

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**  
**ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE ALCOY**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

**CAMPUS D'ALCOI**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**“Diseño conceptual de un proceso para la obtención de Biodiesel a  
partir de aceite usado de fritura”**

**Autor:**

D. Carlota Hernández Ferrer

**Dirigido por:**

Dr. Vicent Fombuena Borràs

Dr. Jaime Lora García

**Diciembre 2019**



# **RESUMEN**

## **“Diseño conceptual de un proceso para la obtención de Biodiesel a partir de aceite usado de fritura”**

Los combustibles han sido utilizados por el hombre desde que encontró la forma de producir, utilizar y controlar el fuego. Su empleo ha sido masivo, desde la madera, pasando por el carbón, hasta el petróleo, provocando con ello un daño considerable tanto al medio ambiente como a la salud de los seres vivos. Ha sido tanto el uso de estos, que la sociedad ha visto en peligro hasta su integridad, por ello a mediados del siglo XX, empieza a restringirse el consumo de estos combustibles, obligando a los científicos a realizar una serie de investigaciones en busca de alternativas menos perjudiciales. Como consecuencia, en la actualidad se trabaja en la implementación de soluciones.

En este trabajo se ha realizado el estudio de una planta conceptual de producción de biodiesel a partir de aceite usado de fritura mediante la transesterificación con metanol en medio básico, empleando como catalizador hidróxido de sodio. Esta planta contará con una capacidad de producción de 20.000 toneladas por año. Para el escalado y condiciones que requiere el desarrollo del proyecto se tomaron como base resultados obtenidos a través de la literatura.



# **SUMMARY**

## **“Conceptual design of a process for the production of Biodiesel from used frying oil”**

Fuels have been used by human beings since they found a way to produce, use and control fire. Their use has been massive, from wood to coal and oil, causing considerable damage both to the environment and to the health of living beings. The massive use of fuels has compromised the integrity of society, therefore in the middle of the XX century, the use of these fuels was controlled, forcing scientists to carry out investigations in order to search less harmful alternatives. As a result, we are currently working on the implementation of these alternatives.

In this work, we design a conceptual plant for the production of biodiesel from used frying oil. These transformation is carried out by transesterification with methanol in basic medium, using as catalyst sodium hydroxide. This plant will have a production capacity of 20,000 tons per year. The scale and conditions required for the development of the project were obtained from literature.



# **RESUM**

## **“Disseny conceptual d'un procés per a l'obtenció de Biodièsel a partir d'oli de fregir”**

Els combustibles han sigut utilitzats per l'home des que va trobar la forma de produir, utilitzar i controlar el foc. El seu ús ha sigut massiu, des de la fusta, passant pel carbó, i fins al petroli; provocant amb això un dany considerable tant al medi ambient com a la salut dels éssers vius. Ha sigut tant l'ús d'aquests, que la societat ha vist en perill fins i tot la seva integritat, per això a mitjan segle XX, comença a restringir-se el consum dels combustibles, obligant els científics a buscar alternatives menys perjudicials. Com a conseqüència, en l'actualitat es treballa en la implementació d'aquestes alternatives.

En aquest treball s'ha realitzat el disseny d'una planta conceptual de producció de biodièsel a partir d'oli de fregir mitjançant la transesterificació amb metanol en medi bàsic, emprant com a catalitzador hidròxid de sodi. Aquesta planta tindrà una capacitat de producció de 20.000 tones per any. Per a l'escalat i condicions requerides per al desenvolupament del projecte es van obtenir a través de la literatura.



# Tabla de Contenidos

RESUMEN .....	3
SUMMARY.....	5
RESUM.....	7
ABREVIATURAS.....	11
LISTADO DE ILUSTRACIONES .....	14
LISTADO DE TABLAS.....	16
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>19</b>
I.1. ANTECEDENTES.....	21
I.2. Combustibles fósiles. ....	23
I.2.1. Petróleo.....	23
I.2.2. Carbón.....	24
I.2.3. Gas natural.....	25
I.2.4. Ventajas de los combustibles fósiles.....	26
I.2.5. Desventajas de los combustibles fósiles. ....	27
I.3. Biodiesel. ....	30
I.3.1. Ventajas del biodiesel. ....	35
I.3.2. Desventajas del biodiesel.....	36
I.3.3. Biodiesel en España. ....	36
1.3.3.1 Producción en España. ....	36
I.3.4. Situación mundial.....	38
<b>II. OBJETIVOS .....</b>	<b>39</b>
II.1. OBJETIVO GENERAL.....	41

II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	41
<b>III. DESARROLLO PROYECTO .....</b>	<b>42</b>
III.1. INGENIERÍA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL. ....	44
III.1.1. Capacidad de producción.....	45
III.1.2. Normativa y regulación. ....	49
III.1.3. Descripción del proceso de fabricación y requerimientos de usuario. .....	53
III.1.4. Balances de materia.....	60
III.1.5. Balances de energía.....	71
III.1.6. Dimensionado del equipo.....	78
III.1.7. Descripción general de instalación.....	87
III.1.8. Plan, diagramas de bloques, distribución de salas, planos de flujos de materiales y personas, planos de áreas clasificadas, diagramas de procesos básicos. .....	89
III.1.9. Estimación económica de la inversión.....	91
<b>IV. ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL.....</b>	<b>100</b>
IV.I. IMPACTO AMBIENTAL .....	102
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>106</b>
<b>VI. REFERENCIAS .....</b>	<b>110</b>
VII. REFERENCIAS.....	111

# ABREVIATURAS

RME	Biodiesel a partir de semillas de colza y canola.
ACPM	Aceite de combustible para motores.
AIE	Agencia internacional de energía.
Mtep	Tonelada equivalente de petróleo (unidad de energía).
ASEAN	Asociación de naciones del sudeste asiático.
HVO	Aceite vegetal hidrotratado.
Aprox.	Aproximado.
AUF	Aceite usado de fritura.
PFD	Diagrama de flujo del proceso.
FAME	Fatty acid methyl ester (Biodiesel metílico).
B20	Combustible formado por un 20% Biodiesel + 80% Diesel.
APPA	Asociación de empresas de energías renovables.
PIB	Producto interior bruto.
S.L	Sociedad limitada.
L	Litros.
Hab.	Habitantes.
$m_{AD}$	Flujo másico de aceite doméstico recogido por RAFRINOR

S.L.

