

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FQF**  
Facultad de  
Química y Farmacia

## TRABAJO DE DIPLOMA

*Título: Estudio del proceso de obtención de biodiesel utilizando  
Chlorella sp. como fuente portadora de ácidos grasos*

*Autor: Mario Octavio García Quiñones*

*Tutor: MSc. Ana Celia de Armas Martínez*

*Curso: 2017-2018*

Santa Clara  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830  
Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

*Pensamiento*

## ***Pensamiento***

*“Adoro la sencillez, pero no la que proviene de limitar mis ideas, sino la de decir lo que veo, pienso o medito con el menor número de palabras posibles”.*

*José María Vargas Vila*

*Dedicatoria*

***Dedicatoria***

*Dedico este triunfo con todo el amor que merecen a mis padres por centrar todos sus esfuerzos en mi educación y formación profesional. Por haber confiado siempre en mí y hacerme creer que todo es posible.*

## *Agradecimientos*

### *Agradecimientos*

*Agradezco en primer lugar mis padres María Caridad Quiñones Álvarez y Octavio Juan García Albornas por ayudarme durante en la formación profesional en los cinco años en la universidad y en cada minuto de mi vida. A mi tutora Ana Celia de Armas pues gracias a ella he logrado una de las virtudes más grandes de mi vida. A mi abuela Adela Álvarez por estar para mí durante toda mi carrera.*

*A mis amigos Yadiel Rafael Alea Martínez, Yisel Pérez Milián, Aliana Lago Benavides, Luis Arturo Tejeda Lema, Danay Legarreta Cruz, Eduardo Mario Rivero González, Jorge Daniel Pérez-Borroto Oliva y Armando Felipe Hernández pues de una manera u otra me ayudaron, apoyaron y confiaron siempre en mí.*

*“A todos, muchas gracias.”*

## *Resumen*

### ***Resumen***

El biodiesel es uno de los biocombustibles líquidos que más desarrollo ha alcanzado en los últimos años. El presente trabajo analiza la factibilidad de una planta de producción del mismo a partir de biomasa seca de la microalga *Chlorella sp.*, que se caracteriza por tener aproximadamente un 40% de ácidos grasos. Se estudiaron dos métodos para su obtención, la transesterificación básica utilizando hidróxido de potasio (KOH) como catalizador y la transesterificación con metanol supercrítico. Al realizar los balances de masa se alcanzó mayor producción de biodiesel en el proceso supercrítico, 431,75 kg/d, mientras que, por transesterificación básica se obtuvieron 258,74 kg/d. Estos procesos fueron simulados en el simulador profesional Aspen Hysys utilizando el paquete de propiedades termodinámicas que brinda el mismo. Al evaluar económicamente estas alternativas ninguna resultó factible. Al hacer un análisis de sensibilidad con el precio de biodiesel como producto final, solo se logra la rentabilidad de la planta por transesterificación básica cuando el mismo se comercializa a 21 \$/kg, alcanzándose valores de ganancia de 625 174 \$/año, un VAN de \$ 1 884 711, una TIR de 34,6 % en un período de recuperación de 5,1 años.

## *Abstract*

## *Abstract*

Biodiesel is one of the liquid biofuels that has reached more development in recent years. The present work analyzes the feasibility of a production plant from dry biomass of *Chlorella* sp. Microalgae, which is characterized by approximately 40% fatty acids. Two methods were studied to obtain it, the basic transesterification using potassium hydroxide (KOH) as a catalyst and the transesterification with supercritical methanol. When carrying out mass balances, higher production of biodiesel was achieved in the supercritical process, 431.75 kg / d, while, by basic transesterification, 258.74 kg / d was obtained. These processes were simulated in the professional simulator Aspen Hysys using the package of thermodynamic properties provided by it. When evaluating these alternatives economically, none was feasible, which is in relation to that reported in the literature worldwide. When making a sensitivity analysis with the price of biodiesel as a final product, only the profitability of the plant is achieved by basic transesterification when it is sold at \$ 21 / kg, reaching profit values of \$ 625,174 / year, a NPV of \$ 1 884 711, an IRR of 34.6% in a recovery period of 5.1 years.

# Índice

# Índice

Introducción .....	1
1.1- Biocombustibles .....	3
1.1.1- Tipos de biocombustibles.....	4
1.1.2- Principales biocombustibles.....	5
1.1.3- Clasificación de los biocombustibles.....	8
1.1.4- Ventajas del uso de los biocombustibles .....	9
1.2- Métodos de producción de biodiesel.....	10
1.2.1- Uso directo y mezcla de aceites vegetales con gasoil.....	10
1.2.2- Microemulsiones .....	11
1.2.3- Pirólisis .....	11
1.2.4- Transesterificación de aceites vegetales.....	11
1.3- Fuentes de materia prima para la producción de biodiesel .....	14
1.3.1- Microalgas como materia prima para obtener biodiesel.....	16
1.4- Ventajas e inconvenientes en la utilización de biodiesel como combustible .....	18
Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas .....	20
2.1- Proceso de obtención de biodiesel de microalgas.....	20
2.2- Propuestas de procesos de producción de biodiesel.....	21
2.3- Selección de la materia prima portadora de aceite. ....	21
2.4- Caracterización de los procesos considerados.....	22
2.4.1- Caracterización de la producción de biodiesel por transesterificación en medio básico. 22	
2.4.2- Balances de materiales en la obtención de biodiesel por transesterificación básica. 24	
2.5- Caracterización de la producción de biodiesel por transesterificación con metanol supercrítico.....	27
2.5.1- Balances de materiales en la obtención de biodiesel por transesterificación supercrítica.....	28
2.6- Simulación en Aspen HYSYS del proceso de obtención de biodiesel de aceite de microalgas. ....	30
2.4.1- Simulación del proceso de biodiesel por transesterificación básica.....	30
2.4.2- Simulación del proceso de biodiesel por transesterificación con metanol supercrítico.....	33
Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas .....	36
3.1- Dimensionamiento de los equipos principales de producción de biodiesel.....	36

## *Índice*

3.1.1- Dimensionamiento de los equipos principales de producción de biodiesel por transesterificación básica.....	36
3.2- Evaluación económica de la producción de biodiesel.....	40
3.2.1- Planta de producción de biodiesel por transesterificación básica.....	40
3.2.2- Planta de producción de biodiesel por transesterificación supercrítica.....	43
3.2.3- Análisis de sensibilidad para la producción de biodiesel por transesterificación básica.	45
Conclusiones .....	48
Recomendaciones .....	49
Bibliografía .....	50
Anexos.....	54

## ***Introducción***

El panorama actual de agotamiento de los combustibles fósiles tradicionales, se traduce en una situación en la cual la producción de petróleo no puede seguir a la demanda asociada al crecimiento económico. Debido a cuestiones ambientales, económicas, sociales, y estratégicas, los biocombustibles producidos a partir de la biomasa han adquirido una importancia y valoración creciente. Los biocombustibles en uso proceden de materias primas vegetales, a través de transformaciones biológicas y físico-químicas.

Actualmente se encuentran desarrollados principalmente dos tipos: el biodiesel, obtenido a partir de la transesterificación de aceites vegetales y grasas animales con un alcohol ligero, como metanol o etanol; y el bioetanol, obtenido fundamentalmente de semillas ricas en azúcares mediante fermentación. Químicamente el biodiesel se produce a partir de transesterificación de aceites, constituyendo ésteres de alquilos, de metilo y de etilo, con cadenas largas de ácidos grasos obteniéndose glicerol como coproducto.

Existen diferentes formas de procesamiento de los aceites vegetales, desde metodologías que emplean una catálisis ácida o básica homogénea hasta procesamientos en los cuales se emplea catálisis ácida heterogénea o condiciones supercríticas para lograr su transformación en biodiesel. El biodiesel obtenido a partir de microalgas en comparación con el biodiesel obtenido a partir de otras fuentes, tiene como principal ventaja que no compete con la producción de alimentos para el ser humano ni por el suelo. En Cuba, hasta el momento no se ha desarrollado a nivel industrial una tecnología que permita la obtención del mismo a partir de esta fuente de biomasa, es por ello que la presente investigación tiene como problema científico:

### **Problema científico:**

A pesar de existir diferentes fuentes para la obtención de biodiesel, en Cuba no existe una tecnología instalada que permita la obtención de este producto a partir de biomasa microalgal.

### **Hipótesis:**

Si se introduce el proceso de obtención de biodiesel a partir de microalgas es posible contribuir favorablemente a la disminución de importaciones en el país, considerando así el uso de biocombustibles de tercera generación.

## *Introducción*

### **Objetivo general:**

Proponer alternativas para la obtención de biodiesel considerando la biomasa de la microalga *Chlorella sp.*

### **Objetivos específicos:**

1. Obtener una actualización bibliográfica acerca de los métodos de obtención de biodiesel que permita la selección de los posibles a desarrollarse en el país.
2. Identificar los procesos seleccionados a partir de los balances de masa y energía en cada una de sus etapas.
3. Simular las alternativas propuestas en el simulador profesional Aspen Hysys.
4. Evaluar técnica y económicamente las posibilidades de aplicación de los esquemas propuestos para la producción de biodiesel.

## ***Capítulo 1: Revisión bibliográfica***

### **1.1- Biocombustibles**

Actualmente, entre los importantes problemas que enfrenta la humanidad, destacan el deterioro ambiental y la crisis energética. Una de las principales causas de la contaminación del aire es la quema de combustibles fósiles, su combustión produce grandes cantidades de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno), óxidos de azufre, hidrocarburos no quemados y cenizas finas. Además, este recurso natural es una fuente energética no renovable y, se conoce que las reservas mundiales tarde o temprano se agotarán. (Serrano-Ruiz and Luque, 2011) Refiere que el petróleo se acabará en 41 años, el gas natural en 63 años y el carbón en 218 años.

Es por ello que se ha insistido sobre la necesidad de generar biocombustibles como una fuente de energía alternativa, de tal forma que puedan ir sustituyendo el empleo de los hidrocarburos y a su vez disminuir los efectos negativos que tienen sobre el medio ambiente (Huber et al., 2006).

Biocombustible es el término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que se derive de la biomasa. Es una fuente renovable de energía, a diferencia de otros recursos naturales como el petróleo, carbón y los combustibles nucleares. Aunque se puede hablar de muchos tipos de biocombustible, por su importancia, aplicación y volumen de producción, básicamente hay dos: el bioetanol y el biodiesel.(García and Triñanes, 2010)

En dependencia de la naturaleza de la biomasa, su uso energético y el tipo de combustible deseado, se pueden utilizar diferentes métodos para obtener los biocombustibles, estos pueden ser: mecánicos (astillado, trituración, compactación), termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), biotecnológicos (fermentación y digestión microbiana anaeróbica) y extractivos. De forma resumida en la tabla 1.1 se exponen estos procesos de obtención, así como los principales productos y sus aplicaciones.

## Capítulo 1: Revisión bibliográfica

**Tabla 1.1. Procesos de obtención de biocombustibles**

	Técnicas	Productos	Usos
<b>Mecánicos</b>	Astillado Trituración Compactación	Leñas Astillas Briquetas Aserrín	Calefacción Electricidad
<b>Termoquímicos</b>	Pirólisis	Carbón Aceites	Calefacción Electricidad Transporte Industria química
	Gasificación	Gas de gasógeno	Calefacción Electricidad Transporte Industria química
<b>Bioteconológicos</b>	Fermentación	Etanol Varios	Transporte Industria química
	Digestión anaerobia	Biogás	Calefacción Electricidad
<b>Extractivos</b>	Extracción físico-química	Aceites Ésteres Hidrocarburos	Transporte Industria química

### 1.1.1- Tipos de biocombustibles

Según el Consejo Argentino para la información y el desarrollo de la biotecnología (Lede, 2015) los principales tipos de biocombustibles, en función del estado físico, pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, como se resumen en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2. Tipos de combustibles obtenidos de la biomasa**

Sólidos	Líquidos	Gaseosos
Paja	Alcoholes	Gas
Leña	Biohidrocarburos	Biogás
Astillas	Aceites vegetales y ésteres derivados	hidrógeno
Briquetas		
Carbón vegetal	Aceites de pirólisis	

Los sólidos, proceden de materia orgánica de origen vegetal o animal tras su tratamiento físico. Los líquidos son fundamentalmente los biocarburantes, siendo los más conocidos el bioetanol, que se obtiene normalmente de cultivos con alto contenido en azúcar, y el biodiesel, que se obtiene a partir de aceites vegetales y grasas animales. Ambos se usan como sustitutivos de combustibles derivados del petróleo como el diesel y la gasolina, respectivamente (Serrano-Ruiz and Luque, 2011). Por último, los

## Capítulo 1: Revisión bibliográfica

biocombustibles gaseosos, se obtienen a partir de la descomposición anaeróbica (ausencia de oxígeno) de la materia orgánica obteniéndose un gas mezcla de metano y CO<sub>2</sub> (Muñoz, 2016). En la tabla 1.3 se muestran los biocombustibles más comunes.

**Tabla 1.3. Diferentes tipos de biocombustibles.**

Biocombustible	Bioetanol	Biodiesel	Biogás
<b>Fuente de obtención</b>	Azúcares (caña de azúcar, sorgo, remolacha, dulce, etc.) Almidones (maíz, yuca, etc.) Celulosa (residuos agrícolas, boscosos, etc.)	Plantas oleaginosas (cártamo, girasol, higuera, Jatropha y aceite de palma.) Grasa animal. Aceites usados.	Desechos orgánicos. Excrementos de ganado.
<b>Proceso de obtención</b>	Fermentación	Transesterificación	Digestión anaerobia
<b>Combustible a sustituir</b>	Gasolina	diesel	Gas natural
<b>Porcentaje de sustitución</b>	5 al 20%	20%	100%

### 1.1.2- Principales biocombustibles

#### Biodiesel

El biodiesel es un combustible líquido producido a partir de materias renovables, como los aceites vegetales o grasas animales, que actualmente puede sustituir parcial o totalmente al diesel de petróleo en los motores diesel (Callejas and Quezada, 2009). Puede funcionar en cualquier motor diesel, y se presume que duplica la vida útil de los vehículos, no obstante, algunas de sus propiedades (alta viscosidad, baja volatilidad, menor poder calorífico, estabilidad a oxidación, etc.) deben ser mejoradas para poder lograr reemplazar a 100% el uso de combustibles fósiles.

Las propiedades del biodiesel varían de acuerdo a la materia prima y entre las más sobresalientes y atractivas están su biodegradabilidad y no toxicidad, comparado con el diesel fósil (Loera-Quezada and Olgún, 2010). Son muy similares a las del gas oil de origen fósil, en cuanto a densidad, número de cetanos, eficiencia y rendimiento de los motores gasoleros (diesel), destacándose en el biodiesel punto de inflamación superior (Callejas and Quezada, 2009). En la tabla 1.4 se muestran las principales propiedades del biodiesel y sus principales componentes en la figura 1.1.

## Capítulo 1: Revisión bibliográfica

Tabla 1.4. Propiedades físicas y químicas del biodiesel.

Propiedad	Unidad	Valor aproximado
Conversión	% (m/m)	96.50 a 97.50
Densidad a 15°C	Kg/m <sup>3</sup>	860 a 900
Viscosidad a 40°C	mm <sup>2</sup> /g	3.60 a 5.00
Punto de inflamación	°C	120
Índice de cetanos	Nº	51
Índice de yodo (Para soja)	g yodo/100 g	120

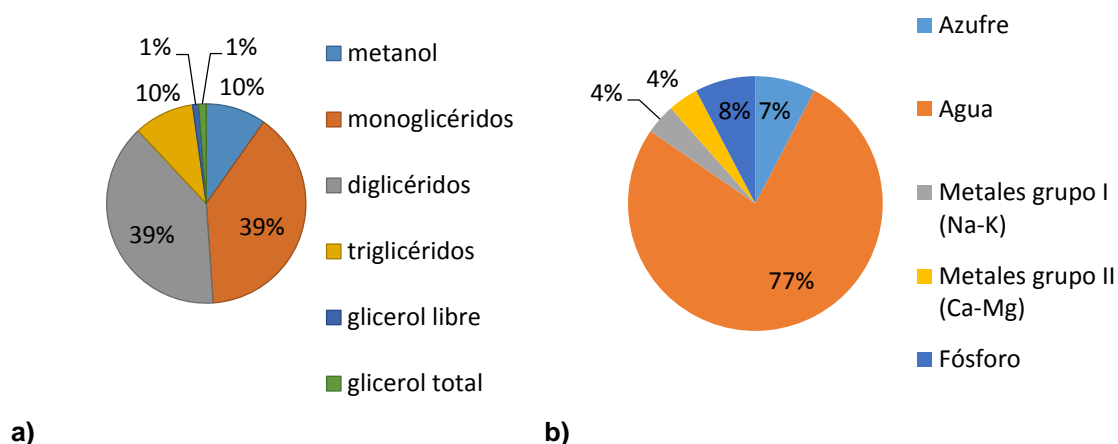


Figura 1.1. Composición del biodiesel. A) Compuestos (% m/m). B) Minerales (mg/kg)

Por otra parte, en la tabla 1.5, se puede observar que el biodiesel es un combustible oxigenado, por eso tiene una combustión completa en comparación al diésel derivado del petróleo y produce menos gases contaminantes.

