aceites de jatropha y palma respectivamente. Finalmente, la torre de destilación más costosa debido a sus dimensiones y número de etapas se encuentra en la simulación del aceite de soya con 6 moléculas.

Sin embargo, el rango en el cual se distribuyen los datos es considerablemente pequeño en 4 de los 5 equipos, mostrando así que los cambios en el costo individual son mínimos cuando se emplean diferentes representaciones. Pese a esto, en el reactor se presenta la mayor variación en los costos puesto que el rango de distribución es de US \$10154.51.

Posteriormente se evalúa el costo de capital fijo para cada ensamble y se proyecta el costo al año 2024 por medio del índice cepci (Towler, G., & Sinnott, R., 2021), para el periodo mencionado el índice presenta el valor de 799.1 (Maxwell, 2020). Los costos totales se presentan a continuación:



*Ilustración 28. Costos de capital fijo*

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Con base en los dimensionamientos presentados en la tabla 19. Se contrastan los costos de cada proceso empleando la configuración de 1 molécula y los modelos de Constantinou-Gani, Marrero Gani y Joback-Reid. En este caso se evidencia la variación en los costos al emplear cada modelo en una configuración determinada, los resultados se presentan a continuación.

Tabla 21. Costos por equipo para cada método de estimación

Materia Prima	Método	Calentador	Reactor	Tanque lavado	Tanque Decantación	Columna de destilación
Palma	Joback	\$ 186.739,55	\$ 180.114,45	\$ 9.608,97	\$ 9.501,97	\$ 21.758,65
Soya		\$ 186.717,20	\$ 182.127,33	\$ 9.888,98	\$ 9.654,26	\$ 21.599,86
Jatropha		\$ 186.717,20	\$ 182.127,33	\$ 9.888,98	\$ 9.654,26	\$ 21.599,86
Palma	Marrero	\$ 186.739,58	\$ 199.778,62	\$ 9.649,27	\$ 9.327,16	\$ 21.331,83
Soya		\$ 186.708,13	\$ 180.786,68	\$ 9.575,65	\$ 9.256,92	\$ 21.351,21
Jatropha		\$ 186.708,13	\$ 180.786,68	\$ 9.575,65	\$ 9.256,92	\$ 21.351,21
Palma	Constantinou	\$ 186.739,58	\$ 175.371,95	\$ 9.649,27	\$ 9.336,07	\$ 21.459,58
Soya		\$ 186.714,51	\$ 183.129,54	\$ 9.626,69	\$ 9.306,15	\$ 21.479,07
Jatropha		\$ 186.714,51	\$ 183.129,54	\$ 9.626,69	\$ 9.312,19	\$ 21.040,83