$m_{A.I.1}$	Flujo másico de aceite industrial recogido por RAFRINOR S.L.
$m_{A.I}$	Flujo másico de aceite industrial que se procesará en la planta diseñada.
$m_{A.T}$	Flujo másico de aceite total que se procesará en la planta.
$T_{D.L.1}$	Total de días laborables (sin imprevistos incluidos).
$T_{D.L}$	Total de días laborables con imprevistos incluidos.
$m_D$	Flujo másico diario de aceite
$m_{D,R}$	Flujo másico diario de aceite por reactor
$n_{L.D}$	Número de lotes al día
$m_{L,R}$	Flujo másico de aceite por lote en cada reactor.
NaOH	Hidróxido de sodio.
g	Gramos.
ml	Mililitros.
V	Voltios.
$Pm_{metanol}$	Peso molecular del metanol.
$Pm_{Trioleina}$	Peso molecular del Trioleina.
$Pm_{FALM}$	Peso molecular del éster metílico
$m_{1\ CH_3OH,M}$	Flujo másico del metanol con pequeñas cantidades de agua y metóxido de sodio en el mezclador.
$m_{1\ CH_3OH,R}$	Flujo másico del metanol con pequeñas cantidades de agua y metóxido de sodio en el reactor.

$m_{L.R.E.R}$  Flujo másico de éster metílico generado en cada lotes por cada reactor instalado.

$m_{L.R.G.R}$  Flujo másico de glicerol generado en cada lotes por cada reactor instalado.

$m_{L.R.M.R}$  Flujo másico de metanol generado en cada lotes por cada reactor instalado.

$m_{E.G.C}$  Flujo másico a la entrada de la centrifugadora del éster metílico y glicerol.

$m_{E.T.M}$  Flujo másico a la salida de la centrifugadora.

$m_{A.T.M}$  Flujo másico de agua a la entrada del tanque de lavado.

Atm Atmosferas.

B.E Balance de energía

# LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ciclo idealizado de Diésel y motor Diésel.....	22
Ilustración 2. Petróleo.....	24
Ilustración 3. Carbón Lignítico.....	25
Ilustración 4. Carbón Antracítico.....	25
Ilustración 5. Gas natural.....	26
Ilustración 6. Reservas de petróleo probadas.....	28
Ilustración 7. Reacción de transesterificación.....	32
Ilustración 8. Evolución del consumo anual del Biodiésel en España.....	37
Ilustración 9. Ciclo Biodiesel.....	60
Ilustración 10. Reacción de trasesterificación.....	65
Ilustración 11. Diagrama de balances de masa por operación del proceso de producción de biodiesel.....	71
Ilustración 12. Balance de energía en el reactor.....	79
Ilustración 13. Balance de energía en el secador.....	86
Ilustración 14. Diagrama de flujo del proceso.....	89
Ilustración 15. Distribución de planta.....	90
Ilustración 16. Localización de la planta.....	91
Ilustración 17. Propiedades físico-químicas.....	104



# LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Variedad de Biocarburantes.....	31
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de AUF.....	49
Tabla 3. Requerimientos del Biodiesel según la norma europea EN 14214. ....	50
Tabla 4 Emisiones estimadas provisionales de las materias primas de biocarburantes y biolíquidos, resultantes del cambio indirecto del uso de la tierra (gCO <sub>2</sub> eq/M) .....	51
Tabla 5. Objetivos globales nacionales en relación con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía final en 2020.....	52
Tabla 6. Ventajas e inconvenientes de los diferentes tipos de catálisis en el proceso de transesterificación.....	56
Tabla 7. Valores obtenidos del B.M. en el mezclador. ....	63
Tabla 8. Valores obtenidos al realizar el B.M. de la reacción de transesterificación.....	66
Tabla 9. Valores obtenidos al realizar el B.M en la centrifugadora.....	67
Tabla 10. Valores obtenidos en el B.M del tanque de mezclado.....	68
Tabla 11. Valores obtenidos al realizar el B.M centrifugadora de lavado.....	68
Tabla 12. Balance de materia en el secador. ....	69
Tabla 13. Capacidades caloríficas, flujos másicos y temperaturas del primer mezclador .....	73
Tabla 14. Capacidades caloríficas, flujos másicos y temperaturas del reactor de transesterificación.....	74
Tabla 15. Capacidades caloríficas, flujos másicos y temperaturas del secador .....	76
Tabla 16. Inversión de equipos.....	92
Tabla 17. Coste obras y terrenos.....	92
Tabla 18. Inversiones diferidas.....	93
Tabla 19. Costos de materia prima.....	93

Tabla 20. Requerimiento de personas por equipos.....	94
Tabla 21. Costos mano de obra indirecta.....	95
Tabla 22. Gastos de administración y ventas.....	95
Tabla 23. Gastos generales.....	96
Tabla 24. Costes generales de operación.....	96
Tabla 25. Flujo de egresos.....	97
Tabla 26. Flujo de ingresos.....	97
Tabla 27. Flujo efectivo neto.....	98
Tabla 28. Formulación de datos para el cálculo del VAN y TIR.....	99
Tabla 29. VAN y TIR.....	99



# **I. INTRODUCCIÓN**

## **INTRODUCCIÓN**



## **I.1. ANTECEDENTES.**

El uso de aceites vegetales como combustible se utilizó por primera vez en 1900, por Rudolph Diesel, en un motor de ignición-comprensión. Este motor consiste en: un motor de cuatro tiempos cuya diferencia más notable es que utiliza combustible diésel, y no gasolina. Los cuatro tiempos según el ciclo idealizado de Diésel corresponden a [1]:

1. Tiempo de admisión: se produce la apertura de la válvula de admisión, penetra aire a presión constante.

2. Tiempo de compresión: el aire se comprime con ausencia de intercambio de calor (proceso adiabático), al final del recorrido, se inyecta el combustible. La mezcla es encendida sin necesidad del uso de una bujía ("dispositivo de un motor de combustión interna donde se produce la chispa eléctrica que inflama la mezcla explosiva comprimida").

3. Tiempo de expansión: la expansión de los gases de combustión se lleva a cabo primero isobáricamente (a presión constante) y posteriormente adiabáticamente (sin flujo de calor), empujando el pistón hacia abajo.

4. Tiempo de escape: el pistón se eleva de nuevo, abriéndose la válvula de escape, que permite que disminuya la presión dentro del cilindro de manera isocórica y que se liberen los gases a presión atmosférica.

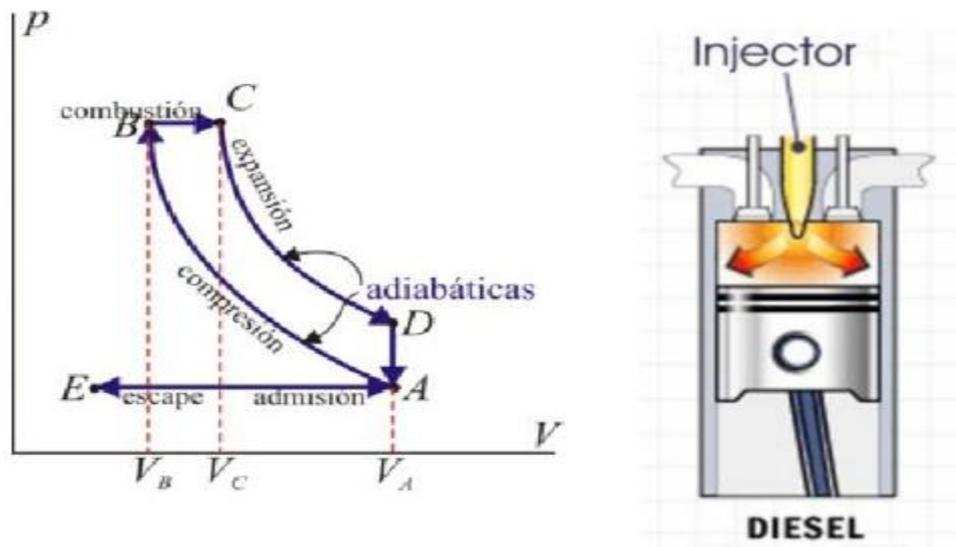


Ilustración 18. Ciclo idealizado de Diésel y motor Diésel

Es decir, solo succiona aire, lo comprime y se le suministra el combustible, el calor del aire comprimido enciende espontáneamente el combustible.