Tabla 1.5. Comparación de las propiedades físico-químicas del diésel y biodiesel.

	Diésel	Biodiesel
Densidad a 15°C (Kg/m <sup>3</sup> )	840	880
Contenido en oxígeno (% m/m)	0	11
Contenido en parafinas (% m/m)	67.8	0
Contenido en azufre (mg/Kg)	Menor 10	Menor 1
Poder calorífico (MJ/Kg)	43	38
Emisiones de NO <sub>x</sub> frente al diésel	-	+ 10 %
Emisiones de CO <sub>2</sub> (Kg/MJ)	0.08	0.06

### Bioetanol

El bioetanol es un alcohol, y se obtiene como la cerveza y otras bebidas alcohólicas. Los carbohidratos son transformados en azúcares simples, los que se convierten por fermentación en etanol, que luego es destilado en su forma final. Se produce principalmente a partir de caña de azúcar o maíz (en algunos casos mezclado con otros cereales), cuyos hidratos de carbono son fermentados a etanol por las levaduras del género *Saccharomyces* (Lede, 2015).

## *Capítulo 1: Revisión bibliográfica*

La caña de azúcar es la fuente más atractiva para la producción de etanol, ya que los azúcares que contiene son simples y fermentables directamente por las levaduras. El mayor inconveniente es que resulta cara como materia prima. Los cultivos como el maíz son ricos en almidón, un hidrato de carbono complejo que necesita ser primero transformado en azúcares simples. (Callejas and Quezada, 2009) Este proceso se denomina sacarificación, e introduce un paso más en la producción, con el consecuente aumento en los costos.

Los principales productores de alcohol como combustible son Brasil, Estados Unidos y Canadá. Brasil lo produce a partir de la caña de azúcar y lo emplea como "hidro-alcohol" (95% etanol) o como aditivo de la gasolina (24% de etanol). Estados Unidos y Canadá lo producen a partir de maíz (con un poco de trigo y cebada) y es el biocombustible más utilizado en diferentes formulaciones que van desde el 5% al 85% de etanol (Lede, 2015).

### **Biogás**

La digestión anaerobia se entiende como una serie de procesos biológicos en los cuales diferentes microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Durante la degradación anaerobia la materia orgánica es transformada en una mezcla de gases conocida como biogás, cuyos principales componentes son el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), aunque incluye trazas de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{SH}_2$ ), vapor de agua, amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y otros componentes dependiendo del sustrato de origen. Al final del proceso se obtiene también una mezcla acuosa de materiales sólidos, conocido como digerido, rica en nutrientes, minerales y compuestos biológicamente activos, que puede ser utilizado como biofertilizante o enmienda orgánica en suelos (Suárez, 2014). Es un proceso apropiado para materiales orgánicos con alto grado de humedad (80% - 90%).

Se aplica actualmente para el tratamiento de prácticamente cualquier residuo de origen orgánico y como proceso productor de energía renovable (el biogás) a partir de cualquier material orgánico, excepto la madera. Entre los diferentes materiales capaces de ser degradados anaeróbicamente se encuentran cualquier tipo de deyecciones ganaderas (estiércol vacuno, de oveja y de cabra, porcino, gallinaza y pollinaza, etc.), cultivos energéticos (ensilado de maíz, microalgas, etc.), cultivos no energéticos y residuos de cosecha (cebada, centeno, trigo, alfalfa, cáñamo, etc.), aguas residuales de origen urbano e industrial (residuales de mataderos, destilerías, fábricas de levadura) y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (Suárez, 2014).

## *Capítulo 1: Revisión bibliográfica*

El biogás puede ser empleado para generar energía eléctrica o mecánica mediante su combustión, sea en plantas industriales o para uso doméstico. Los países con mayor producción mundialmente son la India (aproximadamente 200 mil biodigestores) y China con alrededor de 6 millones.

### **1.1.3- Clasificación de los biocombustibles**

El hombre, por medio de la investigación constante, hace propuestas de biocombustibles novedosos, con materias primas y procedimientos diferentes, y con niveles de afectación sobre el medio ambiente variables. El constante desarrollo de los biocombustibles ha llevado a que se consideren hoy en día la existencia de biocombustibles de primera, segunda, tercera y cuarta generación (ONU-Energía, 2014).

#### **Primera generación**

Estos utilizan materias primas de uso alimentario (como el maíz, la caña de azúcar o la soya) y tecnologías de proceso como la fermentación (para el bioetanol) y la transesterificación (para el Biodiésel) (ONU-Energía, 2014). Los biocombustibles líquidos de primera generación son los más socorridos; esto se demuestra porque hoy en día se está produciendo aproximadamente el equivalente a 20 millones de toneladas de petróleo, lo que significa 1% del consumo mundial total (León et al., 2009).

#### **Segunda generación**

Estos se distinguen de los de primera generación en dos aspectos: se obtienen de vegetales que no tienen una función alimentaria, y se producen con innovaciones tecnológicas que permitirán ser más ecológicos y avanzados que los actuales. Como se obtienen de materias primas no alimentarias, se pueden cultivar en tierras marginales que no se emplean para el cultivo de alimentos. En este sentido, permiten una mayor diversificación con nuevas materias primas, nuevas tecnologías y nuevos productos finales, promoviendo de esta forma el desarrollo agrícola y agroindustrial (Canakci and Gerpen, 2001).

Los biocombustibles de segunda generación (B2G) requieren incentivos comerciales que sean autosostenibles con la generación de impuestos por su producción y comercialización en el largo plazo; se tienen que evitar políticas de subsidios indiscriminados y excesivos.

#### **Tercera generación**

Se producen con biomasa diferente a la utilizada para los biocombustibles de primera y segunda generación, su obtención está basada en tecnologías emergentes que

## *Capítulo 1: Revisión bibliográfica*

prometen una gran cantidad de combustible por unidad de área y menores costos de producción. El aceite proveniente de las microalgas ha aparecido en los últimos años como una potencial fuente de biodiesel debido a que el contenido de aceite de muchas especies de microalgas supera al contenido de aceite de todas las fuentes vegetales cultivadas actualmente, varios métodos de extracción de lípidos con solventes químicos, shock osmótico, extracción con fluidos supercríticos, autoclavado, extracción con ultrasonido, extracción asistida con microondas, extracción mediante destrucción mecánica, extracción enzimática han sido evaluados en microalgas con el fin de hacer fácil, eficiente, económico y amigable con el ambiente el proceso de extracción (Mendoza, 2015).

### **Cuarta generación**

Son aquellos que tienen como objetivo principal crear un ciclo de emisiones cero (o incluso negativo) en su proceso de obtención. Un aspecto fundamental son sus fuentes de biomasa, compuesta de cultivos de materiales lignocelulósicos genéticamente modificados con el fin de lograr un rendimiento energético mayor, más velocidad de crecimiento y mayor capacidad de fijación de CO<sub>2</sub> (Mendoza, 2015).

#### **1.1.4- Ventajas del uso de los biocombustibles**

El biocombustible apareció como una solución para varios problemas, especialmente la reducción de gases de efecto invernadero, para el desarrollo de las economías agrícolas regionales y para la independencia de la economía en base a combustibles fósiles. Algunos países y organismos comenzaron a regular el uso obligatorio de los mismos en ciertos porcentajes y otorgando subsidios para su producción, sin embargo, están apareciendo a nivel mundial varias preocupaciones sobre la real sustentabilidad de su producción cuando se analiza su ciclo de vida completo, especialmente cuando se considera el cambio del uso de la tierra (Herguedas et al., 2011).

El uso de biomasa vegetal en la elaboración de combustibles podría beneficiar la realidad energética mundial con una significativa repercusión en el medio ambiente, dentro de sus principales ventajas se encuentran (Vargas, 2016):

- Su uso como fuente de energía renovable, puede contribuir a reducir el consumo de combustibles fósiles, responsables de la generación de emisiones de gases efecto invernadero.
- Son una alternativa viable al agotamiento de energías fósiles, como el gas y el petróleo.

## *Capítulo 1: Revisión bibliográfica*

- Se producen a partir de cultivos agrícolas, que son fuentes renovables de energía y a partir de cultivos propios de una región, permitiendo la producción local del biocombustible.
- Permiten disponer de combustible independientemente de las políticas de importación y fluctuaciones en el precio del petróleo.
- Producen mucho menos emisiones nocivas para los seres vivos, el agua y el aire.

### **1.2- Métodos de producción de biodiesel**

Para lograr que el biodiesel se convierta en una alternativa energética real, se necesita que este producto no sólo presente características equivalentes a las del petrodiesel, sino también en el conjunto de procesos de obtención, se consigan balances energéticos positivos y llegue al mercado con un costo similar al del diesel de petróleo. Actualmente, éste es el principal obstáculo para su comercialización. Una causa del elevado costo de este biocombustible radica en el empleo de aceites comestibles vírgenes para su producción; es por esto que recientemente se ha explorado la utilización de aceites reciclados o aceites no comestibles (Linares et al., 2012).

Existen principalmente cuatro métodos desarrollados en profundidad para la producción de biodiesel, ellos son: uso directo y mezcla de aceites vegetales con gasoil, microemulsión, craqueo térmico (Pirólisis) y transesterificación.

#### **1.2.1- Uso directo y mezcla de aceites vegetales con gasoil**

Esta técnica consiste en usar directamente aceites vegetales como combustible o bien diluirlos con diésel mineral. Presenta como ventajas la gran disponibilidad mundial y un alto poder calorífico, además de ser un recurso renovable. Por otro lado, el uso directo de aceite vegetal como combustible presenta problemas, debido a su elevada viscosidad. Esto produce una acumulación de depósitos de carbón en los motores, contaminación del aceite lubricante y disminución, por tanto, de la vida de los motores.

Para evitar estos problemas se opta por la mezcla de aceite vegetal y diésel, pero según los resultados obtenidos no es recomendable su uso para largos períodos de operación en motores diésel de inyección directa, ya que los problemas vuelven a aparecer a largo plazo: depósitos de carbón, contaminación del aceite lubricante del motor y formación de goma debido a la oxidación y polimerización durante el almacenamiento y combustión (Vargas, 2016).

## *Capítulo 1: Revisión bibliográfica*

### **1.2.2- Microemulsiones**

Para solucionar el problema de la alta viscosidad de aceites vegetales, se han estudiado las microemulsiones de aceites con disolventes como el metanol, etanol y butanol al que se le añade un agente surfactante. Los tensioactivos o surfactantes son sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases (Lucca et al., 2014).

Una microemulsión está definida como una dispersión de equilibrio coloidal de fluidos inmiscibles que contienen microestructuras. Las microemulsiones pueden ser iónicas o no iónicas según el surfactante empleado.

El alcohol utilizado en esta técnica preferentemente es el metanol por su disponibilidad y ventaja económica con respecto a otros alcoholes. Se observó que esta microemulsión obtenida producía un menor desgaste del motor que el diésel convencional, pero provocaba, entre otros aspectos desfavorables grandes depósitos de carbón, una combustión incompleta y muchas veces la viscosidad de dicha microemulsión no cumplía los límites exigidos (Vargas, 2016).

### **1.2.3- Pirólisis**

Otro proceso que se puede aplicar a los aceites vegetales para mejorar sus cualidades como combustible es la pirólisis química. Este método, consiste en la conversión de una sustancia en otra por aplicación de calor en ausencia de oxígeno.

Utilizado en los años 40 para producir productos combustibles a partir de grasas y aceites, ha sido estudiado en aceites de palma, soja y colza. Como productos de pirólisis se obtienen olefinas, parafinas, una mezcla de esteres insaturados, CO, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. Se obtienen productos que son químicamente similares a la gasolina derivada del petróleo, sin embargo, este método presenta los inconvenientes de que el equipamiento es caro y de que se producen productos secundarios de escaso valor, además este método al tratarse de un combustible en ausencia de oxígeno afecta negativamente al medio ambiente en mayor medida que el uso de un combustible oxigenado (Vargas, 2016).

### **1.2.4- Transesterificación de aceites vegetales**

La manera más común de sintetizar biodiesel es mediante una reacción de transesterificación, en la cual un triglicérido (compuesto por una molécula de glicerol esterificada por tres moléculas de ácidos grasos), contenido en el aceite vegetal o grasa animal y un alcohol ligero (metanol o etanol), obteniéndose como productos glicerina y ésteres derivados de los tres ácidos grasos de partida, es decir, biodiesel. En general se suele usar metanol como alcohol de sustitución, en cuyo caso el biodiesel estará

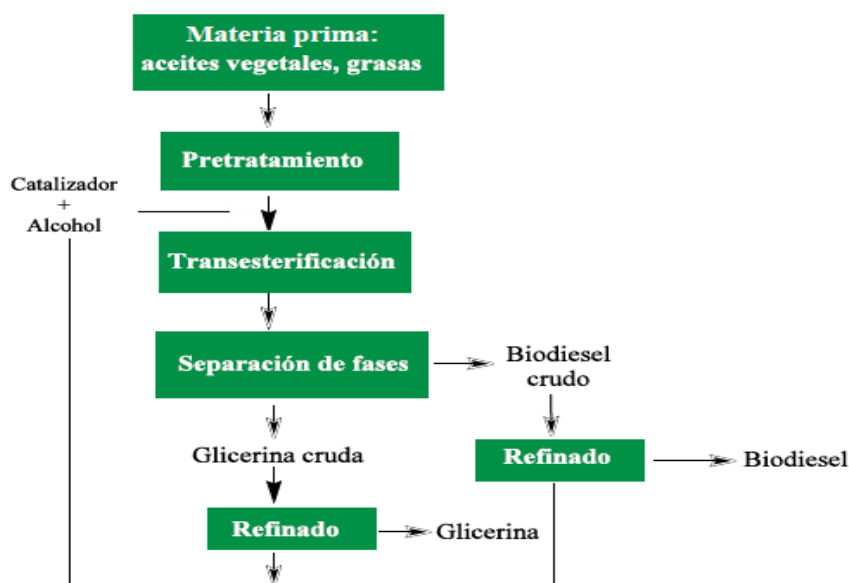
## Capítulo 1: Revisión bibliográfica

compuesto por ésteres metílicos (figura 1.2)(León et al., 2009). Debido a la naturaleza reversible de esta reacción, es recomendable emplear exceso de alcohol para con esto favorecer el equilibrio hacia la formación de biodiesel.



**Figura 1.2. Reacción de transesterificación para la producción de biodiesel.**

El producto recuperado se separa por reposo de dos fases para eliminar el glicerol. La mezcla restante, que es el biodiesel, se destila para quitar el excedente de alcohol para reciclado. Posteriormente, los ésteres son sometidos a procesos de purificación que consiste en el lavado con agua, e inclusive secado al vacío y filtrado. Como resultante del proceso, se obtiene biodiesel, así como un subproducto conocido como glicerol, que tiene usos variados en la industria farmacéutica y cosmética. El proceso general para la obtención de biodiesel se encuentra esquematizado en la figura 1.3 (Vargas, 2016).



**Figura 1.3. Representación esquemática del proceso general para la obtención de biodiesel**

Las principales variables que afectan el rendimiento y pureza en términos de producción de biodiesel son: pureza de los reactivos empleados, tiempo de mezclado, temperatura de reacción, concentración y tipo de catalizador empleado y relación en masa de la cantidad de metanol y aceite empleados (Muñoz, 2016).

## *Capítulo 1: Revisión bibliográfica*

### **1.2.4.1- Tipos de Transesterificación**

Las reacciones de transesterificación (también llamada alcoholisis) pueden ser llevadas a cabo por medio de la adición de diferentes tipos de catalizadores, homogéneos (alcalinos y ácidos) o heterogéneos (por enzimas). Los dos primeros tipos se han estudiado más extensamente, mientras que los sistemas catalizados por enzimas requieren más investigación por los tiempos tan elevados de reacción (Vargas, 2016).

#### *Transesterificación en medio básico*

Los catalizadores utilizados en la transesterificación básico son generalmente hidróxidos alcalinos y alcóxidos alcalinos. En general, la transesterificación catalizada por álcalis es mucho más rápida que la catalizada por ácidos y es la que se suele utilizar a escala comercial. Sin embargo, la utilización de álcalis implica que los glicéridos y el alcohol deben ser sustancialmente anhidros, ya que el agua hace que la reacción cambie parcialmente hacia una saponificación, la cual produce jabones (Vargas, 2016).

#### *Transesterificación en medio ácido*

Los ácidos usados como catalizadores en este tipo de transesterificación son el sulfúrico, fosfórico, clorhídrico y ácidos orgánicos sulfónicos. Aunque la transesterificación por catálisis ácida es mucho más lenta que por catálisis básica, es más aconsejable para aceites que tienen un alto contenido en ácidos grasos libres y mayor contenido en humedad, por lo que el pretratamiento requerido en el proceso alcalino no será necesario en este caso. Esta técnica tiene como desventaja la necesidad de utilización de acero inoxidable en las unidades de equipo y, por tanto, mayor inversión en materiales de construcción (Vargas, 2016).