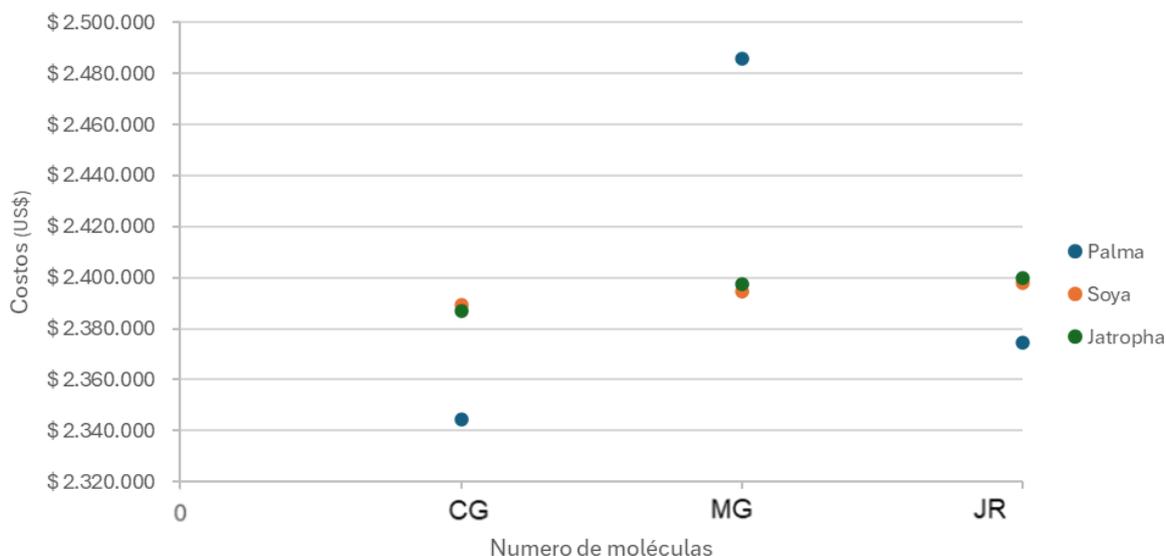
De acuerdo a la tabla 21. El equipo de calentamiento con menor costo corresponde al aceite de soya representado con el método de Marrero-Gani, mientras que el mayor costo se encuentra en el método de Constantinou-Gani. La diferencia entre estos extremos es de 0.02%, sin embargo esto indica que la representación de mayor costo requiere un mayor flujo de material, puesto que este es el parámetro requerido en el cálculo de costos.

En el reactor, los datos muestran que el equipo más costoso se encuentra en la simulación empleando el aceite de palma y el método de Marrero-Gani, esto se debe a que en esta combinación se da el reactor de mayor volumen (ver Tabla 19), para este equipo se evidencia la mayor diferencia porcentual entre los extremos con 10.92%. Paralelamente, los equipos de lavado y decantación de mayor costo pertenecen al aceite de jatropha y el modelo de Joback-Reid, mostrando una diferencia de 3.27% y 4.29% con los equipos de menor costo correspondientes al aceite de jatropha y el modelo de Constantinou-Gani

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Finalmente en la torre de destilación, el extremo de mayor costo corresponde a la combinación de aceite de palma y modelo Joback-Reid, mientras que el menor costo se encuentra en la combinación de aceite de jatropa y modelo Constantinou-Gani, para este equipo los datos muestran la menor diferencia entre los puntos extremos correspondiente a 2.00%

El costo total del proceso aplicando cada modelo de estimación de propiedades se presenta en la ilustración 29



*Ilustración 29. Costos totales del proceso con diferentes modelos de estimación de propiedades*

Los costos totales permiten observar diferencias considerables en el uso del aceite de palma, el cual corresponde al costo total más bajo (empleando el modelo de Constantinou-Gani) y el costo total más alto (en el método de Marrero-Gani), las variaciones entre los modelos de Constantinou-Gani y Marrero-Gani son de 6.03% para este aceite, mientras que entre los modelos de Constantinou-Gani y Joback-Reid el cambio es de 1.28%. Para los aceites de soya y jatropa, se evidencian variaciones ligeras que no superan el 0.6%. En términos generales, el modelo de Constantinou-Gani presenta los menores costos, mientras el modelo de Marrero-Gani presenta los mayores costos y la mayor desviación entre los puntos. Por su parte el modelo de Joback-Reid presenta un comportamiento con dispersión mínima, a pesar de esto, en este modelo se evidencia el mayor costo total para los aceites de soya y jatropa.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## 8. CONCLUSIONES

Este trabajo recoge los resultados de diversos análisis del proceso de producción de biodiesel a partir de tres aceites vegetales. Con base en lo presentado anteriormente se entiende que:

El modelo desarrollado por Constantinou-Gani predice de forma relativamente acertada las propiedades de los compuestos estudiados, sin embargo, presenta porcentajes de error que en algunos casos superan el 20% por lo que deben ser tomados en cuenta a la hora de su aplicación.

El dimensionamiento de los equipos utilizados para el proceso presenta variaciones en cada configuración, no obstante, las dimensiones tienen un rango de distribución menor a 1%, esto indica que no hay una diferencia apreciable en este aspecto.

