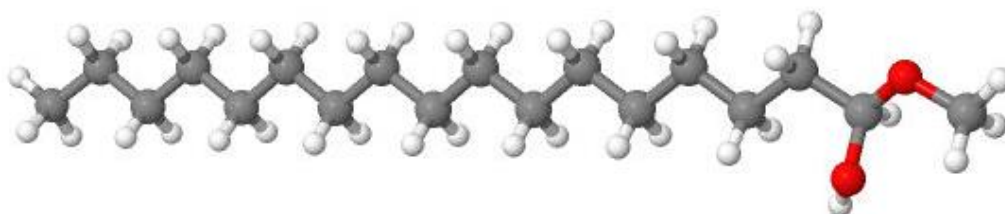




---

# ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITES DE FRITURA USADOS DOMÉSTICOS.

---



GRADO DE INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

EDUARDO MÉNDEZ MESA

Universidad de La Laguna

## INDICE

RESUMEN .....	4
ABSTRACT.....	4
1.- Objetivos .....	4
2.- Justificación del proyecto .....	5
3.- Situación .....	6
4.- Biodiesel.....	6
4.1.- Introducción .....	6
4.2.- Antecedentes .....	7
4.3.- Problemática del uso directo del aceite vegetal .....	8
4.4.- Materia prima .....	8
4.4.1.- Tipos y características .....	8
4.4.2.- Procesos posibles para la obtención del biodiesel .....	12
4.4.3.- Mercado Actual.....	13
4.5.- Marco regulatorio .....	17
4.6.- Ventajas .....	17
4.7.- Inconvenientes .....	18
5.- Proceso de obtención del biodiesel.....	19
5.1.- Bases de diseño .....	19
5.1.1.- Características de la materia prima .....	19
5.1.2.- Capacidad de la planta y rendimiento .....	20
5.2.- Almacenamiento de la materia prima .....	22
5.3.- Pretratamiento .....	22
5.3.1.- Filtración .....	23
5.3.2.- Pre-esterificación ácida .....	24
5.3.3.- Secado .....	25
5.4.- Transesterificación .....	25
5.4.1.- Variables manipuladas .....	26
5.4.2.- Descripción del equipo utilizado.....	28
5.5.- Separación y purificado .....	30
5.6.- Almacenamiento del producto .....	31
5.7.- Sistema de impulsión .....	32
5.8.- Calidad del producto y rendimiento del proceso.....	32
5.9.- Consumos.....	33
5.10.- Aprovechamiento del subproducto .....	33
6.- Estudio económico .....	35

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITES DE FRITURA USADOS DOMÉSTICOS.

6.1.- Inversión.....	35
6.2.- Ingresos y gastos .....	35
6.2.1.- Costes por litro de biodiesel producido.....	36
6.3.- Amortización.....	38
6.4.- Rentabilidad económica.....	39
6.5.- Tasa interna de retorno.....	42
7.- Huella de carbono.....	43
8.- Conclusiones.....	46
9.- Bibliografía .....	48

## RESUMEN

El presente proyecto trata sobre un estudio de viabilidad de instalar una planta de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales usados (AVU), recogidos mediante la gestión de residuos de la mancomunidad del Nordeste de Tenerife. Dado el volumen de aceite disponible a tratar, se producirá biodiesel en lotes de 1800 litros mediante un proceso de transesterificación catalítico homogéneo, estableciendo las condiciones más adecuadas para alcanzar el máximo rendimiento posible. El producto obtenido irá dirigido principalmente a cubrir los gastos de combustible derivados de la gestión del aceite, reduciendo así la dependencia con combustible fósil. Además del ahorro económico que puede obtenerse del proceso, se obtienen también diversas ventajas respetuosas con el medio ambiente, por un lado creando un medio efectivo para eliminar un residuo altamente contaminante, y por otro lado reducir las emisiones de carbono generadas por otro tipo de combustibles fósiles mediante un combustible biodegradable.

## ABSTRACT

The present project is about a feasibility research to install a biodiesel production plant from waste cooking oils (WCO), collected through the waste management of the commonwealth of the northeast of Tenerife. Given the amount of WCO available to be treated, biodiesel will be produced in batches of 1800 liters by homogeneous catalytic transesterification reaction, establishing the most appropriate conditions to achieve the maximum possible yield. The product obtained will be directed mainly to cover fuel expenses incurred, thus reducing dependence on fossil fuels. In addition to the economic saving that can be obtained from the process, several environmentally and friendly advantages would be obtained, on the one hand to create an effective way to eliminate a highly polluting waste, and on the other hand reducing the carbon emissions generated by other types of fossil fuels through a biodegradable fuel.

## 1. Objetivos

Actualmente los aceites vegetales suponen una posible fuente de energía alternativa para sustituir a los combustibles fósiles convencionales, ya que su composición es rica en carbono. Diversas naciones ya implementan cultivos energéticos para abastecer de forma renovable los motores diésel de calefacción o automovilismo, no obstante esta práctica produce también deforestación, desplazamiento de terrenos agrícolas y ganadería, así como la destrucción de la biodiversidad y el equilibrio natural del ecosistema que le rodea. Otra alternativa posible es utilizar los aceites vegetales usados en cocinas domésticas o en cadenas de restauración, adecuando el aceite generado al proceso de obtención de biodiesel, se consigue así gestionar un peligroso contaminante, transformándolo en combustible y disminuyendo la huella de carbono producida.

El objetivo principal es doble, por un lado diseñar una planta capaz de producir biodiesel apto para su uso directo en la flota de gestión de residuos, reduciendo así la dependencia energética y la huella de carbono producida por el proceso. Y por otro lado, eliminar de la circulación un importante contaminante que conlleva graves impactos ambientales si no se gestiona adecuadamente.

Como es evidente en la industria, no solo basta con que el proceso sea viable técnicamente y respetuoso con el medio ambiente, además debe ser económicamente rentable. Por este motivo, se debe desarrollar un estudio de mercado para valorizar el producto final y los gastos producidos durante el proceso. En adición, se consigue crear puestos de trabajos (tanto directos como indirectos) para fomentar el crecimiento económico local y por otro lado, puede suponer un ejemplo para concienciar a la población sobre la importancia y los beneficios de tratar adecuadamente este tipo de residuos. El objetivo económico básico será la amortización de los equipos e instalaciones necesarias en el proceso en un periodo de tiempo razonable, y utilizar el propio biodiesel generado para cubrir los gastos de combustible de la flota de vehículos dedicados a la gestión de los aceites.

## **2. Justificación del proyecto**

Las Islas Canarias se encuentran en una situación en la que el desarrollo de las energías renovables, y la sostenibilidad energética, son temas que deben ser tratados en un futuro no tan lejano. La actividad industrial, el turismo excesivo o los vertidos no controlados, tienen consecuencias medioambientales, y socioeconómicas, que deben ser objeto de estudio para mantener nuestro entorno como el patrimonio natural que representa. Los vertidos de aceites de cocina usados son especialmente contaminantes, ya que es conocido que un solo litro de aceite es capaz de contaminar 1000 litros de agua, y puede llegar a contaminar 40.000 litros de agua, que es equivalente al consumo de agua anual de una persona en su domicilio [1].

Este residuo suele acabar en el alcantarillado cuando se desecha de forma inadecuada, y si este residuo alcanza una EDAR se incrementan los costes de depuración debido a su alto contenido en materia orgánica que hay que separar. Por ello, se hace evidente la problemática que una mala gestión de estos residuos supone.

Lo más interesante de estos residuos es que pueden reutilizarse para producir biocombustibles, mayoritariamente, que puede ser utilizado en motores de combustión interna tras los tratamientos oportunos. La producción de biodiesel a partir de aceites usados de cocina comporta un ahorro de energía fósil significativo, además de solucionar el impacto ambiental que supondría el vertido incontrolado de este residuo [1].

Ante el panorama medioambiental que vivimos actualmente, es razonable tener interés en la búsqueda de fuentes energéticas renovables. Resulta interesante estudiar el aprovechamiento de los residuos para la generación de energía, combatiendo así el impacto ambiental que estos residuos provocan al no gestionarse adecuadamente, además se consigue reducir la dependencia energética del archipiélago. La generación de biodiesel no solo comporta la reducción de la contaminación medioambiental, sino que fomenta el desarrollo socioeconómico local y a la seguridad energética nacional.

### **3. Situación**

Uno de los factores de los que depende el buen funcionamiento de una planta de producción de biodiesel a partir de aceites de fritura domésticos es la efectiva gestión de dichos residuos. Por tanto, en la búsqueda de un municipio que realice un seguimiento del volumen de residuos generados en la isla destaca la Mancomunidad del Nordeste de Tenerife, la cual realiza una gestión selectiva de los distintos tipos de residuos, entre ellos los aceites vegetales usados con un volumen razonable a tratar. El equipo necesitará de una nave industrial fácilmente accesible para la descarga de la materia prima y la carga de producto, además deberá situarse preferiblemente en una zona céntrica o cercana entre los puntos de recogida para facilitar la recogida y evitar rutas de transporte innecesarias.

## **4. Biodiesel**

### **4.1. Introducción**

El biodiesel es un combustible líquido que se obtiene a partir de materias primas renovables como aceites vegetales o grasas animales, principalmente de los aceites vegetales que son extraídos de la soja, la colza, la palma y el girasol. El interés reside en que también se puede transformar el aceite vegetal utilizado previamente para freír alimentos en biodiesel, mediante los tratamientos adecuados, por lo que resulta útil, e interesante desde el punto de vista energético y medioambiental, reciclarlo convenientemente. El consumo de combustibles derivados del petróleo supone el 88% del consumo energético mundial [2], por lo que actualmente se hace notable la escasez de esta forma de energía además de la contaminación ambiental que significa. El biodiesel se ha convertido en los últimos años en una potencial alternativa para sustituir el diésel derivado del petróleo, parcialmente o en su totalidad. Sin embargo, el uso de cultivos energéticos para la producción de biodiesel se ha convertido también en una opción poco práctica y rentable.

El aceite usado de fritura usado es un residuo que provoca serios problemas ambientales. Su vertido inadecuado es capaz de contaminar en gran medida el agua, la tierra y produce costes adicionales en las EDAR que podrían evitarse [1]. Por ello es necesario un procesamiento adecuado de este residuo, mediante una gestión correcta y un óptimo aprovechamiento de lo que podría ser la solución a dos problemas medioambientales simultáneamente. Como parte del trabajo de recuperación de estos aceites se encuentra la concienciación social sobre el tema, por lo que es necesario un sistema de recogida efectivo que sea capaz de absorber la mayor cantidad de residuo posible.

El biodiesel producido con aceite vegetal usado (AVU) de buena calidad, bien procesado en discontinuo con separación intermedia de glicerina y adecuadamente lavado, secado y filtrado cumple con la mayoría de las especificaciones establecidas excepto en dos de las más importantes: Contenido en ésteres y estabilidad frente a la oxidación. Por ello es de suma importancia que los AVU obtenidos sean de buena calidad. Entonces, las cuestiones técnicas de interés para producir biodiesel a partir de aceites vegetales usados son:

1. Definir las características físico-químicas mínimas que debe cumplir un AVU para producir biodiesel.

2. Planteamiento de la operación a seguir, asegurando que se cumplan todas las especificaciones del biodiesel producido.

#### **4.2. Antecedentes**

La utilización de aceites vegetales en motores de combustión interna se remonta a los años 1920-1930 y la segunda guerra mundial, muchos países ya habían desarrollado diferentes tipos de biocombustibles. Sin embargo, la producción de combustibles fósiles era más barata que los combustibles alternativos, causando el estancamiento en el desarrollo de nuevas infraestructuras dedicadas a la producción de biocombustibles.

El interés por este tipo de combustibles tuvo su máximo nivel científico durante la década de los 70, pero posteriormente estas investigaciones cayeron drásticamente ante la caída de los precios del petróleo ya que por aquel entonces era mucho más rentable la elaboración de combustibles mediante la explotación de petróleo crudo.

Afortunadamente, hoy en día se retoman las investigaciones sobre el biodiesel para combatir los impactos medioambientales causados por la explotación petrolera, según la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos), el biodiesel reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en al menos el 57% y hasta el 86% en comparación con el diésel del petróleo, convirtiéndose así en una de las maneras más prácticas y rentables de abordar de inmediato el tema del cambio climático.

En el año 2012, comenzó a producirse biodiesel en Tenerife, gracias a la compañía CEPESA y la utilización de AVU entre sus procesos como aditivo al diésel convencional, por lo tanto no se producía biodiesel mediante transesterificación. En junio de 2018 se tomó la decisión de dismantelar la refinería debido al obstáculo que suponía para la expansión y el desarrollo de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife, por ello se detuvo tanto la producción de productos derivados del petróleo como la adición de dichos AVU. [3]

Una de las empresas pioneras en las Islas Canarias en el sector biodiesel es Biodiesel Lanzarote, en la cual se recoge el aceite usado de cocina y se recicla para producir biodiesel, además de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Los vehículos beneficiarios de esta planta no necesitan ninguna adaptación técnica, así mismo, el implemento de biodiesel en sus combustibles convencionales supone un ahorro de 8 céntimos por litro, por parte del consumidor. La empresa produce alrededor de 60 toneladas de biodiesel al mes, lo que equivaldría al combustible de la flota de transporte público de Lanzarote en un año. Este hecho supone un gran incentivo para llevar a cabo un proyecto al respecto en una isla capitalina.

Éste es uno de los muchos ejemplos de la funcionalidad a nivel local de este tipo de plantas. No obstante, uno de los requisitos indispensables para asegurar el correcto funcionamiento es una buena gestión de los aceites usados, concienciando a la población y ofreciendo facilidades de recogida, tanto a domicilios como a empresas que produzcan este tipo de “residuo”.

### 4.3. Problemática del uso directo del aceite vegetal

Es lógico pensar que no es conveniente hacer uso directo de este tipo de aceite en un motor de combustión diésel. No obstante, los motores diésel convencionales admiten la adición de biodiesel sin ningún otro requerimiento ni modificación del mismo. Uno de los problemas principales de los AVU es la alta viscosidad que tienen, además de las impurezas sólidas presentes, humedad, ácidos grasos libres, entre otros. Por ejemplo, una alta viscosidad puede producir una mala combustión y atomización del combustible en el motor, lo que deriva en fallos mecánicos por acumulación de carbono.

Por estos motivos se hace necesario un tratamiento para adecuar el aceite lo máximo posible al proceso. El hecho de contar con AVU supone que la calidad de la materia prima de la que se dispone sea mucho más baja que las que se obtendrían de aceites vegetales refinados, y además, la trazabilidad de sus características físico-químicas se vuelve incontrolable. Uno de los pretratamientos que sería necesario es la neutralización de los ácidos grasos libres, presentes en el aceite debido a su vida útil y que podrían causar graves fallos en un motor de combustión interna. Por otro lado, el contenido de humedad de los aceites también habrá que eliminarlo para evitar reacciones de saponificación que afecten negativamente al rendimiento global del proceso formando productos jabonosos.