#### *Transesterificación enzimática. Inmovilización de lipasas.*

Las enzimas son catalizadores con mucha proyección de futuro dadas sus condiciones de proceso (presión, temperatura, tiempo), su buena conversión y su selectividad. La enzima inmovilizada permite incrementar la estabilidad, la reutilización, la operación continua, y la posibilidad de mejorar el control de las reacciones (Peñaranda, 2013).

Los productos obtenidos mediante catálisis enzimática tienden a ser más puros que los que se obtienen por medios químicos alternativos, dado que la catálisis química tiende a ser no específica y por lo tanto genera varios subproductos. El uso de lipasas para realizar la esterificación alivia la necesidad de una variedad amplia de procesos complejos de separación en la post-reacción y conlleva a una disminución de costos totales de operación. Sin embargo, las reacciones catalizadas por lipasas tienen como

## *Capítulo 1: Revisión bibliográfica*

inconveniencia las conversiones relativamente bajas en comparación con procesos químicos tradicionales (Vargas, 2016).

Estas bajas productividades volumétricas pueden conducir a productos menos puros que los obtenidos por síntesis química y tal desventaja se puede unir con la inhibición del catalizador biológico por los productos y/o los sustratos y la desactivación térmica del biocatalizador. Por ello, es necesario un estudio más amplio y profundo de la materia, antes de empezar a producir biodiesel utilizando dicha técnica (Peñaranda, 2013).

### *Transesterificación con metanol supercrítico*

Existe un tipo especial de transesterificación llevada a cabo por medio de fluidos en condiciones supercríticas. Esta tecnología consiste en llevar a cabo una alcoholisis sin la presencia de catalizador, utilizando metanol supercrítico (Martínez et al., 2007).

La relación molar necesaria para que la reacción entre metanol y aceite sea óptima es de 42:1. Se presuriza el aceite hasta 45 MPa y se trata varios minutos con metanol supercrítico a esta misma presión, obteniéndose así ésteres metílicos. En estas condiciones, los triglicéridos de naturaleza no polar se pueden disolver con el metanol, formando una única fase mezcla de aceite y alcohol. El rendimiento con este proceso es mayor que con un proceso convencional (Vargas, 2016).

La velocidad de conversión de los triglicéridos aumenta drásticamente en estado supercrítico, y los ácidos grasos presentes en los aceites iniciales son convertidos eficientemente en ésteres metílicos. Además, al ser el proceso no-catalítico, la purificación de los productos tras la transesterificación es más sencilla (Manuale, 2011).

Entre estos métodos, la transesterificación con alcohol supercrítico sin catálisis ha encontrado numerosas ventajas: es más simple, tiene mayor rendimiento en un corto período de tiempo y su purificación es más sencilla (BERRÍOS and SKELTON, 2008). Los procesos de metanol supercrítico tienen gran velocidad de reacción lo que hace que la reacción se complete en un corto período de tiempo. Es también más simple en la separación de los productos y en el proceso de purificación, ya que no hay catalizador en el sistema (Manuale, 2011).

### **1.3- Fuentes de materia prima para la producción de biodiesel**

La materia prima utilizada para el proceso de fabricación del biodiesel es muy variada (distintos tipos de aceites vegetales y grasas animales, aceites reciclados, etc.), haciendo que el resultado de la reacción química correspondiente sea una multiplicidad

## Capítulo 1: Revisión bibliográfica

de ésteres de ácidos grasos distintos, en proporciones muy variables, todos ellos denominados biodiesel (León et al., 2009).

Entre los principales aceites vegetales usados se encuentran los de colza, palma, soya, girasol, jatropha, semilla de algodón, canola, grasas animales y aceites usados. Estas fuentes se resumen en la tabla 1.6.

**Tabla 1.6. Fuentes de materia prima para la producción de biodiesel**

Aceites	Ejemplos
<b>Aceites vegetales convencionales</b>	De: girasol, colza, soya, coco y palma
<b>Aceites vegetales alternativos</b>	De: Brassica carinata, Cynara cardunculus, Camelina sativa, Crambe abyssinica, Pongamia, Jatropha curcas, semillas modificadas genéticamente y de girasol de alto oleico
<b>Aceites de frituras usados</b>	
<b>Grasas animales</b>	De: Sebo de vaca, sebo de búfalo, grasa de pollo y de pescado
<b>Aceite de otras fuentes</b>	De: Producciones microbianas y microalgas

De forma general, el proceso de extracción del aceite representa cerca del 70% del costo total de producción, lo cual indica que los aceites vegetales más apropiados son aquellos de cultivos con las mayores productividades por hectárea (tabla 1.7) o aceites de bajo costo como aceites de cocina gastados (Linares et al., 2012)

**Tabla 1.7. Comparación entre fuentes de materia prima para la producción de biodiesel**

Fuente	Rendimiento de aceite (L/ha)	Productividad de Biodiesel (L/ha/año)	Superficie equivalente requerida ha x 10 <sup>6</sup>
<b>Palma</b>	2400	5950	3.972
<b>Jatropha</b>	1300	1892	12.490
<b>Colza</b>	1100	1190	19.859
<b>Girasol</b>	690	952	24.823
<b>Soja</b>	400	446	52.986
<b>Microalga<sup>b</sup></b>	18750	12000	1.969
<b>Microalga<sup>c</sup></b>	58760	-	-

No obstante, dentro de estas fuentes se pueden encontrar a las plantas verdes y a las algas, aunque según algunos especialistas, existe una mayor ventaja comparativa en la utilización de las algas para la producción de biodiesel, con respecto a las plantas verdes. Esta ventaja radica en la alta eficiencia fotosintética de las algas. Es así, que las pruebas de varias plantas piloto muestran que las producciones anuales de aceites a

## *Capítulo 1: Revisión bibliográfica*

base de algas son mucho mayores, entre 2 550 superiores que para cualquier otro tipo de cultivo (Santander, 2013).

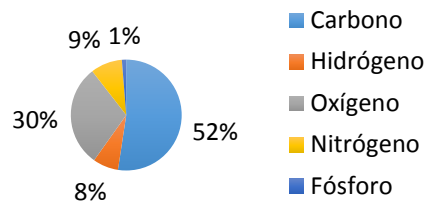
### **1.3.1- Microalgas como materia prima para obtener biodiesel**

Una alternativa es usar microalgas como materia prima, ya que pueden aplicarse en zonas no aptas para los cultivos tradicionales y alcanzan tasas de crecimiento altas (0.5 a 1.2 d<sup>-1</sup>)(PATA, 2014). Sin embargo, muchas tecnologías de cultivo de microalgas involucran el uso de agua no contaminada, fertilizantes e inyección de CO<sub>2</sub> para su crecimiento, lo cual eleva el costo de la producción de biomasa algal y reduce su atractivo como tecnología(Loera-Quezada and Olgúin, 2010). Para minimizar estos inconvenientes, una alternativa de cultivo es usar aguas residuales municipales, de la agricultura y la ganadería, donde las microalgas pueden desarrollarse aprovechando los nutrientes en este tipo de descargas. Esta integración permite: 1) tratar las aguas residuales; 2) obtener un efluente de alta calidad; 3) generar biomasa algal útil para producir biodiésel o biogás (Agüero, 2010).

El término microalga engloba un grupo muy diverso de microorganismos fotosintéticos unicelulares, procariotas (cianobacterias) y eucariotas, que se localizan en hábitats diversos tales como aguas marinas, dulces, salobres, residuales o en ambientes húmedos, bajo un amplio rango de temperaturas, pH y disponibilidad de nutrientes. En ficología aplicada, este término se refiere a las algas microscópicas en sentido estricto, y a las bacterias que realizan la fotosíntesis oxigénica, es decir, las cianobacterias que son los únicos organismos procariotas que pueden llevar a cabo la fotosíntesis (Vargas, 2016).

Las microalgas tienen una composición bioquímica compleja debida a la presencia del aparato fotosintético, que le da una gran riqueza en pigmentos y componentes como citocromos y ácidos poliinsaturados de cadena larga (PUFAs) (Pérez and Labbé, 2014). Esto resulta en un elevado contenido en productos de alto valor, como los carotenoides luteína y astaxantina o los PUFAs DHA y EPA. Como captadoras de CO<sub>2</sub> y asimiladoras del nitrógeno, son además una fuente sostenible de biocombustibles y biofertilizantes (Hernández et al., 2014). Se destaca además la presencia de minerales, vitaminas, proteínas, carbohidratos y ácidos grasos y la misma puede ser manipulada mediante varios parámetros durante el proceso de cultivo. Valores aproximados de su composición se muestran en la figura 1.4.

## Capítulo 1: Revisión bibliográfica



**Figura 1.4. Composición aproximada de las microalgas**

Las microalgas son una fuente de múltiples beneficios para el hombre, extendiéndose su aplicación tanto a la alimentación funcional, la agricultura, la acuicultura, farmacología y la cosmética, entre otros. Asimismo, cada vez más estudios apuntan a que las microalgas pueden generar energía limpia y biocombustibles, contribuyendo con ello al desarrollo sostenible de la economía. El consumo humano de microalgas está restringido a unas pocas especies, debido a las estrictas regulaciones de seguridad alimentaria y las reglamentaciones del comercio internacional. En cuanto a la producción de biocombustibles, las algas, presentan ciertas ventajas con respecto a las plantas verdes (Castillo et al., 2017):

- Al ser un grupo de organismos netamente acuáticos no requieren de tierra para su cultivo, y por tanto no compiten con ningún otro cultivo por un recurso limitante, la tierra. Aún si fuera necesario su cultivo sobre la tierra, este podría hacerse en zonas marginales, de ningún o escaso uso alternativo.
- El agua utilizada en los cultivos de algas puede ser dulce o salada, y si es de este segundo tipo, la concentración de sales puede ser dos veces la concentración del agua marina. Esto significa que tampoco competirían por el recurso, también limitado, del agua dulce (Benítez et al., 2015)
- Las Algas tienen una mucha mayor capacidad de absorber CO<sub>2</sub> con respecto a las Plantas Verdes, sin sufrir la inhibición del proceso fotosintético bajo condiciones de intensa incidencia lumínica (Balladares, 2017).

Dado el alto contenido de lípidos que contienen las microalgas, numerosas especies pueden ser inducidas, manipulando las características físico-químicas del medio de cultivo, a producir elevadas cantidades de lípidos o ácidos grasos, que pueden ser posteriormente empleados para la producción de biodiesel, como se muestran en el tabla 1.8. Estas manipulaciones pueden ser simples, como variación de la salinidad, temperatura, pH o disponibilidad de micronutrientes (Vargas, 2016).

## Capítulo 1: Revisión bibliográfica

Tabla 1.8. Cantidad de lípidos (% peso seco) producidos por las microalgas

Agua	Microalga	Lípidos (% peso seco)
Agua dulce	<i>Chlorella emersonii</i>	63
	<i>Chlorella protothecoides</i>	11 - 59
	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	27
	<i>Chlorella sorokiniana</i>	13 - 23
	<i>Chlorella saccharophila</i>	18 - 54
	<i>Chlorella sp.</i>	19 - 43
	<i>Chlorella vulgaris</i>	15 - 58
	<i>Chlorella zofingiensis</i>	51
	<i>Chlorella pluvialis</i>	35
	<i>Neochloris oleoabundans</i>	26 - 38
	<i>Scenedesmus dimorphus</i>	31
	<i>Scenedesmus incrassatulus</i>	8 - 12
	<i>Scenedesmus obliquus</i>	10 - 43
	<i>Scenedesmus rubescens</i>	27 - 43
	<i>Scenedesmus sp.</i>	7 - 53

La acumulación de lípidos se atribuye a un consumo de azúcares mayor al crecimiento celular, que favorece la conversión a lípidos de los azúcares en exceso. Sin embargo, y por regla general, las microalgas con alto contenido lipídico no presentan altas velocidades de crecimiento. Es por ello que lo que se busca optimizar es la producción neta de lípidos por unidad de volumen de reactor o de superficie ocupada (Vargas, 2016).

Sin embargo, los principales problemas técnicos de la obtención de biodiesel a partir de microalgas radican en la dificultad de la extracción de los lípidos de las células. Estos procedimientos son complejos y están todavía en fase de desarrollo. Los principales problemas económicos derivan, por tanto, del alto precio de la tecnología necesaria, así como del hecho que compiten con precios de carburantes relativamente bajos (Vargas, 2016).

### 1.4- Ventajas e inconvenientes en la utilización de biodiesel como combustible

Con respecto a las ventajas del biodiesel frente a los combustibles fósiles, el biodiesel es un biocombustible no tóxico, libre de azufre, derivado de una fuente renovable de energía y biodegradable, degradándose cuatro veces más rápido que el diésel fósil (Serna et al., 2011). Además, es un combustible oxigenado, por lo que su combustión es completa en comparación al diésel derivado del petróleo y no contribuye al efecto invernadero al producir menos emisiones indeseables (hidrocarburos volátiles,

## Capítulo 1: Revisión bibliográfica

monóxido de carbono y partículas en suspensión) (Tabla 1.9) (Ramírez et al., 2012). Este biocombustible presenta mayores características de lubricación que el diésel de base fósil, siendo asimismo un biocarburante capaz de operar bajo cualquier porcentaje (B100, B50, B30, B5) en combinación con su homólogo derivado del petróleo (Serrano-Ruiz and Luque, 2011).

**Tabla 1.9. Por ciento de disminución de emisiones del biodiesel con respecto al diésel**

Tipo de emisión	Efecto respecto al diésel (%)
Monóxido de carbono	- 44
Partículas en suspensión	- 40
Hidrocarburos totales sin quemar	- 68
Óxidos de nitrógeno	+ 6 (excepto en el biodiesel de microalgas donde son menores)

Por otro lado, muestra inconvenientes al tener un detrimento en un 3% de su potencia energética, puede presentar problemas de cristalización a bajas temperaturas (menores a 0°C), al ser un producto hidrófilo y degradable es necesaria la planificación exacta de su producción y expedición, de no ser así se degrada notoriamente más rápido que el petrodiesel. Además que su proceso productivo global tiene mayores costes que los asumidos en el diésel de origen petrolífero (BERRÍOS and SKELTON, 2008).

### Conclusiones parciales

- ✓ El uso de los biocombustibles puede constituir una fuente de alternativa para la independencia de la economía en base a combustibles fósiles.
- ✓ La obtención del biodiesel a partir de microalgas es una vía para ir sustituyendo el empleo de los hidrocarburos y a su vez disminuir los efectos negativos que tienen sobre el medio ambiente.
- ✓ Existen diferentes métodos para la obtención de biodiesel los cuales son: uso directo y mezcla de aceites vegetales con gasoil, las microemulsiones, craqueo térmico y la transesterificación, siendo esta última la más utilizada mundialmente.

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

### 2.1- Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

Como se mencionó anteriormente en la literatura se han reportado diferentes vías para la obtención de biodiesel. Entre ellas los procesos por reacciones de transesterificación han sido los más estudiados (CABEZA and ROJAS, 2009). En Cuba, hasta el momento, no se ha instalado ninguna planta para la producción de biodiesel, es por ello que si se desea trabajar en este sentido se hace necesario plantear una metodología que permita identificar, cuáles de los métodos de obtención resultan técnica y económicamente factibles aplicar, logrando así una herramienta que facilite el criterio de selección de la propuesta final. Esta metodología es la que se muestra a través del diagrama de la figura 2.1 y propuesta por (Martínez, 2017).

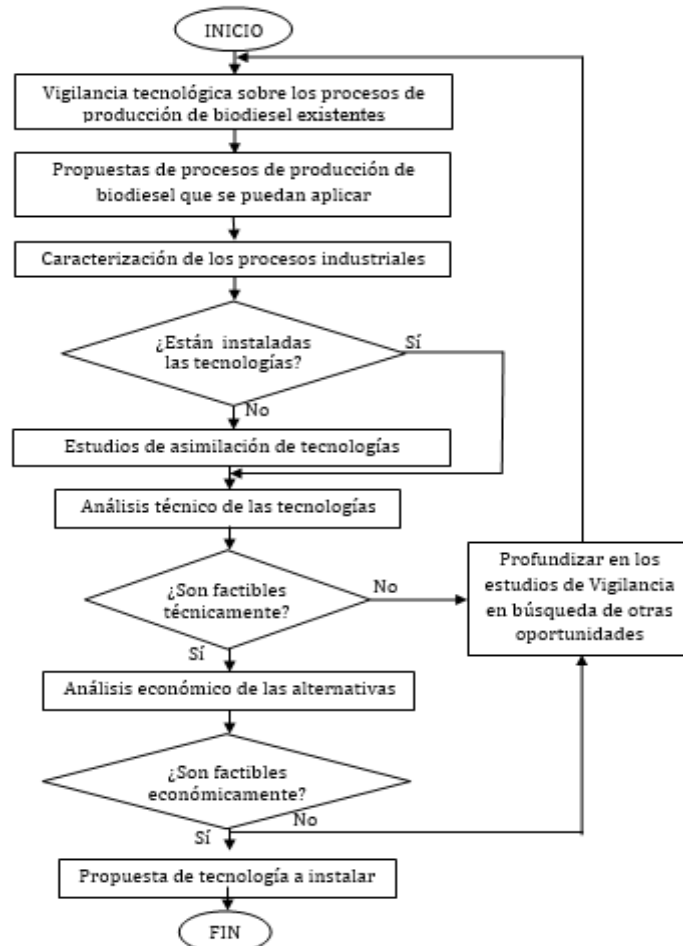


Figura 2.1. Diagrama heurístico para el análisis de alternativas de producción de biodiesel.