El consumo energético en las etapas propuestas tiende a disminuir al aumentar el número de moléculas representadas tanto en las materias primas como en los productos de la reacción de transesterificación. Aunque, se evidencian algunas excepciones en configuraciones y equipos particulares, esta tendencia suele mostrar diferencias considerables entre los extremos de los datos, es decir, entre las representaciones con 1 y 9 moléculas. El análisis indica que en el aceite de palma las variaciones entre la representación de menor y mayor complejidad no superan el 20% tomando en cuenta los cuatro equipos estudiados. Para el aceite de soya la variación más alta se presenta en el aumento del consumo energético es de aproximadamente 53% presentada en la configuración de 6 moléculas. Por otro lado, en el aceite de jatropha todas las variaciones superan el 20% siendo el cambio más notable en el equipo de calentamiento con un máximo de 54% entre sus diferentes configuraciones.

Como consecuencia de las variaciones ligeras en el dimensionamiento de los equipos, el costeo de los mismos presenta un comportamiento similar, dado que la variación en el costo total no supera el 3%. Pese a esto el comportamiento no es lineal, se evidencian cambios de dirección en cada punto de la gráfica, esto indica que no existe una tendencia clara de aumentar o disminuir el costo del proceso respecto al número de moléculas empleadas en la simulación. Sin embargo teniendo en cuenta los puntos extremos, es decir, la representación más simple y la representación más compleja se evidencia que en el aceite de palma la diferencia es positiva (1.61%) por lo tanto el costeo del proceso aumenta respecto al número de moléculas mientras que en los aceite de soya y jatropha la diferencia de costos entre estas representaciones es negativa (1.88% y 1.20%) demostrando que en estos casos el costo disminuye cuando se representa el aceite en su totalidad

Finalmente, al comparar los modelos de estimación de propiedades aplicados a una configuración específica se evidencian variaciones tanto en el dimensionamiento de equipos como en el costeo, especialmente en el aceite de palma para los tres métodos aplicados. Respecto a equipos la mayor variación se presenta en el reactor donde la diferencia del modelo de Constantinou-Gani con los modelos de Joback-Reid y Marrero-Gani es de 7% y 38% respectivamente. El costo total también presenta la mayor diferencia entre los modelos

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	<small>CERTIFICADA POR</small>   <small>CO-SC 7188-1</small>
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

de Constantinou-Gani y Marrero-Gani aplicados al aceite de palma con aproximadamente 6.1%.

Este análisis del proceso de producción de biodiesel detallando las composiciones de los aceites empleados como materia prima, es útil para la identificación de mejoras y optimizaciones al sistema.

## 9. RECOMENDACIONES

La metodología propuesta es un punto de partida para la optimización del proceso de producción de biodiesel, sin embargo, debido a los márgenes de error en la estimación de propiedades se recomienda utilizar una combinación de modelos para reducir las desviaciones en el dimensionamiento, consumo energético y costeo de equipos.

Además como se mencionó anteriormente no existe una tendencia clara respecto al impacto del número de moléculas en el costo de los equipos, por ende es necesario realizar estudios más extensos y variados para determinar el efecto real de las configuraciones en estos parámetros.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## BIBLIOGRAFÍA