### 4.4. Materia prima

#### 4.4.1. Tipos y características

El biodiesel es un éster que puede obtenerse a partir de diversas fuentes, las cuáles deben contener los glicéridos necesarios para formar ésteres metílicos de ácidos grasos. Algunas materias primas que se utilizan en la obtención de biodiesel se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 4.4.1. Clasificación de aceites

<b>ACEITES VEGETALES CONVENCIONALES</b>
Aceite de girasol
Aceite de colza
Aceite de soja
Aceite de coco
Aceite de palma
<b>ACEITES VEGETALES ALTERNATIVOS</b>
Aceite de <i>Jatropha curcas</i>
Aceite de <i>Brassica carinata</i>
Aceite de <i>Cynara cardunculus</i>
<b>GRASAS ANIMALES</b>
Sebo
<b>ACEITES DE FRITURA USADOS</b>
<b>ACEITES DE OTRAS FUENTES</b>
Aceite de producción microbiana
Aceite de microalgas



Utilizando aceites vegetales usados (AVU) se pretenden abordar diversos objetivos, los cuales son:

- Reutilización energética de un residuo altamente contaminante.
- Sustituir cultivos energéticos que podrían ser utilizados como alimento por la población.
- Concienciar a la población acerca de las ventajas de reutilizar este residuo, además de los inconvenientes de una mala gestión.

Por estos motivos, se ha realizado un seguimiento de los volúmenes recogidos de aceite usado en el nordeste de la isla de Tenerife. A partir de estos datos es posible dimensionar la planta de producción de biodiesel a través de un balance de materia, pero no solo es suficiente con conocer el volumen a tratar, además se debe conocer las características físico-químicas de dicho aceite con el objetivo de plantear tratamientos adicionales, tema que se abordará en puntos posteriores.

Los datos obtenidos a través de la mancomunidad del Nordeste de Tenerife se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.4.2. Datos de recogida de aceite usado en el Nordeste de Tenerife

	Total (Litros)	Media mensual (Kg/mes)	Nº habitantes	Litros por habitante y año
<b>2014</b>	2.077	173	64.994	0,032
<b>2015</b>	3.203	267	64.847	0,049
<b>2016</b>	4.801	400	64.511	0,074
<b>2017</b>	8.053	671	64.697	0,124
<b>2018</b>	15.513	1.293	65.349	0,237

Fuente: Banco de datos de la Mancomunidad del Nordeste de Tenerife. Elaboración propia. Página web: <http://www.mnordeste.org/web/banco-de-datos>

Se observa que el volumen recogido de aceite usado aumenta paulatinamente. En 2017 se recogieron más de 8000 litros anuales de aceite usado, y en 2018 se recogieron poco más de 15.500 litros. Lo que supone un incremento de la recogida de aceite en un 93% con respecto al año 2017, y por consiguiente, un aumento de la cantidad de aceite disponible a tratar.

La Mancomunidad del Nordeste de Tenerife está formado por 4 municipios; Tacoronte, El Sauzal, La Matanza y Santa Úrsula. En la siguiente tabla se recoge el volumen de recogida disponible para cada municipio según su población, definido como la contenerización de cada municipio. En adición, se muestra la procedencia de cada fracción de aceite recogido y la media de litros disponibles por habitante, con el objetivo de estudiar la eficiencia de la recogida

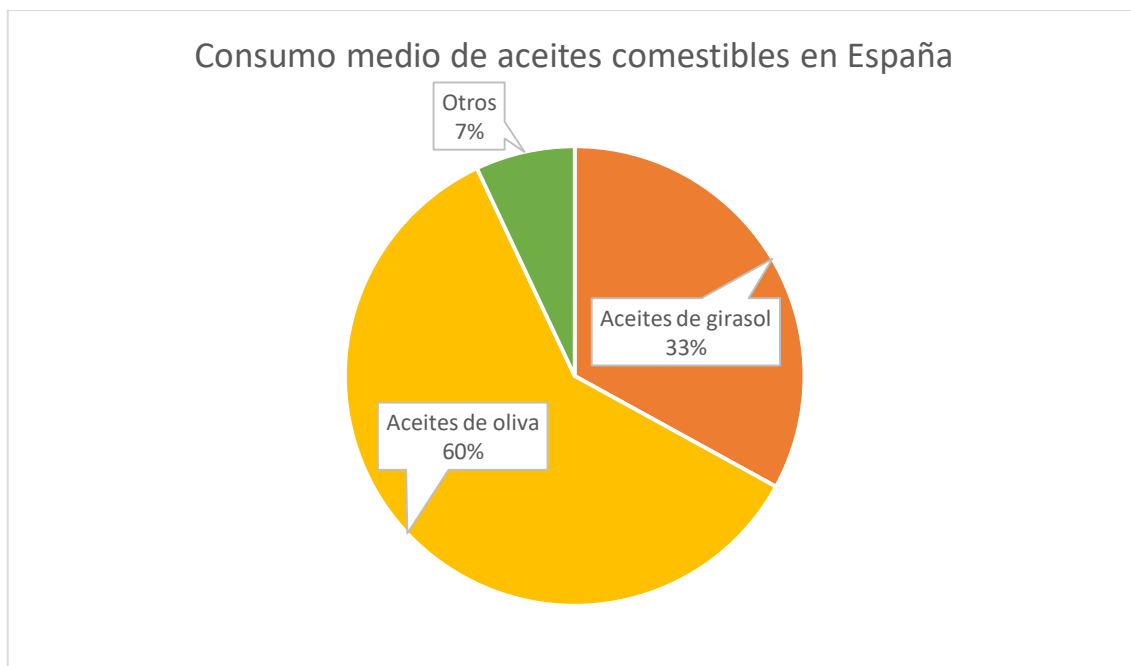
Tabla 4.4.3. Contenerización Mancomunidad del Nordeste de Tenerife

	Nº contenedores	Volumen de contenerización (Litros)	Nº habitantes	Ratio habitantes por contenedor	Ratio litros por habitante
<b>Tacoronte</b>	21	10.500	23.772	1.132	0,44
<b>El Sauzal</b>	8	4.000	8.873	1.109	0,45
<b>La Matanza</b>	8	4.000	8.772	1.097	0,46
<b>Santa Úrsula</b>	13	6.500	14.125	1.087	0,46
<b>TOTAL</b>	50	25.000	64.511	1.290	0,39

Fuente: Gestión de residuos de ATARETACO. <http://www.mnordeste.org/web/banco-de-datos>

Se observa que Tacoronte es el municipio con mayor contenerización debido a su población, mientras que El Sauzal y La Matanza tienen un menor ratio de habitantes por contenedor. Se hace evidente que una mayor contenerización permitiría una mayor recogida de residuo por lo que la viabilidad de este proyecto podría ser el incentivo que se necesita para aumentar este ratio.

La Asociación Nacional de Industriales Envasadores y Refinadores de Aceites Comestibles (ANIERAC) ofrece una perspectiva general del consumo medio de aceite vegetal en España y representando el mercado actual por clases de aceites.



Gráfica 4.4.2. Consumo medio de aceites comestibles en España  
Fuente: Asociación Nacional de Industriales Envasadores y Refinadores de Aceites Comestibles (ANIERAC, 2019)

La siguiente tabla muestra datos aproximados de la media de consumo de aceites vegetales durante el año a modo orientativo.

Tabla 4.4.4. Consumo medio en toneladas de los diferentes tipos de aceite vegetal

TOTALES	Consumo en toneladas
Aceite de oliva	507.000
Aceite de girasol	281.000
Otros	62.000
<b>TOTAL</b>	<b>850.000</b>

Con el deseo de conocer el consumo específicamente en Canarias de aceite vegetal se presenta el siguiente gráfico, en el cual se muestran los diferentes consumos de este producto en las siguientes comunidades autónomas.

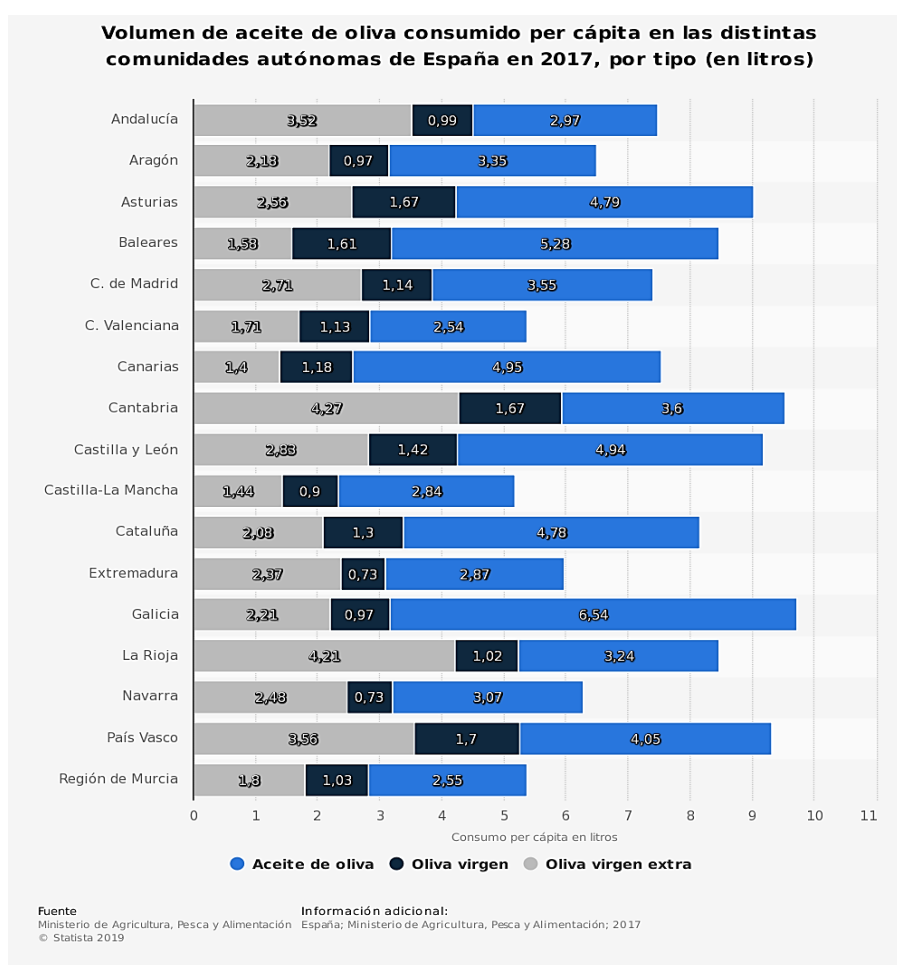


Figura 4.4.1. Volumen de aceite consumido per cápita en las distintas comunidades (2017).

Se puede observar como en Canarias se consume una cantidad considerable de aceite vegetal, colocándose en una media de 7,5 litros totales per cápita, según los datos recogidos por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. La población total de las Islas Canarias en el año 2018 fue de 2,128 millones de personas, por lo tanto, junto con los datos anteriormente citados se puede calcular aproximadamente el consumo medio de aceite.

$$2,128 \cdot 10^6 \text{ personas} \times 7,5 \frac{\text{Litros}}{\text{persona}} = 16 \cdot 10^6 \text{ Litros de aceite}$$

Por ello es razonable pensar en el uso de las tecnologías más adecuadas para aprovechar convenientemente el residuo generado, ya que se puede reutilizar el desecho del anterior consumo de aceite para producir un producto con alto valor añadido.

La mancomunidad del Nordeste posee un sistema de gestión de residuos adecuado y efectivo, reflejando públicamente las cantidades gestionadas de cada fracción de residuos. Por este motivo, se realizarán las primeras estimaciones sobre los datos aportados por dicha mancomunidad, siempre teniendo en cuenta el posible crecimiento de recogida anual.

#### **4.4.2. Procesos posibles para la obtención del biodiesel**

Existen diversos métodos y procesos para permitir reducir la viscosidad de los aceites vegetales hasta los valores permitidos para su utilización, sin riesgos, como combustible en un motor diésel, sin embargo, no solo basta con reducir su viscosidad, además debe cumplir con las especificaciones físico-químicas establecidos por el marco legislativo. Los procesos posibles para producir biodiesel son las siguientes:

- Transesterificación catalítica homogénea. Será el proceso llevado a cabo en este proyecto debido a la disponibilidad de los reactivos necesarios y la sencillez del proceso. Se utilizará un alcohol en exceso, como metanol, para favorecer que la reacción produzca metilésteres (biodiesel) y glicerina como subproducto, además, el catalizador de la reacción será una base alcalina como sosa caustica (NaOH), o hidróxido potásico (KOH), para aumentar la velocidad de reacción [4].

- Proceso ácido-base. En primer lugar se produce una esterificación ácida y luego seguir el proceso base-base. Se utiliza generalmente para aceites con alto índice de acidez y como pretratamiento a la transesterificación.

- Transesterificación catalítica heterogénea. En la transesterificación homogénea tanto los productos de reacción como el catalizador se encuentran en la misma fase inmiscible (aceite y alcohol), pero en la catálisis heterogénea también existe una fase sólida, lo que facilita la separación de fases y recuperación del catalizador. Los catalizadores heterogéneos pueden ser ácidos o básicos, pero a diferencia de los sistemas homogéneos el intercambio de materia se produce en la superficie del catalizador sólido. [5]

- Catálisis enzimática. Este tipo de proceso es capaz de realizar simultáneamente la reacción de esterificación y transesterificación, un hecho ventajoso cuando se trata de aceites residuales con alto contenido en ácidos grasos libres y agua. Por otro lado, No se suele usar en la actualidad a escala industrial debido a su alto coste, el cual impide la producción de biodiesel en grandes cantidades. [5]

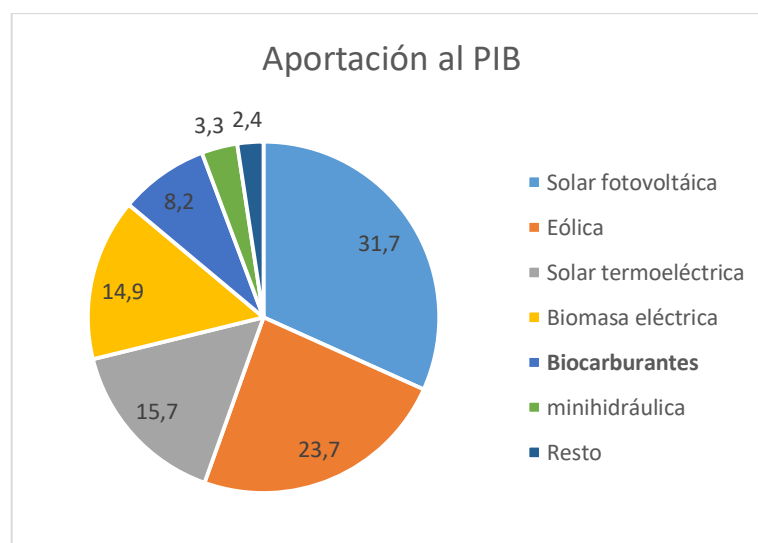
· Método de reacción ultrasónica. En este método, las ondas ultrasónicas causan que la mezcla produzca y colapse burbujas constantemente. Esta cavitación proporciona simultáneamente la mezcla y el calor necesario para llevar a cabo el proceso de transesterificación. Se reduce drásticamente el tiempo, la temperatura y la energía necesaria para la reacción. No solo reduce el tiempo de reacción sino también el de separación. Conveniente para producción en continuo en lugar de producción por lotes, sin embargo, se requiere una tecnología específica para este proceso, generalmente muy cara [6].

