Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Modelamiento matemático de un reactor de transesterificación de aceite de soya para la producción de biodiesel

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química

AUTOR

Sheyla Alison ASTETE QUIJANDRIA

ASESOR

Dr. Raymundo ERAZO ERAZO

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Astete, S. (2024). *Modelamiento matemático de un reactor de transesterificación de aceite de soya para la producción de biodiesel*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Sheyla Alison Astete Quijandria
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	73324009
URL de ORCID	-
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Raymundo Erazo Erazo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08439329
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-1480-7641
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Roberto Robles Calderón
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06078749
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	José Fernandes de Oliveira Ugarte
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	48755147
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.1.2. Nuevos Combustibles
Grupo de investigación	No aplica.

Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Facultad de Química e Ingeniería Química País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Latitud: -12.060861928004034 Longitud: -77.09745932356137
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Bioproductos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.09.00

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú. DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "II Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2024-I", bajo la Presidencia del **Mg. ROBERTO ROBLES CALDERÓN;** el **Dr. JOSÉ FERNANDES DE OLIVEIRA UGARTE (Miembro)** y el **Dr. RAYMUNDO ERAZO ERAZO (Asesor);** habiendo presentado para tal efecto la **TESIS,** titulada **"Modelamiento matemático de un reactor de transesterificación de aceite de soya para la producción de biodiesel"** después de **SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborado por la bachiller en Ingeniería Química: **ASTETE QUIJANDRIA, SHEYLA ALISON;** para optar el TÍTULO **PROFESIONAL** de **INGENIERA QUÍMICA,** acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DIECIOCHO (LETRAS) 18 (NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 17 de agosto del 2024

Mg. ROBERTO ROBLES CALDERÓN
Presidente

Dr. JOSÉ FERNANDES DE OLIVEIRA UGARTE
Miembro

Dr. RAYMUNDO ERAZO ERAZO
Asesor

Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, RAYMUNDO ERAZO ERAZO en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N° 000656-2024-D-FQIQ/UNMSM de la tesis, cuyo título es **Modelamiento matemático de un reactor de transesterificación de aceite de soya para la producciónde biodiesel**, presentada por la bachiller **Sheyla Alison Astete Quijandria** para optar el título Profesional de Ingeniería Química, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 14% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 22 de agosto de 2024

Firma del Asesor _____

Nombres y Apellidos del asesor: Raymundo Erazo Erazo

DNI: 08439329

Tabla de Contenido

RESUMEN 3

INTRODUCCIÓN 5

REALIDAD PROBLEMÁTICA 5

OBJETIVOS 11

JUSTIFICACIÓN 12

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 14

ANTECEDENTES DE ESTUDIO 14

BASES TEÓRICAS 19

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS 31

HIPÓTESIS Y VARIABLES 33

HIPOTESIS 33

VARIABLES 34

METODOLOGIA 36

PROCEDIMIENTO 37

RESULTADOS 50

DISCUSION DE RESULTADOS 53

CONCLUSIONES 55

RECOMENDACIONES 58

BIBLIOGRAFIA 59

RESUMEN

Como ya es sabido, los combustibles fósiles son una gran fuente de contaminación ambiental, en ese sentido, los biocombustibles son una buena alternativa para la sustitución total o parcial de dichos combustibles fósiles; en consecuencia, el biodiesel es una buena opción para suplir al diésel debido que se puede emplear sin modificar los motores que operan actualmente y se puede distribuir de manera segura.

Por lo mencionado, la presente investigación está enfocada en aplicar un modelamiento matemático de un reactor Batch para obtener biodiesel, este modelamiento se obtiene partiendo de las ecuaciones de balance y energía de la reacción de transesterificación.

Con la finalidad de validar el modelamiento matemático aplicado, se realizó la simulación del mismo mediante el software Matlab, obteniéndose una respuesta temporal similar respecto a la concentración de reactantes y productos.

Finalmente se obtuvo un error porcentual para los esteres metílicos de 64.5%, para el metanol el error porcentual fue de 38.7%. y un porcentaje de conversión de aceite a esteres metílicos de 43.45%.

Palabras clave: modelamiento matemático, reacción de transesterificación, biodiesel, reactor Batch.

ABSTRACT

As it is already known, fossil fuels are a great source of environmental pollution, in this sense, biofuels are a good alternative for the total or partial substitution of these fossil fuels; consequently, biodiesel is a good option to replace diesel because it can be used without modifying the engines that currently operate and it can be distributed safely.

Therefore, this research is focused on applying a mathematical modeling of a Batch reactor to obtain biodiesel, this modeling is obtained from the balance and energy equations of the transesterification reaction.

In order to validate the applied mathematical modeling, the simulation was carried out using Matlab software, obtaining a similar time response with respect to the concentration of reactants and products.

Finally, a percentage error was obtained for methyl esters of 64.5%, for methanol the percentage error was 38.7%, and a conversion percentage of oil to methyl esters of 43.45%.

Keywords:

Keywords: Mathematical Modelling, Transesterification Reaction, biodiesel, Batch reactor.

INTRODUCCIÓN

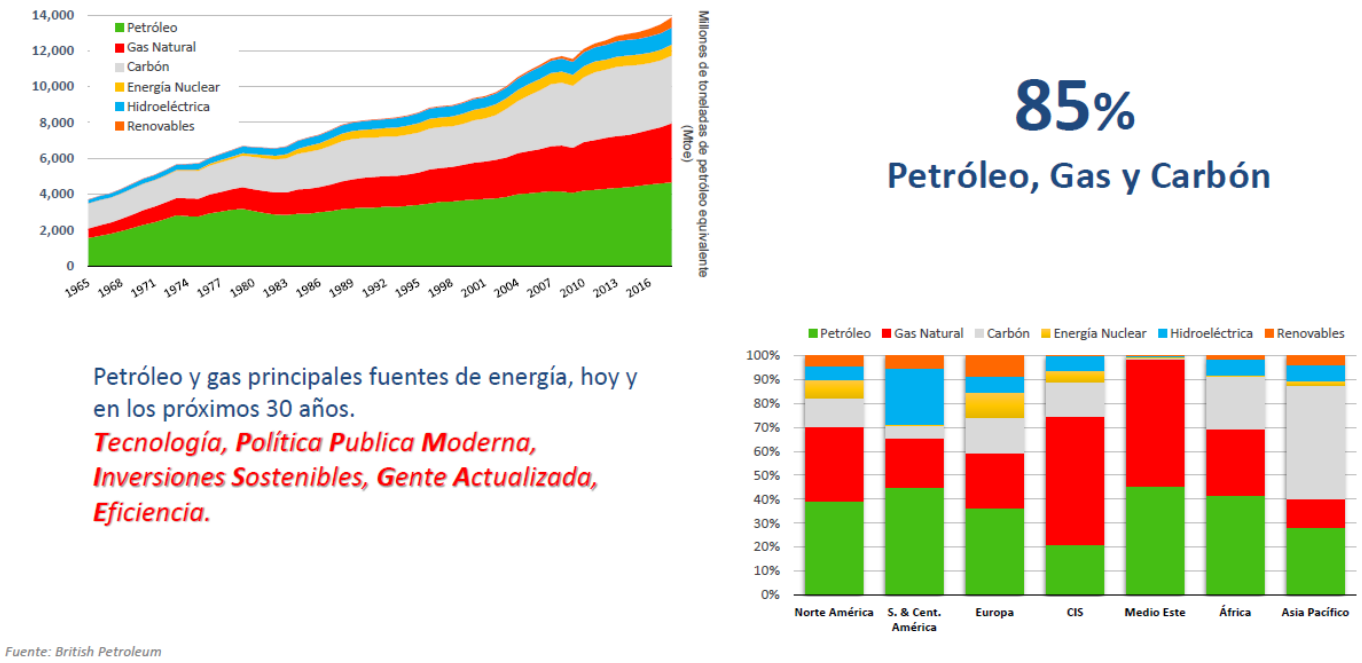
REALIDAD PROBLEMÁTICA

El carbón se considera un combustible fósil con un bajo índice energético en relación con la cantidad de dióxido de carbono que se emite a la atmósfera. Los principales impactos de su quema se relacionan con la minería y los residuos. Estos últimos pueden suponer un 15% del peso original del carbón. El contenido en azufre y zinc en los carbones se ha relacionado con la muerte de millones de peces en aguas superficiales de minas. La generación de residuos en las actividades de explotación minera y de generación de residuos son otra fuente de impacto ambiental significativa.

Como, por ejemplo, la turba, que es materia orgánica parcialmente descompuesta, es empleada como combustible por su bajo valor energético, también tiene un alto impacto directo sobre el ecosistema. Además, otras fuentes de contaminación son la maquinaria empleada en la minería de carbón y petróleo y los procesos asociados a la extracción y transporte del gas natural. Por otra parte, la gasolina, uno de los productos obtenidos del petróleo, contiene gran cantidad de compuestos orgánicos volátiles que promueven distintos procesos y que son liberados a la atmósfera.

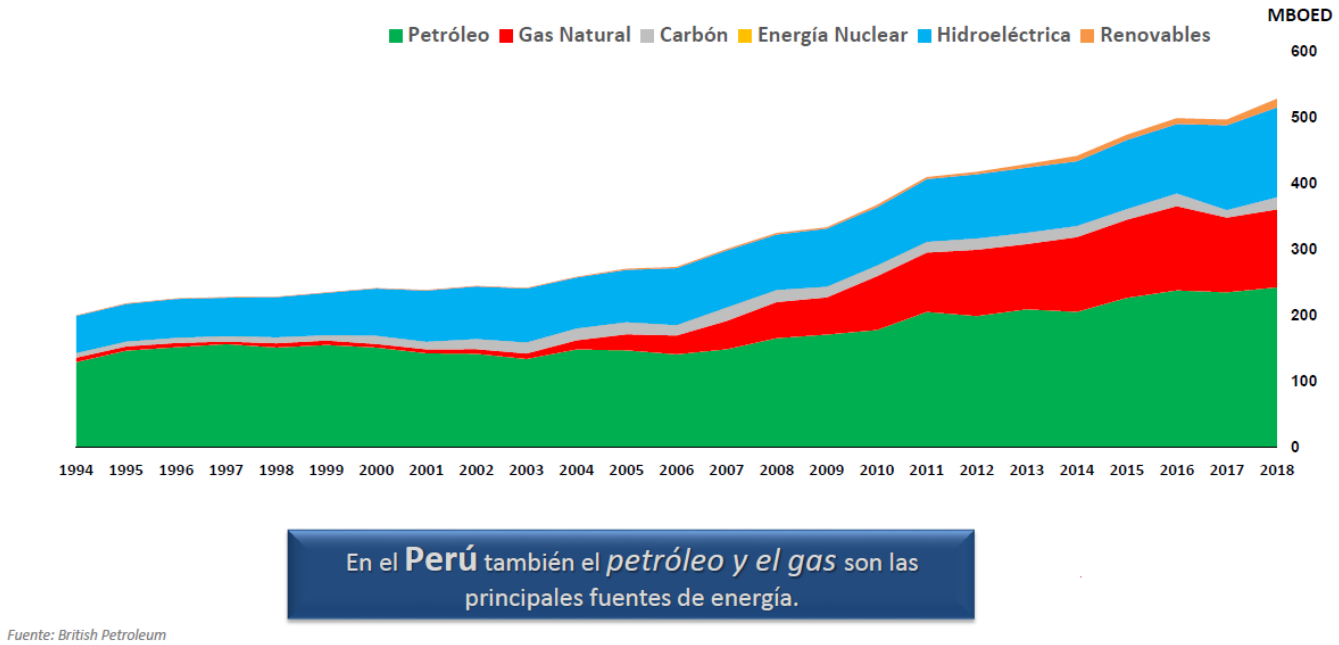
La quema de los combustibles fósiles genera graves impactos ambientales. Los tres tipos de fuente petrolera, tal como se mencionó previamente, desprenden gases y compuestos a la atmósfera por medio de la quema. Una vez en el aire, matizan la calidad de este, intensificando el calentamiento global. Especial mención merecen los compuestos azufrados del petróleo que suponen el principal origen humano de la lluvia ácida. Los hidrocarburos derramados accidentalmente suponen un tipo distinto de contaminación. La extracción y refinación del petróleo también genera impactos severos.