Más tarde, en el transcurso de la segunda guerra mundial, el excesivo uso de combustibles fósiles y el elevado coste de petróleo, obligo a realizar una investigación exhaustiva sobre otra fuente de alimentación. Una de las investigaciones realizadas y que es fundamental destacar fue la realizada por Otto y Vivacqua en Brasil, sobre el diésel de origen vegetal. [2]

En 1982, se llevaron a cabo las primeras pruebas técnicas con Biodiesel en Alemania y Austria. Pero no se construyó ninguna planta piloto hasta 1985 en Austria, Silberberg. La productora es RME.

A día de hoy, se deben destacar países como Canadá, Italia, Malasia, Alemania, Austria, Francia, Estados unidos y Suecia, ya que se pueden considerar como los pioneros en la producción y uso del biodiesel en automóviles.

## **I.2. Combustibles fósiles.**

En la actualidad, los combustibles fósiles son de las fuentes de energía más utilizadas en el planeta. Se utiliza en una gran diversidad de campos, aunque podríamos destacar el sector de la energía eléctrica (para generar dicha energía), y también en la energía mecánica (en el uso de automóviles, motores térmicos...) [3].

Los combustibles fósiles, se generan a partir de la descomposición parcial de la materia orgánica, un proceso cuya transformación puede durar una infinidad de años [4], o lo que es lo mismo, se originan a través de un proceso de fosilización anoxia ambiental, de forma natural. Se dividen en 3 grupos principales:

1. Petróleo.
2. Carbón
3. Gas natural

### **I.2.1. Petróleo.**

El petróleo es de origen natural. Se forma cuando los animales o plantas acuáticas fallecen y caen al fondo de los océanos, estanques o pantanos. Se depositan en las grietas de las rocas, rocas productivas, caracterizadas por ser rocas porosas. A medida que la presión aumenta sobre los materiales depositados, progresa la formación del petróleo. [5]

El petróleo se compone principalmente de hidrocarburos. Se puede encontrar en manantiales o charcas, aunque normalmente se extrae de debajo de la superficie de la tierra mediante perforación de pozos. Este líquido extraído se conoce como aceite de roca (antiguamente) o petróleo crudo (actualidad).

Una vez extraído, se refina (proceso que se encarga de la transformación de los hidrocarburos en productos derivados) y obtendremos el petróleo propiamente dicho.

Este combustible fósil, se puede aplicar a una amplia serie de productos, como cabe destacar la gasolina, el gasóleo, el fuel,...



*Ilustración 19. Petróleo*

El petróleo a diferencia del carbón, requiere menos años para su formación.

### **I.2.2. Carbón.**

La formación del carbón es similar a la del petróleo. Se forma a través de la descomposición heterogénea de componentes orgánicos acumulados en zonas marinas, lagunares o pantanosas, caracterizadas por ser poco profundas y sepultadas por sedimentos tras el curso del tiempo. Las condiciones de presión y de temperatura aumentan produciendo así un enriquecimiento progresivo del carbono (carbonificación). Finalmente obtenemos el carbón. El carbón, es una roca negra, y como su propio nombre indica, principalmente está formada de carbono. Pero se pueden encontrar otra serie de elementos en cantidades variables. Estos elementos pueden ser hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno. Encontramos diferentes tipos de carbón, de los cuales podemos destacar [6]:

-Carbón Lignítico: Carbón con poco poder calórico y de color pardo.



*Ilustración 20. Carbón Lignítico*

- Carbón Antracítico: se caracteriza por ser el más puro y brillante. Formado por la mayor concentración de carbono.



*Ilustración 21. Carbón Antracítico*

### **I.2.3. Gas natural.**

El gas natural está formado por hidrocarburos, al igual que el petróleo, como anteriormente hemos mencionado. Su formación se lleva a cabo en el subsuelo profundo. Se depositan en las rocas (rocas madre) sedimentos de elevado contenido de materia orgánica.

El gas natural está compuesto principalmente de gas metano ( $\text{CH}_4$ ), en proporciones que varían desde un 70% hasta un 95%. También se encuentra en

cantidades variables y muy pequeñas los compuestos tales como el etano, propano, butano, dióxido de carbono, azufre y nitrógeno [7].



*Ilustración 22. Gas natural.*

#### **I.2.4. Ventajas de los combustibles fósiles.**

Recopilando lo descrito anteriormente, definimos los combustibles fósiles como la principal fuente de energía del planeta, cuyo proceso de formación transcurre a través de miles de años, y consiste en la descomposición de materia orgánica a la temperatura y presión que ejerce la corteza terrestre. Estos organismos sufren un proceso de descomposición aerobia formando así un hidrocarburo capaz de contener energía [8]

Se podría enumerar un sinnúmero de ventajas que nos proporcionan, pero las más relevantes de cada combustible fósil son:

##### **1. Petróleo.**

- Tiene un alto poder calorífico, es decir, un buen rendimiento.
- Es una fuente regular de energía.
- Se puede obtener una gran gama de productos a partir de este material.

## 2. Gas natural.

- Cuenta con un precio competitivo.
- Es fácil de operar, lo que abarata su precio (de ahí, su precio competitivo).
- Su combustión es mucho más limpia que la de otros combustibles, lo que facilita el cumplimiento de las leyes vigentes en el sector de medio ambiente.
- Dado las cualidades de combustión que ofrece, explora una gran diversidad de mercados.

## 3. Carbón.

- Tiene una gran capacidad calórica (gran cantidad de energía), con lo que es muy útil en las industrias domésticas.
- Se puede consumir en el mismo sitio de donde se produce la extracción y ahorrar costes de transporte.

### **I.2.5. Desventajas de los combustibles fósiles.**

Dejando al margen las extraordinarias propiedades de los combustibles fósiles, se procede a exponer los diversos factores que nos están obligando a que estos, sean remplazados [9].