· Hidrotratamiento (HVO). Se trata de otro método para producir biodiesel a partir de muchas clases de aceites vegetales y grasas, incluyendo los aceites vegetales usados. En el proceso se emplea hidrógeno para separar el oxígeno de los triglicéridos produciendo una mezcla de parafinas, dióxido de carbono y agua. El producto de la primera etapa se isomeriza, siempre en presencia de hidrógeno, para obtener cadenas lineales laterales que mejoren las propiedades de flujo frío. Los HVO ofrecen diversas ventajas, de las cuales se destaca la ventaja de que no se forma glicerina como subproducto y el rendimiento alcanza prácticamente el 100%. Además, es posible modificar refinerías convencionales en desuso para adecuar la planta a la producción de este tipo de combustibles. Este proceso, a pesar de ser el que más rendimiento ofrece, también es el que más inconvenientes presenta, ya que se requiere de un suministro constante de hidrógeno.

#### 4.4.3. Mercado Actual

La producción de biodiesel en España se incrementó un 30,6% (1.515.000 toneladas) en 2017, lo que supone una contribución, entre biodiesel y bioetanol, de 764 millones de euros al PIB alcanzando así la cifra más elevada de la serie histórica. Según el estudio realizado por APPA, “Este resultado ha sido posible gracias al incremento de las exportaciones, dado que las ventas en el mercado nacional sólo aumentaron ligeramente debido al aumento de las importaciones”. [7]

En el mismo estudio, se observan las distintas tecnologías y su aportación porcentual al PIB en 2017, la cual es la siguiente:



Gráfica 4.4.3. Aportación de tecnologías al PIB nacional. Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en el gráfico anterior, La aportación de los biocarburantes supuso un 8,2% del total de energía renovable generada en 2017, lo que supone unos 763 millones de euros corrientes aportados por los biocarburantes españoles.

El mercado del biodiesel sufrió un incremento en 2018 del 17%, alcanzando la cifra de 1.767.000 toneladas producidas, según los datos ofrecidos por la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC). Por lo tanto, se puede observar que aunque la producción haya aumentado con respecto al año anterior, ese aumento ha sido menor que en otros años.

No obstante, España sigue teniendo una gravísima dependencia energética donde el 99.9% del gas y el petróleo han de ser importados, lo que nos produce una destacada vulnerabilidad a precios en la cotización de estos hidrocarburos. Sin embargo, España es también un país con un gran potencial en la explotación de energías de fuentes renovables: situado entre mares, desniveles de terreno que favorecen la eólica, una gran superficie de insolación ideal para las tecnologías fotovoltaicas y un alto potencial en el desarrollo de energías mareomotrices.

La evolución del mercado de los biocarburantes no arroja mucha confianza a las industrias petroleras, ya que aunque la producción haya aumentado para la misma capacidad instalada, durante 2017 se cerraron diez plantas sobre las treinta plantas operativas que empezaron el año en España. Cabe destacar que todas esas plantas utilizaban aceites vegetales refinados provenientes de cultivos energéticos como materia prima, lo que provoca el gasto adicional de cubrir los costes de un cultivo energético constante, o en otras palabras, una dependencia de cultivos energéticos. Este hecho no es el único inconveniente en este tipo de procesos, ya que dicho tipo de cultivo causa diversos problemas medioambientales como desplazamiento de especies, erosión del suelo y el propio hecho de utilizar un posible alimento como fuente de energía.

En este proyecto se utiliza un residuo alimenticio altamente contaminante, como el aceite vegetal usado, para elaborar un producto con un alto valor añadido, lo que reduce los costes de obtención de la materia prima y los costes del tratamiento de dicho residuo si no llega a gestionarse adecuadamente.

En la siguiente tabla se puede observar el consumo de los diferentes tipos de gasóleos por comunidades autónomas, en la cual las Islas Canarias registraron, en 2018, un consumo de gasóleo de 914 mil toneladas.

Consumo de gasóleos por Comunidades Autónomas\*

Unidad: miles de toneladas

	nov-18				Últimos doce meses			
	A	B	C	Subtotal	A	B	C	Subtotal
Andalucía	296	54	10	361	3.632	653	94	4.380
Aragón	72	26	10	108	876	309	85	1.270
Asturias	35	8	5	47	440	84	53	578
Baleares	27	4	11	43	421	52	136	609
Canarias	59	-	20	79	696	-	218	914
Cantabria	26	5	^	32	327	62	5	394
Castilla y León	152	62	22	236	1.858	642	209	2.709
Castilla La Mancha	109	54	15	178	1.314	583	128	2.025
Cataluña	308	46	23	378	3.696	515	236	4.447
Ceuta	1	-	^	1	14	-	1	14
C. Valenciana	178	25	7	210	2.187	269	76	2.532
Extremadura	55	13	2	70	673	153	19	845
Galicia	115	26	26	166	1.417	303	241	1.961
La Rioja	15	5	2	22	205	52	20	277
Madrid	191	21	23	236	2.262	214	208	2.684
Melilla	2	-	-	2	21	-	-	21
Murcia	78	13	1	92	948	149	11	1.109
Navarra	55	8	2	65	658	98	20	776
País Vasco	156	15	8	180	1.824	169	77	2.070
<b>Total nacional</b>	<b>1.929</b>	<b>386</b>	<b>190</b>	<b>2.505</b>	<b>23.468</b>	<b>4.309</b>	<b>1.838</b>	<b>29.615</b>

\* No incluye otros gasóleos de automoción ni otros gasóleos.  
- igual que 0,0 / ^ mayor que 0,0

Fuente: Cores

Figura 4.4.3. Consumo de gasóleos por Comunidades Autónomas. Fuente: CORES.

Así mismo, en la siguiente tabla se pretende comparar el consumo de biocarburantes frente a otros combustibles más utilizados como la gasolina o el gasóleo A. Se observa que los biocarburantes sufren un lento crecimiento debido, por un lado, a la desconfianza del consumidor ante la incertidumbre de posibles fallos mecánicos en el motor diésel, y por otro lado, el precio del biodiesel se sitúa por encima del gasóleo A, siendo su precio de 1,288 € por litro y 1,221 € por litro respectivamente.

Tabla 4.4.4. Precio y consumo combustible actualizado febrero 2019. Fuente: CORES.

	Total (Tn)	Precio (€/L)
A	23.476.823	1,221
Biodiesel	15.593	1,288
Biodiesel Mezcla	41.108	-
<i>Subtotal gasóleos auto</i>	<b>23.533.524</b>	
B	4.325.911	0,883
C	1.803.999	0,946
Otros	1.839.505	-
<b>Gasóleos</b>	<b>31.502.938</b>	
95 I.O	4.696.168	1,254
98 I.O	391.455	1,387
Bioetanol	4.355	0,90
<b>Gasolinas</b>	<b>5.091.977</b>	

En la siguiente tabla se pretende destacar el porcentaje de biocombustible que se mezcla con las gasolinas y gasóleos en Canarias en el último año 2018. Se encuentra que el promedio se encuentra cerca del 5% de mezcla de biocombustible.

Tabla 4.4.5. Consumo combustibles en Canarias en 2018 y porcentaje de biocombustible.

Unidad: Toneladas						
Mes	Gasolina 95	Gasolina 98	% bio en gasolinas	Gasóleo A	% bio en gasóleos	Fuelóleo BIA
Enero	14.655	6.544	4,27%	27.831	3,48%	40.433
febrero	13.914	6.208	4,27%	26.514	3,28%	36.792
marzo	15.799	7.321	4,06%	29.389	2,81%	36.811
abril	14.979	6.925	3,44%	28.726	3,45%	37.230
mayo	14.703	6.894	4,12%	28.825	3,60%	37.702
junio	14.228	6.464	3,80%	27.242	3,72%	34.467
julio	14.934	6.679	4,00%	28.268	4,08%	43.354
agosto	16.062	6.991	4,26%	29.644	3,48%	39.502
septiembre	14.139	6.118	5,11%	26.267	4,05%	31.722
octubre	15.678	6.822	5,11%	30.019	3,41%	35.754
noviembre	15.458	6.373	5,27%	29.479	3,40%	36.889
diciembre	15.461	6.784	4,85%	27.732	3,53%	30.516
	<b>12.944.207</b>	<b>1.081.456</b>	<b>4,88%</b>	<b>64.828.238</b>	<b>5,01%</b>	<b>441.171</b>

Fuente: CORES.

#### 4.5. Marco regulatorio

A continuación se expone la legislación vigente a cerca de las características técnicas y especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo y se regula el uso de determinados biocarburantes.

Real Decreto 61/2006, de 31 de enero. Los productos resultantes de la adición del etanol a la gasolina y del biodiesel al gasóleo de automoción, destinados a su utilización como carburantes de vehículos, han de cumplir las especificaciones recogidas.

Por su parte, los esteres metílicos de los ácidos grasos (FAME), denominados biodiesel, son productos de origen vegetal o animal, cuya composición y propiedades están definidos en la **norma EN 14214** (el índice máximo de yodo queda establecido en 140).

El valor de referencia para el objetivo indicativo nacional de comercialización de un porcentaje mínimo de biocarburantes se fija en el 5,75%, calculado sobre la base del contenido energético de toda la gasolina y todo el gasóleo comercializado en el mercado con fines de transporte [2]. En la tabla 1 se muestran los valores establecidos que debe cumplir el biodiesel para ser comercializable.



Tabla 4.5. Parámetros establecidos para los biocombustibles según la normativa vigente

Propiedad	Unidad	UNE EN 14214		ASTM	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Contenido de éster	% (m/m)	96,5	-	-	-
Densidad (15 °C)	Kg/m <sup>3</sup>	860	900	860	900
Viscosidad cinemática (40 °C)	cSK	3,5	5,0	1,9	6,0
Punto de inflamación	°C	101	-	130	-
Contenido en azufre	mg/kg (ppm)	-	10	-	0,05
Residuo carbonoso	% (m/m)	-	0,3	-	0,5
Índice de cetano	-	51,0	-	-	-
Contenido en cenizas de sulfatos	% (m/m)	-	0,02	-	0,02
Contenidos de agua	mg/kg	-	500	-	-
Contaminación total	mg/kg	-	24	-	-
Valor ácido	mg KOH/g	-	0,5	-	0,5
Contenido en metanol	% (m/m)	-	0,20	-	0,2
Contenido en monoglicéridos	% (m/m)	-	0,80	-	0,8
Contenido en diglicéridos	% (m/m)	-	0,20	-	0,2
Contenido en triglicéridos	% (m/m)	-	0,20	-	0,2
Glicerina libre	% (m/m)	-	0,02	-	0,02
Glicerina total	% (m/m)	-	0,25	-	0,24

#### 4.6. Ventajas

Las ventajas que comportan la producción de este tipo de biodiesel se resumen a continuación:

- Empleo de residuo altamente contaminante como materia prima, dando solución doble; problemática de contaminación medioambiental y aprovechamiento energético.
- Sustitución del diésel convencional en motores, quemadores y turbinas sin necesidad de modificación mecánica.
- Posee mejores propiedades lubricantes que el diésel tradicional.

- Proporciona una protección contra la dependencia del petróleo.
- Mayor poder disolvente, que evita la formación de carbonilla y mantiene limpio el motor.
- Es un combustible biodegradable por lo que evita la contaminación en caso de derrame.
- Se producen menos partículas de desgaste que con el diésel convencional.
- El uso de aceites vegetales usados reduce drásticamente el costo de obtención de esta materia prima, ya que normalmente se entiende como un residuo.

#### **4.7. Inconvenientes**

Por otro lado, el biodiesel también supone ciertas desventajas como las siguientes:

- Es incompatible a bajas temperaturas con el petrodiesel. Posee malas propiedades por debajo de los 0 °C.
- Mayor viscosidad. Por lo que es posible que se produzcan pérdidas de flujo en los inyectores del motor.
- Problemas de corrosión.
- La presencia de K y Na pueden producir precipitaciones y obstrucciones.
- Problemas de estabilidad. Se oxida con mayor facilidad que el diésel convencional por lo que es importante tenerlo en cuenta a la hora de su almacenamiento, al ser altamente higroscópico se producen ácidos corrosivos, gomas y otros depósitos.
- Emisiones de NO<sub>x</sub>. Se debe prestar especial atención en la emisión de estos compuestos ya que pueden ser variados y de especial transcendencia en los problemas de contaminación.
- Problemática logística. Al utilizar aceites de fritura usados se presentan problemas como la recolección de los aceites, transporte y almacenamiento. Además presentan problemas a la hora de establecer sus características y trazabilidad.

Tratando de observar la ventaja que supone utilizar biodiesel, o mezcla, en cuanto a término de emisiones se ha destacado la siguiente gráfica que refleja la reducción, o incremento, de los diferentes tipos de emisiones por combustión del biodiesel.

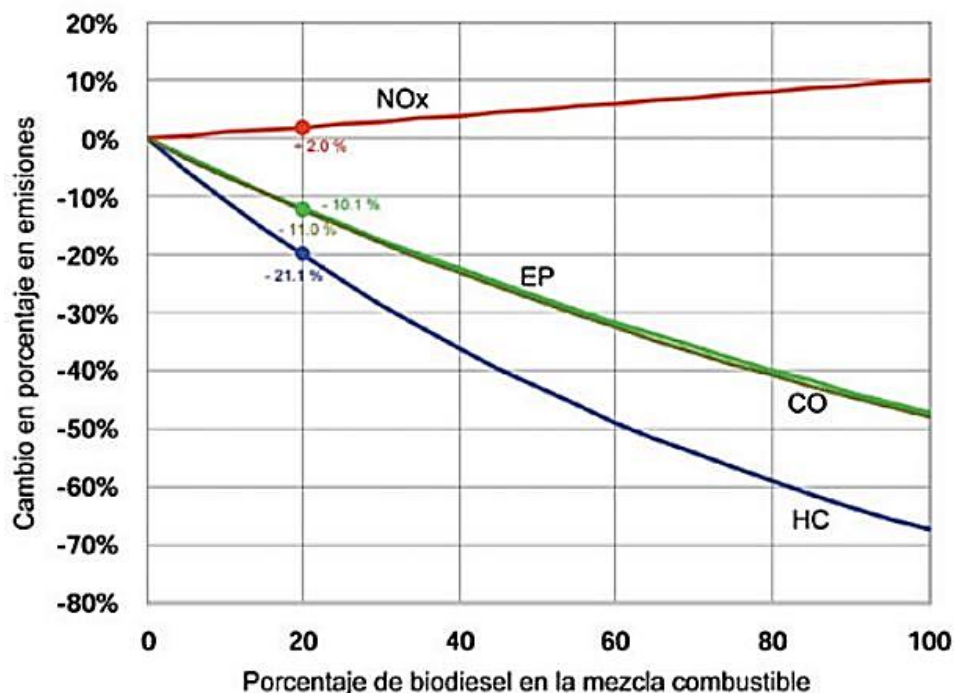


Figura 4.7. Cambio de las emisiones del biodiesel en motores de combustión interna.

Fuente: Agencia de Protección Ambiental (EPA)

En la figura anterior se observa que a medida que aumenta la proporción de biodiesel en el combustible, se reduce la emisión de gases como los hidrocarburos, micropartículas o el monóxido de carbono. Sin embargo, se observa un crecimiento en las emisiones de compuestos nitrogenados. Por otro lado, el uso de una mezcla B20 en el combustible reduce las emisiones tóxicas en un 20%, así como el uso de una mezcla B100 reduce las emisiones en casi un 70%, produce un olor agradable, es biodegradable y su toxicidad es nula por lo que se puede considerar un combustible ideal para preservar el medio ambiente.