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

### 2.2- Propuestas de procesos de producción de biodiesel

De los métodos de producción de biodiesel planteados inicialmente se considerarán en el presente estudio dos de los que se realizan por medio de la reacción de transesterificación: los que se realizan en medio básico y los que utilizan metanol supercrítico.

La transesterificación catalizada por álcalis es más rápida que la catalizada por ácidos y es la que se suele utilizar a escala comercial, aunque se debe tener en cuenta que los glicéridos y el alcohol deben ser sustancialmente anhidros, para evitar que el agua cambie la reacción parcialmente hacia una saponificación, produciendo jabones. Por otra parte, la transesterificación llevada a cabo por medio de fluidos en condiciones supercríticas permite que el rendimiento sea mayor que por medio de un proceso convencional, además, en ella se alcanza mayor rendimiento y la purificación de los productos finales se hace más sencilla (Vargas, 2016).

### 2.3- Selección de la materia prima portadora de aceite.

Las microalgas se presentan como una fuente con gran reserva de aceites dada su eficiencia fotosintética que las convierte en una materia prima importante para la producción de biodiesel (Alva et al., 2014). Dentro de ellas las especies del género *Chlorella* se destacan por tener un contenido de lípidos entre el 10 y el 60 % aproximadamente. Considerando esto, se propone trabajar en la presente investigación con biomasa de la especie de microalga *Chlorella sp* en la cual se puede alcanzar hasta un 43 % de lípidos. Su composición de forma general se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición de la especie *Chlorella sp*.

Especie	Proteínas (% peso seco)	Carbohidratos (% peso seco)	Lípidos (% peso seco)	Ácidos nucleicos (% peso seco)
<b>Chlorella sp</b>	52 - 68	11 - 16,1	11,4 - 43	5,1 - 7

La composición de ácidos grasos de esta especie reportada en (Vargas, 2016) está dada por los valores de ácidos grasos presentes en la tabla 2.2.

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

Tabla 2.2. Perfil de ácidos grasos (%) del microalga *Chlorella sp.*

Ácido Graso	Biomasa <i>Chlorella sp.</i> (%)
Palmítico	23,13
Palmitoleico	0,40
Heptadecanoico	0,26
Esteárico	4,76
Oleico	26,33
Linolelaílico	0,39
linoléico	14,09
Araquídico	6,34
Cis 11- Eicosenoico	0,52
Alfa - Linoléico	9,03
Behénico	0,24

### 2.4- Caracterización de los procesos considerados.

#### 2.4.1- Caracterización de la producción de biodiesel por transesterificación en medio básico.

Las microalgas secas con un contenido de 40% de aceite, se someten a un proceso de extracción del aceite, realizándose en una etapa combinada. Inicialmente se realiza una extracción mecánica mediante una prensa de aceite donde se extrae aproximadamente el 65 % del mismo, posteriormente el sólido resultante se somete a un proceso de lixiviación utilizando como solvente hexano lográndose separar un 65 % del aceite (Pardal, 2012). La mezcla líquida resultante de la lixiviación es evaporada para recuperar el solvente en forma de vapor, el cual es condensado y reincorporado al proceso adicionándole un 11,87% de reposición (Santander, 2013) .

Seguidamente ocurre la transesterificación de los ácidos grasos, donde tienen lugar tres reacciones reversibles y consecutivas, esto ocurre en presencia de hidróxido de potasio como catalizador (Leyva and Ramos, 2009). El triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción es liberado un mol de éster metílico. Las condiciones de operación son: 60°C, presión atmosférica, velocidad de agitación 200 rpm, relación molar de alcohol/aceite 1:3 y tiempo de contacto 90 minutos. La mezcla obtenida es neutralizada adicionándole ácido ( $H_2SO_4$ )

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

para evitar que el catalizador básico en exceso reaccione con los ácidos grasos libres y que se formen jabones indeseados en el producto final (CORRO et al., 2011).

La mezcla resultante es evaporada para separar el metanol en exceso. Los vapores de metanol son condensados y enviados a un tanque de almacenamiento para luego ser aprovechados en el primer reactor.

Por último, la corriente libre de metanol que contiene metiléster, glicerina, y sales se envía al decantador, en el cual se obtienen dos fases, una mezcla de glicerina, sales e impurezas (jabones, catalizadores ácidos) y el biodiesel. Esta etapa se realiza a 25°C y presión atmosférica (Alva et al., 2014). En la figura 2.2 se muestra el diagrama detallado del proceso de obtención de biodiesel por transesterificación básica.

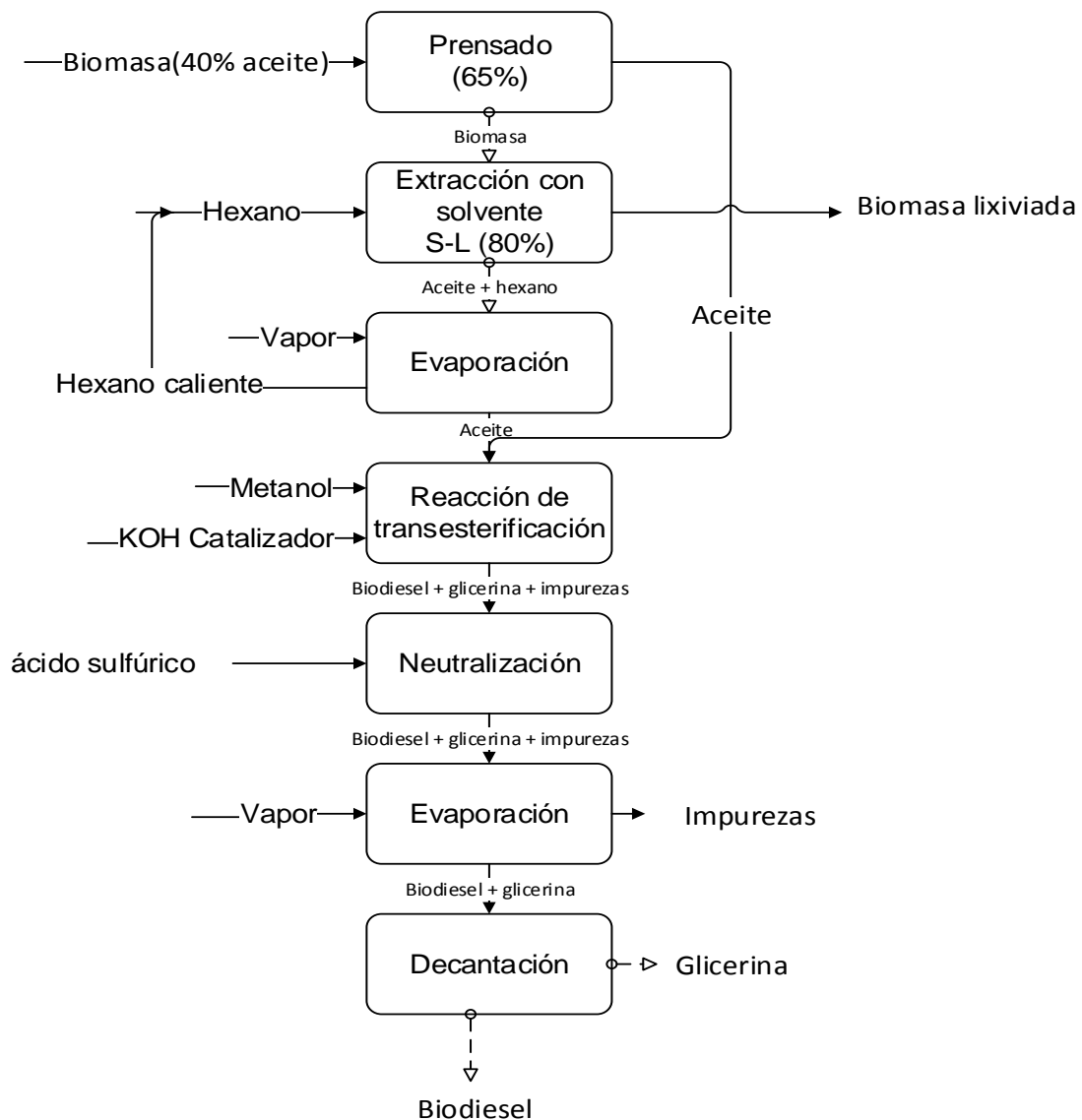


Figura 2.2. Diagrama de bloques del proceso de producción de biodiesel por transesterificación básica

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

### 2.4.2- Balances de materiales en la obtención de biodiesel por transesterificación básica.

Para realizar los balances se considera el proceso en tres etapas fundamentales: extracción del aceite (incluye la extracción por vía mecánica y con solvente, así como la recuperación del solvente empleado), reacción química (incluye la reacción de transesterificación) y por último la purificación del producto final (considera las etapas de neutralización, recuperación del metanol y decantación). Se toma como capacidad de la planta 1200 kg de algas, siendo una de las capacidades de plantas de este tipo existentes a nivel comercial (CAMPUSANO, 2008).

#### ✓ Extracción del aceite.

La biomasa es generalmente prensada mecánicamente con el fin de extraer la mayor cantidad del aceite disponible en la materia prima. El contenido de aceite residual es posteriormente recuperado en la etapa de extracción con solventes (Chico and Llaxacondor, 2013). En la lixiviación ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto se difunde desde el sólido hasta la fase líquida, produciendo una separación de los componentes originales del sólido. La recuperación del solvente se logra por evaporación, mediante la cual se elimina el vapor formado por ebullición de la solución para así obtener el aceite concentrado (Hernández et al., 2014). Los resultados de los balances se muestran en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3. Resultados de los balances en la etapa de extracción de aceite**

Datos	Ecuaciones	Valores	Unidad
<b>PRENSADO</b>			
Alga seca (As)	$A_{sp} = \left(\frac{\text{Extracción}}{100}\right) * C_{ai}$ $A_p = A_s - A_{sp}$	1200,00	kg/d
Concentración de aceite inicial		40	%
Extracción		65	%
Cantidad de aceite inicial (Cai)		480,00	kg/d
Aceite salida de la prensa (Asp)		312,00	kg/d
Alga prensada (Ap)		888,00	kg/d
<b>LIXIVIACION</b>			
$\rho$ alga seca	$S_r = E_1 + B(\text{inerte en el sólido})$ $S_f = \frac{((Y_F * F) - (Y_1 * E_1))}{X_1}$	141	kg/m <sup>3</sup>
$M_{\text{hexano}} = 1,5 * M_{\text{alga seca}}$		1332	kg/d
80% extracción			
4% pérdida de hexano			
F(Aliment. del sólido) = A + C		168,00	kg disol
A(Hexano en el sólido)		0	kg
B(inerte en el sólido)		720,00	kg
$Y_F = C/(A+C)$		1	kg <sub>aceite</sub> /kg <sub>disol</sub>

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

$N_F = B/(A+C)$		4,29	kg <sub>inerte</sub> /kg <sub>disol</sub>
$Y_1 = 20\% * Y_F$		0,20	kg <sub>aceite</sub> /kg <sub>disol</sub>
$X_1$		0,10	kg <sub>aceite</sub> /kg <sub>disol</sub>
$E_1$		86,88	kg
C(aceite en el sólido)		168,00	kg
Sólido resultante (Sr)		806,880	kg
Solución final (Sr)		1446,72	kg <sub>disol</sub>
<b>EVAPORACION DE HEXANO</b>			
Aceite separado	$Aceite\ separado = Sf * X1$	150.624	kg <sub>aceite</sub>
Hexano recuperado (Hr)	$Hr = Sf - Aceite\ separado$	1296,10	kg <sub>hexano</sub>

### ✓ Reacción química

La reacción de transesterificación se realiza con metanol utilizando hidróxido de potasio como catalizador básico, según se muestra en la figura 2.3. Los principales resultados de los balances en esta etapa se resumen en la tabla 2.4, mientras que de forma detallada aparecen en el Anexo 1.

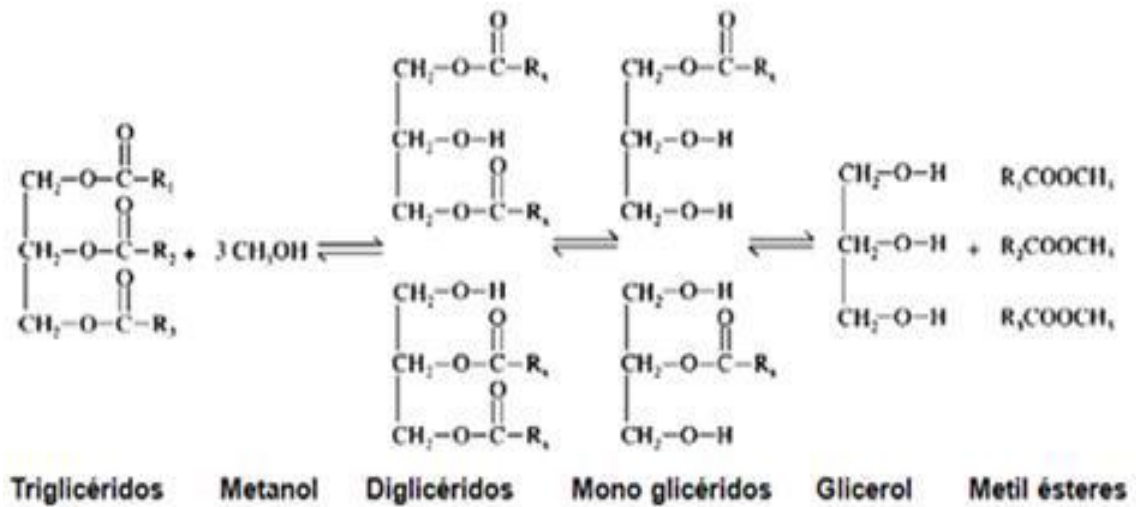


Figura 2.3. Reacción general de transesterificación

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

**Tabla 2.4. Resultados de los balances en la etapa de transesterificación básica**

Datos	Ecuaciones	RESULTADOS	Unidad
<b>Aceite</b>	$n^o = \frac{m_{inicial}}{M}$ Moles iniciales	462,62	kg
<b>Metanol</b>	$n_{ae} = n_a^o - n_a^o * \frac{a}{a} * x_a$	77,10	kg
<b>Glicerina</b>		0	kg
<b>KOH</b>	Moles en equilibrio de reactantes	9,25	kg
<b>Éster 1</b>	$n_{ce} = n_c^o + n_a^o * \frac{c}{a} * x_a$	57,88	kg
<b>Éster 2</b>		373,86	kg
<b>Otros ésteres</b>	Moles en equilibrio de productos	0	kg
<b>Biodiesel</b>	$K_{equilibrio} = \frac{n_D^d * n_C^c}{n_A^a * n_B^b} * \left(\frac{P}{n_T}\right)^{\Delta n}$	222,05	kg
	Constante de equilibrio $m_{biod} = m_{éster 1} + m_{éster 2} + m_{otros ésteres}$		

- ✓ Purificación del producto final

La neutralización ácido base es un proceso mediante el cual un ácido reacciona con una base o hidróxido y da como resultado una sal y agua. La más común es la reacción de un ácido fuerte contra una base fuerte. Por su parte la decantación consiste en separar componentes que contienen diferentes fases siempre y cuando exista una diferencia significativa entre sus densidades (Castillo et al., 2017). En este caso se separa el biodiesel de la glicerina. Los resultados para los balances en la neutralización, evaporación del metanol y decantación se muestran en la tabla 2.5.

**Tabla 2.5. Resultados de los balances en la purificación del biodiesel en el proceso de transesterificación básica**

NEUTRALIZACION			
Datos	Ecuaciones	Valores	Unidad
<b>Masa reacción-2 (<math>M_{reacc 2}</math>)</b>	$M_{neutraliz} = M_{ácido} - M_{reacción2}$	369,347	kg
<b>Masa de Acido =Maceite</b>		462,624	kg
<b>Masa neutraliz</b>		831,971	kg
EVAPORACION DE METANOL			
<b>Metanol recuperado</b>	$Met_{exc} = K_{mol\ aceite} * Cant_{aceit}$	58,310	kg
<b>Mezcla resultante</b>	$M_{mezcla} = M_{neutraliz} - M_{met exc}$	7773,66	kg
DECANTACION			
<b>Residuo líquido</b>	$M_{residuo} = M_{mezcla} - M_{biodiesel}$	514,92	kg
<b>Biodiesel</b>		258,743	kg

**2.5- Caracterización de la producción de biodiesel por transesterificación con metanol supercrítico.**

La transesterificación supercrítica es un método alternativo de catálisis, donde las condiciones extremas a las que se lleva el metanol ( $T > 290^{\circ}\text{C}$ ,  $P > 10\text{MPa}$ ) favorecen la cinética de la reacción así como también la transferencia de masa, pues forman una sola fase con el aceite. La ventaja de este método es que es libre de catalizador e insensible a la acidez de la materia grasa. Con temperaturas de  $350^{\circ}\text{C}$ , presión de 43 MPa y una relación molar metanol:aceite de 42:1, este proceso logra la conversión total en un menor tiempo que el método convencional (Lucca et al., 2014).