#### 1. Petróleo.

El impacto que provoca al medio es extremadamente negativo, debido a:

- Las construcciones de las plataformas destinadas para su extracción alteran el medio ambiente. Además de que en el proceso de refinación se requiere cantidades masivas de agua que provocan el mismo impacto.
- Los derrames o accidentes ocasionales. Al ser insoluble en agua dificulta con gravedad su limpieza. Además, se debe tener en cuenta que las personas utilizamos el mar como depósito de sustancias contaminantes; decisión que provoca un impacto ecológico enorme.

- Lluvia ácida. La combustión del petróleo emite una elevada cantidad de dióxido de carbono, óxidos nitrosos y de azufre dando lugar a lluvias ácidas.
- Productos derivados. A partir del petróleo se pueden generar una amplia gama de productos, como pueden ser los pesticidas y fertilizantes. A priori, estos productos pueden ser inocuos con el medio, pero se estima que tan solo el 0,1% llegan a las plagas, con lo que el resto se dispersa aumentando la contaminación del planeta. También podemos destacar de las industrias petroquímicas, el producto más utilizado, el plástico. No es reciclable ni biodegradable, su uso es extremadamente continuo, y el tiempo de vida medio del producto final como, por ejemplo, el de las bolsas, puede ser de segundos. Cuando este producto entra en desuso (a penas tras unos segundos de su utilización) puede tardar hasta 150 años en degradarse.

A parte, es un recurso no renovable, el ser humano no es capaz de crearlo.

Por último, es uno de los factores desencadenantes de la guerra del Golfo (1991) y de la guerra de Irak (2003). En definitiva, es un promotor de los conflictos bélicos.



*Ilustración 23. Reservas de petróleo probadas.*

## **2. Gas natural.**

Comparte muchas desventajas ya mencionadas en el petróleo, por ello, se han destacado las que se consideran más relacionadas con este compuesto.

- A pesar de que la combustión de este material es más limpia, los niveles de contaminación que se producen al producirlo, transportarlo y usarlo, son muy altos. Además, este material presenta una gran dificultad a la hora de almacenarlo.

- El uso de este material puede producir a lo largo del tiempo un cambio extremadamente dañino a nuestro clima debido al calentamiento global que producen todo el planeta.

## **3. Carbón.**

- Desprenden contaminantes que producen los dióxidos, provocando así lluvias ácidas (al igual que con el gas natural y el petróleo).

- La combustión y la minería del carbón causan serios problemas ambientales, además de los que provocan a la salud humana.

A parte de las consecuencias que acarrearán el uso de estos compuestos al medio ambiente, también hay que destacar dos factores muy importantes:

En primer lugar, los combustibles fósiles se tratan de energías no renovables, y es una de las fuentes de energía más importante y eficientes que por ahora disponemos.

En segundo lugar, su procesado puede durar miles de años, y desde hace bastante tiempo, consumimos más rápido de lo que lo podemos generar.

Con lo cual, hay que empezar a focalizar la solución a este problema en una nueva fuente de energía, en vez de buscar más fuentes de combustibles fósiles.

## **1.3. Biodiesel.**

Las alternativas de los combustibles fósiles que se encuentran en la actualidad se llaman energías alternativas o renovables, las cuales son:

- Energía Fotovoltaica: A finales de 1970 se construyeron los primeros paneles solares, tecnología que permitió concentrar la luz solar que incide sobre ellos y transformarla en energía.
- Energía Hidroeléctrica: Utilizando la energía que genera el agua al caer en una serie de turbinas provocando en estas un movimiento giratorio, obtenemos electricidad.
- Energía Eólica: Utilizando el viento como “materia prima” conseguimos hacer girar las paletas de la turbina, las cuales están conectadas a un generador que produce energía.
- Energía Geotérmica: Capta fuentes naturales (como por ejemplo aguas termales) y las utiliza para producir electricidad o suministrar agua caliente a una región.
- Energía Oceánica: Captura la energía del flujo de las mareas que entran y salen de las bahías o estuarios. Las turbinas realizan por su defecto un movimiento giratorio, y debido a este movimiento, se produce electricidad.
- Biomasa o Biocombustible: Cualquier residuo vegetal, desperdicio de madera, agrícola y de vertedero de basura, así como determinados cultivos se utilizarán como combustible.

Esta última propuesta es en la que se ha enfocado este trabajo, en concreto en el biocombustible Biodiesel.

Existen una gran variedad de biocarburantes (combustibles producidos a partir de biomasa), los cuales son:

Tabla 1. Variedad de Biocarburantes.

TIPOS	DESCRIPCIÓN
ETANOL	Destilado de residuos y vegetales
METANOL	Destilado de la pirolisis de vegetales, residuos y madera.
METANO	Gas resultante de la descomposición de fangos de las depuradoras y de los residuos.
BIOACEITES	Aceites extraídos de plantas como el girasol, la oliva, soja, ...
BIODIÉSEL	Producto que se obtiene a partir de la transesterificación de aceites vegetales

La biología nos proporciona información acerca de las plantas con propiedades que se pueden aprovechar para extraer combustible. Las plantas oleaginosas (vegetales de cuya semilla o fruto puede extraerse aceite), como pueden ser el cacahuete, la higuera, la soja, las semillas de algodón, las semillas de girasol, la colza, el coco, los granos de palma, etc.; proporcionan aceite que, al ser procesado químicamente, se obtiene un combustible que puede reemplazar al ACPM.

El origen de los aceites que son refinados para su posterior transformación en biodiesel, principalmente procede de los sectores de hostelería, fábricas alimenticias, cocinas domésticas... De este modo revalorizamos un desecho, evitando su vertido, con el fin de salvaguardar la contaminación de las aguas marinas, subterráneas y fluviales. Además de evitar su posible uso en la fabricación de pienso.

Con el uso de los aceites vegetales, incrementamos la diversidad de suministros y

seguridad además de proporcionar una fuente de sostenible. A contraposición, reducimos la dependencia del uso del petróleo, fomentamos el desarrollo socioeconómico del área rural (mediante la producción de plantas oleaginosas con objetivos energéticos) y conservación del medio.

El término biodiesel (Ésteres metílicos o etílicos obtenidos comúnmente por el proceso de transesterificación de aceites vegetales), FAME, es un carburante ecológico que posee una multitud de ventajas medioambientales.