## 5. Proceso de obtención del biodiesel

### 5.1. Bases de diseño

En este apartado se mencionan los aspectos técnicos y físico-químicos que se deben especificar para el diseño de la planta de producción de biodiesel. El objetivo de caracterizar el aceite vegetal recogido es realizar las operaciones oportunas para adecuar dicho aceite al proceso de transesterificación. Un aceite con altos niveles de acidez o altos niveles de humedad puede afectar negativamente al proceso.

#### 5.1.1. Características de la materia prima

En primer lugar se identifica la procedencia del aceite, así como sus características físico-químicas y composición de ácidos grasos libres, ya que será de gran importancia conocer la calidad de la materia prima recogida. A la muestra se le debe realizar los análisis pertinentes para determinar algunas características físicas (Densidad y viscosidad) y químicas (Índice de acidez, índice de yodo, Contenido de humedad). [8]

- Caracterización física

- Densidad: Establece la relación entre su peso y el volumen que ocupa. Se puede determinar la variación de densidad con respecto a un cambio de temperatura.
- Viscosidad: Es una medida de fricción interna entre moléculas e indica la resistencia a fluir del líquido. Se debe observar la condición física del aceite recogido. Este parámetro es de especial relevancia

- Caracterización química

- Índice de acidez: Indica la cantidad de base necesaria (NaOH ó KOH) para neutralizar los ácidos grasos libres de una cierta cantidad de aceite. Se determina mediante la valoración del aceite disuelto en alcohol con una solución de NaOH ó KOH.

Este índice es importante para el proceso de transesterificación, ya que los ácidos grasos reaccionan con el catalizador del proceso dando lugar a saponificación (jabones), y esto disminuye el rendimiento de la producción de biodiesel.

- Índice de Yodo: Nos permite obtener el número de insaturaciones de los aceites grasos presentes en el aceite. El valor obtenido estará relacionado con el punto de fusión del aceite.
- Contenido de humedad: la humedad y otros materiales volátiles son impurezas que producen la hidrólisis de los triglicéridos. Este proceso se acelera con aumentos de temperatura y presión. Existen varios métodos para determinar la humedad pero generalmente se suele usar el método de evaporación.

Se espera que el aceite tenga las condiciones adecuadas para su empleo, ya que en condiciones de exceso de ácidos grasos libres el catalizador tenderá a la neutralización de dichos ácidos grasos o a formar jabones (saponificación) en presencia de agua. Estas condiciones son un gran problema de producción ya que disminuyen el rendimiento del proceso, por ello la caracterización es un paso fundamental en el proceso de producción.

### **5.1.2. Capacidad de la planta y rendimiento**

Como se comentó en el apartado 2.4.1, en el año 2017 se recogieron poco más de 8000 litros de aceite usado doméstico, eso supone una media de unos 670 kg de aceite al mes lo que no lanza expectativas favorables sobre la rentabilidad de llevar a cabo el proceso. Por otro lado, las últimas cifras del 2018 son alentadoras, ya que el crecimiento

con respecto al 2017 fue de 7.460 litros (93%), lo que sitúa la cifra en 15.513 litros anuales recogidos y una media mensual de casi 1.300 litros. El fuerte crecimiento en la recogida de aceite favorece las condiciones de la planta en el sentido de contar con mayor materia prima. Evidentemente, la captación de dicho aceite variará según diversos factores por lo que se deberá tener en cuenta a la hora de producir de forma discontinua. Inicialmente se realizará el proceso de forma discontinua hasta que el volumen a tratar justifique una tecnología continua de producción. El diagrama general del proceso se puede observar a continuación.

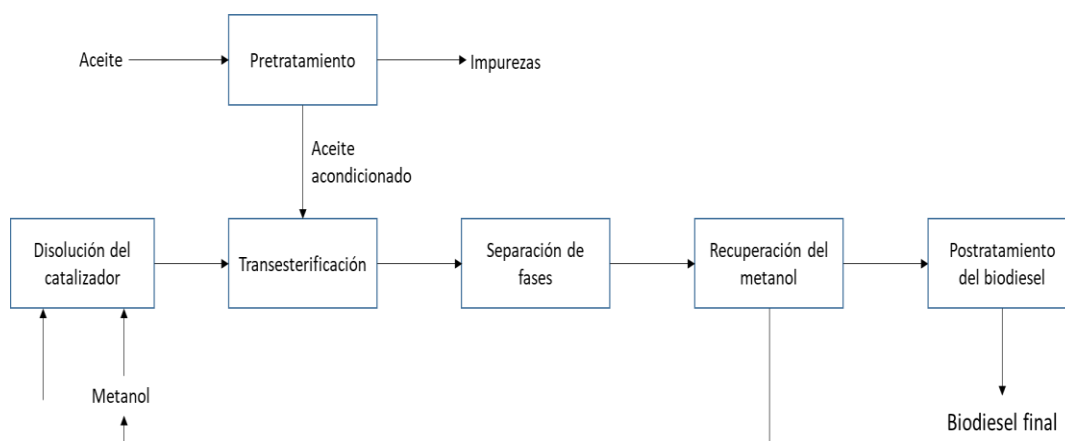


Figura 5.1.2. Esquema general del proceso de obtención de biodiesel a partir de AVU.

Se indicó anteriormente que la relación aceite:alcohol con la que trabajaremos en este proyecto será de 1:6, respectivamente. Para hallar las cantidades necesarias para que se cumpla esta relación debemos conocer principalmente el peso molecular y su densidad, lo que nos permite conocer el volumen y la masa necesaria para la reacción de transesterificación. Supone un problema logístico realizar análisis por cada lote de aceite tratado, ya que el aceite recibido no tiene una trazabilidad fija.

Por ello, se ha realizado el balance de materia utilizando como base de cálculo 100 litros de aceite. Aun así, nos encontramos con la problemática de desconocer el peso molecular más preciso para el aceite de partida ya que puede ser muy variado, por lo que acudimos a la bibliografía para realizar una primera estimación orientativa. Los datos obtenidos difieren unos de otros según el autor, la procedencia de las muestras, el grado de uso del aceite, el estado de oxidación, etc.

A pesar de las diferencias entre los pesos moleculares obtenidos bibliográficamente, Diversas fuentes citan el valor entre 866 y 873,4 g/mol [9,10], por ello optaremos por el caso más representativo, por lo que se establece el peso molecular del aceite en 876 g/mol. A partir de este dato, junto con la densidad del aceite de partida, se puede calcular las cantidades a añadir de reactivo y catalizador. En la siguiente tabla se muestra esa relación en base a los 100 litros de referencia y suponiendo un rendimiento del 95% facilitado por el fabricante del equipo utilizado.

Tabla 5.1.2. Tabla de trabajo:

		Reactivos		Productos	
	Aceite*	Metanol	NaOH	BD	Glicerina
Litros	100	26,80	0,43	99,39	7,68
kg	92	21,23	0,92	87,46	9,67

\*hasta 1800 L

Los cálculos reflejados en la tabla anterior se muestran a continuación, usando 100 litros de AVU como base de cálculo.

$$\cdot \text{Proporción de alcohol: } 100 \text{ L aceite} * \frac{\rho_{\text{Aceite}}}{PM_{\text{Aceite}}} = 0,105 \text{ kmol aceite}$$

Dado el rendimiento bibliográfico del 95%:

$$\frac{0,105}{0,95} = 0,110 \text{ kmol aceite}$$

Como la relación aceite:metanol en esta reacción ha sido establecida en 1:6, la proporción de alcohol será:

$$0,110 \text{ kmol aceite} \longrightarrow 0,663 \text{ kmol Metanol} = 26,8 \text{ Litros Metanol}$$

De los cuales 13,40 Litros son añadidos en exceso, recuperados y recirculados al sistema.

· Proporción de catalizador: (1% p/p<sub>aceite</sub>)

$$100 \text{ Litros aceite} = 92 \text{ kg aceite} \longrightarrow 0,92 \text{ kg NaOH/BC}$$

· Producción de biodiesel: (1 mol aceite → 3 mol biodiesel)

$$110,6 \text{ mol aceite} \longrightarrow 315,07 \text{ mol de biodiesel} \longrightarrow 104,62 \text{ litros de biodiesel}$$

· Producción de glicerina

$$100 \text{ litros aceite} \longrightarrow 9,67 \text{ kg glicerina} \longrightarrow 7,68 \text{ litros glicerina}$$

## 5.2. Almacenamiento de la materia prima

El almacenamiento del aceite crudo recogido se deberá realizar con la menor cantidad de trazas sólidas posibles, a fin de evitar incrustaciones, sedimentación de dichos restos sólidos en el tanque y degradación de éstos que puedan afectar al proceso posterior. Por ello será importante por parte del gestor que se eliminen los restos sólidos antes de almacenarlo. El almacenamiento se realizará en depósitos de 1200 litros de capacidad cada uno, contruidos con doble capa de polietileno de alta densidad, asegurando unas óptimas condiciones de higiene, seguridad e insensibilidad a la corrosión. Además contará con un indicador de nivel y visor de fugas.

Aunque la producción anual de aceite sea de 8000 litros de aceite a tratar, se contará con 4 tanques de este tipo, con un total de 4800 litros de capacidad total, ya que al trabajar en discontinuo, se realizarán lotes cada 1800 litros aproximadamente. En caso de ampliación de recogida de aceites será recomendable aumentar también la capacidad de almacenaje, como es evidente. Una primera imagen del contenedor se puede ver a continuación.



Figura 5.2. Tanque de almacenamiento de aceite crudo.

### 5.3. Pretratamiento

En esta etapa del proceso se pretende eliminar en su totalidad los sólidos suspendidos y el agua presente en la muestra, además de otras impurezas. Mediante desbaste y/o filtrado conseguimos eliminar gran parte de los sólidos suspendidos totales y mediante evaporación eliminamos la humedad que pudiera quedar atrapada.

Por otro lado, se deberán eliminar los ácidos grasos libres presentes ya que estos compuestos serán los protagonistas de formar pastas jabonosas. Estos ácidos son provenientes de la alteración de los triglicéridos en el procesado y almacenamiento de los aceites. Es importante eliminarlos en la mayor proporción posible ya que pueden reaccionar con el catalizador disminuyendo el rendimiento de la operación.

Por lo tanto las unidades a emplear en el pretratamiento son:

- Filtración. En este proceso se pretende eliminar en la mayor cantidad posible los sólidos suspendidos presentes y residuos sólidos que pudieran haber.
- Secado. Eliminación del agua presente en el aceite mediante evaporación al vacío y/o centrifugación.
- Pre-esterificación ácida: La pre-esterificación ácida se basa en hacer reaccionar los ácidos grasos libres presentes en el aceite para eliminarlos previamente a la transesterificación.

Entre los tratamientos más importantes destaca el análisis de ácidos grasos libres. En caso de que el aceite presente altos niveles de acidez (>5%) se debe llevar a cabo una pre-esterificación ácida, con el objetivo de transformar los ácidos grasos libres presentes en el aceite en triglicéridos que puedan formar parte de la reacción de transesterificación. Además se consigue eliminar, en cierta medida, algunos compuestos saponificables que puedan afectar posteriormente a la reacción de transesterificación.

### 5.3.1. Filtración

La filtración es necesaria para eliminar las impurezas sólidas que pueda contener el aceite crudo, como restos de comida resultantes del uso del aceite. Para eliminar en el mayor grado posible estas impurezas se utilizarán depósitos diseñados especialmente para almacenar el aceite limpio a la vez que es posible eliminar dichos restos sólidos.



Figura 5.3.1. Tanques de filtración y almacenamiento de aceites vegetales usados.  
Fuente: DISSET ODISSEO

Cada tanque contará con 1000 litros de capacidad, en total será necesario 4 tanques de este tipo para una capacidad total de 4000 litros. Un embudo con filtro extraíble y capacidad de 20 litros retendrá los sólidos y evitará posibles derrames. Están fabricados en polietileno de alta calidad, no se oxidan, son totalmente estancos y resistentes a daños mecánicos, además su estructura de doble casco reduce el mínimo la posibilidad de escape de aceite.

En caso de no conseguir el grado de filtración adecuado, se optará por mallas filtrantes con las siguientes características. El aceite crudo debe estar exento de residuos sólidos para evitar posteriores problemas, como por ejemplo en los sistemas de impulsión. La filtración se puede realizar en caliente para agilizar el proceso o en frío para eliminar sustancias jabonosas o con bajo punto de fusión provenientes del uso del aceite.





Figura 5.3.2. Malla filtrante del aceite crudo. Fuente: Filtros Anoa s.a.

### 5.3.2. Pre-esterificación ácida

Esta etapa comporta la neutralización previa de los ácidos grasos libres, para evitar la saponificación de dichos compuestos. Este pretratamiento será necesario siempre y cuando el nivel de acidez sea mayor que el 5%, a priori no será necesario este proceso para nuestro caso pero se deberá tener en cuenta. El proceso puede llevarse a cabo mediante dos procesos. Por un lado se puede realizar neutralización con agua, el cual se evitará para evitar reacciones de saponificación con el aceite y pérdidas de rendimiento. Por otro lado, mediante la esterificación previa de los ácidos grasos libres con ácido sulfúrico se consiguen rendimientos mayores pero se produce una reacción exotérmica con la que se deberá tener especial cuidado. En este último caso, se hace reaccionar los ácidos grasos libres presentes en el aceite con el alcohol (Metanol) en presencia de un catalizador ácido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) para transformarlos en triglicéridos, los cuales reaccionarán en la etapa de transesterificación.

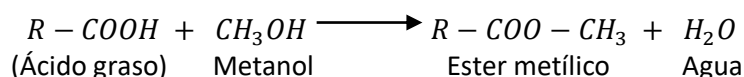


Figura 5.3.2. Reacción de esterificación ácida

Con la esterificación ácida se consigue un beneficio doble: un aumento de la producción de alquilésteres y una disminución de la formación de jabones, lo que se traduce como un mayor rendimiento del proceso.

### 5.3.3. Secado

Es importante resaltar que el aceite debe contener un bajo nivel de humedad ya que el hidróxido de sodio reacciona con la humedad del ambiente para formar jabones y disminuir su efectividad como catalizador. El jabón que se forma resultado de la saponificación provoca un aumento significativo de la viscosidad y la aparición de geles que dificultan tanto la reacción de transesterificación como su posterior separación del glicerol. En la reacción de saponificación el triglicérido reacciona con el catalizador en presencia de agua para formar jabones siguiendo la siguiente estequiometría.