El proceso diseñado requiere de al menos cinco operaciones: mezclado, calentamiento, transesterificación, destilación y decantación (figura 2.4). La mezcla inicial se realiza con aceite de microalgas y metanol, ambos a una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  y presión de 1 atm, la cual es calentada hasta  $240^{\circ}\text{C}$  y llevada hasta 70 bar de presión. Seguidamente es añadida a un reactor en condiciones supercríticas para una conversión en biodiesel aproximada del 90 %, obteniéndose además glicerina y metanol; luego se envía a una columna de destilación para separar el metanol en exceso de los compuestos productos de la reacción. Por último se utiliza un decantador donde se separa el biodiesel de la glicerina formada (Lucca et al., 2014). En la figura 2.4 se muestra el diagrama del proceso descrito anteriormente.

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

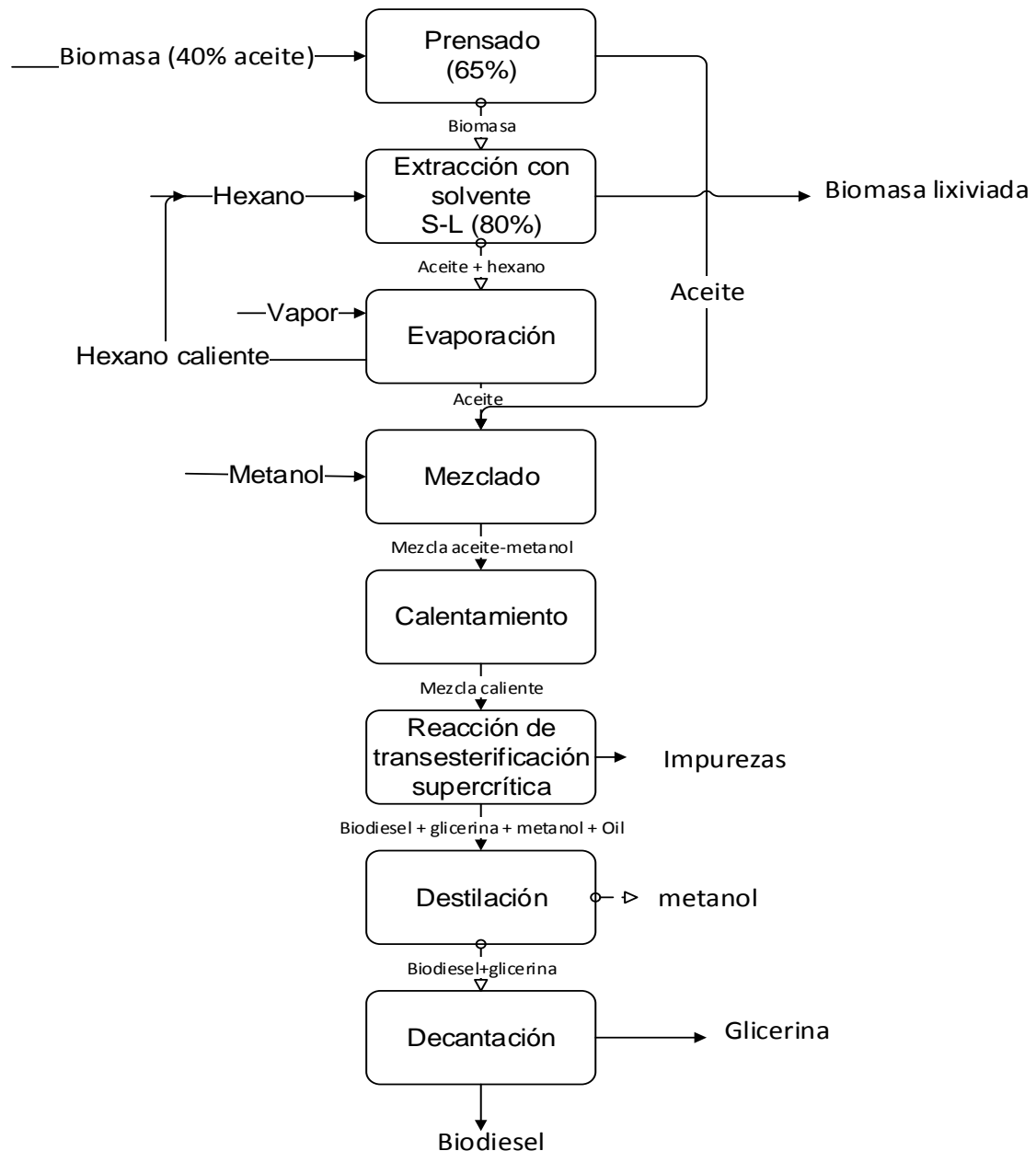


Figura 2.4. Diagrama de bloques del proceso de producción de biodiesel por transesterificación supercrítica

### 2.5.1- Balances de materiales en la obtención de biodiesel por transesterificación supercrítica

De igual forma que en la obtención de biodiesel utilizando transesterificación básica, la transesterificación con metanol supercrítico consta de tres etapas fundamentales: la extracción del aceite (la extracción por vía mecánica y con solvente), la reacción de transesterificación y la purificación del producto final (separación del metanol en exceso y decantación). En esta alternativa se trabaja con la misma capacidad de 1200 kg/d de biomasa de algas (CAMPUSANO, 2008).

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

- ✓ Extracción del aceite.

Como esta etapa se mantiene para los dos métodos considerados para la producción de biodiesel, los resultados en la extracción de aceite son los que aparecen en la tabla 2.2.

- ✓ Reacción química

Los trabajos más relevantes relacionados con cinética de metanólisis supercrítica, suponen una reacción simple irreversible de primer orden como el mejor modelo. En (Lucca et al., 2014) indica apropiado trabajar con una relación 42:1 sin correr el riesgo de perjudicar la reacción por un exceso de alcohol obteniendo una conversión casi completa con un rendimiento de 95% de ésteres metílicos.

Considerando lo planteado anteriormente se realizan los balances para esta etapa siendo los que se muestran en la tabla 2.6.

**Tabla 2.6. Resultados de los balances en la etapa de transesterificación supercrítica**

Datos	Ecuaciones	RESULTADOS	Unidad
<b>Aceite</b>	$n^o = \frac{m_{inicial}}{M}$ Moles iniciales	462	kg
<b>Metanol</b>	$n_{ae} = n_a^o - n_a^o * \frac{a}{a} * x_a$	2217,6	kg
<b>Glicerina</b>		0	kg
<b>KOH</b>	Moles en equilibrio de reactantes	9,25	kg
<b>Éster 1</b>	$n_{ce} = n_c^o + n_a^o * \frac{c}{a} * x_a$	57,88	kg
<b>Éster 2</b>	Moles en equilibrio de productos	0	kg
<b>Otros ésteres</b>	$K_{equilibrio} = \frac{n_D^d * n_C^c}{n_A^a * n_B^b} * \left(\frac{P}{n_T}\right)^{\Delta n}$	0	kg
<b>Biodiesel</b>		Constante de equilibrio $m_{biod} = m_{\text{éster 1}} + m_{\text{éster 2}} + \text{otros ésteres}$	431,49

- ✓ Purificación del producto final

A pesar de utilizar gran relación molar en la alimentación de los reactantes la conversión no es completa y en consecuencia se realiza la separación de glicéridos no reaccionados mediante destilación a presión reducida, con el objeto de separar el biodiesel puro de los componentes no reaccionados y reciclar el metanol. Además de separar la glicerina formada del biodiesel por decantación (Manuale, 2011). Los resultados para los balances en la destilación del metanol y decantación se muestran en la tabla 2.7.

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

Tabla 2.7. Resultados de los balances en la purificación del biodiesel en la transesterificación supercrítica

DESTILACION			
Datos	Ecuaciones	Valores	Unidad
Alimentación (F)	$F = D + W$ $Z_f * F = X_d * D + X_w * W$	926,61	kg
Comp metanol aliment ( $Z_f$ )		0,77	
Destilado (D)		330,03	kg
Comp metanol dest. ( $X_d$ )		1	
Biodiesel+Glicerina (W)		596,58	kg
Comp. Metanol Biod+Glic ( $X_w$ )		0,64	
DECANTACION			
Residuo líquido	$M_{residuo} = M_{mezcla} - M_{biodiesel}$	195,61	kg
Biodiesel		400,97	kg

### 2.6- Simulación en Aspen HYSYS del proceso de obtención de biodiesel de aceite de microalgas.

El simulador profesional Aspen HYSYS es una herramienta de proceso líder en el mercado de modelado para el diseño conceptual, la optimización, planificación empresarial, gestión de activos, y las industrias de separación de aire (Simulation, 2015).

Este simulador de procesos es principalmente utilizado por la industria del petróleo y gas, debido a la amplia gama de paquetes termodinámicos que posee, aunque otras industrias del rubro como la química, de energía, de alimentos, entre otras, también lo utilizan (Chico and Llaxacondor, 2013). Entre sus ventajas, permite simular procesos industriales tanto en estado estacionario como en estado dinámico, implementar lazos de control, optimizar procesos, dimensionar operaciones unitarias así como estimar los costos de equipos. Sin embargo, no es un software de fácil manejo, requiere de conocimientos específicos de ingeniería química (Aspen Technology, 2012). Actualmente pertenece al paquete Aspen ONE de la empresa canadiense Aspentech y está posicionado como un simulador de procesos industriales líder en el mercado mundial, por más de veinticinco años (Ramos et al., 2015).

#### 2.4.1- Simulación del proceso de biodiesel por transesterificación básica.

En este caso se realiza la simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de microalgas mediante la transesterificación básica (figura 3.1). Para realizar esta simulación, en ambos casos, se considera el proceso a partir del aceite ya extraído

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

de la biomasa de microalgas. Se desprecian las dos primeras etapas de ambos procesos pues este simulador no permite trabajar con corrientes sólidas.

En la simulación por transesterificación básica, se declararon inicialmente los componentes que permitirían crear las corrientes así como las reacciones químicas para la conversión de los ácidos grasos a ésteres al reaccionar con el metanol. Estos componentes y sus composiciones se especifican en la tabla 2.8.

**Tabla 2.8. Compuestos necesarios para la simulación**

Compuesto	Composición (%)
<b>Aceite</b>	Ácido linoleico= 59,88
	Ácido palmítico= 4,71
	Ácido esteárico= 0,51
	Ácido oleico= 34,9
<b>Metanol</b>	100
<b>KOH</b>	100
<b>Biodiesel</b>	
<b>Glicerol</b>	100

Se mezcla previamente el metanol con el catalizador de la reacción (KOH), llevándose por medio de un intercambiador de calor hasta la temperatura de reacción. En este caso se utiliza una relación molar de metanol-aceite de 1,5:1. Por su parte la corriente de aceite también fue calentada para ser alimentada al reactor de conversión junto a la mezcla de metanol y catalizador ya preparada. En el reactor se convierten los principales ácidos grasos presentes en el aceite a sus respectivos ésteres, estas reacciones ocurren con un 51,23 % de conversión (Ramos et al., 2015). Según los resultados de la simulación el metanol que no reaccionó sale en la corriente de vapor del reactor, por tal motivo la mezcla formada se envía directamente a un decantador para separar el producto final deseado y la glicerina como coproducto. Los principales resultados alcanzados en la simulación se ofrecen en la tabla 2.9 y el diagrama final del proceso en la figura 2.5.

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

Tabla 2.9. Resultados alcanzados en la simulación de transesterificación básica

Etapa	Corriente	Condiciones	Composición (% masa)
Mezclado	Metanol+ KOH	F= 81,72 kg/h T= 65 °C P= 3,95 atm	Metanol= 95,5 KOH= 4,5
	Aceite	F= 462 kg/h T= 65 °C P= 3,95 atm	Ácido linoleico= 59,78 Ácido palmítico= 5,13 Ácido esteárico= 0,501 Ácido oleico= 34,58
Reacción química	Producto de la reacción (Glicerol+Biodiesel)	F= 543,72 kg/h T= -2,6 °C P= 1 atm	M- Oleato= 11,12 M- Linoleato= 19,21 M- Estearato= 0,17 Glicerina= 31,57
Decantación	Biodiesel	F= 228,78 kg/h T= 285,3 °C P= 1 atm	M- Oleato= 36,46 M- Linoleato= 63,00 M- Estearato= 0,53
	Glicerina	F= 314,94 kg/h T= 311,2 °C P= 1 atm	Glicerina= 45,42

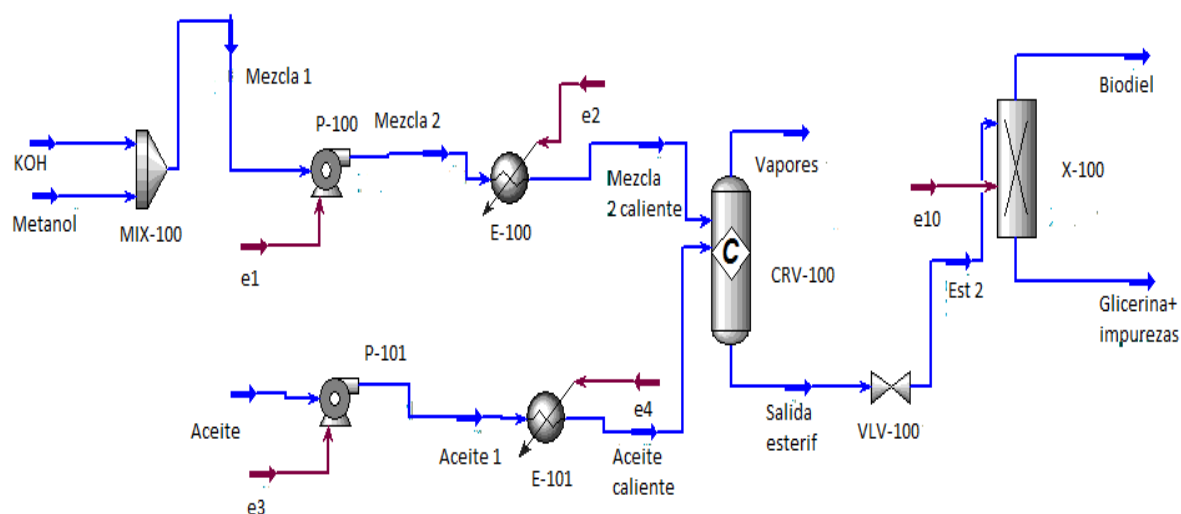


Figura 2.5. Diagrama de flujo del proceso de transesterificación básica

**2.4.2- Simulación del proceso de biodiesel por transesterificación con metanol supercrítico.**

La simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de microalgas mediante la transesterificación con metanol supercrítico igualmente se considera a partir del aceite ya extraído de la biomasa de microalgas, despreciándose las dos primeras etapas.

De la misma forma que en el caso anterior, se identifican los componentes que permiten crear las corrientes así como las reacciones químicas para la conversión de los ácidos grasos a ésteres. Para el presente caso coinciden con los presentes en la tabla 2.7, exceptuando la presencia del KOH, pues una de las ventajas que tiene realizar el proceso por transesterificación supercrítica es trabajar en ausencia de catalizador.