Se puede obtener biodiesel a partir de micro-emulsiones (consiste en micro-emulsiones de aceite y alcohol etílico que sustituyen al diésel n°2, es decir, diésel con un número de centeno entre 40-55 y a una temperatura de ignición entre 254-285 °C), por craqueo térmico o pirolisis (consiste en la conversión de cadenas largas y sustancias saturadas en biodiesel por medio de calor), y por último, por del uso directo de aceites (realizando el proceso de transesterificación) y mezcla con diésel normal (como se verá más abajo). El proceso de transesterificación se caracteriza por ser un proceso químico que consiste en la reacción del aceite (materia prima) con el metanol (en este caso el alcohol transesterificador seleccionado) y hidróxido de sodio, como catalizador, para proporcionar biodiesel y glicerina. A continuación, se muestra la reacción en la imagen:

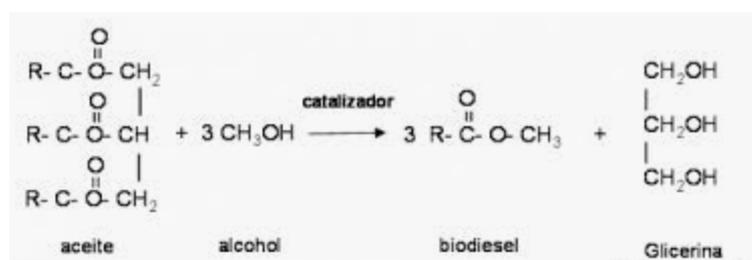


Ilustración 24. Reacción de transesterificación

En el esquema mostrado de la reacción, "R" hace referencia a las cadenas de ácidos grasos, definen las propiedades del biodiesel, pero no modifican el proceso de transesterificación. Para realizar los cálculos en este trabajo, se ha tomado como base representativa de los compuestos que contiene el aceite, la Trioleína. Con lo que todos los cálculos realizados se han tomado como datos los que caracteriza a este compuesto. Estequiométricamente se puede decir que:

100 Kg de Trioleina (FAME) + 10 Kg de Metanol → 100 Kg de Éster metílico (Biodiesel) + 10 Kg

Aspectos a destacar de esta reacción son:

1. La reacción se lleva a cabo por la presencia de un catalizador, pero no se produce de manera directa. Está formada por tres reacciones reversibles, que se producen de manera seguida:

1. Triglicérido + Metanol  $\leftrightarrow$  Éster metílico + Diglicérido
2. Diglicérido + Metanol  $\leftrightarrow$  Éster metílico + Monoglicérido
3. Monoglicérido + Metanol  $\leftrightarrow$  Éster metílico + Glicerina

2. La glicerina y el éster no son miscibles, con lo que el rendimiento de la reacción es próximo a 100 %.

3. Hay variables que se debe de tener en cuenta, ya que afectan de manera negativa a la viabilidad de la reacción, podemos remarcar:

1. **Acidez y humedad:** El máximo contenido de ácidos grasos no debe superar el 3%, por ello, se realice un pretratamiento exhaustivo y tedioso. Conforme al contenido de agua de la muestra inicial, reacciona con el catalizador formando jabones (reacción de saponización), reacción que queremos inhibir y evitar, ya que provoca una disminución de la conversión, rendimiento.
2. **Tipo de catalizador:** hay varios catalizadores (posteriormente se especificarán los diversos tipos.), y en función de las condiciones de la materia prima, se deberá de utilizar uno u otro.
3. **Relación molar de alcohol/aceite y tipo de alcohol:** tiene un efecto directo sobre la eficiencia de la reacción. Para que en la reacción de transesterificación se desplace el equilibrio hacia la derecha, es necesario un exceso de alcohol.
4. **Efecto de tiempo de reacción y temperatura:** la conversión es directamente proporcional al tiempo de reacción y temperatura.

4. Diferentes sistemas de llevar a cabo esta reacción en plantas industriales:

1. **Transesterificación en régimen discontinuo:** Método más sencillo. Se utilizan reactores con agitación. La reacción se lleva a cabo a una temperatura de 65 °C (habitualmente), pero también se puede realizar en un rango de temperaturas de 25 °C-85°C.
2. **Transesterificación en régimen continuo:** Se pueden utilizar reactores de "tanque agitado", proporcionando mayores tiempos de residencia, mayor conversión y rendimiento.

**Ésterificación:** Cuando se trata con aceites de hasta un 30% de ácidos grasos libres, se realiza un pretratamiento denominado Ésterificación, el cual consiste en la sintetización de un éster. Es decir, los ácidos sufren reacciones con los alcoholes en presencia de un

catalizador (por lo general, un ácido fuerte como el ácido sulfúrico) con el fin de formar un éster a través de la eliminación de la molécula de agua, reduciendo el porcentaje hasta 1%.



- 3. Proceso combinado de esterificación- transesterificación:** Refinación de ácidos grasos a través de la adición de un catalizador (proceso de ésterificación), cuyo producto resultante se separa mediante una centrifugadora. Los aceites refinados, se secan y se procesan mediante la transesterificación.

Para el uso puro del biodiesel se deberían efectuar una serie de modificaciones en los motores diésel. En España, por ejemplo, ante la imposibilidad de controlar aquellos vehículos que adquieren las modificaciones necesarias para la utilización en su estado puro, se comercializa con Bionor MX-15, que contiene 12% de Biodiesel y un 88% de gasóleo, el cual no presenta ningún problema ante cualquier motor diésel. Aunque aquellos combustibles que sean producto de una mezcla de biodiesel y diésel, normalmente suelen adquirir una terminología que consiste en nombrar a la mezcla con la B, de biodiesel, seguida del porcentaje que contiene. Por ejemplo, B20 equivaldría a una mezcla de 20% biodiesel - 80% de diésel.

Está en continuo estudio, debido a que, de momento, es el único combustible no dañino capaz de suplir parcialmente al gasóleo convencional. Inocuo con el medio, neutro con el efecto invernadero, compatible con cualquier motor diésel, independientemente de su antigüedad o estado. La mezcla que se comercializa en España cumple con las especificaciones propuestas por la norma de gasóleo automoción (EN-590).

### **I.3.1. Ventajas del biodiesel.**

El biodiesel nos ofrece una multitud de ventajas, de las cuales se destacan las más importantes:

- Es inocuo con nuestro medio ambiente. El Biodiesel es un carburante de origen vegetal, el cual en su estado más puro no daña el medio ambiente.
- Prácticamente no contiene nada de azufre, un compuesto que encuentra presente en el gasóleo por su poder de lubricación.
- Menores emisiones de hollín (-55% aprox.), produciendo un menor número de inquemados. Esto es debido a que la molécula de Biodiesel aporta una mayor cantidad de átomos de oxígeno (por unidad de volumen) que con el mismo volumen en el gasóleo convencional.
- Menores emisiones de CO<sub>2</sub>. Además de que el dióxido de carbono que se emite en el proceso de combustión es neutro, debido a que es el mismo que captó la planta oleaginosa utilizada para extraer el aceite durante su etapa de crecimiento.
- No contribuye al efecto invernadero, con lo cual ayuda a cumplir el protocolo de Kyoto. El protocolo de Kyoto consiste en limitar las emisiones de gases de efecto invernadero por los Estados firmantes, con el fin de reducir el recalentamiento de nuestro planeta con sus derivadas consecuencias.
- No contiene bencenos ni hidrocarburos aromáticos poli-cíclicos (compuestos aromáticos cancerígenos), con lo que disminuye el riesgo de enfermedades tanto respiratorias, como alérgicas.
- Es biodegradable, se estima que en 21 días aproximadamente se ha extinguido, con lo que se puede decir que es fácil de eliminar. En caso de accidente o derrame, no supone un peligro para la integridad del medio.
- No se considera mercancía peligrosa, dado que su punto de inflamación se encuentra por encima de 110°C.