En las figuras 1 a 4 se muestran el consumo de combustibles, la matriz energética peruana, la producción peruana y la producción mundial, respectivamente.



Fuente: British Petroleum

Figura 1 MATRIZ ENERGÉTICA: Consumo mundial



Fuente: British Petroleum

Figura 2 MATRIZ ENERGETICA: Consumo PERU 1994-2018

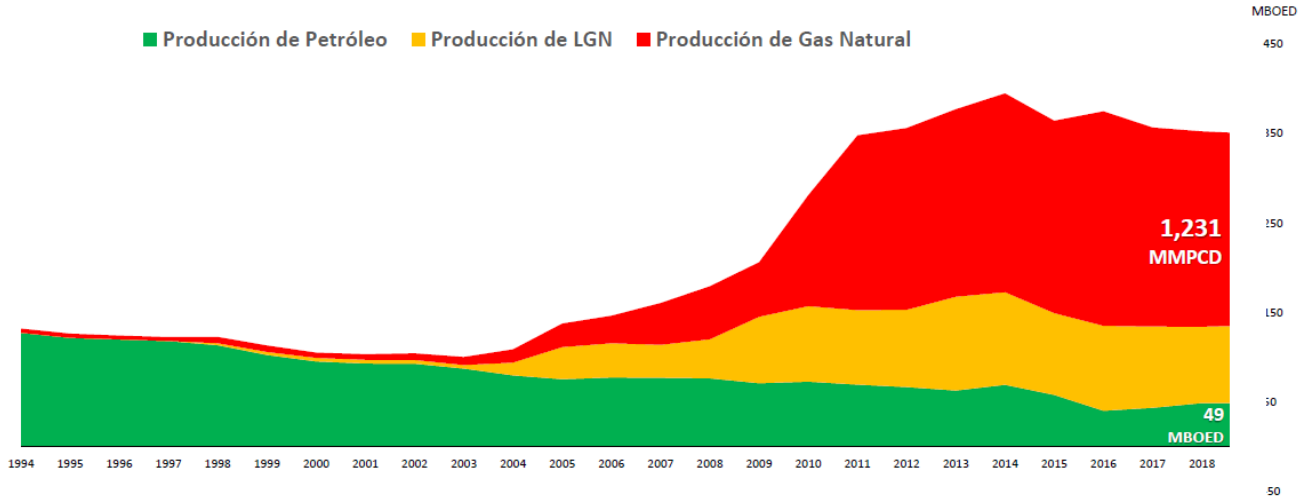


Figura 3 Producción PERU 1994-2018

*El Perú solo ha producido el 48% de petróleo de lo que consumido entre los años 1994-2018

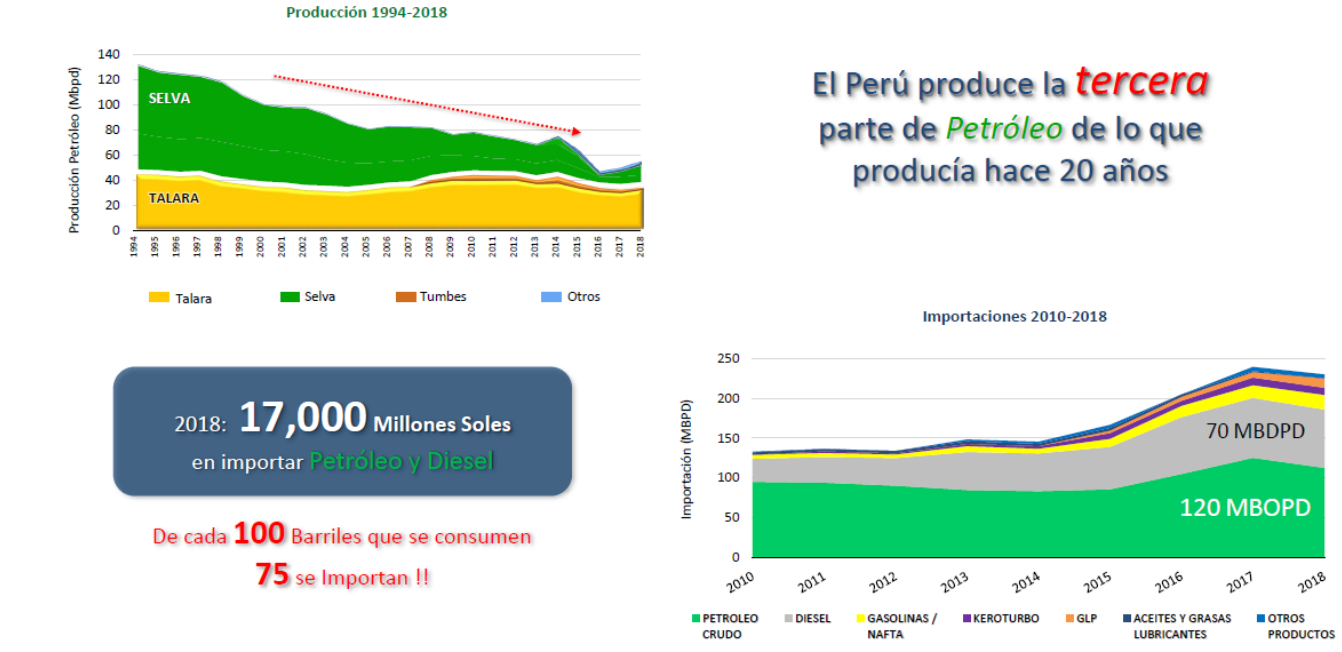


Figura 4 Producción e Importaciones

Problemática de los combustibles fósiles en el Perú puede ser afectada por:

- Próxima escasez de combustible a nivel mundial.
- Balanza comercial deficitaria en el sector combustibles en el Perú
- Interés de reducir la contaminación vehicular

Por lo mencionado anteriormente es necesario buscar otro tipo de combustible que no impacte al medio ambiente de la manera que lo viene haciendo los combustibles fósiles. Una alternativa es la producción de biocombustibles, en esta categoría se encuentra el biodiesel.

La figura 5 indica la problemática causada por las emisiones de gases al medioambiente.

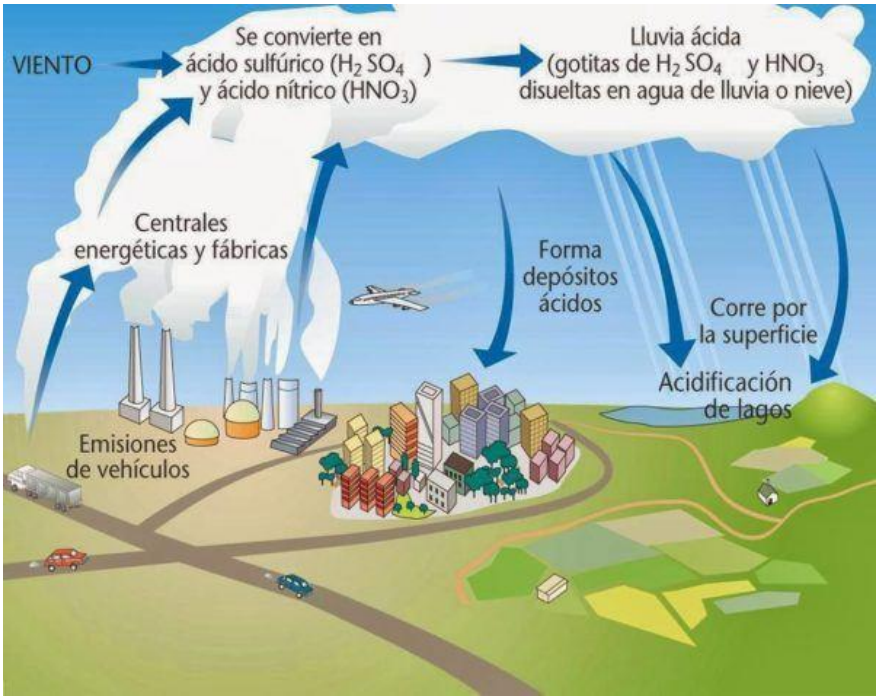


Figura 5 Problemática causada por las emisiones de gases al medio ambiente

La mayoría de las personas, empresas e industrias han desarrollado una conciencia adecuada sobre el cambio de los combustibles fósiles en los últimos tiempos. La contaminación causada por el uso de derivados de petróleo en los vehículos de todo el mundo ha aumentado con el tiempo. No obstante, las emisiones de gases proveniente de los combustibles derivados del petróleo, generará una situación más grave y crítica en caso de que no se tomen medidas o se creen nuevas fuentes de combustibles alternativos. Es importante destacar que el petróleo es una fuente única y se agota con el tiempo debido al uso constante.

En los estudios globales sobre combustibles, los derivados de biomasa, que pueden provenir de origen vegetal, son los más utilizados como alternativas para su sustitución.

En el Perú, en concordancia con las disposiciones de los organismos reguladores internacionales en combustibles, se expende al público el combustible B5, un combustible que resulta de mezclar 95% de Diesel de petróleo y 5% de biodiesel, contra lo que es en Europa que ya regulan B20.

Por lo tanto, se hace necesario buscar tecnologías modernas en la producción de biodiesel, y el reactor de transesterificación se constituye como un gran obstáculo dentro del proceso, y es necesario superar estas ineficiencias tecnológicas.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

I. Pregunta de investigación general

¿Es posible aplicar un modelo matemático de un reactor de transesterificaciónde aceite de soya para obtener biodiesel con una conversión de aceite de soya > 97%?

II. Preguntas de investigación específicas

- ¿Es posible evaluar las variables de operación (velocidad de agitación del reactor, temperatura de reacción y tiempo de reacción) que afectan el rendimiento del reactor de transesterificación?
- ¿Se puede ajustar los parámetros del modelo matemático aplicado partiendo de registros de operación encontrados en la literatura?
- ¿Es posible la validación del modelo matemático empleado a partir de la simulación mediante Software Matlab?

OBJETIVOS

Objetivo general

Aplicar un modelo matemático de un reactor de transesterificación de aceite de soya para obtener biodiesel con una conversión de aceite de soya > 97%.

Objetivos específicos

- Evaluar las variables de operación (velocidad de agitación del reactor, temperatura de reacción y tiempo de reacción) que afectan el rendimiento del reactor de transesterificación
- Ajustar los parámetros del modelo matemático empleado a partir de los registros de operación encontrados en la literatura.
- Validar el modelo matemático a partir de la simulación mediante el software Matlab.

JUSTIFICACIÓN

La motivación principal para la realización del presente trabajo se basa en la necesidad de encontrar nuevas tecnologías, es decir, nuevas alternativas para la producción de combustibles. Actualmente los combustibles fósiles generan un impacto sumamente negativo al medio ambiente

Por lo mencionado anteriormente se busca tener más información de los "nuevos" procesos de obtención de biocombustibles para de esta manera no depender mayoritariamente de recursos no renovables como lo son los combustibles fósiles.

Existen diversas alternativas tecnológicas para la obtención de biodiesel, como el uso de aceite de soya, el cual busca obtener un combustible limpio y rentable.

El uso de combustibles fósiles son grandes fuentes de emisiones de dióxido de carbono, monóxido de carbono y otros gases, y tienen un impacto negativo en el medio ambiente porque aumenta la contaminación. Estos problemas incluyen la contaminación del aire, el agua y el suelo, la formación de la lluvia ácida y el efecto invernadero.

El Perú no es un país industrializado, la falta de investigación y en general, la falta de avances tecnológicos no permite la oferta de nuevos empleos. Este trabajo no solo se basa en el ODS 7 el cual nos indica que se debe garantizar la asequibilidad de una energía segura, sostenible y no contaminante, sino también en los ODS 8 el cual nos indica que se debe promover el crecimiento económico el cual sea sostenible en el tiempo y pueda obtenerse mediante el aumento la productividad, así como el aumento de innovación tecnológica.

El ODS 9 el cual abarca la promoción de la industrialización, que esta sea inclusiva y a la vez sostenible fomentando la innovación obteniendo así que para el 2030, se logre aumentar de manera considerable contribución de la industria al empleo y este a su vez al PBI.