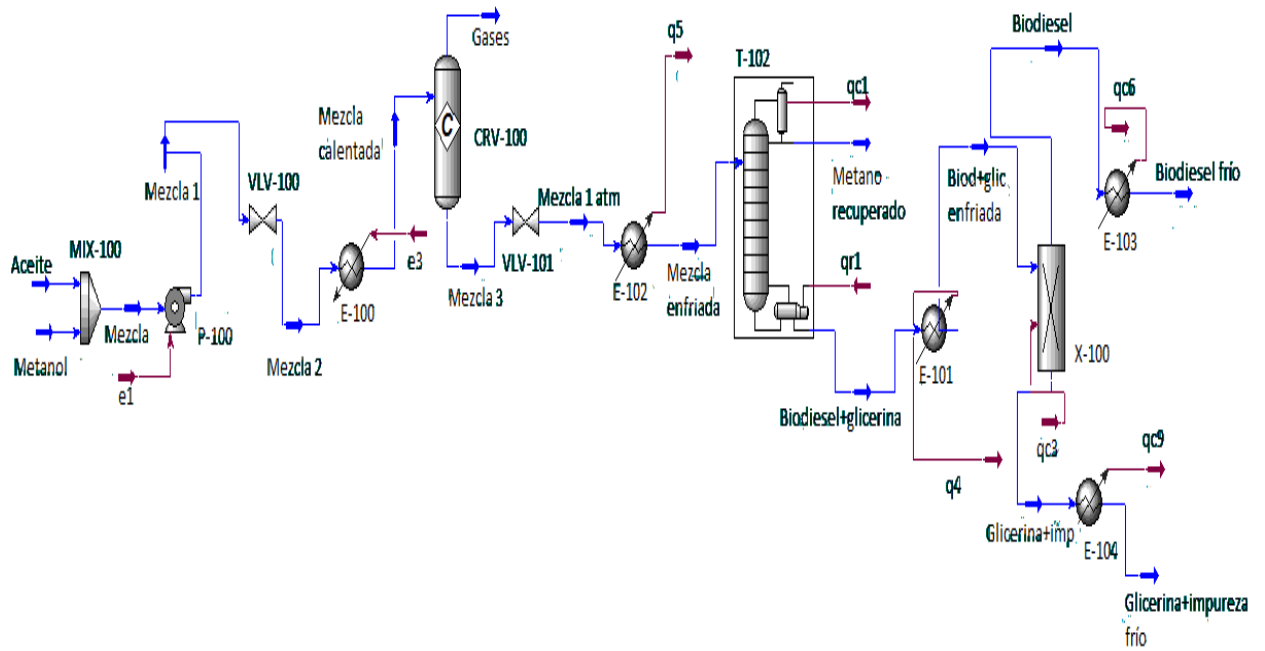
La simulación por este método se realizó según lo reportado por (Lucca et al., 2014). Primeramente se mezclaron el metanol y el aceite, para ser llevados a las condiciones de presión y temperatura supercrítica de 70 atm y 246,9 °C respectivamente. En el reactor ocurre la reacción de transesterificación con una conversión del 89,90 %, siendo necesario utilizar una relación molar 42:1 de metanol/aceite. En este proceso se separa el metanol en exceso a través de una destilación, con el objetivo de obtener este producto de forma pura y que pueda ser reincorporado a la etapa de reacción. Finalmente se purifica el biodiesel separándolo por decantación de la glicerina. Los principales resultados alcanzados en la simulación se ofrecen en la tabla 2.10 y el diagrama final del proceso en la figura 2.6.

## Capítulo 2: Proceso de obtención de biodiesel de microalgas

**Tabla 2.10. Resultados alcanzados en la simulación de transesterificación supercrítica**

Etapa	Corriente	Condiciones	Composición (% masa)
<b>Mezclado</b>	Mezcla (Metanol-Aceite)	F= 1173,4 kg/h T= 36,5 °C P= 1 atm	Metanol= 95,5 Ácido linoleico= 4,14 Ácido palmítico= 0.36 Ácido esteárico= 0.034 Ácido oleico= 2,39
<b>Reacción química</b>	Productos de la reacción (Vapores) Metanol	F= 246,81 kg/h T= 247,5 °C P= 70 atm	Metanol= 99
	Productos de la reacción (Fondo) (Glicerol+Biodiesel+metanol)	F= 926,61 kg/h T= 247,6 °C P= 70 atm	M- Oleato= 3,72 M- Linoleato= 6,43 M- Estearato= 0,54 Glicerina= 10,54 Metanol= 77,4
<b>Destilación</b>	Metanol recuperado	F= 330,03 kg/h T= 64,48 °C P= 1 atm	Metanol= 100
	Biodiesel+glicerina	F= 596,58 kg/h T= 282,77 °C P= 1 atm	M- Oleato= 16,47 M- Linoleato= 28,43 M- Estearato= 0.24 Glicerina= 46,66
<b>Decantación</b>	Biodiesel	F= 400,97 kg/h T= 285,35 °C P= 1 atm	M- Oleato= 36,49 M- Linoleato= 63,0 M- Estearato= 0,53
	Glicerina	F= 195,61 kg/h T= 295,7 °C P= 1 atm	Glicerina= 85,07

## Capítulo 2: *Proceso de obtención de biodiesel de microalgas*



**Figura 2.6. Diagrama de flujo del proceso de transesterificación no catalítica en condiciones supercríticas**

### **Análisis de resultados**

- ✓ Los balances de materiales y energía permitieron conocer los valores de las principales corrientes en los procesos de obtención de biodiesel a partir de microalgas.
- ✓ El proceso de transesterificación con metanol supercrítico presenta mayor producción del biodiesel con respecto a la reacción básica.
- ✓ La simulación en el Aspen HYSYS demuestra que los procesos obtuvieron rendimientos altos de biodiesel y glicerina pero difieren fundamentalmente en el número de equipos necesarios, lo que repercute necesariamente en los costos de inversión.

## ***Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas***

### **3.1- Dimensionamiento de los equipos principales de producción de biodiesel**

El dimensionamiento de los equipos y las instalaciones de la planta es uno de los aspectos más importantes en un proyecto ingenieril. El primer paso a seguir en el dimensionamiento es la realización de los balances de materia y energía, ya que es la herramienta necesaria para contabilizar los flujos en un determinado proceso industrial y los alrededores o entre las distintas operaciones que lo integran (Tamayo, 2013).

Una vez realizados los balances necesarios se pueden realizar los cálculos iniciales en los que se obtengan las dimensiones principales de los equipos del proceso. Como resultados fundamentales se deben indicar para cada equipo dimensiones tales como la altura, diámetro, largo, volumen, caudal, etc.

En este caso se considerará solamente el diseño de la producción de biodiesel a partir de la transesterificación básica, ya que el diseño del equipamiento por transesterificación supercrítica es más engorroso y requiere de datos específicos que no se disponen en la bibliografía consultada.

#### **3.1.1- Dimensionamiento de los equipos principales de producción de biodiesel por transesterificación básica.**

El diseño de los principales equipos para la producción de biodiesel por transesterificación básica se muestra en las siguientes tablas.

La selección del filtro prensa vertical se realiza utilizando la tabla 17 (Rosabal and Valle, 1989) obteniéndose el siguiente modelo:

**Tabla 3.1. Diseño del filtro prensa**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Selección del filtro</b>	FIG-80-1 000/25K
<b>Superficie de filtración</b>	80 m <sup>2</sup>
<b>Presión máxima de filtración</b>	0.4 MPa
<b>Espesor de lámina o marco</b>	25 mm
<b>No de elementos de filtración</b>	40

Para corroborar el diseño se consideró el espesor de la torta (h) como criterio de diseño importante, éste plantea que para filtros prensa verticales, el valor de  $h_{\text{máximo}} = \frac{1}{2}$  espesor del marco, siendo  $h_{\text{máximo}} \geq h$  para que el diseño sea correcto.

$$h_{\text{máx}} = \frac{1}{2} * 25 \text{ mm} = 12,5 \text{ mm} = 12,5 * 10^{-3} \text{ m} > 8,28 * 10^{-3} \text{ m}$$

Como se cumple que  $h_{\text{máximo}} > h$ , el diseño es correcto.

*Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas*

**Tabla 3.2. Diseño del mezclador de la etapa de lixiviación**

Datos	Ecuación	Resultados
Malga prensada= 888,0 kg M <sub>hexano</sub> = 1332,0 kg ρ <sub>alga</sub> = 141 kg/ m <sup>3</sup> ρ <sub>hexano</sub> = 660 kg/ m <sup>3</sup> ρ <sub>mezcla</sub> = 292,8 kg/ m <sup>3</sup> Sobrediseño= 15%	$MT = \text{Malga prensada} + M_{\text{hexano}}$	M <sub>T</sub> = 227,5 kg
	$V = M_{\text{líquido}} / \rho_{\text{mezcla}}$	V= 7,58 m <sup>3</sup>
	$h = 1,53 D$ $D = \left( \frac{4V}{1,53 \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$	D= 1,85 m h= 2,83 m
	$H = h + 0,15 * h$	3,25 m

**Tabla 3.3. Diseño del filtro**

Datos	Ecuación	Resultados
ρ <sub>suspensión</sub> = 292,8 kg/m <sup>3</sup> μ <sub>mezcla</sub> = 0,07 Pas α=5*10 <sup>13</sup> m/kg (cte) R <sub>m</sub> = 10000000000 (-ΔP)= 0,4 MPa T <sub>auxiliar</sub> = 45 min T <sub>filtración</sub> = 225 min M <sub>suspensión</sub> = 227,5 kg M <sub>torta</sub> = 77,5 kg Malga seca= 150 kg M <sub>inerte</sub> = 70%Malga seca=105 kg M <sub>líquido en torta</sub> = 7,5 kg M <sub>filtrado</sub> = 151,5 kg ρ <sub>filtrado</sub> = 670 kg/m <sup>3</sup>	$x = \text{minerte} / M_{\text{suspensión}}$	0,461
	$Xt = \text{minerte} / M_{\text{torta}}$	0,978
	$X = x / (1 - x)$	0,857
	$Xt = x / (1 - x)$	46,25
	$H_{\text{dadtorta}} = M_{\text{líquido en torta}} / M_{\text{torta}}$	6,991 %
	$1 / \rho_{\text{suspensión}} = 1 / \rho_{\text{torta}} + (1 - x) / \rho_{\text{filtrado}}$	129,85 kg/m <sup>3</sup>
	$C't = xt * \rho_{\text{torta}}$	127,1 kg/m <sup>3</sup>
	$C's = x * \rho_{\text{suspensión}}$	135,13 kg/m <sup>3</sup>
	$Cs = X * \rho L$	574,29 kg/m <sup>3</sup>
	$C = CS / (1 - CS / xt * \rho_{\text{filtrado}})$	585,14 kg/m <sup>3</sup>
	$V_{\text{filtrado}} = M_{\text{filtrado}} / \rho_{\text{filtrado}}$	0,226 m <sup>3</sup>
	$\frac{V}{S} = \frac{\frac{t_f}{\mu} * (-\Delta P)}{\frac{\alpha C}{2} \left( \frac{V}{S} \right) \text{suspens} + R}$	3,13E <sup>-11</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
	$S = V / (V/S)$	72,1 m <sup>2</sup>
	$H = (C * V) / (C_t * S)$	0,014 m

*Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas*

**Tabla 3.4. Dimensionamiento del evaporador de hexano**

Datos	Ecuación	Resultados
$\rho_{aceite} = 1060 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{hexano} = 660 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{liquido} \text{ (ecuac de Pavlov)} = 670,01 \text{ kg/m}^3$ $M_{hexano} = 84 \text{ kg/kmol}$ $M_{aceite} = 643,52 \text{ kg/kmol}$ $m_{hexano} = 194,04 \text{ kg}$ $m_{aceite} = 11,83 \text{ kg}$ $m_{liquido} = 151,5 \text{ kg}$ $\rho_{filtrado} = 670 \text{ kg/m}^3$ Relación (h/D)= 1,53 Sobrediseño= 15 %	$\frac{1}{\rho_{mezcla}} = \frac{X_{aceite}}{\rho_{aceite}} + \frac{X_{hexano}}{\rho_{hexano}}$	$\rho_{mezcla} = 496,46 \text{ kg/m}^3$
	$V = M_{liquido} / \rho_{mezcla}$	0,31 m <sup>3</sup>
	$\text{Fórmula } V = \left( \pi * \frac{D^2}{4} \right) * 1,53 * D$	0,63 m
	$\text{Despeje } D = (4 * V / 1,53 * \pi)^{1/3}$	
	De la relación h/D de obtiene que	46,25
	$H = h + 0,15 * h$	1,11 m

**Tabla 3.5. Resumen del diseño del serpentín del evaporador de hexano**

Parámetros	Valores	Unidades	
<b>Requerimientos energéticos</b>			
Temperatura de trabajo	68,9	°C	
Calor transferido en el evaporador	79088,88	BTU/batch	
Masa de vapor total	29,97	kg/batch	
<b>Diseño del serpentín</b>			
Coeficientes peliculares	Hc	325,8	BTU/hpie <sup>2</sup> °F
	hoi	1500	BTU/hpie <sup>2</sup> °F
Coeficientes totales	Uc	267,65	BTU/hpie <sup>2</sup> °F
	UD	114,46	BTU/hpie <sup>2</sup> °F
Área de transferencia de calor	1,98	pie <sup>2</sup>	
	0,185	m <sup>2</sup>	
Área de una vuelta	2,47	pie <sup>2</sup>	
	0,23	m <sup>2</sup>	
N de vueltas	2		
Altura del serpentín	0,81	m	
Diámetro del serpentín	0,37	m	
Distancia entre vueltas	40,5	cm	

Los datos restantes del serpentín del evaporador de hexano se muestran en el Anexo 2

**Tabla 3.6. Características geométricas del reactor de transesterificación**

Datos	Ecuación	Resultados
$M_{reacc-1} = 504,26 \text{ kg}$ $m_{KOH} = 1,14 \text{ kg}$ $\rho_{reacc-1} = 867,2 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{KOH} = 2040 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{reacc-2} = 919,5 \text{ kg/m}^3$ $X_{eq} = 90,1\%$	$M_{reacc-2} = M_{reacc-1} + MKOH$	$M_{reacc-2} = 505,40 \text{ kg}$
	$V = M_{reacc-1} / \rho_{reacc-1}$	V=0,549m <sup>3</sup>
	$h = 1,53 D$ $D = \left( \frac{4 V}{1,53 \pi} \right)^{1/3}$	D=0,77 m h=1,17 m

*Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas*

Sobrediseño=15%	$H = h + 0,15 * h$	H=1,36 m
-----------------	--------------------	----------

En el Anexo 3 se muestra los datos del diseño de la chaqueta del reactor de transesterificación

**Tabla 3.7. Dimensionamiento del neutralizador**

Datos	Ecuación	Resultados
$M_{reacc-2} = 505,40 \text{ kg}$ $m_{\text{ácido}} = 57 \text{ kg}$ $\rho_{reacc-2} = 919,5 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{\text{ácido}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{neutraliz} = 927,06 \text{ kg/m}^3$ Sobrediseño= 15%	$M_{neutraliz} = M_{reacc-2} + MH_2SO_4$	$M_{neutraliz} = 562,40 \text{ kg}$
	$V = M_{neutraliz} / \rho_{neutraliz}$	$V = 0,60 \text{ m}^3$
	$h = 1,53 D$ $D = \left( \frac{4V}{1,53 \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$	$D = 0,796 \text{ m}$ $h = 0,1,22 \text{ m}$
	$H = h + 0,15 * h$	$H = 1,40 \text{ m}$

**Tabla 3.8. Dimensionamiento del evaporador de metanol**

Datos	Ecuación	Resultados
$m_{neutralizador} = 562,40 \text{ kg}$ $m_{metanol \text{ exc}} = 6,14 \text{ kg}$ $m_{mezcla} = 118,69 \text{ kg}$ $\rho_{metanol \text{ exc}} = 800 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{neutralizador} = 927,06 \text{ kg/m}^3$ comp. del metanol exc= 0.01 comp. de la mezcla= 0,21 Sobrediseño= 15%	$\frac{1}{\rho_{neutralizador}} = \frac{X_{metanol \text{ exc}}}{\rho_{metanol \text{ exc}}} + \frac{X_{mezcla}}{\rho_{mezcla}}$	$\rho_{mezcla} = 198,16 \text{ kg/m}^3$
	$V = M_{neutralizador} / \rho_{neutralizador}$	$V = 0,61 \text{ m}^3$
	$\frac{h}{D} = 1,53$	$h = 1,22 \text{ m}$
	$H = h + 0,15 * h$	$1,40 \text{ m}$

**Tabla 3.9. Resumen del diseño del serpentín del evaporador de metanol**

Parámetros	Valores	Unidades
<b>Requerimientos energéticos</b>		
Temperatura de trabajo	179,91	°C
Calor transferido en el evaporador	59 449,50	BTU/batch
Masa de vapor total	22,57	kg/batch
<b>Diseño del serpentín</b>		
Coeficientes peliculares	Hc	372,09
	hoi	1500
Coeficientes totales	Uc	298,14
	U <sub>D</sub>	119,70
Área de transferencia de calor	1,84	pie <sup>2</sup>
	0,17	m <sup>2</sup>
Área de una vuelta	0,14	pie <sup>2</sup>
	0,013	m <sup>2</sup>
N de vueltas	13	
Altura del serpentín	0,54	m
Diámetro del serpentín	0,04	m

### Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas

Distancia entre vueltas	27	cm
-------------------------	----	----

Los restantes datos del serpentín del evaporador de metanol se exponen en el Anexo 4

**Tabla 3.10. Dimensionamiento del decantador de biodiesel**

Datos	Ecuación	Resultados
$m_{mezcla} = 773,66 \text{ kg}$ $m_{biodiesel} = 258,74 \text{ kg}$ $m_{residuo \text{ líquido}} = 514,91 \text{ kg}$ $\rho_{biodiesel} = 880 \text{ kg/m}^3$	$V = m_{mezcla} / \rho_{mezcla}$	$V = 0,83 \text{ m}^3$
$\rho_{neutralizador} = 927,06 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{residuo \text{ líquido}} = 952,67 \text{ kg/m}^3$ Relación $h/D = 1,53$	$h = 1,53 D$ $D = \left( \frac{4 V}{1,53 \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$	$D = 0,87 \text{ m}$ $h = 1,35 \text{ m}$
Sobrediseño = 15%	$H = h + 0,15 * h$	$H = 1,56 \text{ m}$

#### 3.2- Evaluación económica de la producción de biodiesel

El diseño de una planta incluye estudios económicos que evalúan su rentabilidad sobre la base del cálculo del Costo Total de Inversión, Costo Total de Producción, Ganancias, así como el análisis de los indicadores dinámicos de rentabilidad como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa de Rendimiento Interna (TIR) y el Plazo de Recuperación al Descontado (PRD); de esta forma se determina si es factible o no su montaje y puesta en marcha (Zannol, 2016).