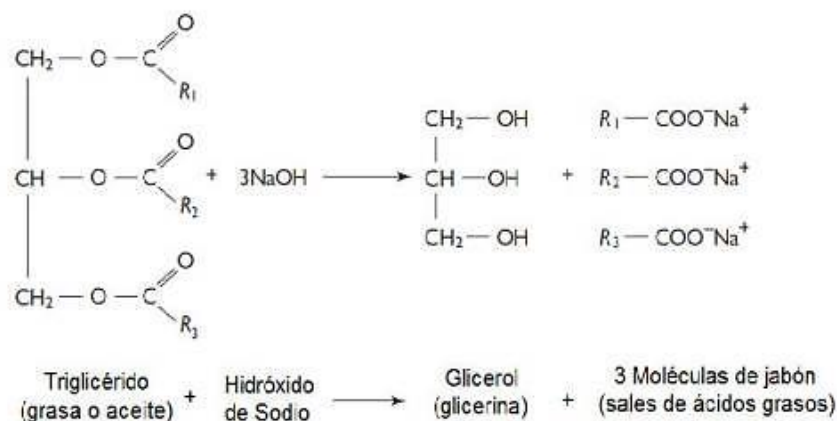


Figura 5.3.3. Reacción de saponificación

Para realizar el secado se utiliza una bomba de vacío acoplada al equipo compacto que se utiliza para la siguiente etapa del proceso, en adición se utilizará una centrifugadora previamente a la adición al equipo con el objetivo de eliminar en la mayor proporción posible la humedad del aceite.

#### 5.4. Transesterificación

Tras realizar el pretratamiento oportuno al aceite vegetal usado, se procede con la puesta en marcha de la instalación para comenzar con la producción de biodiesel, tras asegurarse de la completa seguridad del proceso y los parámetros adecuados para garantizar la óptima calidad del producto.

Esta etapa es crucial en el proceso, pues supone añadir los reactivos y el catalizador en la proporción correcta. Por ello, hay que realizar el balance de materia teniendo en cuenta el volumen de sólidos y el agua que se haya separado en la etapa de pretratamiento.

Tanto la proporción de aceite y alcohol como la cantidad de catalizador suponen la mayor dificultad del proceso. Como ya se comentó anteriormente, es aconsejable utilizar un exceso de alcohol en la disolución para desplazar el equilibrio hacia la formación de productos. Se tiene una relación molar estequiométrica de 3 moles de alcohol por cada mol de triglicérido (1:3), mediante la bibliografía se llega a la conclusión de que la relación a usar será de 6 moles de alcohol por cada mol de aceite (1:6) [11]. Por otro lado, debido a que se trata de residuos, trabajar en base molar es una problemática pues es difícil averiguar la masa molecular y la composición de cada lote producido, además de las concentraciones de las sustancias que contiene.

El catalizador juega un papel fundamental en el desarrollo de la reacción en un periodo de tiempo razonable. Por ello, qué tipo de catalizador utilizar y en qué cantidad son cuestiones de gran relevancia. Utilizar una cantidad demasiado baja de catalizador puede provocar que la reacción transcurra en demasiado tiempo, y a su vez, una cantidad demasiado alta de catalizador favorece la formación de jabones que hace disminuir el rendimiento del proceso.

Se elige como catalizador el metóxido de sodio ( $\text{CH}_3\text{ONa}$ ), resultante de la mezcla entre el metanol y el hidróxido sódico. Este compuesto, al ser libre de agua, permite obtener rendimientos de conversión mayores, a unos costes más bajos y obteniendo un biodiesel de mayor calidad. [12]

El esquema general para el proceso de transesterificación es el siguiente.

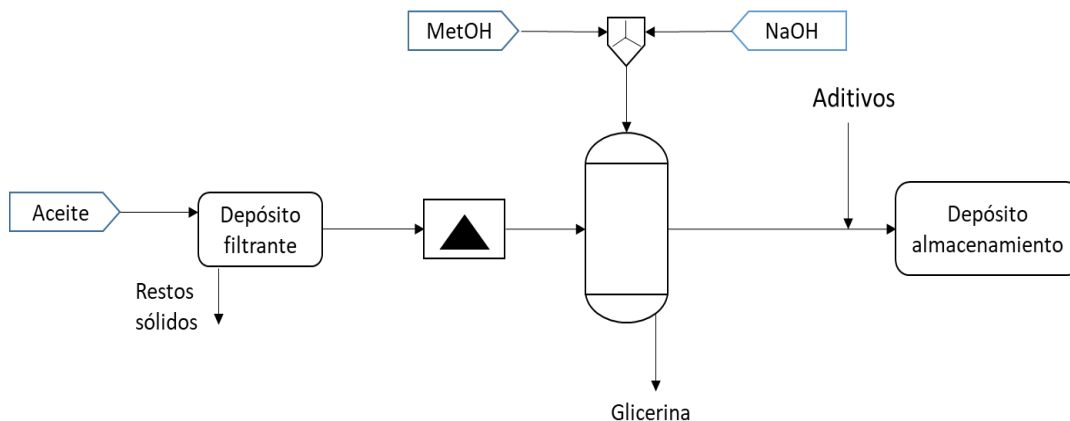


Figura 5.4.1. Diagrama de flujo general para proceso de transesterificación.

#### 5.4.1. Variables manipuladas

Las variables manipuladas del sistema, con las que operan en la planta, se mencionan a continuación. Este apartado supuso el estudio de las variables que afectan al proceso desde el punto de vista técnico, con el fin de obtener el mayor rendimiento posible.

Las variables analizadas en el proceso fueron las siguientes:

- Tipo de catalizador:

La reacción de transesterificación sucede entre un triglicérido y un alcohol, pero es necesaria la presencia de un catalizador para que la reacción transcurra en un periodo de tiempo razonable. Existen gran cantidad de sustancias capaces de catalizar este tipo de reacción, por ello se consultó en la bibliografía el catalizador más adecuado para el proceso. El objetivo es conseguir un catalizador que contamine lo menos posible el combustible y el medio ambiente, además de encontrar un equilibrio entre rendimiento de producción y tiempo de reacción.

Los catalizadores básicos más utilizados en la industria son  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$  o  $\text{H}_2\text{SO}_4$  como catalizador ácido en la pre-esterificación ácida de los aceites. El catalizador que más adecuado para este proyecto será el hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) por motivos económicos y su fácil obtención en el mercado local.

- Relación molar alcohol:aceite y cantidad de catalizador:

Como se ha hecho mención en el punto anterior, el mecanismo de reacción de la transesterificación del aceite vegetal transcurre entre un triglicérido y un alcohol en proporción estequiométrica 1:3, moles de triglicéridos a moles de alcohol respectivamente. Sin embargo, al tratarse de una reacción de equilibrio esta relación no

es la apropiada si se quiere conseguir la mayor cantidad de producto posible ya que la cinética de la reacción tenderá a alcanzar el equilibrio en estas condiciones, por este motivo se usa cantidades de alcohol en exceso determinadas para desplazar el equilibrio hacia la formación de productos, es decir hacia la formación de biodiesel.

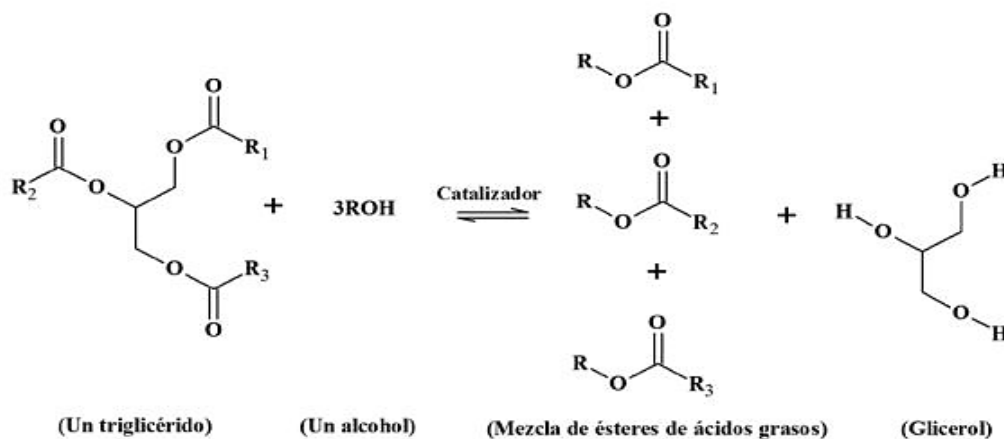


Figura 5.4.2. Transesterificación de un triglicérido con alcohol. [13]

A través de la bibliografía y anteriores proyectos dedicados al estudio de esta reacción, se ha llevado a la conclusión de que la relación molar a utilizar en el proceso será de 1:6, la cual supone el mayor rendimiento alcanzando el 90%.

- Número de transesterificaciones:

El proceso de transesterificación se puede realizar en una única etapa. Sin embargo, es posible realizar la transesterificación en varias etapas, fraccionando el proceso con el objetivo de eliminar en cada etapa la glicerina y las pastas jabonosas que se hayan formado. Existen diversos métodos para eliminar gradualmente los subproductos, que en cantidades considerables son los protagonistas del desplazamiento del equilibrio hacia la formación de reactivos de nuevo, disminuyendo el rendimiento del proceso y aumentando el tiempo de reacción [14]. Por este motivo es aconsejable eliminar en el grado en el que sea posible la glicerina y los subproductos que se van formando durante la reacción.

En nuestro caso no será necesario realizar dos etapas, ya que no estará justificado debido a la reducida carga de trabajo, y porque se cuenta con un único reactor para realizar la transesterificación. En caso de realizar un proceso en continuo, será aconsejable fraccionar el proceso, eliminando la glicerina y pastas jabonosas intermedias para obtener un mayor rendimiento.

- Temperatura, tiempo y velocidad de agitación:

La temperatura de la reacción puede afectar a la densidad y la viscosidad del aceite y de la mezcla, mejorando así la solubilidad entre el alcohol y el aceite. La mezcla homogénea de ambas fases favorecerá que se formen los productos en un tiempo inferior. Por otro lado, la conversión de los aceites se incrementa con el tiempo que permanece la reacción, pero éste puede variar según el tiempo de aceite vegetal usado y del catalizador utilizado. Según la bibliografía, las condiciones ideales están entre 4 y

12 horas, dependiendo del tipo de catalizador, pero también se observa que a partir de los 90 minutos la formación de metilésteres es casi nula. [15]

La transesterificación puede ocurrir a diversas temperaturas dependiendo del aceite usado, para nuestro caso utilizaremos temperaturas cercanas al punto de ebullición del metanol (60 °C), teniendo cuidado cuando se realiza la mezcla con el catalizador, ya que ocurren reacciones exotérmicas. Por ello, hay que tener en cuenta la posibilidad de que una temperatura muy elevada puede provocar la evaporación del alcohol, ya que este tiene un punto de ebullición relativamente bajo (64 °C). Por lo tanto, es necesario implementar algún tipo de sistema de condensación con el objetivo de devolver como reflujo los volátiles que escapan de la reacción.

Por otro lado, el sistema de agitación también tiene un papel fundamental en el proceso. Un incremento de la velocidad de agitación favorece el contacto entre ambas fases y ayuda a que los reactivos difundan entre ellas, por otro lado, una agitación muy intensa puede propiciar la formación de reacciones de saponificación.

#### **5.4.2. Descripción del equipo utilizado**

Las plantas de producción de biodiesel pueden ser obtenidas en el mercado íntegramente y completamente equipadas para realizar todos los procesos necesarios. En este proyecto se ha optado por realizar el proceso en discontinuo, ya que las cantidades de aceite a tratar no justifican una tecnología continua. Tras una exhaustiva búsqueda del equipo más apropiado se encontró un equipo compacto de producción de biodiesel ideal para nuestro caso, contando con todas las medidas de seguridad necesarias.

El equipo cuenta con un reactor de metóxido para disolver el alcohol en el catalizador previamente a la transesterificación. El reactor principal de 1.800 litros de capacidad está equipado con sistemas de agitación con variador de frecuencia, calefactores por resistencias blindadas, rompedores de corrientes, cono de decantación y visores de separación de fases. Además consta de un depósito cerrado de recogida de líquidos destilados e intercambiador de tubos refrigerado por agua, para condensar el excedente de metanol recuperado por destilación. Incluye una bomba de vacío que deshidrata tanto el aceite como el biodiesel y otra bomba especial dedicada a la adición de los ácidos puros necesarios bien para la neutralización o para la esterificación ácida.

En adición, este equipo está especialmente diseñado para trabajar con aceites vegetales usados, por lo que tiene la capacidad de desgomar aceites crudos y neutralizar los altos niveles de acidez, si los tuviere. La separación de la glicerina se realiza por decantación, destila el excedente de metanol, lava el biodiesel, y el aceite, por agitación y recirculación mediante bomba de piñones. El biodiesel obtenido mediante esta tecnología tendrá un contenido en ésteres metílicos superiores al 95%, pero deberá ser superior al 96,5% para que cumpla los parámetros establecidos en la normativa vigente, por lo que se deberá tener en cuenta la opción de utilizar equipos adicionales y aditivos para adecuar el biodiesel.



Figura 5.4.3. Equipo compacto de biodiesel. Fuente: Assia s.l

El biodiesel generado mediante esta tecnología será sensible a la oxidación por lo que es importante un adecuado almacenamiento del producto, así como suministrar los aditivos necesarios. Por otro lado, la glicerina producida como subproducto se acumula en un depósito anexo, ésta glicerina se puede purificar en el propio reactor principal, con el fin de destilar el metanol y conseguir una glicerina neutra.

### 5.5. Separación y purificado

Una vez completada la reacción de transesterificación, se dejará estabilizar el contenido del reactor para lograr la separación de fases. En la fase superior se obtendrá el éster producido junto otros compuestos como puede ser el alcohol correspondiente del exceso, y por otro lado, la fase inferior contendrá la glicerina producida como subproducto. Dicha glicerina será bombeada al tanque de glicerina junto con lo que se haya producido en reacciones anteriores.

Tras la separación de las fases, se debe lavar la fase éster convenientemente utilizando agua desionizada, o agua pura, con el fin de eliminar en la mayor proporción posible los jabones que se han formado y el resto de sustancias que no han formado parte de la reacción. Se repite hasta las veces que sean necesarias para su eliminación. En adición, se colocará una centrifugadora tras el equipo de transesterificación para purificar el biodiesel y eliminar lo máximo posible las impurezas.

Cabe destacar que la glicerina separada puede tener un valor como materia prima de otros productos, por ello este subproducto debe ser procesado adecuadamente para su aprovechamiento económico, ya que puede conseguir cierto valor añadido mediante purificación. En apartados posteriores se hablará sobre las posibles utilidades de la glicerina producida.

Por otro lado, la separación del metanol en el biodiesel se puede conseguir por destilación y condensación del mismo, donde por diferencia de volatilidad se consigue

separar el metanol en exceso, el cual podrá ser utilizado nuevamente en el proceso sin necesidad de purificación ya que se recupera libre de agua. El equipo utilizado para la reacción de transesterificación de los aceites cuenta con un sistema de separación de los productos, así como la separación y recuperación del metanol en exceso.

Cuando el biodiesel sale de la reacción de transesterificación puede contener diversas impurezas en pequeñas cantidades como glicerina, metanol, catalizador y los jabones que se hayan formado, por este motivo se contemplará la posibilidad de llevar a cabo un lavado del biodiesel adicional con una columna de lavado previa a la etapa de almacenamiento de producto. En principio, el equipo de transesterificación utilizado es capaz de eliminar cualquier impureza de este tipo en el biodiesel, pero el uso continuado de este equipo podría ocasionar alguna incidencia de este estilo.

## 5.6. Almacenamiento del producto

El almacenamiento del biodiesel no es de menor importancia, ya que en esta etapa el producto es sensible a la oxidación y la polimerización. Por ello se han escogido depósitos especialmente diseñados para este servicio con capacidad de 2000 litros cada uno.