- Aca-Aca, M. G. (2009). Estimación de propiedades termodinámicas de los compuestos involucrados en la producción de biodiesel. *Superf. vacío*, 15-19.
- Ahmad, M., Khan, M. A., Zafar, M., & Sultana, S. (2012). *Practical handbook on biodiesel production and properties*. CRC press.
- Akbar, E., Yaakob, Z., Kamarudin, S. K., Ismail, M., & Salimon, J. (2009). Characteristic and composition of *Jatropha curcas* oil seed from Malaysia and its potential as biodiesel feedstock feedstock. *European journal of scientific research*, 29(3), 396-403.
- Alcalá-Galiano Morell, D. D., Cujilema-Quitio, M. C., León-Revelo, G., Baryolo-González, L., & Ramos-Sánchez, L. B. (2018). Producción enzimática de biodiesel con biomasa lignocelulósica. *Tecnología Química*, 38(1), 138-152.
- Ali, E. N., & Tay, C. I. (2013). Characterization of biodiesel produced from palm oil via base catalyzed transesterification. *Procedia Engineering*, 53, 7-12.
- Alonso Castro, E. (2014). Biodiésel de ésteres etílicos de ácidos grasos: correlación composición-propiedades.
- Arenas Sánchez, J. J. (2021). Producción de biodiesel a partir de aceite de cocina usado, simulación y evaluación económica.
- ASTM D 6751:2002 "Standard Specification for Biodiesel Fuel (B-100) Blend Stock for Distillate Fuels.
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., & Aziz, A. A. (2011). Biodiesel separation and purification: a review. *Renewable Energy*, 36(2), 437-443.
- Avinash, A., & Murugesan, A. (2017). Economic analysis of biodiesel production from waste cooking oil. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12(10), 890-894.
- Bateni, H., Saraeian, A., Able, C., & Karimi, K. (2019). Biodiesel purification and upgrading technologies. *Biodiesel: From production to combustion*, 57-100.
- Bogatishcheva, N. S., Faizullin, M. Z., Popov, A. P., & Nikitin, E. D. (2017). Critical properties, heat capacities, and thermal diffusivities of four saturated triglycerides. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 113, 308-314.
- Callejas, E. S., & Quezada, V. G. (2009). Los biocombustibles. *El cotidiano*, (157), 75-82
- Carlson, E. (1996). Don't gamble with physical properties for simulations. *Chemical Engineering Progress*, 92(10), 35-46.
- Castro-Martínez, C., Beltrán-Arredondo, L. I., & Ortiz-Ojeda, J. C. (2012). Producción de biodiesel y bioetanol: ¿ una alternativa sustentable a la crisis energética?. *Ra Ximhai*, 8(3), 93-100.
- Constantinou L., & Gani R. (1994). New Group Contribution Method for Estimating Properties of Pure Compounds, *AIChE J.*, 40, 1697-1709
- Cortés-Sánchez, M. D., Gata-Montero, E. M., Pipió-Tertero, A., Rivas, Á. R., & Sánchez-Santos, J. M. (2019). Biocombustibles: tipos y estrategias de producción. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 35.
- Deen, A., Visvanathan, R., Wickramarachchi, D., Marikkar, N., Nammi, S., Jayawardana, B. C., & Liyanage, R. (2021). Chemical composition and health benefits of coconut oil: an overview. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(6), 2182-2193.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Delgado, J. E., Salgado, J. J., & Perez, R. (2015). Perspectivas de los biocombustibles en Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27), 13-28.

Dey, S., Reang, N. M., Das, P. K., & Deb, M. (2021). A comprehensive study on prospects of economy, environment, and efficiency of palm oil biodiesel as a renewable fuel. *Journal of cleaner production*, 286, 124981.

Domínguez, Y. D., García, D. T., Fernández-Santana, E., Macias, M. R., Pérez, L. G., Piloto-Rodríguez, R., & Fischer, T. (2019). Rheological behavior and properties of biodiesel and vegetable oil from Moringa oleifera Lam. *Afinidad*, 76(587).

Drapcho, C. M., Nhuan, N. P., & Walker, T. H. (2008). *Biofuels engineering process technology* (pp. 160-180). New York: McGraw-Hill.

Durán Agüero, S., Torres García, J., & Sanhueza Catalán, J. (2015). Aceites vegetales de uso frecuente en Sudamérica: características y propiedades. *Nutrición Hospitalaria*, 32(1), 11-19.

Farouk, S. M., Tayeb, A. M., Abdel-Hamid, S. M., & Osman, R. M. (2024). Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production, challenges, and prospects: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(9), 12722-12747.