- Contiene un elevado poder lubricante asegurando al motor un desgaste elevado, y alargando la vida de este.

### **1.3.2. Desventajas del biodiesel.**

- Se obstruyen los conductos del combustible cuando se trabaja a bajas temperaturas ( $< 0^{\circ}\text{C}$ ), ya que se solidifica y adquiere forma de cristal.
- No se puede utilizar en todos los motores del mercado.
- Por sus propiedades solventes, puede ablandar y degradar ciertos materiales, tales como el caucho natural y la espuma de poliuretano, en general los elastómeros. Es por esto que puede ser necesario cambiar algunas mangueras y retenes del motor antes de usar biodiesel en él, especialmente con vehículos antiguos.
- Sus costos aún pueden ser más elevados que los del Diésel de petróleo. Depende de la fuente de aceite utilizado en la fabricación.
- Su estabilidad es menor en tiempos de almacenamiento largos, ya que se ve corrompido tanto por la oxidación bacteriana como por la atmosférica, dando lugar a aldehídos, cetonas y ácidos, con olores desagradables y muy fuertes.
- Su poder calorífico es menor, con lo que requiere 1.1 L de biodiesel por cada litro reemplazado de diésel.

### **1.3.3. Biodiesel en España.**

#### **1.3.3.1 Producción en España.**

El estudio realizado del impacto macroeconómico de las energías renovables por la asociación de empresas de energías renovables (APPA) en el año 2017 en España, remarca los buenos resultados registrados por la industria de biocarburantes. Se ha obtenido una contribución de 764 millones de euros al PIB con la suma de los sectores del biodiesel y del bioetanol. Produciendo un total de 1.515.000 toneladas de biodiesel en el año de 2017. Este ascenso (30,6 % más de la producción en 2016) fue posible gracias

a la importación (un 39,3% de la producido fue importado) al mercado nacional. A pesar de este aumento de producción, ese mismo año cerraron 10 plantas de producción de biodiesel, de las 30 que empezaron. Y en los años previos al 2017 cesaron su actividad un total de 24 plantas. En 2017, en España había tan solo 20 plantas productoras de biodiesel.

En la actualidad, los biocarburantes convencionales están sufriendo un periodo de estancamiento como energías renovables en el sector del transporte. Su futuro está “en el aire”, dependerá de la decisión de equilibrio político y económico, en los que estarán involucrados los sectores que participan en su obtención (agrícolas, industrial y distribución).

Año	Mes	Producción**		Importaciones		Exportaciones	
		m <sup>3</sup>	Variación mismo mes año anterior (%)	m <sup>3</sup>	Variación mismo mes año anterior (%)	m <sup>3</sup>	Variación mismo mes año anterior (%)
2017	enero	132.912	43,26%	39.051	729,77%	79.026	242,80%
2017	febrero	118.949	26,63%	32.227	8189,44%	57.450	57,08%
2017	marzo	138.954	7,43%	52.810	1798,56%	87.049	89,18%
2017	abril	147.461	57,66%	50.365	887,63%	89.007	172,86%
2017	mayo	154.746	32,70%	52.906	43,49%	115.368	29,39%
2017	junio	144.626	15,25%	34.788	-31,47%	112.233	112,85%
2017	julio	149.547	21,54%	38.415	-40,44%	105.227	9,83%
2017	agosto	163.162	18,20%	38.954	42,58%	125.121	39,42%
2017	septiembre	148.139	14,73%	28.719	-14,64%	79.388	-17,99%
2017	octubre	139.956	75,79%	67.001	15,17%	86.937	76,96%
2017	noviembre	140.172	57,07%	41.854	0,64%	48.812	64,65%
2017	diciembre	143.104	32,95%	40.585	-11,44%	62.125	169,31%
2018	enero	147.655	11,09%	64.346	64,78%	61.025	-22,78%
2018	febrero	159.627	34,20%	84.939	163,57%	85.392	48,64%
2018	marzo	138.792	-0,12%	66.400	25,73%	66.999	-23,03%
2018	abril	137.111	-7,02%	87.384	73,50%	123.591	38,85%
2018	mayo	182.797	18,13%	98.569	86,31%	129.823	12,53%
2018	junio	172.617	19,35%	108.053	210,60%	140.991	25,62%
2018	julio	185.380	23,96%	96.948	152,37%	113.872	8,22%
2018	agosto	200.407	22,83%	90.539	132,43%	133.169	6,43%
2018	septiembre	182.689	23,32%	69.095	140,59%	109.426	37,84%
2018	octubre	164.627	17,63%	80.691	20,43%	107.220	23,33%
2018	noviembre	150.859	7,62%	59.105	41,22%	84.670	73,46%
2018	diciembre	185.541	29,65%	99.869	146,08%	134.646	116,74%

Ilustración 25. Evolución del consumo anual del Biodiésel en España. [10]

### **I.3.4. Situación mundial.**

Según la Agencia Internacional de la Energía obtenemos los siguientes porcentajes:

En 2017, según la AIE, la producción de biocombustibles aumentó un 4%, alcanzando los 143 mil millones de litros, con un valor energético de 83 Mtep. Para 2023, la producción aumentará un 15%, lo que equivaldría una cantidad de 165 mil millones de litros, siendo 97 Mtep. El principal motor de este aumento es el nuevo marco de políticas que dictamina RenovaBio.

Aquellos países que representan la expansión mundial en la producción de biocombustibles son los países asiáticos, como China, India y ASEAN. Aunque hay que destacar que América Latina representa el 45% de la producción.

Especificando en algunos tipos de biocombustible, encontramos que:

#### **1. Etanol.**

Desde principios del 2018 hasta 2023 se prevé que dos tercios del crecimiento de los biocombustibles sean de etanol. En 2017 llegó a aumentar un 3% a nivel mundial, alcanzando 104 mil millones de litros de producción.

#### **2. Biodiesel.**

La producción de Aceite Vegetal Hidrotratado (HVO) combinada con la producción de Biodiesel aumentó 7% en 2016, obteniendo en 2017 un producción record de 39 mil millones (aprox.) de litros. En 2023, se espera producir 46 mil millones de litros, debido a la expansión de mercado impulsada por los países como Estados Unidos, Brasil y algunos que pertenecen a la ASEAN. Además, se prevé la instalación de nuevas plantas que entrarán en funcionamiento en Europa y los Estados Unidos.