Figura 3.6. Depósitos homologados para gasoil 2000 Litros

En este punto del proceso es importante destacar la estabilidad a la oxidación del biodiesel producido, ya que son diversos factores (Bacterias, hongos, exceso de agua, luz o contacto con el aire) los que afectan significativamente en la estabilidad a la oxidación. Por ello es necesario evitar el contacto con dichos factores, pero no basta con esto, además se deben añadir ciertos aditivos para asegurar la calidad del biodiesel y así evitar multas al entregar un producto fuera de rango de requerimientos establecidos por legislación. Los aditivos antioxidantes se deben añadir tan pronto como sea posible, ya que la calidad perdida no puede recuperarse.

El antioxidante utilizado para aumentar la estabilidad del biodiesel producido será ofrecido por la empresa 3A Antioxidants situada en Murcia, los agentes activos del producto Oxibiol son polifenoles y agentes quelantes. Los cuáles serán adecuados para el biodiesel proveniente de aceites vegetales usados utilizando entre 500 y 1000 ppm de antioxidantes dependiendo del grado de insaturación del biodiesel y del estado oxidativo del mismo. Las características del compuesto se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 3.6. Parámetros antioxidantes Oxibiol

PARÁMETROS	RESULTADOS
<b>Color</b>	Amarillo – rojizo
<b>Solubilidad</b>	Insoluble en agua, soluble en disolventes orgánicos
<b>Densidad (20°C)</b>	0,95 – 1,05
<b>Punto de Inflamación (°C)</b>	159
<b>Cenizas (mg/kg)</b>	< 0,004
<b>Incremento estabilidad oxidativa (AGQM) 1000 mg/kg</b>	10,1 (referencia: 4,6)

### 5.7. Sistema de impulsión

El trasvase de aceite crudo filtrado, desde el depósito filtrante hasta el equipo de transesterificación, requerirá la utilización de un sistema de impulsión adecuado para líquidos con sus características, principalmente su alta viscosidad. Por este motivo, se hará uso de una bomba autoaspirante de anillo líquido ideal para el trasiego de aceites vegetales, grasas fluidas o gasoil. Dado el volumen de aceite a tratar será ideal que trabaje entorno a los 1200 L/h de aceite. Dependiendo de la viscosidad del aceite vegetal usado se tendrá mayor o menor pérdida de carga, por lo que será de gran importancia filtrar adecuadamente el aceite y reducir su viscosidad lo máximo posible antes de ser impulsado por la bomba.

Por otro lado, será necesario otro equipo de impulsión para almacenar el biodiesel en los depósitos. Por lo que se contará con una bomba acondicionada para atmosferas explosivas (ATEX). El equipo de impulsión será ofrecido por los mismos proveedores que los depósitos de almacenamiento del producto, ahorrándonos así problemas en las condiciones de uso del equipo. Dicho equipo será una bomba automática de 12 Voltios trabajando a un caudal de 30 L/min con contador mecánico, válvula antirretorno en la boca de aspiración y 4 metros de manguera racorada.

### 5.8. Calidad del producto y rendimiento del proceso

No es suficiente con producir biodiesel a partir de este tipo de residuo, es importante que el biocombustible generado cumpla con los parámetros establecidos en la normativa vigente, ya que los fallos asociados al uso de biodiesel en motores diésel convencionales suelen ser causados por una mala calidad del biocombustible.

Cada fallo de motor producido por usar este tipo de biocombustible en motores diésel supone un aumento de la insatisfacción del consumidor, por lo tanto es de suma importancia garantizar la calidad del biodiesel producido, con el fin de aumentar la confianza de los consumidores en este tipo de combustibles. Los estándares de calidad requeridos se recogen en la normativa UNE EN 14214, cuyos valores se citaron en el apartado 2.5.

Una vez hayamos obtenido el biodiesel, se procederá a realizar los análisis que determinan la calidad del producto obtenido y compararlos con los límites estables por la normativa vigente. Como comentamos en puntos anteriores, el rendimiento de la



operación la definiremos como la relación entre la masa de biodiesel y la masa de aceite utilizada para obtenerlo.

$$\varphi = \frac{\text{Masa biodiesel obtenido}}{\text{Masa de aceite utilizado}} \cdot 100$$

El biodiesel obtenido deberá cumplir con los parámetros establecidos por la norma UNE EN 14214. Será necesario realizar los análisis oportunos para determinar la calidad del producto.

En general, este tipo de procesos suelen tener un rendimiento superior al 90%, pero la calidad de los AVU suele ser un condicionante para el grado de conversión. Las causas de una baja conversión pueden ser dos (o una combinación de ambas):

- Reacción incompleta, dejando aceites (triglicéridos) y productos intermedios (monoglicéridos, diglicéridos). Un valor alto de éstos es, juntamente con la glicerina libre, causante de comprobados fallos en los motores.

- Contenido no esterificable en el AVU, característico de procesar este tipo de aceites residuales, ya que se hace presente la degradación y la polimerización que sufren los aceites a lo largo de su vida útil.

## 5.9. Consumos

Los consumos derivados de este proceso serán, principalmente los reactivos necesarios para la reacción de transesterificación, así como los servicios auxiliares de acondicionamiento de la materia prima y el producto, tales como el vapor de calefacción, el agua de lavado, la energía eléctrica necesaria para el proceso o el antioxidante utilizado para el almacenamiento del producto.

El consumo que se deberá cubrir para justificar el proyecto será el consumo de combustible de los vehículos responsables de la gestión del aceite, así como también, los consumos internos de la planta como la electricidad necesaria para el funcionamiento de los equipos. Los costes derivados de la gestión y explotación de la planta de biodiesel se supondrán como el 1% del coste total de la instalación y se contemplan los siguientes gastos:

- Emisión de facturas
- Póliza de seguro de responsabilidad civil sobre el valor de la instalación
- Mantenimiento preventivo y correctivo

## 5.10. Aprovechamiento del subproducto

En este proyecto, se entiende la glicerina que se produce como subproducto de la reacción de transesterificación de los aceites. No obstante la glicerina tiene diversos usos y aplicaciones en la industria, como por ejemplo en la industria alimenticia, farmacéutica, cosmética o incluso en la industria tabaquera como humidificante. [15]

En el apartado 4.4.2 se hizo referencia a uno de los métodos posibles para producir biodiesel sin producir este subproducto de la reacción de transesterificación. Dado que ese tipo de tecnologías no está disponible para este caso se deberá intentar reducir, en la medida de lo posible, la formación de éste. El potencial económico de este

subproducto vendrá afectado directamente por el grado de pureza que se consiga en el proceso, por ello se deberá estudiar su composición y purificarlo, en caso de que sea necesario. La separación se puede conseguir mediante acidificación, destilación a alto vacío o con resinas de intercambio.

Sin embargo, no se trata de un subproducto totalmente inofensivo, ya que uno de sus componentes denominado etilenglicol resulta mortal en dosis superiores a 0,014 – 0,170 mg/kg de peso. El extremo cuidado que se debe tener con el uso de esta sustancia en ámbitos como el alimenticio o el cosmético se hace notable ante el panorama de intoxicaciones debidas a este compuesto. Los casos más recientes se han desvelado en febrero de 2019 en Panamá, registrándose durante los últimos 11 años una sucesión de casi 400 muertos por envenenamiento por etilenglicol en forma de jarabe expectorante (Notimérica.com, 2019). Así como el caso de Panamá, se podría citar incontables casos de intoxicación, dando a conocer el carácter tóxico de este compuesto.

La glicerina producida directamente a partir de la transesterificación de los aceites vegetales se entiende como glicerina cruda, ya que su composición de glicerol no es suficiente para considerarlo como glicerina de grado técnico. La purificación de la glicerina puede ser realizada en el equipo compacto adquirido para el proceso, la cual deberá ser capaz de obtener un alto grado de pureza de glicerol. Los parámetros de cada uno de los tipos de glicerina se reflejan en la siguiente tabla.

Tabla 3.11. Propiedades de los diferentes tipos de glicerina.

Propiedades	Glicerina cruda	Glicerina grado técnico	Glicerina grado refinada USP (99,7%)
Contenido en glicerol	40 – 88%	98% Min	99.7%
Cenizas	2.0% Max	N/A	N/A
Contenido de humedad	N/A	2.0% Max	0.3% Max
Cloruros	N/A	10 ppm Max	10 ppm Max
Color	N/A	40 Max (Pt – Co)	10 Max. (APHA)
Gravedad específica	N/A	1.262 (@25C)	1.2612 Min
Sulfatos	N/A	N/A	20 ppm Max
Análisis	N/A	N/A	99.0 – 101.0% (base seca)
Metales pesados	N/A	5 ppm Max	5 ppm Max
Compuestos clorados	N/A	30 ppm Max	30 ppm Max
Residuos de ignición	N/A	N/A	100 ppm Max
Ácidos grasos y esteres	N/A	1.00 Max	1.000 Max
Agua	12.0% Max	5.0% Max	0.5% Max
pH (solución 10%)	4.0 – 9.0	4.0 – 9.1	N/A
Residuo orgánico	2.0% Max	2.0% Max	N/A

ppm: partes por millón. N/A: No aplica.

Fuente: (SRS Engineering Corporation, glycerin specifications, 2008)

La glicerina cruda tiene un valor muy bajo en el mercado debido a su baja pureza, mientras que la glicerina de grado técnico y la glicerina grado USP poseen un valor mayor. No obstante alcanzar este grado de pureza de la glicerina también acarrea un gasto de producción que habrá que valorar convenientemente. El equipo compacto tiene la capacidad de purificar la glicerina producida por lo que resulta una ventaja de ahorro de gasto considerable, ya que un equipo adicional de tratamiento de glicerina aumentaría la inversión y los gastos globales del proyecto. Cabe destacar una vez más, que el presente proyecto comprende la producción de biodiesel y de glicerina como subproducto, por lo que la obtención de un alto grado de pureza de esta glicerina sobrepasa los límites de diseño.

## 6. Estudio económico

Este apartado es de los más importantes de destacar, ya que supondrá la viabilidad del proyecto, no solo desde el punto de vista medioambiental, sino económicamente rentable. El objetivo principal será cubrir los costes de producción, los consumos internos de la planta, y el consumo de combustible de los vehículos que transportan la materia prima, lo que justificaría una planta de este tipo.

### 6.1. Inversión

La inversión inicial comporta toda aquella maquinaria necesaria para el proceso básico de obtención de biodiesel, el cual hace referencia al esquema general representado en la figura 3.1.2. Para llevar a cabo el proyecto se deberá contar con una inversión inicial de poco más de 92.000 euros aproximadamente.

Tabla 4.1. Presupuesto inicial de maquinaria y útiles

Maquinaria y útiles	Unidades	Precio (€)	Total (€)
Tanque almacenamiento AVU	4	799	3196
Depósito filtrante	4	1195	4780
Centrifugadora	1	15000	15000
Equipo compacto transesterificación	1	60000	60000
Bombas de aspiración K-944.2	1	2282,54	2282,54
Almacenamiento Biodiesel 2000 L	3	514,25	1542,75
Bomba biodiesel automática	1	665,5	665,5
bidones transporte 200 L	10	493,7	4937
<b>SUBTOTAL</b>	<b>25</b>		<b>92.403,79 €</b>

### 6.2. Ingresos y gastos

El ingreso de la planta será íntegramente el percibido por el biodiesel, el cual irá destinado a cubrir los gastos de combustible producidos por los vehículos de gestión de este residuo y gastos energéticos internos de la planta. Como se comentó en apartados anteriores, el precio actualizado a febrero de 2019 se sitúa en los 1,206 € por litro de biodiesel y el volumen de recogida de aceite fue de 8.053 litros. En la siguiente tabla se resumen las diferentes proporciones necesarias tanto de reactivo como de catalizador y su costo.

Tabla 4.2. Tabla de precios aproximado

	Reactivos			Productos	
	Aceite	Metanol	NaOH	Biodiesel	Glicerina
Litros	100	25,46	0,43	104,62	8,08
€/L	0	1,68	6,34	1,206	-

$$\text{Beneficios} = \text{Ingresos producto} - \text{gastos}$$

Se comprende que el aceite vegetal usado obtenido, no tiene coste de adquisición, ya que se trata normalmente como residuo. Por lo que tenemos una materia prima sin coste al que se le puede añadir un alto valor añadido. No obstante, el biodiesel obtenido no podrá ser comercializable directamente, ya que son los distribuidores autorizados los responsables de hacerlo. Por este motivo, el biocombustible producido irá especialmente dirigido a autoabastecer los gastos internos de la planta, así como los gastos derivados de la actividad de gestión.

Podemos hacer un cálculo aproximado de los gastos anuales de un vehículo de este tipo, y con los beneficios percibidos por la producción de biodiesel se puede esbozar un primer balance de gastos de transporte como el siguiente.

Gasto de combustible medio		
<b>vehículo diésel*:</b>		
(~15000 km)	975	euros
Seguro:	800	euros
Imp. Circulación:	120	euros
Mantenimiento:	129,37	euros
Gastos variables:	840	euros
<b>TOTAL:</b>	<b>2864,37</b>	<b>€</b>

\*: Fuente: Jorge Serrano. Autopista.es (a través de IDAE).

Los cálculos son solo aproximaciones, sensibles a variaciones del mercado actual nacional, desde el precio del biodiesel hasta variaciones en impuestos establecidos. Como se hace evidente, habrá que sumar los gastos de amortización de los equipos y útiles, así como los gastos de producción.

### 6.2.1. Costes por litro de biodiesel producido

Como se comentó anteriormente, la materia prima obtenida no tendrá coste alguno ya que generalmente se trata como residuo, por lo que se presupone que el único gasto producido por el aceite vegetal usado será el gasto derivado de su procesamiento, además de los producidos por el transporte y gestión. Por lo tanto, los gastos de producción de dicha materia prima serán:

- Metanol

BC: 100 L de aceite crudo  $\longrightarrow$  105 mol de aceite  $\xrightarrow{1:6}$  630,1 mol de metanol

630,1 mol de metanol = 20,2 kg MetOH = 25,46 L de MetOH

De los cuales se estima recuperar la mitad ya que estequiométricamente se gastan 3 moles de ácido por cada mol de aceite, y se añaden 6 moles de alcohol por cada mol de aceite. Es decir, por cada 100 litros de aceite se deberán añadir 25,46 litros de metanol de los cuales se consume la mitad, recuperando la otra mitad por destilación y produciendo 104,62 litros de biodiesel aproximadamente.

Precio del metanol  $\longrightarrow$  42 €/25 Litros = 1,68 €/L metanol\*

$$1,68 \frac{\text{€}}{\text{L metanol}} \times \frac{13,40 \text{ L metanol}}{94,16 \text{ L biodiesel}} = 0,24 \frac{\text{€}}{\text{L Biodiesel}}$$

[\*] Referencia: Vadequímica Productos Químicos. “Disolb Metanol (25 litros)”

- Sosa caustica

(1% p/p aceite)

BC: 100 L de aceite crudo  $\longrightarrow$  92 kg de aceite  $\longrightarrow$  0,92 kg de NaOH

Precio del hidróxido sódico  $\longrightarrow$  2,975 €/ kg NaOH\*

$$2,975 \frac{\text{€}}{\text{kg NaOH}} \times \frac{0,92 \text{ kg NaOH}}{94,16 \text{ L Biodiesel}} = 0,029 \frac{\text{€}}{\text{L Biodiesel}}$$

[\*] Referencia: PanReac AppliChem ITW Reagents S.L.U. “Hidróxido de sodio perlas grado técnico”.