Finalmente se tiene al ODS 11 el cual indica que de aquí a 2030, se debe lograr tener tanto ciudades como asentamientos humanos que sean seguros, inclusivos y sostenibles, para lograr ello se debe considerar reducir las fuentes de contaminación para tener una mejor **calidad del aire, suelo y agua.**

Actualmente, los biocombustibles líquidos están ganando popularidad como un componente de una transición hacia una movilidad más sostenible en el contexto de un modelo de movilidad que se basa en la combustión interna. Los nuevos paradigmas de movilidad (electromovilidad, propulsión por hidrógeno, etc.) están comenzando a ser considerablemente masificados y son una alternativa ambientalmente más sostenible que los combustibles fósiles, sin cambios técnicos significativos en los vehículos actuales. Por lo ya mencionado, es importante buscar fuentes alternativas para la producción de combustibles, ante esta problemática surgieron los biocombustibles, en ese sentido con el presente trabajo se busca el modelamiento de un reactor de transesterificación que pueda convertir la mayor cantidad de aceite de soya en biodiesel.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

ANTECEDENTES DE ESTUDIO

El rendimiento del aceite de soja utilizado en la producción de biodiesel para una mejor utilización de la transesterificación, el óxido de calcio (2% y 6%) y las relaciones molares de etanol a aceite (9:1 y 15:1). Cuando la relación molar de etanol a aceite es de 15:1 y la concentración de óxido de calcio es del 6%, el rendimiento máximo de biodiesel es del 60,9%. Cabe señalar que esta propiedad se puede mejorar utilizando métodos de reacción superficial con una viscosidad de 8,70 centistokes, resultado cercano al estándar ASTM D6751-09.

Finalmente, variables de control con una relación molar superior a 15:1 y una concentración de catalizador cercana al 6% son adecuadas para optimizar el rendimiento de la producción de biodiesel. Rodríguez Bustamante et al (2024).

Los biocatalizadores hechos de materiales de desecho agrícolas e industriales son una alternativa prometedora a los catalizadores químicos convencionales en la producción de biodiesel. Los catalizadores de origen biológico son accesibles, económicos y renovables, lo que facilita la producción de biodiésel de manera ecológica. M. Gowthama Krishnan (2024).

Buitrago Mejía, L. D. (2023). En su estudio “Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado y la modelación de una planta de producción”, concluyó que las condiciones óptimas para la producción de biodiesel están dadas, que, por 1 litro de aceite, es necesario 200 mL de metanol y el uso de 0.6 g de NaOH.

Rivera Rios, Leydi (2023) en su investigación basada en la influencia del tiempo y temperatura de la reacción de transesterificación sobre el rendimiento de esteres metílicos provenientes de residuos de aceites vegetales utilizando catalizador platino,

realizó la manipulación de las variables de proceso (temperatura y tiempo), obtuvo 12 y 3 niveles de temperatura y tiempo respectivamente en presencia de catalizador PtO. Realizó 36 combinaciones las cuales, de manera aleatoria, determinaron las condiciones y niveles óptimos de los parámetros de proceso estudiados, los cuales producen un efecto en la variable de respuesta el cual fue el rendimiento de esteres metílicos.

Nestares Guerra (2023) en su trabajo basado en la reacción de transesterificación en medio básico de aceite residual vegetal para la obtención de biodiesel realizo la evaluación de las variables: velocidad de agitación, temperatura, relación molar metanol: aceite, para cada una de las variables mencionadas se trabajó 3 valores y/o niveles distintos obteniendo una conversión máxima de 82% bajo las condiciones de 700 rpm para la velocidad de agitación, 65°C en el caso de la temperatura, una relación molar metanol:aceite de 6:1 y 120 min como tiempo de reacción.

La mayoría de los modelos matemáticos creados se derivan de ecuaciones de transferencia de masa, transferencia de energía, concentración de las sustancias involucrados, conversión y grado de avance, entre otras variables. Los resultados de las diferentes investigaciones son el resultado directo de las simplificaciones asumidas, las condiciones operativas evaluadas y los métodos utilizados para la resolución de estos sistemas. Estos factores hacen que la comparación o implementación estandarizada de estos sistemas sea complicada. Maisincho et al (2022).

Las energías renovables son un recurso que proporciona la solución más eficiente al uso de combustibles contaminantes. El combustible contaminante puede causar problemas ambientales durante su producción y uso y afectar directamente al medio ambiente. Por lo tanto, es necesario convertir gradualmente los recursos no renovables existentes en recursos renovables para satisfacer las necesidades energéticas

futuras. Entre los combustibles disponibles actualmente, el biodiesel es uno que tiene un enorme impacto positivo directo en el medio ambiente y puede reemplazar directamente a los combustibles no renovables. Londoño et al (2021).

Los biocombustibles son una opción adecuada para reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles. Pero para evaluar su potencial en el futuro, se requiere una evaluación prospectiva de sostenibilidad. Este método permite avanzar la situación actual de la cadena de valor hacia un escenario futuro previsto, que requiere la evaluación de una variedad de circunstancias y consecuencias. Este enfoque debe tener en cuenta las restricciones esperadas en los niveles de emisiones, así como las variaciones en la cadena de mercado, las fluctuaciones económicas, la demanda de productos y servicios por parte de los consumidores y otros eventos que podrían tener un impacto significativo en el desarrollo tecnológico. Arias et al (2021).

En el artículo "Evaluación del proceso de obtención de biodiesel a partir de grasa de pollo" evaluaron que para obtener biodiesel a partir de grasa animal (especialmente pollo) mediante un proceso de transesterificación, realizaron un diseño de formulación central que varió la relación molar y el porcentaje de catalizador. También mejoraron el proceso de obtención de FAME (éster metílico de ácidos grasos), en más del 9%. El biodiesel resultante se caracteriza determinando sus propiedades como densidad, viscosidad, poder calorífico y cromatografía de gases. Las tasas de conversión de biodiesel estudiadas alcanzaron del 71,9% al 84,8%, y el contenido de FAME llegó al 94,74%. Además, los números de cetano de todas las muestras obtenidas fueron superiores a los determinados por las normas EN 1421 y ASTM D657. Gutiérrez-Hernández et al (2021).

Quispe Puma, K. Y. (2021). En su trabajo acerca de la obtención de biodiesel a partir de la mezcla de aceite residual doméstico y aceite de soya, se realizó una mezcla de ambos aceites nombrados previamente obteniendo un total de 650 ml de aceite de soja. Para la producción de combustible diésel de biomasa, se utilizó hidróxido de potasio (KOH) y etanol de 96° como catalizador. Una vez que se obtuvo, mediante el pretratamiento del aceite, una acidez dentro del valor permisible de las normas NTP (Normas Técnicas de Perú), se realiza la reacción de transesterificación al aceite, seguido de un proceso de lavado y secado, para obtener finalmente biodiesel.

Beltrán et al. (2020). En su estudio "Evaluación de los parámetros cinéticos de la transesterificación de los aceites vegetales", realizaron el análisis de diferentes modelos cinéticos de la reacción de transesterificación de aceites vegetales y alcoholes de cadena corta en presencia de catalizadores, para producir biodiesel. Este puede proporcionar parámetros útiles para la comprensión de su comportamiento, bajo diferentes condiciones de reacción. Se realizaron comparaciones entre las propiedades físicas y químicas de siete aceites vegetales (aceite de maíz, aceite de coco, aceite de soja, aceite de palma, aceite de palmiste, aceitede babasú y aceite de jatrofa) con el uso de ésteres metílicos de ácidos grasos que tienen propiedades para definir los modelos cinéticos utilizados para diferentes tipos de catálisis, condiciones y tipos de procesos.

Rojas et al. (2009) en el artículo acerca de las variables de operación en las reacciones de transesterificación de aceites vegetales, concluyen que en la catálisis básica se utilizan principalmente el NaOH y el KOH, mientras que en catálisis ácida se usa el H_2SO_4. Estos catalizadores son más empleados por ser económicos, de fácil manejo y adquisición. Además, de la obtención de altos porcentajes de conversión.

Con relación a los antecedentes internacionales, se han realizado diversos estudios relevantes sobreel modelamiento matemático de reactores agitados para la transesterificación de aceite de soya. Se han abordado aspectos como la cinética de la reacción, la distribución de tiempos de residencia y la influencia de diferentes parámetros operativos en la eficiencia del proceso. Estos estudios han permitido avanzar en la comprensión de los fenómenos involucrados y en el desarrollo de modelos predictivos más precisos y confiables para laoptimización de reactores de este tipo.

En el contexto peruano, se ha observado un creciente interés en el modelamiento matemático de procesos químicos, incluyendo la transesterificación de aceite de soya.

Este enfoque ha sido respaldado por investigaciones previas que han explorado diversas aplicaciones y métodos de modelamiento. La importancia de estos estudios radica en su potencial para mejorar la eficiencia y sustentabilidad de la industria química en el país, así como en la generación de conocimiento local en un área de relevancia global.

BASES TEÓRICAS

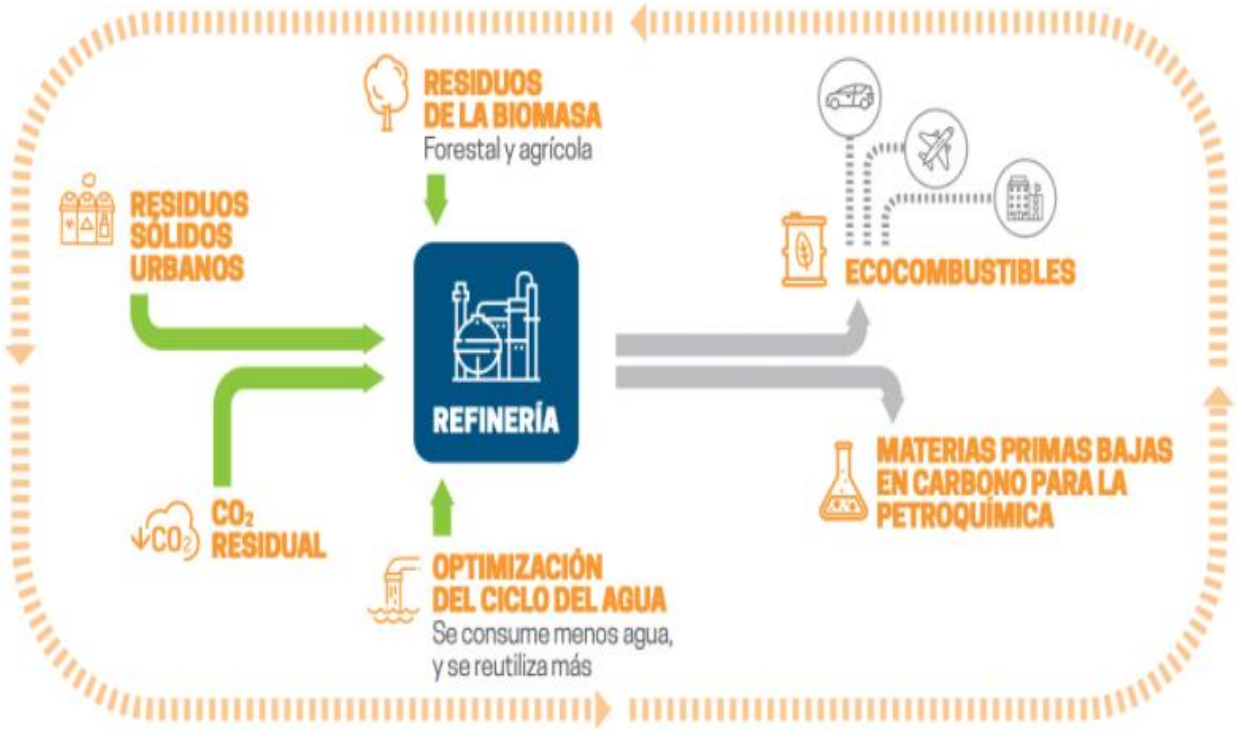
Revisando la historia de la humanidad, es posible percatarnos que el hombre siempre utilizó la energía proveniente de la naturaleza (madera, carbón, petróleo y gas) para desarrollar diferentes actividades en sectores como la agricultura, industria, transporte y servicios. Esta forma de emplear la energía se conoce en la actualidad como indirecta, ya que las diferentes fuentes naturales de energía generabancorrientes de personas y activaban la economía. Como los combustibles fósiles, que llevan siendo quemados, desde la época de la Revolución Industrial. Estos incrementaban la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, generando así, gases de con efecto invernadero. En consecuencia, la temperatura de la tierra aumenta, produciéndose diferentes cambios climáticos a nivel mundial.