## **II. OBJETIVOS**

# **OBJETIVOS**



## **II.1. OBJETIVO GENERAL.**

Desarrollar el diseño de una planta conceptual del proceso de obtención de biodiesel a partir de aceite usado de fritura para la posible ampliación de la empresa RAFRINOR S.L, cuya empresa se dedica a la recolecta de aceite usado de cocina, con lo que también se encargará de suministrar la materia prima (aceite usado de fritura). El diseño se realizará basándose en los datos obtenidos a través de la literatura para determinar los parámetros que nos permiten obtener un producto de calidad con un proceso óptimo y económicamente rentable.

## **II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.**

Para cumplir con el objetivo principal es necesario llevar a cabo una serie de objetivos parciales o particulares que se describen a continuación:

1. Revalorizar un residuo, cuyo producto obtenido puede reemplazar parte del uso de los combustibles fósiles, además de evitar su vertido ya que provocar serios problemas ambientales. El residuo será proporcionado por la empresa RAFRINOR S.L, empresa recolectora de aceite usado de cocina.

2. Determinación de las variables que predominan en el diseño del proceso de obtención de biodiesel.

3. Construir un diagrama de flujo del proceso.

4. Realizar un análisis de rentabilidad del proyecto.

Tomando como referencia la empresa RAFRINOR S.L. Podemos observar la cantidad de aceite que usamos, la cantidad que se reutiliza, que ronda un 72% de lo generado en la industria y un 12% del aceite doméstico, este último es un porcentaje alarmante, ya que no llega ni al cuarto por ciento de lo que utilizamos.

### **III. DESARROLLO PROYECTO**

## **DESARROLLO PROYECTO**



## **III.1. INGENIERÍA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.**

Cuando mencionamos término de ingeniería conceptual, nos referimos a la primera etapa de un proyecto. Esta primera etapa consiste identificar la viabilidad técnica y económica de un proyecto (en nuestro caso de una planta de producción de biodiesel). Siendo esto el estudio previo para posteriormente desarrollado.

Los principales conceptos a analizar y estudiar en esta etapa son:

III.1.1. Capacidad de producción.

III.1.2. Normativa y regulación.

III.1. 3. Descripción del proceso de fabricación y requerimientos de usuario.

III.1. 4. Balances de materia.

III.1. 5. Balances de energía.

III.1.6. Dimensionado de equipo.

III.1.7. Descripción general de la instalación.

III.1.8. Plan, diagramas de bloques, distribución de salas y diagramas de procesos básicos.

III.1.9. Estimación económica de la inversión.

### **III.1.1. Capacidad de producción**

Las investigaciones y estudios que se han hecho acerca del desarrollo para la producción del biodiesel son innumerables. Desde el intento de aprovechar una gran variedad de materias que ya han sido utilizadas, con el fin de revalorizarlas y obtener este producto, hasta investigaciones de una multitud de métodos diferentes para generarlo de la manera más óptima posible.

Para el diseño de este prototipo se ha seleccionado, en primer lugar, el tipo de proceso. Se puede realizar el proceso de producción del biodiesel de forma continua o batch, por lotes, como bien se ha mencionado en el apartado en el que se describe el biodiesel. En este trabajo se va a llevar a cabo de forma discontinua, por lotes, ya que de esta forma se obtiene una gran flexibilidad para realizar modificaciones en los materiales y compuestos utilizados. Además, es el proceso que se suele implantar en las plantas que procesan pequeñas cantidades. Se realizarán los cálculos del procesado bajo las condiciones obtenidas a través de la literatura (normalmente se realiza un proceso experimental el cual se basa para hacer el estudio conceptual, pero por la falta de accesibilidad a un laboratorio, no se ha realizado así).

La planta se diseñará para una capacidad de producción de 20.000 toneladas/año, pero se realizará la instalación para una capacidad mayor, así obtendremos la posibilidad de ampliar la producción. Para definir esta capacidad se ha basado en los datos proporcionados por la empresa por RAFRINOR S.L, empresa que se dedica a la recolecta de aceites vegetales usados, situada en la provincia de Vizcaya, Ortuella.

Se ha decidido realizar el diseño de la planta para procesar aceites de fritura por diversas razones, de las cuales se destacan las más importantes:

1. El reducido coste de la materia prima (aproximadamente tres veces inferior a los aceites nuevos).
2. Se necesita una alternativa urgente al vertido de aceites, ya que estos provocan un impacto ambiental desmesurado.

3. También se necesita una alternativa al uso de combustibles fósiles, ya que se trata de un bien escaso muy presente y necesario en nuestra sociedad actual.

Según los datos que expone RAFRINOR S.L.:

- **Aceite usado doméstico:**

- Producción por habitante/año: 2 - 4 L/hab. Año
- Población de Vizcaya (Fuente: INE 2013): 1.156.447 habitantes.
- Producción total: 2.313.000 - 4.626.000 L/año.
- Producción calculada sobre la media: 3.470.000 L/año
- Recogido por RAFRINOR, S.L y varios en 2014: 432.000 L/año equivalente a solo el 12% de la producción calculada sobre la media.
- Aceite vertido: 3.038.000 L/año equivalente al 88% de la producción calculada sobre la media. De ahí se instala un plan incentivo para poner puntos fijos de vertido de aceite doméstico.

- **Aceite usado en el sector industrial:**

- Producción total aproximada: 1.593.000 m<sup>3</sup>/año.
- Recogido por RAFRINOR, S.L. y varios: 1.154.000 m<sup>3</sup>/año. Equivalente al 72% del total generado.
- Aceite Vertido: 439.000 m<sup>3</sup>/año (28%)

Con lo que finalmente se puede deducir:

- **Aceite doméstico recogido por RAFRINOR, S.L. y otros** será procesado en la planta:

$$\dot{V}_{A,D} = 432.000 \text{ L de aceite doméstico/año}$$

También se puede definir el flujo másico sabiendo que la densidad de la Trioleína es de 0,909 g/cm<sup>3</sup>:

Ec. 1

$$\dot{m}_{A,D} = 432.000 \left( \frac{L}{\text{año}} \right) * 0,909 \left( \frac{g}{\text{cm}^3} \right) * \frac{1000 (\text{cm}^3)}{1(L)} = 392688000 \frac{\text{g de aceite doméstico}}{\text{año}}$$

Lo que es equivalente a:

$$\dot{m}_{A,D} = 392,6 \text{ ton de aceite doméstico/año}$$

- **Aceite industrial recogido por RAFRINOR, S.L.** que será procesado en la planta será el equivalente a un 1,78% del recogido (se estudiará una posible ampliación de la planta):

Ec. 2

$$\dot{m}_{A,I,1} = 1.154.000 \left( \frac{m^3}{\text{año}} \right) * 0,909 \left( \frac{g}{\text{cm}^3} \right) * \frac{1(\text{cm}^3)}{1 * 10^{-6}(\text{m}^3)} = 1.049 * 10^{12} \text{ g/año}$$

Lo que es equivalente a:

$$\dot{m}_{A,I,1} = 1048986 \text{ t/año}$$

- **Aceite industrial** que procesará la planta:

Ec. 3

$$\dot{m}_{A,I} = 1.048.986 \left( \frac{t}{\text{año}} \right) * 0,0178 = 18.671,95 \text{ t/año}$$

Sumando los volúmenes anteriores se puede definir que se trabajará con un volumen de aceite para el diseño de la planta de:

Ec. 4

$$\dot{m}_{A,T} = 392,688 \left( \frac{t}{\text{año}} \right) + 3.8812,48 \left( \frac{t}{\text{año}} \right) = 1.9064,17 \frac{t}{\text{año}} \approx 20.000 \text{ t/año}$$

A continuación, se obtiene la producción diaria de la planta teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Días totales en un año: 365 días.