El estimado de los indicadores se realiza aplicando la metodología de (Peters and Timmerhaus, 1991) y los cálculos a través de su programación utilizando el Microsoft Excel.

##### 3.2.1- Planta de producción de biodiesel por transesterificación básica

###### ✓ Costo Total de Inversión (CTI):

$$CTI = Inversión \text{ fija} + Costos \text{ adicionales}$$

$$Inversión \text{ fija} = Costos \text{ directos} + Costos \text{ indirectos}$$

Costo total del equipamiento:

$$Costo \text{ actual} = Costo \text{ original} * (\text{Índice actual} / \text{Índice original})$$

Índice de costo original de 2015: 568,70

Índice de costo actual: 572,90

*Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas*

✓ **Costo Total de Inversión (CTI):**

**Tabla 3.11. Costo total del equipamiento en reacción básica**

Equipos	Costo original (\$)	Costo actual (\$)
<b>Equipamiento tomando como referencia el año 2015</b>		
<b>Prensa</b>	3111,74	3 134,72
Mezclador	7433,81	14 977,42
Filtro	4321,94	4 353,86
Evaporador de hexano	3147,47	3 170,71
Condensador de hexano	10070,17	10 144,54
Reactor de transesterificación	2766,08	2 786,51
Neutralizador	2593,12	2 612,27
Evaporador de metanol	1469,63	1 480,49
Condensador de metanol	6396,56	6 443,80
Decantador	603,62	608,08
Tanque de almacenamiento de aceite	310,44	312,73
Tanque de almacenamiento de hexano	951,02	958,04
Tanque de almacenamiento de metanol	147,82	148,91
Tanque de almacenamiento de biodiesel	172,46	173,74
Tanque de almacenamiento de residuo líquido	154,33	155,47
Bombas centrífugas	1210,20	6 095,71
<b>Costos totales</b>		<b>255 627,083</b>

**Tabla 3.12. Costos directos en reacción básica**

	% CE	Costo (\$)
Adquisición del equipamiento		255 627,083
Entrega del equipamiento	10	25 562,708
Instalación del equipamiento	39	109 664,019
Instalación instrumentación y control	26	73 109,346
Preparación del terreno	12	33 742,77
Tuberías	31	87 168,835
Instalaciones eléctricas	10	28 118,979
Requerimientos y servicios auxiliares	0.55	154 654,385
<b>Costo Total (\$)</b>		<b>733 905,36</b>

**Tabla 3.13. Costos indirectos en reacción básica**

	%CE	Costo(\$)
Ingeniería y supervisión	32	234 849,714
Gastos en construcción	34	249 527,82
Gastos legales	4	11 247,59
Pago al contratista	19	53 426,06
Contingencias	37	104 040,223

### Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas

<b>Costo Total (\$)</b>	<b>675 361,64</b>
-------------------------	-------------------

#### ✓ Costos totales de producción (CTP)

Los costos totales de producción se obtuvieron a partir de los consumos en materias primas, requerimientos, mano de obra, entre otros aspectos.

$$CTP = \text{Costo Total de Fabricación (CTF)} + \text{Gastos Generales (GG)}$$

$$CTF = \text{Costos Directos} + \text{Costos Fijos}$$

**Tabla 3.14. Costos de materia prima en reacción básica**

	Precio (\$/kg)	Consumo anual (kg/año)	Costo (\$/año)
Biomasa seca	3,2	360 000	1 152 000
Metanol	0,7	997	689
KOH	1,22	2 775	3 385,5
Hexano	2	2925	5850
<b>Costo total</b>			<b>1 161 934,5</b>

**Tabla 3.15. Costos de los requerimientos en reacción básica**

Costos de Requerimientos			
	Precio	Consumo (kWh)	Costo (\$/año)
Vapor	0,002 \$/kg	15 662	31 324,0
<b>Costo Total (\$/año)</b>			<b>31 324,0</b>

#### ✓ Ganancia

$$\text{Ganancia} = \text{Valor de la producción} - \text{CTP}$$

$$\text{Valor de Producción} = \text{Precio de venta} * \text{Producción}$$

**Tabla 3.16. Valor de la producción en reacción básica**

Producto	Precio (\$/kg)	Producción (kg/año)	Valor de la producción
Biodiesel	13,567	77 562	1 052 283,65
Glicerina	1,57	154 476	2 222 517
Residuo sólido microalgas	2,1	242 100	508 410
<b>Total (\$/año)</b>			<b>1 803 220,65</b>

$$\text{Ganancia} = 48 655 \text{ \$/año}$$

#### ✓ Indicadores Dinámicos de Rentabilidad

Para el caso de estudio, la planta no resulta rentable. El comportamiento de los indicadores dinámicos de rentabilidad se puede observar en la tabla 3.17 y el perfil del VAN en la figura 3.1:

### Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas

Tabla 3.17. Indicadores dinámicos de rentabilidad en reacción básica

Indicadores dinámicos de rentabilidad	
VAN	\$ -856 233,38
TIR	2,6 %
PRD	+ 15 años

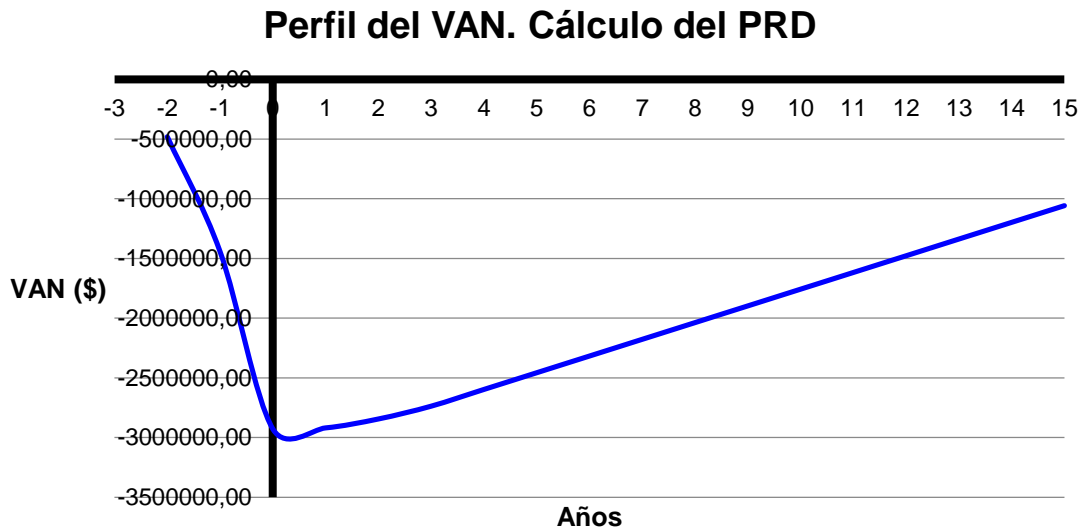


Figura 3.1. Perfil del VAN y cálculo del PRD en reacción básica

#### 3.2.2- Planta de producción de biodiesel por transesterificación supercrítica.

Como no se realizó el diseño del equipamiento para la producción de biodiesel en condiciones supercríticas se toma el costo total de inversión de una planta de este tipo diseñado por (Cruz, 2017).

En esta planta se obtenían 66,1 kg/d de biodiesel y 6,6 kg/d de glicerina y el costo total de inversión para alcanzar esta producción fue de \$ 609 008,86; a partir de estos valores se realiza la estimación del costo total de inversión para la planta considerada en el presente estudio, con una capacidad de producción de 434,75 kg/d de biodiesel, aplicando la ecuación:

$$\text{Costo equipo A} = \text{Costo equipo B} * \left( \frac{\text{Capacidad equipo A}}{\text{Capacidad equipo B}} \right)^{0,6}$$

✓ **Costo Total de Inversión (CTI):**

**Costo total del equipamiento = \$ 1 887 913,134**

*Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas*

**Tabla 3.18. Costos directos en reacción supercrítica**

	% CE	Costo (\$)
Adquisición del equipamiento		1 881 973,134
Entrega del equipamiento	10	188 197,313
Instalación del equipamiento	39	807 366,475
Instalación instrumentación y control	26	538 244,316
Preparación del terreno	12	248 420,45
Tuberías	31	641 752,84
Instalaciones eléctricas	10	207 017,045
Requerimientos y servicios auxiliares	0.55	1 138 593,746
<b>Costo Total (\$)</b>		<b>5 651 565,32</b>

**Tabla 3.19. Costos indirectos en reacción supercrítica**

	%CE	Costo(\$)
Ingeniería y supervisión	32	1 808 500,90
Gastos en construcción	34	1 921 532,21
Gastos legales	4	82 806,82
Pago al contratista	19	393 332,385
Contingencias	37	765 963,066
<b>Costo Total (\$)</b>		<b>4 972 135,38</b>

**Tabla 3.20. Costos de materia prima en reacción supercrítica**

	Precio (\$/kg)	Consumo anual	Costo (\$/año)
Biomasa seca	3,2	360 000	1 152 000
Metanol	0,7	28 732,32	20 112,624
Hexano	2	17 262,72	34 525,44
<b>Costo total</b>			<b>1 206 638</b>

**Tabla 3.21. Costos de los requerimientos en reacción supercrítica**

Costos de Requerimientos			
	Precio	Consumo (kWh)	Costo (\$/año)
Vapor	0,002 \$/kg	60 188,18	120 376,36
<b>Costo Total (\$/año)</b>			<b>120 376,36</b>

✓ **Costos totales de producción (CTP)**

**Tabla 3.22. Valor de la producción en reacción supercrítica**

	Precio (\$/kg)	Consumo anual (kg/año)	Costo (\$/año)
Biodiesel	13,567	130 425	1769475,98
Glicerina	1,57	154 476	242 527
Residuo sólido de microalgas	2,1	242 100	508 410
<b>Costo total</b>			<b>2 520 413</b>

### Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas

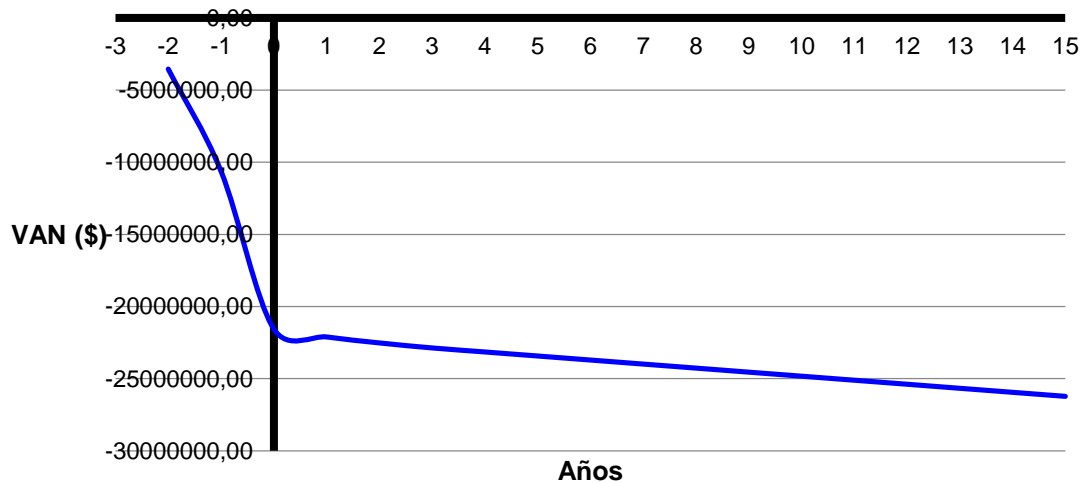
**Ganancia= - 1 089 825,36 \$/año**

#### ✓ Indicadores Dinámicos de Rentabilidad

De igual forma que en la alternativa anterior, la planta no resulta rentable, para estos resultados los indicadores dinámicos de rentabilidad se pueden observar en la tabla 3.22 y el perfil del VAN en la figura 3.2:

**Tabla 3.23. Indicadores dinámicos de rentabilidad en reacción supercrítica**

Indicadores dinámicos de rentabilidad	
<b>VAN</b>	\$ -12 951 907,13
<b>TIR</b>	--
<b>PRD</b>	--



**Figura 3.2. Perfil del VAN y cálculo del PRD en reacción supercrítica**

#### 3.2.3- Análisis de sensibilidad para la producción de biodiesel por transesterificación básica.

Como ninguna de las dos alternativas propuestas resultan factibles desde el punto de vista económico, y la producción de biodiesel por transesterificación básica ha sido más estudiada y desarrollada, se propone realizar un análisis de sensibilidad variando el precio de venta del biodiesel como producto final, en aras de identificar las condiciones en la que se puede lograr que el proceso sea viable económicamente. Para estas condiciones se obtienen los resultados de la tabla 3.23.

*Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas*

**Tabla 3.24. Valor de la producción en reacción básica**

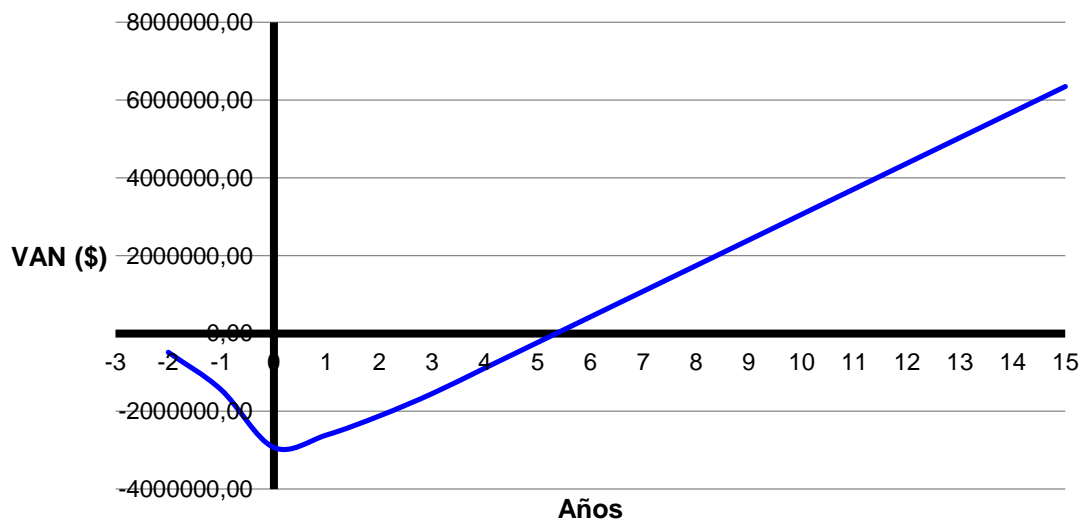
Producto	Precio (\$/kg)	Producción (kg/año)	Valor de la producción
Biodiesel	21	77 562	1 628 802
Glicerina	1,57	154 476	2 222 517
Residuo sólido microalgas	2,1	242 100	508 410
<b>Total (\$/año)</b>			<b>2 379 739</b>

**Ganancia= 625 174 \$/año**

Si se consideran estos aspectos los indicadores dinámicos de rentabilidad serían:

**Tabla 3.25. Indicadores dinámicos de rentabilidad en reacción supercrítica**

Indicadores dinámicos de rentabilidad	
<b>VAN</b>	\$1 884 711
<b>TIR</b>	34,6%
<b>PRD</b>	5,1 años



**Figura 3.3. Perfil del VAN y cálculo del PRD de sensibilidad en la reacción básica**

### *Capítulo 3: Diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de biodiesel a partir de microalgas*

#### **Análisis de los resultados**

- ✓ Los procesos de producción de biodiesel y glicerina no son eficientes económicamente, aunque en la transesterificación básica se alcanzan menores pérdidas que en la transesterificación con metanol supercrítico. Esto se debe a las condiciones extremas que opera esta última planta para llevar el metanol reactante al punto crítico de presión y temperatura, así como el elevado costo de equipamiento y de materia prima por el exceso de metanol con respecto a la transesterificación básica.
- ✓ Según el análisis de sensibilidad realizado al proceso de transesterificación básica se demuestra que con un precio de venta de 21 \$/kg de biodiesel la planta sería rentable y alcanzaría una ganancia de 625 174 \$/año, un VAN de \$ 1 884 711, una TIR de 34,6 % en un período de recuperación de 5,1 años.

## ***Conclusiones***

1. Existen cuatro métodos para la obtención de biodiesel: uso directo y mezcla de aceites vegetales con gasoil, microemulsiones, craqueo térmico y transesterificación.
2. La transesterificación de aceites utilizando catalizador básico y empleando metanol supercrítico son las técnicas más desarrolladas en los últimos años.
3. La producción de biodiesel por transesterificación básica permite obtener 258 kg/d del mismo, mientras que por transesterificación con metanol supercrítico se producen 431,75 kg/d a partir de 1200 kg/d de biomasa seca de microalgas.
4. Los procesos considerados de producción de biodiesel y glicerina no son eficientes económicamente, aunque en la transesterificación básica se alcanzan menores pérdidas que en la transesterificación con metanol supercrítico.
5. El análisis de sensibilidad realizado al proceso de transesterificación básica demostró que con un precio de venta de 21 \$/kg de biodiesel la planta sería rentable y alcanzaría una ganancia de 625 174 \$/año, un VAN de \$ 1 884 711, una TIR de 34,6 % en un período de recuperación de 5,1 años.