Fedebiocombustibles. (2022) Sector de los biocombustibles fija su hoja de ruta para 2022, tras buenos resultados en el 2021 Disponible en línea <https://fedebiocombustibles.com/2022/05/24/sector-de-los-biocombustibles-fija-su- hoja-de-ruta-para-2022>.

Fredenslund, Aa.; Jones, R. L.; Prausnitz, J. M. Group Contribution Estimation of Activity Coefficients in Nonideal Liquid Mixtures. *AIChE J.* 1975,21, 1086-1099.

Hama, S., & Kondo, A. (2013). Enzymatic biodiesel production: an overview of potential feedstocks and process development. *Bioresource technology*, 135, 386-395.

Harriott, P., McCabe, W. L., & Smith, J. C. (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química*.

Hernández, P. N. B., Santamaría, J. R. A., & Rios, L. A. (2009). *Biodiesel: Producción, calidad y caracterización*. Universidad de Antioquia.

Joback, K. G., & Reid, R. C. (1987). Estimation of pure-component properties from group-contributions. *Chemical Engineering Communications*, 57(1-6), 233-243.

Knothe, G., Van Gerpen, J. H., & Krahl, J. (Eds.). (2005). *The biodiesel handbook* (Vol. 1). Champaign, IL: AOCS press.

Koushki, M., Nahidi, M., & Cheraghali, F. (2015). Physico-chemical properties, fatty acid profile and nutrition in palm oil. *Archives of Advances in Biosciences*, 6(3), 117-134.

La república (6 de marzo de 2024). El sector de combustibles fósiles lideró la inversión extranjera directa con 34% en 2023. *La república*. <https://www.larepublica.co/economia/el-sector-de-combustibles-fosiles-lidero-la-inversion-extranjera-directa-con-34-en-2023-3815657>

Laghari, Z. H., Sherazi, S. T. H., Ayyildiz, H. F., Topkafa, M., Kara, H., Mahesar, S. A., & UDDIN, S. (2020). Processing impact on tocopherols and triglycerides composition of soybean oil and its deodorizer distillate evaluated by high-performance liquid chromatography. *Turkish journal of chemistry*, 44(6), 1694-1702.

Li, Y., Qiu, F., Yang, D., Li, X., & Sun, P. (2011). Preparation, characterization and application of heterogeneous solid base catalyst for biodiesel production from soybean oil. *Biomass and bioenergy*, 35(7), 2787-2795.

Litchfield, C. (2012). *Analysis of triglycerides*. Elsevier.

Liu, Y., Yang, X., Adamu, A., & Zhu, Z. (2021). Economic evaluation and production process simulation of biodiesel production from waste cooking oil. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100091.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Machado, G. D., Pessoa, F. L. P., Castier, M., Aranda, D. A., Cabral, V. F., & Cardozo-Filho, L. (2013). Biodiesel production by esterification of hydrolyzed soybean oil with ethanol in reactive distillation columns: simulation studies. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(27), 9461-9469.

Marrero, J., & Gani, R. (2001). Group-contribution based estimation of pure component properties. *Fluid phase equilibria*, 183, 183-208.

Medeiros D. (2024) DWSIM About. DWSIM. <https://dwsim.org/index.php/about/>

Mohammed, J., Edith, U., Atuman, S. J., & Aboje, A. A. (2012). Production and characterization of biodiesel from jatropha oil and neem oil.

Mukhtar, A., Saqib, S., Lin, H., Shah, M. U. H., Ullah, S., Younas, M., ... & Bokhari, A. (2022). Current status and challenges in the heterogeneous catalysis for biodiesel production. *Renewable and sustainable energy reviews*, 157, 112012.

Narváez, P. C., Noriega, M. A., & Cadavid, J. G. (2015). Kinetics of palm oil ethanolysis. *Energy*, 83, 337-342.