Se emplea el término biocombustible para referirse a un conjunto de sustancias de origen orgánico, que pueden ser vegetales, como los aceites y residuos procedentes de la biomasa y los residuos de los combustibles líquidos, obtenidos a partir de la biomasa mediante tratamientos químicos: ETBE Etil- Terc.Butil-Eter, alcoholes metílicos (metanol) y etílicos (etanol), éter metil-terbutílico oel biodiesel (excluyendo el bioetanol).

¿CUAL ES EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES?

Existen distintas tecnologías para convertir materia prima en biocombustible. Estas se pueden integrar en las refinerías actuales, ya sea directamente mediante el coprocesado en las unidades de proceso ya existentes o mediante el tratamiento en nuevas unidades que habría que construir, como con la gasificación, la pirólisis o el proceso de Fisher-Tropsch, como se encuentra indicado en la Figura 6:

Figura 6 Proceso de fabricación de biocombustibles



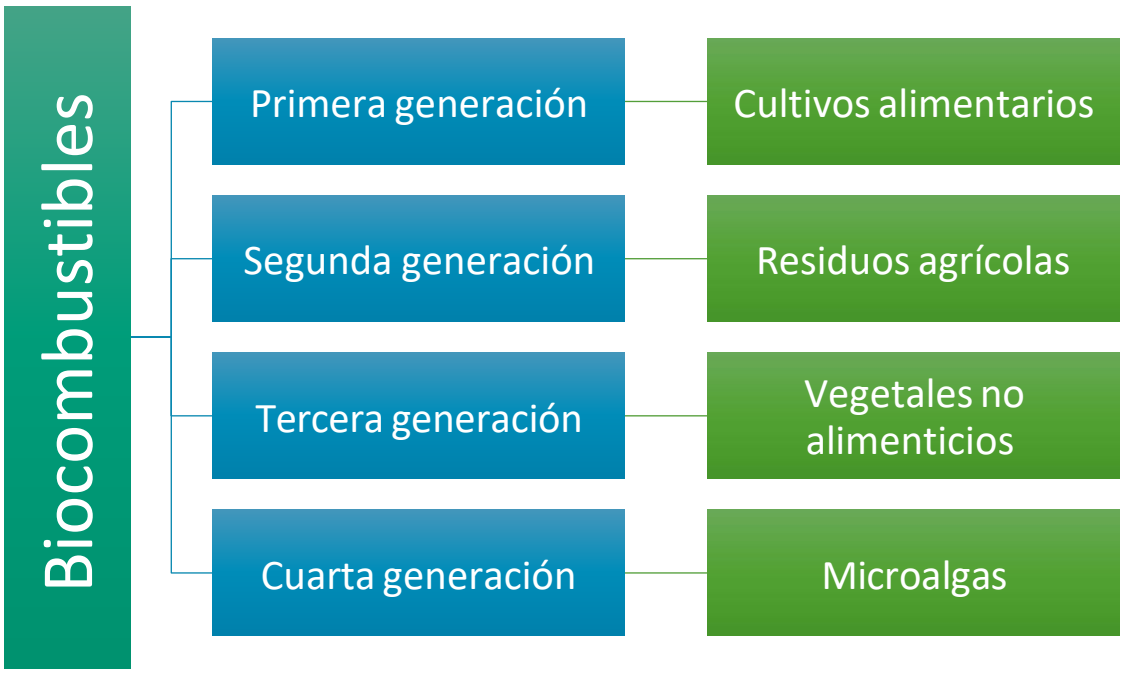
Tipos de biocombustibles

Los biocombustibles pueden ser clasificados de acuerdo con su uso. Materia prima para biocombustibles líquidos y materia prima para biocombustibles sólidos. Si en caso no se ha sacado la máxima eficiencia de la materia prima para combustibles líquidos, se usará la materia prima celulosa para la producción de biocombustible sólido.

Según la norma UNE-EN 14161, un biocombustible se define como "cualquier combustible liberado mediante el proceso biológico y que se obtenga mediante el cultivo, recolección de productos provenientes de la agricultura, silvicultura" (AENOR, 2003). Según esta definición, se puede determinar que existen dos fuentes de materia prima que son un requisito previo de un biocombustible como es la agricultura y la silvicultura.

Los biocombustibles tienen una gran ventaja con respecto a los combustibles fósiles usados actualmente, ya que los primeros no pasan millones de años para la regeneración. Pero aún con esta información no se les puede considerar a los biocombustibles fuentes de energía renovable.

Con el objetivo de mitigar los efectos negativos en la producción de biocombustibles se puede dividir su evolución en 4 generaciones distintas, las cuales son:



Primera generación

El objetivo de los biocombustibles de **primera generación** es mejorar la calidad del aire y, en menor medida, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, específicamente el dióxido de carbono (CO_2), cumpliendo con el objetivo de reducir las emisiones respecto a los biocombustibles de origen fósil. Los biocombustibles de primera generación, en general, se producen o preparan a partir de materias primas consideradas como alimentos, exceptuando aquellos cuyo propósito principal es la regalía de semillas u otras materias primas. La creación y expansión de empresas productoras de agrocombustibles generó un crecimiento en la demanda de soja y maíz, con el consecuente aumento del precio mundial de estos alimentos. En contraposición, el encarecimiento del maíz incidió sobre el precio del maíz amarillo duro (o simplemente maíz) utilizado como insumo en la producción avícola y ganadera, agudizando los conflictos en distintas partes del globo.

Producir biocombustibles de primera generación y la mayoría de ellas se fundamentaron en la producción de etanol a partir de caña de azúcar o maíz y/o en la preparación de biodiesel elaborado a partir de aceites comestibles.

Segunda generación

En el proceso de producción de biogás se aportan materias orgánicas que, al ser descompuestas generan dos productos principales: el CO_2 y el metano (CH_4). Al igual que en el caso de los aceites vegetales, el metano es una molécula que durante su combustión es responsable de la emisión de CO_2 equivalente, sin embargo, debido a que incluye los procesos con base de datos que ya contemplan la emisión de dicho gas en el factor original de emisión, se considera que su combustión no representa tal emisión;

por tanto, no hace parte del inventario. En este caso se han desarrollado tecnologías sencillas de captura en aplicaciones de quema perpetua de residuos agrícolas; sin embargo, al fomentar su utilización se podrían desplazar usos apropiados de los residuos agrícolas o fomentar su cultivo, lo cual tendría un impacto negativo sobre el medio ambiente.

Un mayor progreso se logrará cuando sean desarrollados los llamados biocombustibles de segunda generación, que utilizan como materiales de partida materias orgánicas, sólo aparentemente inútiles, más allá de competir con los productos alimentarios. Bajo esta denominación, se incluyen una serie de biocombustibles tales como el bioetanol a partir de celulosas o algas y el biogás a partir de residuos leñosos, herbáceos agrícolas y residuos de jardinería (en combinación con fracción orgánica de residuos urbanos).

Para la obtención de biocombustibles de segunda generación se hace necesario poner en funcionamiento procesos que transformen a los productos celulósicos en sustratos fermentables (que luego darán origen a alcoholes), un proceso en el que juegan un rol importante las enzimas celulasas y los microorganismos fermentativos. De este modo se hace posible obtener altos rendimientos en cuanto a la utilización del carbono y evitan la bacteria producción de liposacáridos, eliminándose el proceso de explotación de almidones como ocurría con los biocombustibles de primera generación.

Tercera generación

Como segunda tercera generación, este tipo de biocombustibles aprovecha la utilizaciónde la superficie del agua de manera horizontal lo que resulta en un uso más eficiente de la luz del sol. Desde hace unos años, las algas han sido centro de interés como una alternativa a los biocombustibles que hasta ahora se han venido utilizando, tales como etanol y biodiesel, pero es evidente que 50 años no es suficiente tiempo como para que estos hayan alcanzado la relevancia que ahora tienen el etanol y el biodiesel. Las algas no consumen suelo (evitando así la competencia con el cultivo de alimentos), no necesitangrandes extensiones de tierra, al mismo tiempo que se reduce el consumo de agua y se tiene la opción de elección de la calidad de biomasa que se extraerá de ellas, permitiendo además su gestión de manera modular.

Existen estudios realizados en este tipo de biocombustibles que estiman rendimientos desde 5-30 veces superiores a los obtenidos actualmente con cultivos

oleaginosos (colza, girasol...) e, incluso, de hasta 100 veces superior para el etanol si comparamos con el maíz. Este aumento en los rendimientos se debe principalmente a laobtención de masa que se da prácticamente de forma continua en todo el año y que posee un gran contenido en lípidos (con un rango de entre el 30 y 70 por ciento de su peso seco, posibilitando la toma de energía desde distintos medios, tales como fuentes lumínicas alternas y las emisiones de punto de emisión).

Más concretamente, referente al biocombustible se disponen de los tres factores que se precisan para un buen desarrollo de las algas tanto de superficie foliar (CO_2), con un 40 por ciento más de biomasa a la que se obtiene sin el uso de este factor, aire suficientemente renovado y a baja velocidad.

Cuarta generación

La cuarta generación propone el seguimiento de la primera en nuevas estrategias de la misma, donde ya se empieza a barajar la utilización de organismos terrestres superiores, más diferenciados, con un interés biotecnológico evidente por su estructura a nivel celular y la complejidad de su organización. Las especies pertenecientes a un mismo género y una sección para la gastronomía han sido muy apreciadas por personas jóvenes y suelen ser producidas en las barracas.

Se sabe que las primeras y segundas generaciones corresponden a procesos en cadena corta que conducen a biocombustibles que tienen la misma instalación como fuente de materia de bajo costo, como la biomasa energética de cultivos o residuos (RSU, biomasa forestal, etc.). La tercera generación, en cambio, usa la tecnología para romper las cadenas largas, es decir, para convertir la biomasa formada por organismos unicelulares o multicelulares menos diferenciados.

Otro género bacteriano que se destaca por su relación con la producción de etanol es el Corynebacterium. Son bacterias de forma variada que afectan a los ácidos micólicos y a las cadenas ramificadas de los ácidos grasos pardos. La mayoría se encuentran en hábitats de baja aw (elevado contenido en solutos, como el suelo), aunque también están presentes en otros muchos alimentos o asociados a estos.

Corynebacterium es un género que requiere un hospedador humano (no son patógenasfuera de este, como Mycobacterium).

Las corynebacterias presentan una compleja cápsula formada por polisacáridos periféricos, a la que pueden sumarse otros compuestos, como un peptidoglucano parecido al de muchos bacilos gram-positivos, en el cual se encuentra la presencia de agrupaciones glicosídicas de murámico parecidas a los pentasacáridos de los urónicos. Los polisacáridos capsulares bacterianos son importantes desde el punto de vista

clínico, ya que su presencia se puede detectar en el laboratorio, especialmente su uso profiláctico para evitar determinadas infecciones.

BIODIESEL

El biodiesel es un biocombustible derivado de fuentes animales o vegetales, este tipo de combustible presenta una opción más sostenible y ecológica en comparación con los tradicionales recursos de energía basados en combustibles fósiles. Su empleo favorece la disminución de la dependencia de los combustibles derivados del petróleo y a su vez mitiga la liberación de gases de efecto invernadero y otros contaminantes perjudiciales para el ambiente

El biodiesel se caracteriza por ser un éster metílico o etílico obtenido a partir de grasas vegetales, aceites de origen animal o aceites previamente utilizados. Su historia se remonta a la década de 1930, época en la que se buscaba un sustituto al petróleo para su aplicación en motores diésel. Sin embargo, su producción a gran escala no comenzó hasta las décadas de 1970 y 1980. El biodiesel se ha afirmado como una fuente de

energía sostenible y renovable, con significativos beneficios económicos y ambientalesfrente a los combustibles tradicionales.

Los aceites vegetales y las grasas animales se consideran esenciales en la fabricación de biodiesel. Los aceites de soja, palma y colza son los más utilizados, mientras que las grasas animales se obtienen principalmente de fuentes como cerdos y vacas. Estas materias primas contienen una riqueza de ácidos grasos insaturados, componentes indispensables para la producción de ésteres metílicos, que constituyen los elementos primordiales del biodiesel. La garantía de calidad y limpieza de estos insumos es vital, ya que la presencia de cualquier impureza puede comprometer la efectividad y el rendimiento del proceso de producción.