- Energía eléctrica

En el apartado de consumo eléctrico se tiene en cuenta que el proceso, al ser en discontinuo, se realiza cada 1800 litros de aceite vegetal usado recogido, el cual se prevé mediante los datos de recogida de la Mancomunidad del Nordeste de Tenerife que se alcance la cifra una vez al mes aproximadamente.

20 kW x 2 horas reacción = 40 kWh / 1694,8 L Biodiesel = 0,024 kWh/L Biodiesel

Precio de la energía eléctrica en España  $\longrightarrow$  0,13 €/kWh

$$0,024 \frac{\text{kWh}}{\text{L Biodiesel}} \times 0,13 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 0,0031 \frac{\text{€}}{\text{L Biodiesel}}$$

En el cálculo no se refleja el consumo eléctrico derivado del equipo de impulsión, a la espera de recibir la oferta por parte de los proveedores.

- Consumo de agua

Para el cálculo del consumo de agua se supone que la cantidad de agua utilizada para el lavado del biodiesel es del 10% del volumen de biodiesel producido, se deberá tener en cuenta la recuperación por destilación y condensación en el balance global, así como el agua utilizada como refrigerante.

1694,8 Litros biodiesel x 10% = 169,5 litros de agua

Precio del agua en Canarias = 2,30 €/m<sup>3</sup> (2016)\*

$$169,5 L \times 2,30 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 L} = 0,39 \text{ €/lote}$$

$$\frac{0,39 \text{ €}}{1883,11 L \text{ Biodiesel}} = 0,00021 \frac{\text{€}}{L \text{ Biodiesel}}$$

Lo que supone una cantidad despreciable frente a otros gastos, y teniendo en cuenta que parte de esa agua se recuperará por destilación, a priori, no supone un gasto significativo.

[\*] Referencia: iagua.es. “El precio del agua en España”.

Gasto total por litro de biodiesel producido = 0,272 €/L

Litros de biodiesel producido al año = 14.600 – 16.200 Litros Biodiesel/año

Gasto de producción anual estimado = 4.025,95 €/año

### 6.3. Amortización

Existen diversas formas de amortizar los equipos de una planta industrial, en nuestro caso optaremos por la amortización lineal la cual tiene dos formas de ser calculada; según un porcentaje fijo anual sobre el valor de adquisición o según su vida útil. Escogeremos este último al ser la vida útil del equipo facilitado por el proveedor o fabricante, por lo tanto se prevé amortizar el equipo en 20 años.

Tabla 6.3. Amortización de equipos (20 años)

Maquinaria y útiles	Unidades	Precio (€)	Total (€)	Amort. €/año
Tanque almacenamiento	4	799	3196	159,80
Depósito filtrante	4	1.195	4.780	239,00
Centrifugadora	1	15.000	15.000	750,00
Equipo compacto transesterificación	1	60.000	60.000	3.000,00
Bombas de aspiración K-944.2	1	2.282,54	2.282,54	114,13
Almacenamiento BioDiesel 2000 L	3	514,25	1.542,75	77,14
Bomba biodiesel automática	1	665,5	665,5	33,28
bidones transporte 200 L	10	493,7	4937	246,85
<b>SUBTOTAL</b>	<b>25</b>		<b>92.403,79 €</b>	<b>4.620,19</b>

Cabe destacar que existe la posibilidad de amortizar los equipos que sean necesarios en un tiempo de vida útil inferior que el utilizado en la tabla anterior, como los sistemas de impulsión, los cuales serán propensos a tener una vida útil inferior a 20 años.

### 6.4. Rentabilidad económica

Es de gran interés incluir la rentabilidad económica que el proceso ofrece, siempre teniendo en cuenta la posible comercialización del producto principal. Podemos definir la rentabilidad como la relación entre los ingresos percibidos por la planta y el coste de adquisición de la maquinaria y el inmovilizado, siempre referido a un periodo de tiempo de un año.

$$R.E = \frac{\text{Ingresos netos}}{\text{Activo total}}$$

Ingresos netos:

	Reactivos			Productos	
	Aceite	Metanol	NaOH	BD	Glicerina
<b>Litros</b>	<b>15.500</b>	<b>4.154,01</b>	<b>66,95</b>	<b>16.215,64</b>	<b>1.252,37</b>
<b>kg</b>	<b>14.260</b>	<b>3.289,98</b>	<b>142,6</b>	<b>14.269,77</b>	<b>1.577,99</b>

16.215,64 Litros Biodiesel x 1,206 €/Litro Biodiesel = 19.556,06 € de ingresos brutos anuales

4.025,95 €/año (gastos de producción) + 4.620,19 €/año (amortización) + 44,95 (aditivo) = 8.646,14 € de gasto anual

Ingreso neto = Ingreso bruto anual – gasto anual = 10.909,92 €/año

Activo total = 92.403,79 €

$$R.E = \frac{\text{Ingresos netos}}{\text{Activo total}} = \frac{10.909,92}{92.403,79} * 100 = 11,8\%$$

Una rentabilidad del 11% refleja que el retorno de la inversión es positiva pero no suficientemente buena. Ya que, como veremos a continuación, el proceso conlleva varios años para el retorno de la inversión. Por otro lado, no se tiene en cuenta el subproducto de la reacción en el estudio económico. Para observar mejor estos cálculos se hace uso del VAN, que permite calcular el valor presente de un determinado flujo de caja futuro, es decir, junto con el TIR, actúa como indicador de rentabilidad de un proyecto.

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{(1 + T.I.)^i}$$

Donde:

I = Inversión inicial

Q = Flujo de caja (ingresos – gastos)

N = Número de años de vida de la instalación

T.I. = Tasa de interés (5%)

Para el cálculo se ha utilizado una tasa de interés del 5%, la cual es común para este tipo de proyectos, sin tener en cuenta la tasa de inflación. Se supone una vida útil de 20 años.

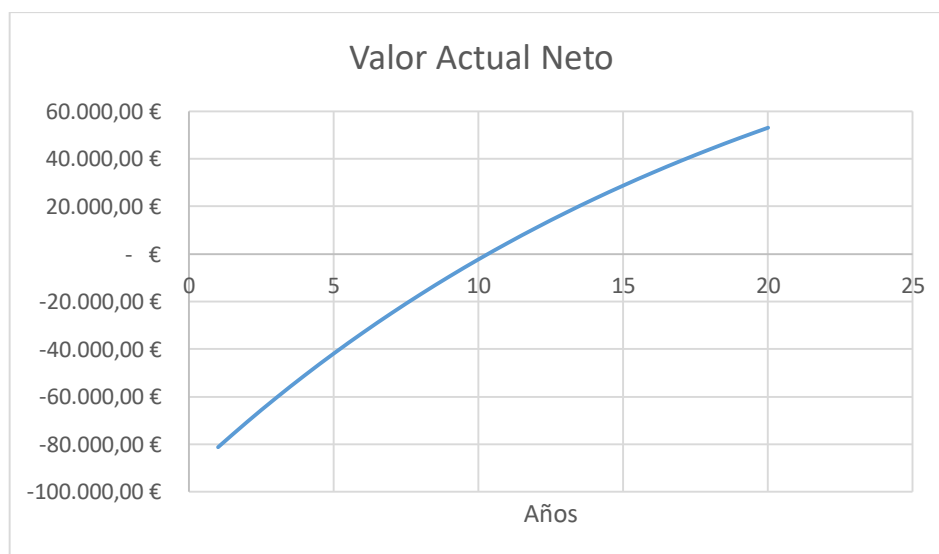


Figura 6.4. Evolución del VAN de la planta de biodiésel.

Fuente: Elaboración propia



Como se observa en la gráfica anterior, el retorno de la inversión se produce a los 13 años de realizar la inversión inicial, lo que generalmente se traduce en una mala rentabilidad económica para proyectos de este tipo. Sin embargo cabe destacar que el proyecto no solo ofrece rentabilidad positiva sino que ofrece otras ventajas medioambientales como la reducción de la huella de carbono, optando así a la posibilidad de entrar en el mercado de emisiones y captura de CO<sub>2</sub>.

Para el cálculo del VAN anterior que se ha llevado a cabo se ha supuesto que el flujo de caja en cada año sería el mismo, percibiendo cada año la misma cantidad de materia prima y por consiguiente, los mismo ingresos. A continuación realizamos el mismo cálculo suponiendo que los ingresos que se perciben aumentan un 5% anual.

Tabla 6.4. Cálculo del valor actual neto con aumento progresivo de los ingresos

Años	Flujo de caja (+5%)	VAN
0	- 92.403,79 €	-
1	11.677,57 €	- 81.282,30 €
2	12.261,45 €	- 70.160,80 €
3	12.874,52 €	- 59.039,31 €
4	13.518,25 €	- 47.917,82 €
5	14.194,16 €	- 36.796,32 €
6	14.903,87 €	- 25.674,83 €
7	15.649,06 €	- 14.553,33 €
8	16.431,51 €	- 3.431,84 €
9	17.253,09 €	7.689,65 €
10	18.115,74 €	18.811,15 €
11	19.021,53 €	29.932,64 €
12	19.972,60 €	41.054,13 €
13	20.971,24 €	52.175,63 €

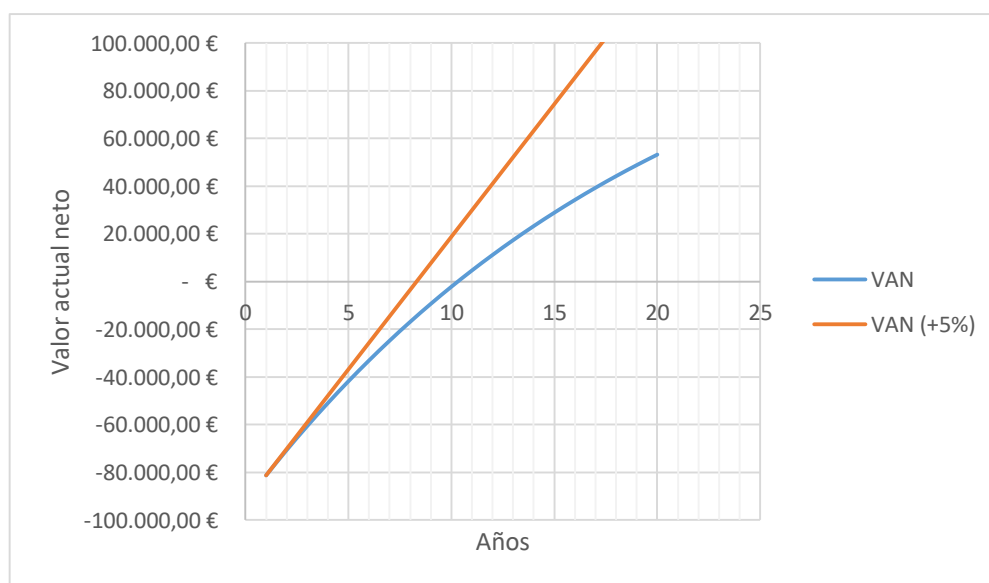


Figura 6.4. Comparación del VAN con un incremento en los ingresos del 5%.

En la figura anterior se puede observar como un aumento del 5% en los ingresos percibidos permite reducir el retorno de la inversión inicial hasta los 8 años aproximadamente, comparado con los 10 años del caso de flujo de caja fijo supone un gran cambio. Suponiendo que la recogida de los aceite vegetales usados, mediante un programa de concienciación más efectivo, aumenta en una tasa superior al 5%, puede significar un tiempo de retorno de la inversión aún menor.

### 6.5. Tasa interna de retorno (TIR)

El TIR o Tasa Interna de Retorno, está relacionada con el valor actualizado neto (VAN), definido como el valor de la tasa de interés que hace el VAN igual a cero, para una inversión de proyecto. El principal problema en el cálculo del TIR radica en que el orden de la ecuación a resolver vendrá dado por el número de periodos, y dado que contamos con 20 periodos, el cálculo se realiza mediante la herramienta Excel teniendo en cuenta, en un primer caso, que cada año tendremos la misma cantidad de ingresos.

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{(1 + TIR)^i} = 0$$

En el caso de recibir la misma cantidad de ingresos todos los años, el valor del TIR será de:

$$TIR = 11\%$$

Dado que el TIR del proyecto es superior a la tasa de descuento utilizada para el cálculo, el proyecto será aceptable, ya que la tasa de rendimiento interno que obtenemos es superior a la tasa mínima de rentabilidad exigida.

Una de las suposiciones que se han hecho para calcular el TIR es que la cantidad de ingresos no varía, por lo que calculamos un segundo TIR con el supuesto de un aumento de los ingresos percibidos por el proceso en un 5% anual.

Dicho aumento supone un aumento del TIR hasta alcanzar el 16%, lo que suponen cifras positivas para llevar a cabo el proyecto.

## 7. Huella de carbono

Uno de los aspectos más importantes en este proyecto, es la reducción de la huella de carbono que tiene el proceso en comparación con la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) producida por el diésel convencional. El objetivo es medir los GEI emitidos durante todo el ciclo de vida del producto: desde la captación de las materias primas hasta su utilización en motores de combustión interna. La huella de carbono identifica la cantidad de emisiones de GEI que son liberadas a la atmósfera como consecuencia del desarrollo de cualquier actividad.

Para el cálculo de la huella de carbono dentro de una organización se tienen en cuenta diferentes tipos de emisión que se pueden clasificar en alcances, un primer alcance que engloba todas las emisiones directas de GEI, como por ejemplo, las emisiones provenientes de la

combustión directa de combustibles en calderas, hornos, vehículos, etc. Así pues, se tiene en cuenta otros dos alcances que hacen referencia a las emisiones indirectas de GEI, como por ejemplo, la generación de electricidad, transporte de materias primas y actividades logísticas realizados por terceros o la utilización de productos o servicios ofrecidos por otros.

Una primera aproximación del cálculo puede ser la siguiente fórmula, utilizando el factor de emisión según el tipo de actividad.

$$\text{Huella de Carbono} = \text{Actividad} \times \text{Factor de emisión}$$

$$E = Q \times FE$$

El factor de emisión supone la cantidad de GEI emitidos por cada unidad del parámetro mencionado como “actividad”. Los factores de emisión varían en función de la actividad desarrollada, además sus unidades han de escogerse en función de los datos de los contemos de la actividad en cuestión. En la siguiente tabla se muestra los factores de emisión de los principales combustibles utilizados en España hasta 2017, facilitado por el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO).

Como se observa, los factores de emisión para el gasóleo A o B para vehículos ha disminuido al igual que el factor de la gasolina, sin embargo, la emisión de GEI para los gasóleos es significativamente mayor. Por otro lado, la adición de biocombustibles disminuye proporcionalmente el factor de emisión del combustible, alcanzando valores de factor de emisión prácticamente nulos para B100. Por lo tanto, calculamos la huella de carbono producida, así como la evitada, con los valores anteriores.