Ndiaye, P. M., Tavares, F. W., Dalmolin, I., Dariva, C., Oliveira, D., & Oliveira, J. V. (2005). Vapor pressure data of soybean oil, castor oil, and their fatty acid ethyl ester derivatives. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 50(2), 330-333.

Noureddin, A., Shirazi, M. M. A., Tofeily, J., Kazemi, P., Motaei, E., Kargari, A., ... & Tabatabaei, M. (2014). Accelerated decantation of biodiesel-glycerol mixtures: Optimization of a critical stage in biodiesel biorefinery. *Separation and Purification Technology*, 132, 272-280.

Ortiz Lechuga, E. G., Rodríguez Zúñiga, M., & Arévalo Niño, K. (2020). Efficiency evaluation on the influence of washing methods for biodiesel produced from high free fatty acid waste vegetable oils through selected quality parameters. *Energies*, 13(23), 6328.

Palacios González, J. R., Ramón Valencia, J. A., & Saavedra Rincon, S. (2018). Analysis in the extraction of oil from jatropha curcas l. By the methods of chemical extraction and ultrasound.

Pantzaris, T. P., & Ahmad, M. J. (2002). Propiedades y usos del aceite de palmiste. *Palmas*, 23(3), 46-58.

Pasha, M. K., Dai, L., Liu, D., Guo, M., & Du, W. (2021). An overview to process design, simulation and sustainability evaluation of biodiesel production. *Biotechnology for Biofuels*, 14, 1-23.

Patel, N. K., & Shah, S. N. (2015). Biodiesel from plant oils. In *Food, energy, and water* (pp. 277-307). Elsevier.

Pons, G. A. (2015). Aceites vegetales, hacia una producción sostenible. *El hombre y la Máquina*, (46), 9-19.

Predojević, Z. J. (2008). The production of biodiesel from waste frying oils: A comparison of different purification steps. *Fuel*, 87(17-18), 3522-3528.

Przybylski, R., Mag, T., Eskin, N. A. M., & McDonald, B. E. (2005). Canola oil. *Bailey's industrial oil and fat products*, 2, 61-122.

Ramírez, I. E. M., Vela, N. A. C., & Rincón, J. J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (55), 62-70

Ramírez-Camacho, J. A., & Rodríguez-Pava, S. C. (2019). Conveniencia de la Producción de Biodiesel en Colombia desde la Perspectiva del Desarrollo Sostenible.

Ramos, F. D., Díaz, M. S., & Villar, M. A. (2016). Biocombustibles.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

Restrepo, A., C Rodríguez, D., & A Peñuela, G. (2021). Eficiencia de un reactor SBR para la remoción de la materia orgánica presente en el agua residual de una industria de teñido de flores. *Revista Ion*, 34(1), 47-59.

Rodríguez, R. P., Perez, L. G., Alfonso, M., Duarte, M., Caro, R., Galle, J., ... & Verhelst, S. (2011). Characterization of *Jatropha curcas* oils and their derived fatty acid ethyl esters obtained from two different plantations in Cuba. *Biomass and bioenergy*, 35(9), 4092-4098.

Rokhum, S. L., Halder, G., Assabumrun, S., & Ngaosuwan, K. (Eds.). (2022). *Biodiesel Production: Feedstocks, Catalysts and Technologies*. Wiley.

Romanelli, G. P., Ruiz, D. M., & Pasquale, G. A. (2016). *Química de la biomasa y los biocombustibles*. Series: Libros de Cátedra

Romano, S. D., Sorichetti, P. A., Romano, S. D., & Sorichetti, P. A. (2011). Introduction to biodiesel production. *Dielectric spectroscopy in biodiesel production and characterization*, 7-27.

Santamaría, J. R. A., Benjumea, P., Meneses, E. G., & Bayer, J. F. P. (2003). Biodiesel—Una revisión del desempeño mecánico y ambiental. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, (13), 1-14.