La elaboración de biodiésel se lleva a cabo mediante distintas metodologías, siendo la transesterificación la más común. Durante esta operación, un aceite vegetal o grasa animal reacciona con un alcohol, usualmente metanol o etanol, bajo la actuación de un catalizador. Durante la transesterificación, los triglicéridos presentes en el aceite o la grasa se transforman en ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos, que constituyen la base del biodiésel. Este proceso es esencial para la producción de un combustible ecológico y renovable.

Algunas de las propiedades del biodiesel están representadas en la Tabla 1:

Tabla 1 Propiedades del biodiesel según ASTM D6751

Propiedad	Método ASTM	Límites	Unidades
Ca y Mg, combinados	ES 14538	5 máx	ppm (ug/g)
Punto de inflamación	D 93	93 min	°C
Control de Alcohol	-	-	-
1. Contenido de metanol	EN14110	0.2 máx	% de masa
2. Punto de inflamación	D 93	130 min	°C
Agua y Sedimento	D2709	0.05 máx	% vol.
Viscosidad cinemática, 40°C	D445	1.9-6.0	mm^2/seg
Cenizas sulfatadas	D874	0.02 máx	% de masa
Azufre	-	-	-
Grado S 15	D5453	0.0015 max (15)	% de masa (ppm)
Grado S 500	D5453	0.05 máx (500)	% de masa (ppm)
Corrosión de Tira	D130	No. 3 máx	-
Cetano	D613	47 min	-
Punto de Nube	D2500	reportar	°C

Propiedad	Método ASTM	Límites	Unidades
Residuo de carbono (muestra 100%)	D4530	0.05 máx	% de masa
Número de ácido	D664	0.50 máx	mg KOH/g
Glicerina Libre	D6584	0.020 máx	% de masa
Glicerina Total	D6584	0.240 máx	% de masa
Contenido de fósforo	D4951	0.001 máx	% de masa
Destilación, T90 AET	D1160	360 máx	°C
Sodio/Potasio, combinado	ES 14538	5 máx	ppm
Estabilidad a la oxidación	ES 14112	3 min	Horario
Filtración en remojo frío	Anexo a D6751	360 máx	segundos
Para usar en temperaturas inferiores a -12 °C	Anexo a D6751	200 max	segundos

Diseño de Reactores de Transesterificación

En el diseño de un reactor para transesterificación, es importante considerar los parámetros como la eficacia de la reacción, la transferencia de masa y la seguridad en la operación. Los reactores pueden ser por lotes, semicontinuos o continuos, cada uno con sus particularidades. Dentro de los reactores más comunes se hallan los de tanque agitado, los cuales posibilitan una adecuada mezcla de los reactivos y una sencilla escalabilidad. Por otro lado, los reactores tubulares exhiben una elevada eficiencia en la transferencia de masa, aunque su control puede presentar complicaciones. La selección del reactor adecuado dependerá de las condiciones de funcionamiento y de los objetivos del procedimiento.

En la transesterificación de aceite de soya, los reactores más comunes son los reactores de tanque agitado y los reactores tubulares. Los reactores de tanque agitado son versátiles, fáciles de operar y permiten un buen control de la temperatura y la agitación. Por otro lado, los reactores tubulares ofrecen mayor eficiencia en la transferencia de masa y menor tiempo de residencia, lo que los hace ideales para procesos de alta producción. La elección entre uno u otro tipo de reactor dependerá de aspectos como la escala de producción, los requerimientos de mezclado y la cinética de la reacción. Es fundamental evaluar estas características para seleccionar el reactor más adecuado y optimizar el proceso de transesterificación.

En la transesterificación, es importante conocer la cinética química por la cual dependerá la velocidad de reacción de conversión de los triglicéridos del aceite de soya. Los conceptos fundamentales de la cinética química en este proceso se refieren a la velocidad de formación de ésteres metílicos, la influencia de la temperatura y la concentración de catalizador. Estos conceptos son esenciales para comprender ladinámica de la reacción y optimizar el diseño del reactor.

La reacción de transesterificación implica la sustitución de los grupos alcoxi en los triglicéridos por grupos alquilo del alcohol. Su mecanismo incluye la formación de un intermediario de tetraedro que facilita la ruptura de los enlaces del glicerol. La velocidad de reacción está influenciada por los parámetros: tipo de catalizador, la relación molar entre el alcohol y el aceite, así como la temperatura del sistema. Comprender estemecanismo es fundamental para el diseño eficiente de reactores y la optimización del proceso de transesterificación de aceite de soya.

Modelamientos matemáticos

El uso de modelos matemáticos es un aspecto importante para comprender los procesos de ingeniería química para comprenderlos y optimizarlos. Las ecuaciones de comportamiento físico y químico se utilizan para modelar comportamientos y tomardecisiones informadas. Este método permite la eficiencia, la reducción de costos y laconciencia de riesgos en una variedad de entornos, como en el caso del diseño de reactores químicos o la simulación de procesos de separación

En el proceso de transesterificación de aceite de soya, el Modelo de Cinética Homogénea es fundamental para predecir la velocidad de reacción de los triglicéridos con el metanol. Este modelo considera que la reacción ocurre en una sola fase, sin importar la distribución espacial de las especies químicas. Se basa en la ley de acción de masas, donde la velocidad de reacción es proporcional a la concentración de los reactivos elevados a ciertas potencias. A través de este modelo, es posible determinar la cinética de la reacción y optimizar las condiciones de operación del reactor para obtener altas conversiones de aceite a biodiésel.

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

- **El reactor agitado:** es uno de los dispositivos más utilizados en ingeniería química para llevar a cabo reacciones químicas. Su diseño permite una mezcla homogénea de los reactivos, una transferencia eficiente de masa y calor, y un mayor control sobre las condiciones de reacción. Este tipo de reactor se emplea en la producción de biodiésel, la síntesis de productos farmacéuticos yla fabricación de productos químicos. Su modelamiento matemático es fundamental para evaluar su desempeño y optimizar su operación.

- **La transesterificación de aceite de soya:** es un proceso químicoque consiste en la transformación de los triglicéridos presentes en el aceite en ésteres metílicos y glicerina. Durante esta reacción, se utilizan alcoholes como metanol o etanol, y se emplean catalizadores como hidróxido de sodio para aumentar la velocidad de la transesterificación. Este procedimiento es esencial en la producción de biodiésel a nivel industrial, permitiendo la obtención de un combustible que cumple con estándares ambientales más rigurosos y que contribuye a la sostenibilidad del planeta.

- En el **modelamiento matemático de reactores agitados:** se deben considerar conceptos básicos como la conservación de masa, energía y cantidad de movimiento. Es fundamental definir adecuadamente las condiciones iniciales y de contorno, así como seleccionar el tipo de modelo que mejor represente el sistema. La comprensión de la cinética de la reacción y la geometría del reactor son aspectos clave para desarrollar un modelo preciso y confiable.

- **Velocidad de reacción:** el tiempo de reacción es la rapidez con lacual ocurre una reacción, también se puede definir como la disminución en la concentración de un reactivo o el aumento de concentración de un producto, en otras palabras, es la cantidad de reactivo que se consume o cantidad de productoque se obtiene por unidad de tiempo.
- La **temperatura de reacción:** es el calor absorbido o desprendido durante una reacción química que suele llevarse a cabo a volumen o presión constante.
- **La velocidad de agitación** de un reactor de transesterificación: es esencial en la reacción ya que nos permite determinar la velocidad de propagación delcatalizador que genere una mayor actividad de este.

HIPÓTESIS Y VARIABLES

HIPOTESIS

I. Hipótesis general

El modelo matemático del reactor de transesterificación de aceite de soya aplicado es validado con los datos obtenidos de la literatura con una conversión de aceite de soya $\geq$ 97%

II. Hipótesis especificas

- Se determinan las variables de operación óptimas (velocidad de agitación del reactor, temperatura de reacción, tiempo de reacción y relación volumétrica de aceite: alcohol) que afectan el rendimiento del reactor de transesterificación
- Se ajustan los parámetros del modelo matemático desarrollado a partir de los registros de operación encontrados en la literatura.
- Se valida el modelo matemático mediante la simulación con el software Matlab.

VARIABLES

1. Variables de entrada

VARIABLE	UNIDAD
Velocidad de giro del agitador	RPS
Flujo de refrigerante F_c	$\frac{m^3}{s}$
Temperatura del refrigerante (Te_R)	K
Flujo de ingreso (F_o)	$\frac{m^3}{s}$
Temperatura de la mezcla de ingreso (Te_o)	K
Concentración de triglicéridos de la mezcla de ingreso (C_{To})	$\frac{mol}{m^3}$
Concentración de alcohol de la mezcla de ingreso (C_{Meo})	$\frac{mol}{m^3}$

2. Estado del sistema

VARIABLE	UNIDAD
Concentración de triglicéridos (C_T)	$\frac{mol}{m^3}$
Concentración de diglicéridos (C_D)	$\frac{mol}{m^3}$
Concentración de monoglicéridos (C_M)	$\frac{mol}{m^3}$
Concentración de metanol (C_{Me})	$\frac{mol}{m^3}$

Concentración de glicerol (C_G)	$\frac{mol}{m^3}$
Concentración de esteres metílicos (C_E)	$\frac{mol}{m^3}$
Temperatura del reactor (Te)	K

3. <u>Variable de salida</u>

    - Fracción másica de ácidos grasos de esteres metílicos (x_E)

METODOLOGIA

Descripción del material experimental

La investigación radica en la modificación del modelo matemático de un reactor de transesterificación para la producción de biodiesel, para lo cual se aplicarán los principios de diseño de reactores de la Ingeniería Química y se realizará la simulación mediante el software Matlab con datos experimentales de la literatura

- Metodología de la investigación: El presente estudio tendrá un diseño descriptivo.
- Enfoque de la investigación: El presente estudio utilizará un enfoque cuantitativo ya que emplea la recolección y análisis de datos para demostrar la hipótesis formulada

La metodología a seguir en el presente estudio se inicia mediante los balances de materia y energía definiendo los parámetros y variables de diseño para deducir el modelo matemático del reactor de transesterificación.

Para efectos de validar el modelo modificado del reactor se tomará datos de la literatura sobre la reacción de transesterificación de soya para la producción de biodiesel.

Se realizará la simulación del modelo matemático modificado mediante el software Matlab.

PROCEDIMIENTO

La reacción de transesterificación para la producción de biodiesel se puede describir por:

$$T + Me \underset{K2}{\overset{K1}{\rightleftharpoons}} D + E \qquad (1)$$

$$D + Me \underset{K4}{\overset{K3}{\rightleftharpoons}} M + E \qquad (2)$$

$$M + Me \underset{K6}{\overset{K5}{\rightleftharpoons}} D + E \qquad (3)$$

donde T, D, M, representan a los triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos, respectivamente; Me al metanol, G al glicerol y E a los esteres metílicos o biodiesel.

Las constantes cinéticas de la reacción están relacionadas con la temperatura mediante la ecuación de Arrhenius:

$$k_j = k_{oj} e^{\frac{-E_{aj}}{RT}} \qquad (4)$$

Donde:

kj: Constante cinética de reacción $\left(\frac{m^3}{mol\ .s}\right)$

k_{oj}: Factor preexponencial $\left(\frac{m^3}{mol\ .s}\right)$

E_{aj}: Energía de activación $\left(\frac{J}{mol}\right)$

R: Cte universal de gases $= 8.314 \frac{J}{K\ .\ mol}$

T: $Temperatura\ absoluta\ (K)$

j = 1, 2, … ,6

Las constantes cinéticas totales de la reacción en cada una de las etapas vienen dadas por:

$$r_1 = k_1 C_T C_{Me} - k_2 C_D C_E \qquad (5)$$

$$r_2 = k_3 C_D C_{Me} - k_4 C_M C_E \qquad (6)$$

$$r_3 = k_5 C_M C_{Me} - k_6 C_G C_E \qquad (7)$$

Donde:

r_1, r_2, r_3: constantes cinéticas de reacción $\left(\frac{m^3}{mol\ .s}\right)$

C_T , C_D , C_M , C_{Me}, C_G , C_E: Concentraciones molares $\left(\frac{mol}{m^3}\right)$

Se tendrá en cuentas las siguientes suposiciones:

- En el reactor se produce una mezcla perfecta manteniendo una presión constante.
- La temperatura de operación del reactor es de 50°C.