Tabla 7.1. Factores de emisión combustibles

	FE (kg CO <sub>2</sub> /L)	kg CO <sub>2</sub> /año
<b>Gasóleo</b>	2,520	40.863,4
<b>B10</b>	2,387	38.706,7
<b>B30</b>	1,857	30.112,4
<b>B100</b>	0,000	0

La cantidad de GEI que se evitan de su emisión a la atmósfera alcanza el valor máximo de 40.863 kg de CO<sub>2</sub> anuales, utilizando proporciones de biodiesel del 100% y con la producción de biodiesel esperada. No obstante, usar proporciones de B100 no es lo habitual ni lo más práctico, por lo que se establece el 10% como el corte mínimo para adicionar el diésel convencional, tal como lo establece la Resolución 390/2014.

Por otro lado, se debe realizar el mismo procedimiento para la energía eléctrica empleada para el proceso, cuya huella de carbono debe ser inferior a la evitada por el uso del biocombustible producido. El factor de emisión de la red eléctrica nacional varía según el tipo de generación de cada comunidad, por lo que se debe consultar cuidadosamente para calcular una huella de carbono representativa. A continuación se expone la emisión de GEI de los diferentes tipos de generación en Canarias, gracias a la información suministrada públicamente por la Red Eléctrica de España.

Tabla 7.2. Emisiones de CO<sub>2</sub> de los diferentes tipos de generación eléctrica en Canarias.

	Combustible (Unidades FE)	Factores de emisión (FE)										
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Vehículos (A)	Gasolina (kgCO <sub>2</sub> /l)	2,295	2,295	2,295	2,295	2,205	2,201	2,205	2,205	2,205	2,196	2,180
	Gasóleo A o B (kgCO <sub>2</sub> /l)	2,653	2,653	2,653	2,653	2,493	2,467	2,544	2,544	2,544	2,539	2,520
	E10 (kgCO <sub>2</sub> /l)	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065
	E85 (kgCO <sub>2</sub> /l)	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344
	E100 (kgCO <sub>2</sub> /l)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B10 (kgCO <sub>2</sub> /l)	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387
	B30 (kgCO <sub>2</sub> /l)	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857
	B100 (kgCO <sub>2</sub> /l)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	GNL (kgCO <sub>2</sub> /kWh)*	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,203
	GNC (kgCO <sub>2</sub> /kWh)*	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,203
	GLP (kgCO <sub>2</sub> /l)	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671
Equipos de combustión fija (B)	Gas natural (kgCO <sub>2</sub> /kWh)*	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,203
	Gasóleo C (kgCO <sub>2</sub> /l)	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868
	Gasóleo B (kgCO <sub>2</sub> /l)	2,653	2,653	2,653	2,653	2,493	2,467	2,544	2,544	2,544	2,539	2,520
	Gas butano (kgCO <sub>2</sub> /kg)	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964
	Gas propano (kgCO <sub>2</sub> /kg)	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938
	Fuelóleo (kgCO <sub>2</sub> /kg)	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127
	GLP genérico (kgCO <sub>2</sub> /l)	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671
	Carbón nacional (kgCO <sub>2</sub> /kg)	2,297	2,297	2,297	2,299	2,299	2,299	2,299	2,299	2,299	2,006	2,227
	Carbón de importación (kgCO <sub>2</sub> /kg)	2,527	2,527	2,527	2,579	2,579	2,579	2,579	2,579	2,579	2,430	2,444
	Coque de petróleo (kgCO <sub>2</sub> /kg)	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169

\* Para el paso de PCS a PCI en el gas natural se utiliza el factor de conversión de 0,901. Fuente: *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero*.

Tipo de generación	2018
Motores diesel	1.378.757
Turbina de gas	318.476
Turbina de vapor	2.209.889
Ciclo combinado <sup>(1)</sup>	1.830.613
Generación auxiliar <sup>(2)</sup>	-
Térmica no renovable/Cogeneración y resto	-
Cogeneración	-
<b>Emisiones (tCO<sub>2</sub>)</b>	<b>5.737.735</b>
<b>Factor de emisión de CO<sub>2</sub> (tCO<sub>2</sub>/MWh)</b>	<b>0,649</b>

<sup>(1)</sup> Utiliza gasoil como combustible principal. Incluye funcionamiento en ciclo abierto.

<sup>(2)</sup> Grupos de emergencia que se instalan de forma transitoria en determinadas zonas para cubrir un déficit de generación.

Los principales equipos de los que se calculará la huella de carbono serán el equipo compacto de transesterificación y el equipo de impulsión.

Tabla 7.2. Huella de carbono equipos

	Consumo anual (kWh/año)	FE (kg CO <sub>2</sub> /kWh)	Huella de Carbono (kg CO <sub>2</sub> /año)
Equipo transesterificación	480	0,649	311,52
Equipo de impulsión	2.350	0,649	1.525,15

Para el cálculo de la huella producida por el equipo de transesterificación se ha supuesto el caso de realizar un lote al mes de 1800 L. Para el equipo de impulsión descrito en la tabla 4.1 se tiene una potencia de aspiración de 1,5 CV según la fuente, lo que equivale a 1,119 kW y a 2.350 kWh durante todo el año, aproximadamente. Por lo que en total, se producen alrededor de 1.830 kg CO<sub>2</sub> anuales como huella de carbono del proceso, que comparado con la huella de carbono evitada (40,86 tn CO<sub>2</sub>) supone un balance positivo de emisión. Cabe destacar las suposiciones realizadas para el cálculo, susceptibles a cualquier variación, incorporación y ajuste de nuevos datos.

En el caso del diseño planteado, se observa una notable reducción de la huella de carbono, evitando la emisión a la atmósfera de 39 tn de CO<sub>2</sub> equivalente aproximadamente. Cada tonelada de dióxido de carbono equivalente que se evita en la atmósfera posee un precio como créditos o bonos de carbono, cuyo valor fluctúa a lo largo del tiempo. En la siguiente tabla se muestran los valores de emisión de la planta.

Tabla 7.3. Valor de las emisiones de la planta en el mercado de emisiones.

tn CO <sub>2</sub> evitadas	EUA <sup>1</sup> (€/tn CO <sub>2</sub> )	CER <sup>2</sup> (€/tn CO <sub>2</sub> )	Valor de mercado	
			EUA	CER
39,03	21,97	0,22	857,5	8,59

<sup>1</sup>: Derechos de emisión

<sup>2</sup>: Créditos de carbono

## 8. Conclusiones

- Se deberá realizar un seguimiento de la producción para controlar el rendimiento del proceso, el cual deberá situarse sobre el 95%. Así mismo, se realizará un seguimiento de la calidad del biodiesel producido, con el objetivo de ajustar los parámetros que sean necesarios.
- La energía necesaria para producir el biodiesel siempre deberá ser inferior a la suministrada por el propio combustible, así mismo, la energía producida será proporcional al volumen de biodiesel generado, por lo que es destacable que la actividad de gestión de la materia prima sea lo más eficiente posible.
- Para el tiempo de vida útil de la instalación (20 años) se obtiene un TIR entre 9% y 14%, además de un periodo de retorno de la inversión de 11 años. Dado que el proyecto se enfoca principalmente como un proyecto de reducción del impacto ambiental que produce el aceite usado, una tasa de retorno de este tipo ofrece optimistas perspectivas de futuro.
- Es fundamental continuar la investigación hacia métodos más eficientes de producción de biodiesel. A lo largo del proyecto se deberá realizar estudios para conocer la frontera entre usar tecnologías alternativas o proyectos expansivos, es decir, la cantidad de aceite a tratar a la cual es más rentable usar otro tipo de tecnologías que trabajen en régimen continuo.
- Los cálculos sobre la huella de carbono confirman una reducción en el impacto ambiental, sin embargo se trata de una pobre reducción debido a la reducida carga de trabajo. Es posible implementar tecnologías posteriores, como sistemas de impulsión capaces de trabajar con el propio biodiesel generado, que disminuyan aún más la huella de carbono.
- El ciclo cerrado de este proceso ofrece diversas ventajas frente al ciclo del biodiesel producido mediante aceites vegetales refinados. Entre ellos se encuentra el hecho de aprovechar el propio residuo del aceite vegetal como materia prima, evitando así los costes de tratamiento de un contaminante residuo y aprovechándolo como fuente de energía alternativa.

## Ciclo de reciclado del **aceite vegetal usado**

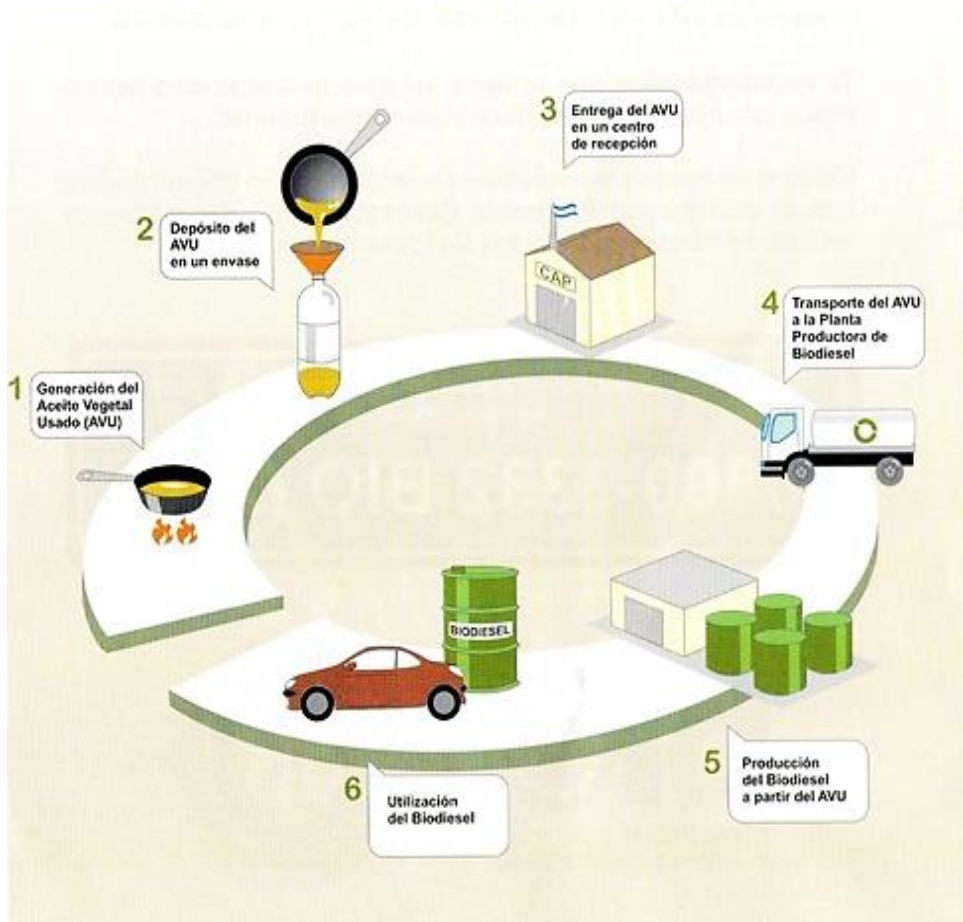


Figura 8. Ciclo de producción de biodiesel mediante reciclaje de aceites vegetales usados domesticos

## 9. Bibliografía

- [1]: González, I. González, J. *Aceites usados de cocina. Problemática ambiental, incidencias en redes de saneamiento y coste del tratamiento en depuradoras* (2015). Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia. <http://residusrecursos.cat/uploads/activitats/docs/20170427092548.pdf> [Consulta 26 de Noviembre de 2018]
- [2]: Benavides-Gamero, A. Valencia-Ochoa, G. Meriño-Stand, L. "Trend analysis of research results in biodiesel production from 2009 to 2016", *Prospectiva*, Vol 16, N° 2, 89-93, 2018.
- [3]: Agencia EFE Edición Canarias (26 de Junio de 2018). "Los terrenos de la refinería de Cepsa en Santa Cruz de Tenerife serán zonas verdes y de equipamientos". *Agencia EFE*. [Consulta 6 de Mayo de 2019]
- [4]: Hernández, B. "*Producción de biodiesel a partir de aceite de fritura*". Proyecto fin de carrera (2004). La Laguna: Ediciones de la Universidad de La Laguna.
- [5]: De Caires, Allan E. "Obtención de biodiesel por catálisis heterogénea con catalizadores alcalinos. Aceite procedente de cultivos energéticos". Trabajo de Fin de Grado. Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología. Universidad de La Laguna. Junio, 2017, 26-28.
- [6]: Ruiz, J. Gutiérrez, N. *Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura* (2015). Licenciatura de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas. Universidad de Guanajuato.
- [7]: Asociación de Empresas de Energías Renovables, APPA Renovables (2017). *Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España*. pp. 52-58. [https://www.appa.es/wp-content/uploads/2018/10/Estudio\\_del\\_impacto\\_Macroeconomico\\_de\\_las\\_energias\\_renovables\\_en\\_Espa%C3%B1a\\_2017.pdf](https://www.appa.es/wp-content/uploads/2018/10/Estudio_del_impacto_Macroeconomico_de_las_energias_renovables_en_Espa%C3%B1a_2017.pdf) [Consulta: 26 de Noviembre de 2018]
- [8]: Ministerio de industria y comercio (2006). *REAL DECRETO 61/2006, de 31 de enero, por el que se determinan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo y se regula el uso de determinados biocarburantes*. <https://www.boe.es/boe/dias/2006/02/17/pdfs/A06342-06357.pdf> [Consulta 26 de Noviembre de 2018]
- [9]: Phan, A. Phan, T (2008). "*Biodiesel production from waste cooking oils*", School of Chemical Engineering and Advanced Materials, Newcastle University, NE1 7RU, UK
- [10]: Encinar JM, Gonzalez JF, Rodriguez-Reinares A. Biodiesel from used frying oil. Variables affecting the yields and characteristics of the biodiesel. *Ind Eng Chem Res* 2005;44:5491–9. <https://docplayer.es/18734220-Desgomado-de-aceites-crudos.html>
- [11]: TORRES, L., BEN, Cherif, ALCO CER-T, L. Beatriz., DE LA ROSAG, D. "*Efecto de la temperatura y del tiempo de reacción sobre la esterificación y la transesterificación de*



*aceites comestibles usados*". Artículo. Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias. Diciembre, 2017 Vol.4 No.13, 19-35.

[12]: Belalcazar, C. Rivera, S.V. "*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA DE BIODIESEL DERIVADO DE ACEITES RECICLADOS DE USO DOMÉSTICO*". Trabajo de fin de grado. Universidad piloto de Colombia.

[13]: Castellar, G. Angulo, E.R. Cardozo, B.M "*Transesterification vegetable oils using Heterogeneous catalysts*", Prospect, Vol 12, N° 2, 90-104, 2014.

[14]: G.Castellar, E.R.Angulo, B.M.Cardozo, "*Transesterification vegetable oils using Heterogeneous catalysts*", Prospect, Vol 12, N° 2, 90-104, 2014.

[15]: Quiminet.com. La glicerina y sus usos en la industria farmacéutica. <https://www.quiminet.com/articulos/la-glicerina-y-sus-usos-en-la-industria-farmaceutica-2583383.htm> [Consulta 14 de Diciembre de 2018]

[16]: Bulla, E. "*Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura*". Tesis (2014). Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia.

[17]: Avellaneda, F. "*Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal*". Tesis (2010). Universitat Rovira I Virgili.