Sarin, A. (2012). *Biodiesel: production and properties*. Royal Society of Chemistry.

Scrimgeour, C. (2005). *Chemistry of Fatty Acids*. Bailey's industrial oil and fat products. F. Shahidi, *Bailey's Industrial Oil and Fats Products, Edible Oil and Fat Products: Chemistry, Properties and Health Effects*, 1-39.

Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M., & García, C. R. (2007). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química* (pp. 446-449). McGraw-Hill.

Suthar, K., Dwivedi, A., & Joshipura, M. (2019). A review on separation and purification techniques for biodiesel production with special emphasis on *Jatropha* oil as a feedstock. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 14(5), e2361.

Tan, C. P., & Nehdi, I. A. (2012). The physicochemical properties of palm oil and its components. In *Palm oil* (pp. 377-391). AOCS Press.

Thangaraj, B., Solomon, P. R., Muniyandi, B., Ranganathan, S., & Lin, L. (2019). Catalysis in biodiesel production—a review. *Clean Energy*, 3(1), 2-23.

Tickell, J. (2006). *Biodiesel America: how to achieve energy security, free America from middle-east oil dependence, and make money growing fuel*. Biodiesel America.

Torossi, F.D., & Sanchez, M. M. (2007). Transformando aceite de freír usado en biodiesel: una propuesta experimental para la enseñanza secundaria. *Educación en Ciencias Químicas*, N° 355, *Industria & Química*.

Towler, G., & Sinnott, R. (2021). *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*. Butterworth-Heinemann.

Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (2008). *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Pearson Education.

Valdés-López, A., López-Bastida, E. J., Torres-Calzadilla, O., Rodríguez-Pérez, E., & Aparicio-Ortiz, L. J. (2020). Análisis de los beneficios ambientales de la recuperación de las aguas residuales en el proceso de lavado de arenas. *Tecnología Química*, 40(3), 640-657.

Varon R. V. (2023). *Producción de B100 de palmiste*. Universidad ECCI

Zapata, C. D., Martínez, I. D., & ANDRÉS, C. (2007). Producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma: 2. Evaluación económica. *Dyna*, 74(151), 83-96.

Zhang, Y., Dube, M. A., McLean, D. D. L., & Kates, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource technology*, 89(1), 1-16.

	<b>GUÍA PARA PRESENTACIÓN Y ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO (TESIS, MONOGRAFÍA, SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN, PASANTÍA)</b>		<b>Código: IF-IN-002</b> <b>Versión: 05</b>	
	<b>Proceso:</b> <b>Investigación</b>	<b>Fecha de emisión:</b> <b>16-Jun-2009</b>	<b>Fecha de versión:</b> <b>28-Mar-2022</b>	

## Anexo 1. Comparativa de los modelos de estimación de propiedades en triglicéridos

*Porcentaje de error en estimación de propiedades: Tricaprilina*

Propiedad/Método	Experimental	JR	MG	CG
Tm (K)	283.15	79%	24%	22%
Tb (K)	506.15	96%	43%	36%
Tc (K)	836.00	47%	9%	2%
Pc (pa)	8.30	68%	9%	11%
Error promedio		72%	21%	18%

*Porcentaje de error en estimación de propiedades: Tricaprina*

Propiedad/Método	Experimental	JR	MG	CG
Tm (K)	305.15	88%	24%	19%
Tb (K)	851.75	33%	15%	15%
Tc (K)	864.00	69%	14%	0.2%
Pc (pa)	7.50	61%	5%	21%
Error promedio		63%	15%	14%

*Porcentaje de error en estimación de propiedades: Trilaurin*

Propiedad/Método	Experimental	JR	MG	CG
Tm (K)	319.98	100%	9%	18%
Tb (K)	916.45	38%	14%	18%
Tc (K)	899.00	98%	8%	1.2%
Pc (pa)	6.50	37%	17%	6%
Error promedio		68%	12%	11%