Se describen las ecuaciones de balance de masas de cada componente como:

$$V\frac{dC_i}{dt} = F_o(C_{io} - C_i) - \sum_{j=1}^{n} r_j V \qquad (8)$$

donde:

$\frac{dC_i}{dt}$: Cambio en la concentración del compuesto "i" respecto al tiempo

V: Volumen del reactor (m^3)

F_o: Flujo de ingreso $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

C_i: Concentración molar del componente $\left(\frac{mol}{m^3}\right)$

C_{io}: Concentración molar de ingreso del componente $\left(\frac{mol}{m^3}\right)$

r_j: Constante cinética total de la reacción $\left(\frac{m^3}{mol\ .s}\right)$

En base a la ecuación (8) se obtiene para cada componente las siguientes relaciones:

$$V\frac{dC_T}{dt} = -F_o(C_{To} - C_T) - r_1V \quad (9)$$

$$V\frac{dC_D}{dt} = -F_o(C_{Do} - C_D) - (r_2 - r_1)V \quad (10)$$

$$V\frac{dC_M}{dt} = -F_o(C_{Mo} - C_M) - (r_3 - r_2)V \quad (11)$$

$$V\frac{dC_{Me}}{dt} = -F_o(C_{Meo} - C_{Me}) - (r_1 + r_2 + r_3)V \quad (12)$$

$$V\frac{dC_G}{dt} = -F_oC_G + +r_3V \quad (13)$$

$$V\frac{dC_E}{dt} = -F_oC_E + (r_1 + r_2 + r_3)V \quad (14)$$

La ecuación de balance de energía está dada por:

$$V\sum_i^n C_i Cp_i \frac{dTe}{dt} = \sum_i^n -F_o C_{io} Cp_i (Te - Te_{io}) - V\sum_{j=1}^3 \Delta H_j r_j - Q \qquad (15)$$

$$V\sum_i^n C_i Cp_i \frac{dTe}{dt} = F_o\left(C_{T_o} Cp_T + C_{D_o} Cp_D + C_{M_o} Cp_M + C_{M_{eo}} Cp_{Me}\right)(Te_{io} - Te) -$$

$$V\sum_{j=1}^3 \Delta H_j r_j - UA_H(Te_c - Te) \qquad (16)$$

donde:

Te: Temperatura del reactor (K)

C_{pi} : Capacidad calorífica del componente $\left(\frac{J}{mol\,.\,s}\right)$

Te_{io}: Temperatura de ingreso (K)

ΔH_j: Calor de la reacción $\left(\frac{J}{mol}\right)$

U: Coeficiente total de transferencia de calor $\left(\frac{W}{m^2.\,K}\right)$

A_H: Área total de transferencia de calor (m^2)

Te_c: Temperatura de la chaqueta (K)

Cp_i y Ci dependen de la temperatura, se considerará el primero como constante, esto debido a que el valor no cambia considerablemente.

El flujo de refrigerante (F_c) y la velocidad de giro del agitador (N) nos permite determinar el coeficiente total de transferencia de calor (U), como se muestra a continuación:

$$U = 735.5F_c^{1.095}N^{0.405}$$

Se tiene que

U: Coeficiente total de transferencia de calor $\left(\frac{W}{m^2.\ K}\right)$

F_c: Flujo del refrigerante (m^3)

N: Velocidad de giro del agitador (RPS)

Según Brásio et al (2013), se tiene que el porcentaje de masa de esteres metílicos de ácido graso (FAME), x_E como variable controlada. Esta variable mide el porcentaje de triglicéridos del aceite que se convierten en ésteres metílicos y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$X_E = \frac{m_E}{m_T+m_D+m_M+m_E} * 100\% \qquad (17)$$

De lo cual:

m_E: Masa de esteres metílicos (kg)

m_T: Masa de triglicéridos (kg)

m_D: Masa de diglicéridos (kg)

m_M: Masa de monoglicéridos (kg)

Se emplea la fracción de masa del componente (x_i) para hallar la masa de los componentes:

$$X_i = C_i \frac{M_i}{\rho} \quad (18)$$

Se tiene que:

X_i : Fracción de masa del componente

C_i: Concentración molar del componente $\left(\frac{mol}{m^3}\right)$

M_i: Masa molar del componente $\left(\frac{kg}{mol}\right)$

ρ: Densidad $\frac{kg}{m^3}$

De las 2 ecuaciones anteriores se puede obtener el porcentaje de masa de esteres metílicos de ácido graso como se muestra a continuación:

$$X_E = \frac{C_E M_E}{C_T M_T + C_D M_D + C_M M_M + C_E M_E} * 100\% \quad (19)$$

VALIDACION DEL MODELO MATEMATICO

Mediante las ecuaciones expuestas previamente, se realiza la simulación en Matlab. Las constantes químicas empleadas y como los parámetros del reactor utilizados para realizar la simulación, se pasan a detallar a continuación:

- Información del reactor

$$V = Volumen\ del\ reactor = 7150\ galones = 27.08\ m^3$$

$$A_H = Area\ total\ de\ transf.de\ calor = 50.48\ m^2$$

$$T = 50\ °K$$

$$V = velocidad\ del\ agitador = 6\ rps$$

$$F_o = Flujo\ de\ ingreso = 0.01\ \frac{m^3}{s}$$

Según Brásio et al (2013), tenemos las constantes químicas empleadas para la simulación, las cuales son las siguientes:

- Factores exponenciales

$$k_{o1} = 5.3992 * 10^{-4}\ \frac{m^3}{mol.s}$$

$$k_{o2} = 0.011\ \frac{m^3}{mol.s}$$

$$k_{o3} = 0.0043\ \frac{m^3}{mol.s}$$

$$k_{o4} = 0.037\ \frac{m^3}{mol.s}$$

$$k_{o5} = 3.1738 * 10^{-5}\ \frac{m^3}{mol.s}$$

$$k_{o6} = 3.9658 * 10^{-5}\ \frac{m^3}{mol.s}$$

- Energías de activación

$$E_{a1} = 16.377\ \frac{J}{mol}$$

$$E_{a2} = 19.202\ \frac{J}{mol}$$

$$E_{a3} = 17.867\ \frac{J}{mol}$$

$$E_{a4} = 19.383\ \frac{J}{mol}$$

$$E_{a5} = 4282\,\frac{J}{mol}$$

$$E_{a6} = 15.302\ \frac{J}{mol}$$

- Capacidades Caloríficas

$$C_{p_T} = 86.6864\ \frac{J}{mol.s}$$

$$C_{p_D} = 1791.5150\,\frac{J}{mol.s}$$

$$C_{p_M} = 1298.3897\ \frac{J}{mol.s}$$

$$C_{p_{Me}} = 804.9159\ \frac{J}{mol.s}$$

$$C_{p_G} = 231.0638\ \frac{J}{mol.s}$$

$$C_{p_E} = 6009.2845\ \frac{J}{mol.s}$$

- Calor de reacción

$$\Delta H_1 = 14869.3 \ \frac{J}{mol}$$

$$\Delta H_2 = 35800 \ \frac{J}{mol}$$

$$\Delta H_3 = -56730.7 \ \frac{J}{mol}$$

- Masa molar

$$M_T = 873.058 * 10^{-3} \ \frac{Kg}{mol}$$

$$M_D = 612.737 * 10^{-3} \ \frac{Kg}{mol}$$

$$M_M = 352.415 * 10^{-3} \ \frac{Kg}{mol}$$

$$M_E = 292.363 * 10^{-3} \ \frac{Kg}{mol}$$

- Concentración de la mezcla de aceite de ingreso

$$C_{To} = 678.57 \ \frac{mol}{m^3}$$

$$C_{Do} = 70.7 \ \frac{mol}{m^3}$$

$$C_{Mo} = 45.0 \ \frac{mol}{m^3}$$

$$C_{Meo} = 6.3 * 10^3 \ \frac{mol}{m^3}$$

$$C_{Go} = 0 \ \frac{mol}{m^3}$$

$$C_{Eo} = 0 \ \frac{mol}{m^3}$$

El código empleado para realizar la simulación fue el siguiente

```
xi=0;

xf=120;

CTO= 678.57; % Concentración molar de ingreso de triglicéridos

CDO= 70.7; % Concentración molar de ingreso de diglicéridos

CMO= 45; % Concentración molar de ingreso de monoglicéridos

CMeO= 6300; % Concentración molar de ingreso de metanol

CGO= 0; % Concentración molar de ingreso de glicerol

CEO= 0; % Concentración molar de ingreso de esteres metílicos

V= 27.08; %Volumen del reactor equivalente a 7150 galones

AH= 50.48; % Área total de transferencia de calor

Fo=0.01 %unidades (m^3 /s)

S=50; %Temperatura inicial en °C

T= S+273.15;  %Temperatura inicial en K

Ko1= 0.00053992; %Factor preexponencial 1

Ko2= 0.0011; %Factor preexponencial 2

Ko3= 0.0043; %Factor preexponencial 3

Ko4= 0.0037; %Factor preexponencial 4

Ko5= 0.000031738; %Factor preexponencial 5

Ko6= 0.000039658; %Factor preexponencial 6


Ea1=16.3772; %Energía de activación 1
```

```
Ea2= 19.202; %Energía de activación 2

Ea3= 17.867; %Energía de activación 3

Ea4= 19.383; %Energía de activación 4

Ea5= 4282; %Energía de activación 5

Ea6= 15.302; %Energía de activación 6

R=8.314472; %unidades de J/mol.K

function y=INT_E (y,dy);

global dx;

y=y+dy*dx;

end

k1=Ko1*exp(-Ea1/(R*T));

k2=Ko1*exp(-Ea2/(R*T));

k3=Ko1*exp(-Ea3/(R*T));

k4=Ko1*exp(-Ea4/(R*T));

k5=Ko1*exp(-Ea5/(R*T));

k6=Ko1*exp(-Ea6/(R*T));

dx=0.001;

xprint=0.5;

X=xi:dx:xf;

n=length(X);

Y=CTO;

Z=CDO;
```

```
A=CMO;

B=CMeO;

C=CGO;

D=CEO;

CT=Y;

CD=Z;

CM=A;

CMe=B;

CG=C;

CE=D;

for i=1:n-1

r1= k1*CT*CMe-k2*CD*CE;

r2= k3*CD*CMe-k4*CM*CE;

r3= k5*CM*CMe-k6*CG*CE;

dCT= -Fo/V*(CTO-CT)-r1;

dCD= -Fo/V*(CDO-CD)-r2+r1;

dCM= -Fo/V*(CMO-CM)-r3+r2;

dCMe= -Fo/V*(CMe-CMe)-r1-r2-r3;

dCG= -Fo/V*(CG)+r3;

dCE= -Fo/V*(CE)+r1+r2+r3;

CT=INT_EULER(CT,dCT);

CD=INT_EULER(CD,dCD);
```

```
CM=INT_E (CM,dCM);

CMe=INT_E (CMe,dCMe);

CG=INT_E (CG,dCG);

CE=INT_E (CE,dCE);

end

dy_dx =@(t,C)[-k1*C(1)*C(4)+k2*C(2)*C(6);

   k1*C(1)*C(4)-k2*C(2)*C(6)-k3*C(2)*C(4)-k4*C(3)*C(6);

   k3*C(2)*C(4)-k4*C(3)*C(6)+ k3*C(2)*C(4)-k4*C(3)*C(6);

   -k1*C(1)*C(4)+k2*C(2)*C(6)-k3*C(2)*C(4)+k4*C(3)*C(6)-
k5*C(3)*C(4)+k6*C(5)*C(6);

   k5*C(3)*C(4)-k6*C(5)*C(6);

   k1*C(1)*C(4)-k2*C(2)*C(6)+k3*C(2)*C(4)-k4*C(3)*C(6)+k5*C(3)*C(4)-
k6*C(5)*C(4)];

y0 = [CTO; CDO; CMO; CMeO; CGO; CEO];

tspan = linspace(0, 2, 1000);

[t, C] = ode15s(dy_dx, tspan, y0);

plot(t, C(:,1), '-', t, C(:,2), '-', t, C(:,3), '-', t, C(:,4), 'x', t, C(:,5), '-', t, C(:,6), '*')

legend('CT', 'CD', 'CM', 'CMe', 'CG', 'CE');

xlabel('Tiempo (horas)');

ylabel('Concentración (mol/m^3)');

Cmax = max(C(:,6));

tmax = t(C(:,6) == Cmax);
```

RESULTADOS

A partir del código Matlab se obtuvo los valores

- Cmax= 0.933mol/L representa la concentración máxima de esteres metílicos
- tmax= 45 min

Realizando la comparación de los resultados obtenidos mediante la simulación y los resultados experimentales obtenidos por Berchmans et al (2013) para la validación del modelo matemático aplicado se consideró los valores expuestos en el apartado anterior, asimismo, se tomó una temperatura inicial de 50°C.