***Recomendaciones***

1. Realizar a escala de laboratorio la obtención de biodiesel a partir de biomasa de microalgas con el objetivo de profundizar en los principales parámetros que influyen en su futuro escalado.
2. Explorar nuevas alternativas como anexarla a una fábrica ya existente para lograr la rentabilidad de la producción de biodiesel de tercera generación.
3. Considerar nuevos mercados para los productos residuales con el objetivo de aumentar el valor agregado de los mismos.

## *Bibliografía*

1. AGÜERO, P. C. 2010. *Biodiesel a partir de microalgas antárticas: Estudio de parametros de crecimiento de estas.*, Universidad de Magallanes.
2. ALVA, M. S. D., LUNA-PABELLO, V. M., MARTÍNEZ, E. C. & MARTINEZ, A. F. A. 2014. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE MICROALGAS Y UNA CIANOBACTERIA CULTIVADAS EN DIFERENTES CALIDADES DE AGUA. 14.
3. ASPEN TECHNOLOGY, I. B. A. P. N. M. I. T. D. A. T. O. S. M. O. T. R. C. 2012. Simple Combustion Reactor with Aspen Plus® V8.0.
4. BALLADARES, A. E. 2017. *Biocombustibles, la alternativa verde* [Online]. Available: <http://www.FederaciónNacionaldeBiocombustiblesdeColombia.htm>.
5. BENÍTEZ, L. T., ARGUMEDO, D. H., ALAYÓN, M. A. & SALDARRIAGA, C. R. C. 2015. Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas. 12.
6. BERRÍOS, M. & SKELTON, R. 2008. Comparison of purification methods for biodiesel. *Chem. Eng*, 6.
7. CABEZA, J. G. & ROJAS, A. T. 2009. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE MICROALGAS *Scenedesmus* spp. EN FOTOBIOREACTOR TANQUE AGITADO. 13.
8. CALLEJAS, E. S. & QUEZADA, V. G. 2009. Los biocombustibles.
9. CAMPUSANO, P. J. O. 2008. *ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ALGAS*. OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA E INGENIERO CIVIL QUÍMICO, UNIVERSIDAD DE CHILE.
10. CANAKCI, M. & GERPEN, J. V. 2001. Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. 6.
11. CASTILLO, O. S., BADAJOZ, S. G. T., COLÍN, C. A. N., CABALLERO, V. P., MÉNDEZ, C. H. H. & RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, J. R. 2017. Producción de biodiésel a partir de microalgas: avances y perspectivas biotecnológicas. 16.
12. CORRO, G., TELLEZ, N., JIMÉNEZ, T., TAPIA, A., BAÑUELOS, F. & CUCHILLO, O. V. 2011. Biodiesel from waste frying oil. Two step process using acidified SiO<sub>2</sub> for esterification step. *Catalysis Today*.
13. CRUZ, D. P. N. 2017. *Diseño de una planta para la producción de biodiésel a partir de aceite de palma y etanol en condiciones supercríticas*. Ingeniero Químico, Escuela Politécnica Nacional de Ecuador.

## Bibliografía

14. CHICO, I. W. M. & LLAXACONDOR, A. W. S. 2013. *Simulación de una planta piloto para la producción de biodiesel en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad Nacional de Trujillo*. Optar por el título de Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Trujillo.
15. GARCÍA, M. J. & TRIÑANES, P. G. 2010. Biocombustibles: bioetanol y biodiesel. Available: [http://www.enciga.org/files/boletins/61/biocombustibles\\_bioetanol\\_y\\_biodiesel.pdf](http://www.enciga.org/files/boletins/61/biocombustibles_bioetanol_y_biodiesel.pdf).
16. HERGUEDAS, A. I. D. L., TARANCO, C. D. P., GARCÍA, E. R. & PANIAGUA, P. P. 2011. BIOMASA, BIOCOMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD.
17. HERNÁNDEZ, A. G., VÁZQUEZ-DUHALT, R., SAAVEDRA, M. D. P. S., CARREÓN, L. S. & JIMÉNEZ, A. M. 2014. Biodiesel a Partir de Microalgas. 24.
18. HUBER, W. G., IBORRA, S. & CORMA, A. 2006. Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering. *Chem Rev.*
19. LEDE, S. 2015. Los Biocombustibles. Available: <http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/agricultura/otros/biodiesel/index.php>.
20. LEÓN, J. G., GASPARINI, R., RODRÍGUEZ, M. E., HUARTE, G. J., ESTRADA, J. & FILGUEIRAS, E. 2009. *Manual de Biocombustibles*.
21. LEYVA, R. F. & RAMOS, G. V. 2009. OBTENCIÓN DE BODIESEL A PARTIR DE UN RESIDUO DE LA INDUSTRIA AZUCARERA. *Tecnología Química*. Universidad de Oriente.
22. LINARES, L. C. F., MONTOYA, J. M., OROPEZA, A. M. & CORONA, J. A. B. 2012. PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE MICROALGAS. 17.
23. LOERA-QUEZADA, M. & OLGUÍN, E. 2010. Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: Retos y oportunidades.
24. LUCCA, M. I. D., GELY, M. C. & PAGANO, A. M. 2014. Producción de biodiesel en condiciones supercríticas. *Revista Argentina de Ingeniería*.
25. MANUALE, D. L. 2011. *OBTENCIÓN DE BODIESEL EN CONDICIONES SUPERCRÍTICAS*. Doctoral, Universidad Nacional del Litoral.
26. MARTÍNEZ, A. C. D. A. 2017. *Evaluación de esquemas de biorrefinerías en el central 5 de Septiembre*. Maestría, Universidad de las Villas.
27. MARTÍNEZ, J., MANZINI, F. & MANCERRA, O. 2007. A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy*. 32.
28. MENDOZA, J. M. 2015. Generalidades sobre los biocombustibles. 12.
29. MUÑOZ, J. A. 2016. *Biocombustibles y sus tipos* [Online]. Available: <http://www.apropellets.com/blog/2016/05/18/el-biocombustible-y-sus-tipos/>.

## *Bibliografía*

30. ONU-ENERGÍA, B. S. U. M. P. L. T. D. D. N. U. 2014. Generalidades sobre los bicomcombustibles.
31. PARDAL, A. C. D. V. 2012. *Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis*. Universidad de Extremadura.
32. PATA, F. F. 2014. *OBTENCION DE MICROALGAS, Y PRODUCCION DE BIODIESEL MEDIANTE SIMULACIÓN, COMO ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DEL CO2 DE LA ATMOSFERA*. Título de Ingeniero Químico, UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA.
33. PEÑARANDA, M. T. A. 2013. *PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS PARÁMETROS DEL CULTIVO QUE AFECTAN LA PRODUCCIÓN DE LÍPIDOS* [Online]. Available:  
<http://Biodiesel/PRODUCCI%C3%93N%20DE%20BIODIESEL%20A%20PARTIR%20DE%20MICROALGAS%20PAR%C3%81METROS%20DEL%20CULTIVO%20QUE%20AFECTAN%20LA%20PRODUCCI%C3%93N%20DE%20L%C3%8DPIDOS%20%20Arias%20Pe%C3%B1aranda%20%20Acta%20Biol%C3%B3gica%20Colombiana.htm>.
34. PÉREZ, A. H. & LABBÉ, J. I. 2014. Microalgas, cultivo y beneficios. 17.
35. PETERS, M. S. & TIMMERHAUS, K. D. 1991. *Plant design and economics*, Professors of Chemical Engineering University of Colorado.
36. RAMÍREZ, I. E. M., VELA, N. A. C. & RINCÓN, J. J. 2012. Biodiesel, un combustible renovable. 9.
37. RAMOS, L. R. D. L. R., MONTERO, E. H., TUIRÁN, E. S. & DELGADO, K. A. O. 2015. Diseño y simulación de una planta para la producción de biodiésel a partir de *Jatropha curcas* L. en el departamento de Bolívar.
38. ROSABAL, J. & VALLE, M. 1989. *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*
39. SANTANDER, U. I. D. 2013. Biodiesel.
40. SERNA, F., BARRERA, L. & MONTIEL, H. 2011. Impacto Social y Económico en el Uso de Biocombustibles.
41. SERRANO-RUIZ, J. C. & LUQUE, R. 2011. Biocombustibles líquidos: procesos y tecnologías. 7.
42. SIMULATION, S. C. 2015. Steam Cycle Simulation – Aspen Plus v8.6.
43. SUÁREZ, L. L. R. 2014. *Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. procedente de diferentes procesos*. Doctoral, Universidad politécnica de Madrid.

## *Bibliografía*

44. TAMAYO, M. J. V. 2013. *ESTUDIO SOBRE EL MODELADO Y CONTROL DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS EN FOTOBIOREACTORES PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL*. Maestría, UNIVERSIDAD DE ALMERIA.
45. VARGAS, V. M. M. 2016. *Planta de producción de biodiesel a partir de microalgas*. Maestría, Universidad de Sevilla.
46. ZANNOL, C. V. 2016. *FACTIBILIDAD ECONOMICA DE PRODUCCION DE BODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS EN ARGENTINA*. MAESTRÍA EN GESTION AMBIENTAL, Instituto tecnológico de Buenos Aires.

## Anexos

### Anexos

#### Anexo 1. Resultados de los balances en la reacción de transesterificación en medio básico

Datos del Reactor de Transesterificación	Masas Iniciales	Masas Molares	Moles iniciales
aceite	462,62		
triglicérido	222,05	1022	0,21
metanol	77,104	32	2,40
glicerina	0	92	0
éster 2	0	342	0
KOH =2% masa aceite	9,25	56	0,16
éster 1	57,88	342	0,169
ácido graso libre inicial	0	328	0
H <sub>2</sub> O	3,04	18	0,16
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	98	0
otros ésteres	0	284	0
Unidades de medida	kg	kg/kmol	kmol

Moles de equilibrio	Fórmulas	Valores (kmol)	Masas (kg)
triglicérido	$n_{ae} = n_{ao} - n_{ao} * (a/a) * x_a$	0,022	21,983
metanol	$n_{be} = n_{bo} - n_{ao} * (b/a) * x_a$	1,822	58,310
éster 2	$n_{ce} = n_{co} + n_{ao} * (c/a) * x_a$	0,587	200,858
glicerina	$n_{de} = n_{do} + n_{ao} * (d/a) * x_a$	0,195	18,010
KOH	$n_{ei} = n_{io}$	0,165	9,252
éster 1	$n_{ei} = n_{io}$	0,169	57,884
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	$n_{ei} = n_{io}$	0	0
H <sub>2</sub> O	$n_{ei} = n_{io}$	0,169	3,046
otros ésteres	$n_{ei} = n_{io}$	0	0

Otros Datos	Valores	
X triglicérido	0,901	
t <sub>reacción</sub>	1,5	
Presión atm	1	
Temperatura °C	60	
Sustancia Limitante: triglicérido	Coefficientes estequiométricos	Valores
triglicérido	a	1
metanol	b	3
éster 2	c	3
glicerina	d	1
KOH	i	1

## Anexos

### Anexo 2. Diseño del serpentín de vapor para el evaporador de hexano

Datos:	
$M_{\text{Líquido}} = 151 \text{ kg/batch} = 333 \text{ lb/batch}$	$h_{oi} = 1500 \text{ BTU/hpie } ^\circ\text{F}(\text{vapor saturad})$
$m_{\text{hexano}} = 194 \text{ kg/batch} = 427 \text{ lb/batch}$	$R_d = 0,005 \text{ hpie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}/\text{BTU}$
$C_{p\text{Líquido}} = 0,65 \text{ BTU/lb}^\circ\text{F}$	$t_1 = 25^\circ\text{C} = 77 \text{ } ^\circ\text{F}$
$T_1 = 179,91^\circ\text{C} = 355,838 \text{ } ^\circ\text{F}(\text{vapor sat.})$	$t_2 = 68,9^\circ\text{C} = 156,02 \text{ } ^\circ\text{F}$
$T_2 = 179,91^\circ\text{C} = 355,838 \text{ } ^\circ\text{F}$	$T_{\text{ambiente}} = 28 \text{ } ^\circ\text{C} = 82,4 \text{ } ^\circ\text{F}$
$\lambda_v = 2778,1 \text{ kJ/kg} = 1196,9 \text{ BTU/lb}$	$D_{\text{serp}} = 0,37 \text{ m} = 1,21 \text{ pie}$
$\lambda_{\text{hexano}} = 80,48 \text{ kcal/kg} = 145,17 \text{ BTU/l}$	$H_{\text{serp}} = 0,81 \text{ m} = 2,66 \text{ pie}$
$k_{\text{fluido}} = 0,08 \text{ BTU}/(\text{hpie})(^\circ\text{F}/\text{pie})$	$DE = 1\frac{1}{4} \text{ plg}$
$N_r = 100 \text{ rpm} = 6000 \text{ rph}$	$DI = 1,12 \text{ plg}$
$L_p = 0,38 \text{ m} = 1,24 \text{ pie}$	$BWG16$
$H_{\text{evap}} = 1 \text{ m} = 3,3 \text{ pie}$	$at = 0,985 \text{ plg}^2$
$D_j = 0,57 \text{ m} = 1,875 \text{ pie}$	$a't = 0,435 \text{ pie}^2/\text{pie}$
$\rho = 670,013 \text{ kg/m} = 41,83 \text{ lb/pie}$	
$\mu = 0.86 \text{ cP} = 2.08 \text{ lb/pie h}$	

## Anexos

### Anexo 3. Diseño de la chaqueta del reactor de transesterificación

Datos	Valores	Unidades
<b>M reacc-2</b>	505,40	kg/batch
	1111,88	lb/batch
<b>Cp agua</b>	1	BTU/lb °F
<b>Cp mezcla</b>	0,6	BTU/lb °F
<b>T1</b>	179,91	°C
	355,84	°F
<b>T2</b>	179,91	°C
	355,84	°F
<b>lv</b>	2778,1	kJ/kg
	1196,89	BTU/lb
<b>t1</b>	25	°C
	77	°F
<b>t2</b>	60	°C
	140	°F
<b>μ agua</b>	1	cP
	2,42	lb/pie h
<b>μ mezcla</b>	1,4	cP
	3,39	lb/pie h
<b>ρ mezcla</b>	919,5	kg/m <sup>3</sup>
	57,40	lb/ pie <sup>3</sup>
<b>ρ agua</b>	998	kg/m <sup>3</sup>
	62,30	lb/ pie <sup>3</sup>
<b>hi y hoi Coef. de transferencia de calor referido al interior y exterior de la pared del reactor</b>		
<b>DI chaqueta</b>	0,33	m
	1,09	pie
<b>DE reactor (espesor de 5mm)</b>	0,323	m
	1,06	pie
<b>k mezcla</b>	0,11	BTU/(hpie <sup>2</sup> )(°F/pie)
<b>k agua</b>	0,33	BTU/(hpie <sup>2</sup> )(°F/pie)
<b>Dj (diámetro del reactor)</b>	0,31	m
	1,02	pie
<b>Hreactor</b>	0,55	m
	1,80	pie
<b>Nr</b>	200	rpm
	12000	rph
<b>Lp</b>	0,21	m
	0,69	pie
<b>Rd</b>	0,002	(h pie <sup>2</sup> °F) / BTU

## Anexos

### Anexo 4. Diseño del serpentín de vapor para el evaporador de metanol

Datos	Valores	Unidades
M neutralizador	562,40	kg/batch
M metanol en exceso	6,14	kg/batch
Cp neutralizador	0,6	BTU/ lb °F
T1 vapor saturado	179,91	°C
T2	179,91	°C
lv	2778,1	kJ/kg
	1196,89	BTU/ lb
λmetanol	262,79	kcal/kg
	473,01	BTU/ lb
kfluido	0,115	BTU/(hpie <sup>2</sup> )(°F/pie)
Nr	100	rpm
	6000	rph
Lp	0,25	m
Hevap	0,67	m
	2,19	pie
Dj	0,38	m
	1,25	pie
ρ	954,75	kg/m <sup>3</sup>
	59,60	lb/ pie <sup>3</sup>
μ	1,4	cP
	3,39	lb/pie h
h <sub>oi</sub> vapor saturado	1500	BTU / (hpie <sup>2</sup> °F)
Rd	0,005	(hpie <sup>2</sup> °F)/BTU
t1	25	°C
	77	°F
t2	64,7	°C
	148,46	°F
Tambiente	28	°C
	82,4	°F
Dserp	0,04	m
Hserp	0,54	m
<b><u>Datos de los tubos</u></b>		
DE 1 1/4 plg BWG 16	1,25	plg
DI tubo	1,61	plg
<b>Según Tabla 10 del Kern III</b>		
Area d flujo por el tubo (a´ t)	0,985	plg <sup>2</sup>
Superficie por pie lineal (a´´)	0,3271	pie <sup>2</sup> /pie