Tomando en cuenta que se busca realizar la validación de la aplicación del modelo matemático modificado para un reactor de tipo Batch, se considera que tanto el flujo de ingreso como el flujo del refrigerante son iguales a cero.

En la Figura 7 se observa la respuesta temporal a 50°C de los resultados obtenidos por Berchmans et al (2013).

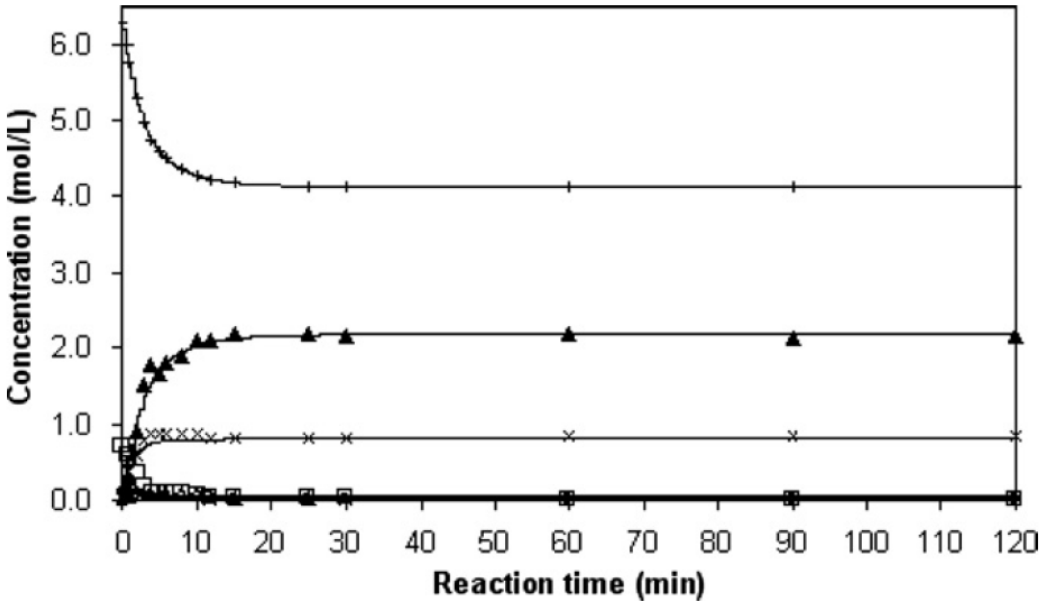


Figura 7 Respuesta temporal de la concentración según Berchmans et al (2013) para una T=50°C representada por: □, triglicéridos; o, diglicéridos; Δ, monoglicéridos; ×, glicerol; ▲, esteres metílicos; +, metanol

En la Figura 8 se muestra la concentración molar de los componentes de la reacción a través del tiempo, estos resultados se obtienen a 50°C mediante simulación

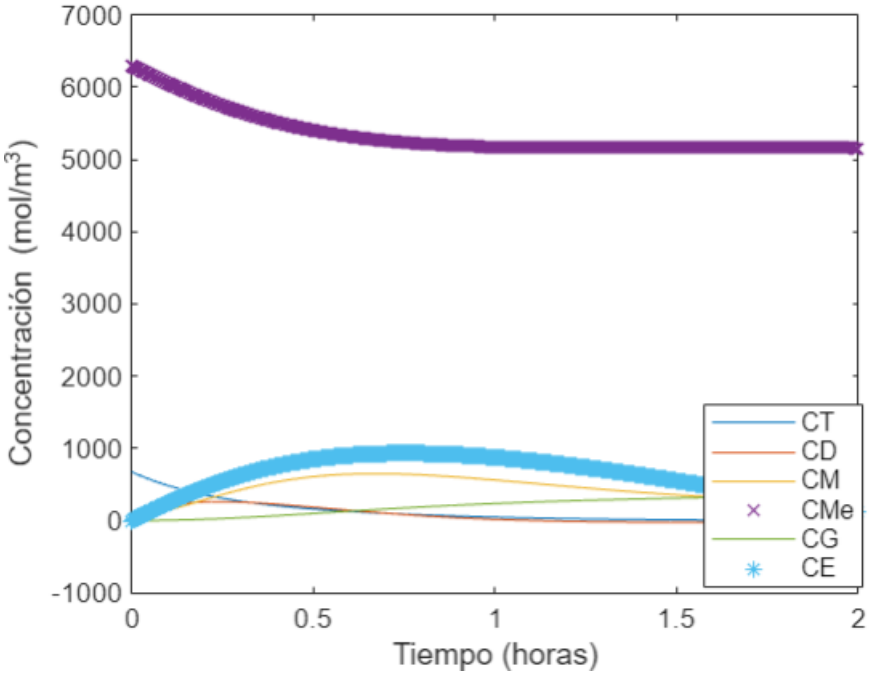


Figura 8 Respuesta temporal obtenida mediante la simulación Matlab a una T=50°C

En la figura 9 se observa cómo cambia el porcentaje de conversión de aceite según Berchmans et al (2013).

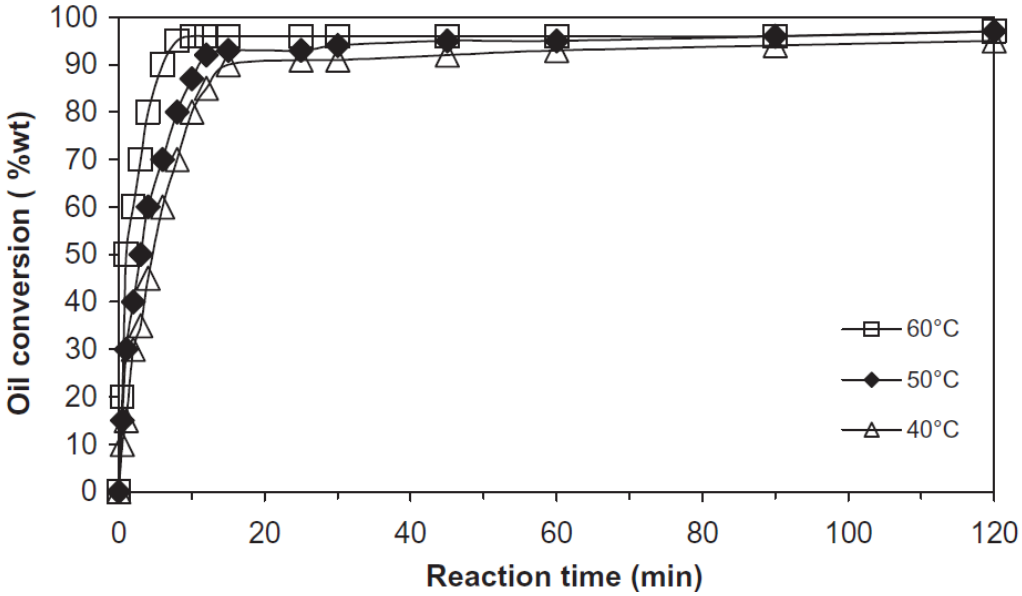


Figura 9 Respuesta temporal de la concentración según Berchmans et al (2013) para diferentes Temperaturas

Como se logra apreciar en las graficas expuestas, la respuesta en el tiempo de todas las variables involucradas en la reacción de transesterificación presenta un comportamiento similar, obteniéndose en la simulación un tiempo máximo se reacción de 45 min, una concentración máxima de esteres metílicos (estado estacionario) 0.933mol/L, para un tiempo de 15 min se tiene que la concentración de esteres metílicos es de 0.551 mol/L y la concentración de metanol para el mismo tiempo de 15 min es de 5.73 mol/L.

De la literatura encontramos que, para un tiempo establecido de 15 min, se obtiene una concentración de esteres metílicos en estado estacionario de 2.146 mol/L, para un tiempo de 15 min se tiene que la concentración de esteres metílicos es de 2.088mol/L y la concentración de metanol para el mismo tiempo de 15 min es de 4.13mol/L.

El error porcentual, en función a lo expuesto líneas arriba, para los esteres metílicos y el metanol se puede obtener mediante:

$$error\ porcentual = \frac{1}{n}\sum \frac{|y_{lit} - y_{sim}|}{y_{lit}} * 100\% \qquad (20)$$

Se tiene que el numero de muestras para los esteres metílicos es 2 (N=2), mientras que en el caso del metanol es 1 (N=1)

- Para los esteres metílicos

$$error\ porcentual\ esteres\ metilicos = \frac{1}{n}\left(\frac{|y_{lit1} - y_{sim1}|}{y_{lit1}} + \frac{|y_{lit2} - y_{sim2}|}{y_{lit2}}\right) * 100\%$$

$$error\ porcentual\ esteres\ metilicos = \frac{1}{2}\left(\frac{|2.146 - 0.933|}{2.146} + \frac{|2.088 - 0.573|}{2.088}\right) * 100\%$$

$$error\ porcentual\ esteres\ metilicos = 64.5\%$$

- Para el metanol

$$error\ porcentual\ metanol = \frac{1}{n}\frac{|y_{lit} - y_{sim}|}{y_{lit}} * 100\%$$

$$error\ porcentual\ metanol = \frac{1}{1}\frac{|4.13 - 5.73|}{4.13} * 100\%$$

$$error\ porcentual\ metanol = 38.7\%$$

Mediante los datos obtenidos en la simulación se tiene que la conversión del aceite fue de:

$$X_E = \frac{C_E M_E}{C_T M_T + C_D M_D + C_M M_M + C_E M_E} * 100\%$$

$$X_E = \frac{933.49 * 0.292363}{89.7 * 0.873058 + 77.5 * 0.612737 + 650.93 * 0.352415 + 933.49 * 0.292363} * 100\%$$

$$X_E = 43.45\%$$

DISCUSION DE RESULTADOS

- Se obtuvo graficas similares respecto a la concentración molar de los componentes de la reacción a lo largo del tiempo (Figura 7 y Figura 8), esto evidencia que la concentración de triglicéridos y metanol disminuye con el tiempo debido que estos componentes se consumen a una velocidad mayor a la que se generan (las curvas de concentración son decrecientes), mientras que para el caso de la glicerina y esteres metílicos, la concentración aumenta con el tiempo debido que se generan a una velocidad mayor a la que se consumen (las curvas de concentración son crecientes).

- Mediante la simulación del modelo matemático se obtuvieron los valores de concentración molar que permitió hallar el porcentaje de conversión empleando la ecuación (19) resultando una conversión mucho menor a la espera siendo de 43.45%, esto se debe a las condiciones a las cuales se aplicó el modelo matemático no han sido las más óptimas, se debe evaluar el modelo aplicado teniendo en consideración otros parámetros y/o condiciones definidas como flujos de ingreso de insumos, temperatura y tiempo de reacción para reevaluar el modelo y determinar si con estos otros parámetros se obtiene una conversión de aceite a esteres metílicos mayor o continua con porcentajes de conversión bajos.

- En la figura 9 que muestra la conversión de aceite a lo largo del tiempo para tres temperaturas distintas, siendo estas 40°C, 50°C y 60°C, la que presenta una mayor conversión es a la temperatura de 60°C. Basando en estudios realizados por diversos autores como Berchmans et al, obtienen datos con mayor dispersión para temperaturas bajas como 30°C, mientras que para temperaturas más elevadas como 50°C o 60°C se

obtienen datos con menor dispersión, los cuales son mas precisos y presentan mayor conversión de aceite

- Diferentes autores que han estudiado el proceso de producción de biodiesel como Arteaga et al a lo largo de sus investigaciones han obtenido que la temperatura a la cual se trabaja la reacción de transesterificación tiene un efecto significativo en el rendimiento, siendo este efecto positivo hasta temperaturas cercanas al punto de ebullición de metanol mientras que de superarse esta temperatura se tendría un efecto negativo en el rendimiento. El efecto respecto a la variación de dosis del catalizador presenta poca influencia en la reacción de transesterificación.

- El comportamiento del reactor se puede modelar matemáticamente utilizando una serie de ecuaciones diferenciales derivadas de los balances de materia y energía apropiados para las masas de los reactivos, paredes de reactor y fluido que circula al interior de la chaqueta.

CONCLUSIONES

El proceso de obtención de biodiésel debe ser sustentable empleando la menor cantidad de insumos y tiempo. Las ecuaciones tanto de balance como energía permitieron modificar el modelamiento matemático ya existente del reactor Batch del proceso de transesterificación.

La reacción de transesterificación presenta reacciones reversibles y consecutivas lo cual la hace que sea una reacción química compleja.

Se logró aplicar un modelamiento matemático de un reactor de transesterificación con un porcentaje de conversión de aceite a esteres metílico del 43.45% con lo cual no se logró el objetivo de conseguir una conversión mayor al 97%

Los resultados obtenidos por el modelo matemático fueron apropiados, por cuanto se realizaron evaluaciones considerando otros parámetros y/o condiciones definidas para el modelamiento y simulación de la reacción.

RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se emplearon datos teóricos obtenidos de la literatura, se recomienda aplicar datos reales ya que con ellos los resultados obtenidos variarán y se podría tener mejores resultados ajustando los parámetros de trabajo en base a la materia prima empleada, en este caso, aceite de soya.

Mantener las condiciones de trabajo controladas, ya que, de no hacerlo, el porcentaje de conversión de aceite a biodiesel se verá afectado, obteniendo valores por debajo de lo esperado.

Tener cuidado al momento de realizar el algoritmo de programación en Matlab dado que se podría obtener una solución que no sea viable o que genere errores en la operación.

Tener presente los límites de operación como lo es la temperatura, de preferencia tener este valor como una restricción ya que, para el caso particular de la reacción de transesterificación, el trabajar con temperaturas mayores al punto de ebullición de metanol generará un porcentaje de conversión de aceite a biodiesel por debajo de lo esperado.

BIBLIOGRAFIA

- Arias et al. (2024), Assessing the future prospects of emerging technologies forshipping and aviation biofuels: A critical review
- Balseca, C. L. I., Tomalá, J. L. M., & Loor, R. O. (2024). Modelado y simulación de procesos de separación por membranas con ecuaciones diferenciales parciales. Cotopaxi Tech. istx.edu.ec
- Catá Salgado, Y., Sosa Gómez, E., González Suárez, E., de Armas Martínez, A. C., & Bonachea Crespo, M. (2024). Contribución a la consideración de la incertidumbre en la integración material y energética para desarrollar la industria química. Revista Universidad y Sociedad, 16(1), 65-78. sld.cu
- López Pinilla, S. (2024). Diseño y puesta a punto de un reactor agitado en continuo a escala de laboratorio para la adsorción de fosfatos durante la obtención de agua regenerada. upc.edu
- Arias Arana, A. (2023). Escalamiento de la síntesis química de nanopartículas de plata a escala piloto. utec.edu.pe
- Luna, C. A. J. R., Mota, R. O., & Campos, G. G. L. (2023). Simulación de la adsorción de cromo hexavalente sobre biomasa de residuos de café en CFD. ugto.mx
- Alba Ruíz, M. (2023). Evaluación de la calidad del mezclado para el escalamiento de la carbonización hidrotérmica. REPOSITORIO NACIONAL CONACYT. uaslp.mx
- Tortosa Grau, J. (2023). Estudio de alternativas para el dimensionamiento de la EDAR de Silvouta situada en Santiago de Compostela. upv.es

- Ríos Avilés, D. F. (2023). Propuesta de restauración ambiental y conservación de servicios ecosistémicos en el municipio de Temascaltepec, Gamarra Chavez, A. M. & Chavez Antunez, M. (2023). Diseño informático en un proceso de tratamiento de aguas superficiales. unjfsc.edu.pe
- González Suárez, E., Concepción Toledo, D. N., & López Bastida, E. J. (2023). Herramientas y métodos matemáticos en investigaciones para la formación de doctores desde la industria química. Revista Universidad y Sociedad, 15(3), 49-58. sld.cu
- Buitrago Mejía, L. D. (2023). Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado y la modelación de una planta de producción
- Rivera Rios, Leydi (2023). Temperatura y tiempo de reacción de transesterificación sobre el rendimiento de metil éster a partir de residuos de aceites vegetales utilizando catalizador platino. repositorio.unprg.edu.pe.
- M Nestares Guerra (2023). Transesterificación básica de aceite vegetal residual para obtener biodiesel en la ciudad de Huancayo. repositorio.uncp.edu.pe.
- Farfán Escalera, R., Pérez Ramírez, C. A., & Romero Aguilar, M. (2023). Aproximaciones temáticas de los estudios ambientales sobre la actividad artesanal: argumentos para su estudio en México. Revista Reflexiones, 102(2), 122-152. scielo.sa.cr
- Pérez-Bravo Sheila Genoveva, Aguilera-Vázquez Luciano, Castañeda-Chávez María del Refugio, Gallardo-Rivas Nohra Violeta. Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción. TIP [revista en la Internet]. 2022 [citado 2024

Abr 23] ; 25: e481. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2022000100311&lng=es. Epub 23-Jun-2023. https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.481.

- Maisincho Asqui, Maritza Paola, Delgado Demera, María Hipatia, & Cedeño Palacios, Carlos Alfredo. (2022). MODELOS MATEMÁTICOS EN LA CINÉTICA ENZIMÁTICA. UNA REVISIÓN. Centro Azúcar, 49(1), 115-131. Epub 01 de enero de 2022.
- Rodríguez Bustamante, J. I., Meza Gago, D. J., & Gutiérrez Rodríguez, I. D. C. (2022). Rendimiento de producción de biodiesel por transesterificación a partir de aceite de soja usado. Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia, 23(23), 149-176
- Hoffmann, A. M. B. & Bernal, G. R. (2022). Un ritual al encuentro intimo en la naturaleza con la primera infancia. [HTML]
- Kasay Lucar, F. A. & Ruesta Carrasco, A. L. (2022). Centro de interpretación y educación ambiental en el parque Kurt Beer distrito 26 de Octubre–Piura 2021. upao.edu.pe
- Preciado, M. C., & Arroyo, G. D. V. (2022). Uso de biocombustibles en Ecuador: Una mirada desde la protección de los derechos de la naturaleza. Revista Venezolana de Gerencia: RVG, 27(7), 477-491. unirioja.es
- Pazmiño Mayorga, M. L. (2022). Manual de buenas prácticas ambientales dirigido al Fuerte Militar Héroes de Chacras, que permita reducir el consumo de energía eléctrica. utmachala.edu.ec

- Gustavo Paz, R. (2022). La agroecología en disputa: una mirada desde el capital y la economía política. Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional, 32(60). scielo.org.mx
- Huaman, C., Maily, B., Useda Mayhua, Y., & Soto Gonzales, H. H. (2022). Biorreactores, tipos y aplicaciones en biotecnologia ambiental. academia.edu
- Seguí Pons, M. (2022). Estudio técnico mediante caracterización térmica y mecánica de un polímero termoestable de origen bio obtenido a partir de aceite de chía. upv.es
- Pineda Ramírez, C. E. (2021). Límites y contradicciones del capital en la naturaleza. Problemas del desarrollo. scielo.org.mx
- MEJÍA, M. S. M. (2021). División de ciencias básicas e ingeniería posgrado en energía y medio ambiente. archive.org
- Quispe Puma, K. Y. (2021). Obtención de biodiesel a partir de la mezcla de aceite doméstico residual y aceite de soya en la región del Cusco
- Londoño, J. P. A., Avendaño, A. J. A., Llanos, J. W. P., & Ordoñez, D. C. R. (2021). Aprovechamiento de aceites vegetales usados para la obtención de biodiésel de segunda generación: una revisión. aprepro.org.br
- Gutiérrez-Hernández, U. R., González-Aguilar, A. M., Ronald, J., Vera-Rozo, J. M. R. Á., & Elizalde-Blancas. (2021). F. Evaluación del proceso de obtención de biodiesel a partir de grasa de pollo.
- González Suárez, E., Concepción Toledo, D. N., Ramos Miranda, F., Cortés Martínez, R., & López Bastida, E. J. (2021). Los métodos matemáticos en las acciones postgrado de gestión de conocimiento de Ingeniería Química. Revista Universidad y Sociedad, 13(5), 259-267. sld.cu

- Villamil Galindo, J. E. & Piagentini, A. (2021). El uso de Nitratos y Nitritos en la Industria cárnica, lo bueno, lo malo y el modelado matemático para optimizar su uso: Una revisión. conicet.gov.ar
- Reyna Segura, A. M. (2021). Optimización del proceso de conversión del dióxido de azufre proveniente de los procesos de tostación de minerales sulfurados a través del modelamiento. unfv.edu.pe
- Zaar, M. H. (2021). 250. Cambio climático antropogénico y decrecimiento. Ar@ cne. Revista Electrónica de Recursos en Internet …. ub.edu
- Ramírez, L. A. G. & Torres, C. A. L. (2021). Diseño y construcción de un biorreactor batch tipo tanque agitado y aireado para la producción de proteína unicelular. REBIOL. unitru.edu.pe
- Ruiz Alonso, B. (2021). Producción de aceite rico en ácidos grasos omega-3 a partir de microalgas y sustratos residuales. uca.es
- López Pérez, M. F., Cardona Navarrete, S. C., Fombuena Borrás, V., Lora García, J., & Carbonell Alcaina, C. (2021, September). Beneficios de la utilización del simulador comercial PROMAX® en combinación con cálculomanual en el análisis de un proceso industrial en el Grado de Ingeniería Química. In IN-RED 2021: VII Congreso de Innovación Edicativa y Docencia en Red (pp. 891-904). Editorial Universitat Politècnica de València. upv.es
- Fleites Avila, Y., Martí Marcelo, C. A., Albernas Carvajal, Y., Miño Valdés, J. E., & González Suárez, E. (2020). Experiencias de las aplicaciones de la programación lineal en la industria de procesos químicos en Cuba. Centro Azúcar, 47(4), 90-102. sld.cu

- Beltrán Velásquez, E. & Gaviria Navarro, J. (2020). Evaluación de los parámetros cinéticos de la transesterificación de los aceites vegetales
- Pérez R. (2020). Modelación matemática de un reactor de tanque agitado concatalizador disperso para la obtención de metil oleato a partir de trioleína BASADO EN UN DIAGNOSTICO AMBIENTAL. http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/139272
- Brásio, A., Romanenko, A., Leal, J., & Santos, L. (2013). Nonlinear model predictive control of biodiesel production via transesterification of used Vegetable oils. Journal of Process Control, 23, 1471-1479.
- Berchmans, H. J., Morishita, K., & Takarada, T. (2013). Kinetic study of hydroxide-catalyzed methanolysis of Jatropha curcas–waste food oil mixture for biodiesel production. Fuel(104), 46-52.
- Reátegui Romero, Warren, & Salas Barrera, Fernando Javier. (2013). Estudio del proceso de transesterificación para la obtención de biodiesel a partir del aceite de palma en un reactor por lotes. Producción + Limpia , 8 (1), 119-134.
- Mjalli, F. S., & Azlan Hussain, M. (2009). Approximate Predictive versus Self-Tuning Adaptive control strategies of Biodiesel Reactors. Ind. Eng. Chem. Res., 48, 11034-11047.
- Rojas González, Andrés Felipe, Girón Gallego, Erika y Torres Castañeda, Harlen Gerardo. (2009). Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión - catálisis química. Ingeniería e Investigación, 29 (3), 17-22.

- Arteaga, H., Siche, R., Pagador, S. y Cáceres, H. (2010). Efecto de la temperatura y tiempo de transesterificación en el rendimiento y poder calórico del biodiesel a partir de grasa refinada de pollo. Scientia Agropecuaria , 1 (1), 37-45.