- Días hábiles de la semana (que se trabajan): 6 días.
- Semanas en un año: 52 semanas.
- Total de días laborales ( $T_{D.L.}$ ):

$$T_{D.L.1} = 6 * 52 = 312 \text{ días laborales.}$$

Se dejan un margen de 2 días para casos imprevistos (rotura de equipos, fugas,...). Con lo que el total de días laborales:

$$T_{D.L.} = 310 \text{ días laborales.}$$

Teniendo en cuenta que la capacidad de procesado era de 20.000 t/año, se calcula el flujo diario ( $\dot{m}_D$ ):

Ec. 5

$$\dot{m}_D = 20.000 \left( \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right) * \frac{1(\text{año})}{310(\text{días})} = 64,51 \frac{\text{ton}}{\text{día}}$$

Con el objetivo de facilitar el procesado de la planta, mantenimiento y control se instalarán 4 reactores. Cada reactor deberá de procesar al día ( $\dot{m}_{D,R}$ : Flujo diario en cada reactor):

Ec. 6

$$\dot{m}_{D,R} = \frac{64,51 \left( \frac{\text{t}}{\text{día}} \right)}{4(\text{reactores})} = 16,13 \frac{\text{t}}{\text{día} * \text{reactor}}$$

A través de la lectura, se ha obtenido que la media del tiempo de carga por cada lote es de 2 horas (este tiempo es la suma del tiempo de mezclado de la solución de metanol con hidróxido de sodio, más el tiempo que tarda en transcurrir la reacción de transesterificación), en el apartado de *descripción del proceso* se detalla los tiempos de procesado. Se calculan el número de lotes que se van a llevar a cabo a lo largo del día ( $n_{L,D}$ ):

Ec. 7

$$n_{L,D} = \frac{24(\text{h})}{\text{día}} * \frac{1(\text{lote})}{2(\text{h})} = 12 \frac{\text{lotes}}{\text{día}}$$

Siendo el tamaño de cada lote ( $\dot{m}_{L,R}$ ):

Ec. 8

$$\dot{m}_{L,R} = 16,13 \left( \frac{\text{ton}}{\text{día} * \text{reactor}} \right) * \frac{1(\text{día})}{12(\text{lotes})} = 1,344 \frac{\text{t}}{\text{reactor} * \text{lote}}$$

### III.1.2. Normativa y regulación.

El objetivo es generar biodiesel satisfactorio económicamente y cumpliendo las condiciones de salida que dictamina tanto la norma UNE-EN-14214, combustibles de automoción. Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) para motores diésel. Requisitos y métodos de ensayo, como la norma EN 590, combustibles para automoción. Combustibles para motor diésel (gasóleo). Requisitos y métodos de ensayo.

#### - Aceite Usado de Fritura (AUF):

Los aceites usados de fritura (AUF) son utilizados varias veces antes de ser desechados, además de sometidas diferentes condiciones a lo largo de su utilidad. Esto provoca cambios tanto en su composición química como en su composición física, como puede ser un aumento en la viscosidad, un aumento en el calor específico, cambios en el color, etc. En la siguiente tabla podremos observar las propiedades fisicoquímicas que presentan los AUF en función de lo que dictaminan las normas:

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de AUF

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES	NORMA
VISCOSIDAD CINÉMATICA A 40°C	40,2	cSt	EN ISO 3104
DENSIDAD A 15°C	926	Kg/m <sup>3</sup>	EN ISO 12185
PUNTO DE INFLAMACIÓN	286	°C	EN ISO 2719
ÍNDICE DE YODO	108	cg l2/g aceite	EN 14111

ÍNDICE DE SAPONIZACIÓN	193,2	mg KOH/g aceite	AOCS CD3 1993
VALOR DE ÁCIDO	1,7	mg KOH/g aceite	EN 14104
CONTENIDO DE AGUA	1200	mg/kg	EN ISO 12937
CONTENIDO DE AZUFRE	6	mg/kg	EN ISO 20846
CARBÓN RESIDUAL	0,18	% m/m	EN ISO 10370
PESO MOLECULAR	879	g/mol	

**Fuente:** J. M. Dias, M. C. M. Alvim-Ferraz, and M. F. Almeida, "Production of biodiesel" [10]

Marco normativo en el sector de biocarburantes:

Normativa Española y Europea:

Tabla 3. Requerimientos del Biodiesel según la norma europea EN 14214.

EN 14214				
ENSAYO	UNIDADES	LÍMITES		NORMA DE ENSAYO
		Mínimo	Máximo	
Contenido en ester	% (m/m)	96,5		prEN 14103
Densidad a 15°C	kg/m <sup>3</sup>	860	900	EN ISO 3675
Viscosidad a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	3,50	5,00	EN ISO 3104
Punto de inflamación	°C	120		ISO 3679
Contenido en azufre	mg/kg		10,0	prEN20846
Residuo carbonoso	% (m/m)		0,30	EN ISO 10370
Número de Cetano		51,0		EN ISO 5165
Contenido en cenizas de sulfatos	% (m/m)		0,02	ISO 3987
Contenido en agua	mg/kg		500	EN ISO 12937
Contaminación total	mg/kg		24	EN 12662
Corrosión en lámina de cobre	Clasificación	Clase 1		EN ISO 2160
Estabilidad a la Oxidación	horas	6,0		prEN 14112
Valor ácido	mg KOH/g muestra		0,50	prEN 14104
Índice de yodo	g l/100g muestra		120	prEN 14111
Metiléster linolénico	% (m/m)		12,0	prEN 14103
Metiléster poliinsaturados	% (m/m)		1	
Contenido en metanol	% (m/m)		0,20	prEN 14110
Contenido en monoglicéridos	% (m/m)		0,80	prEN 14105
Contenido en diglicéridos	% (m/m)		0,20	prEN 14105
Contenido en triglicéridos	% (m/m)		0,20	prEN 14105
Glicerina libre	% (m/m)		0,02	prEN 14105
Glicerina total	% (m/m)		0,25	prEN 14105
Metales grupo I (Na+K)	mg/kg		5,0	prEN 14108/14109
Metales grupo II (Ca+Mg)	mg/kg		5,0	prEN 14538
Contenido en fósforo	mg/kg		10,0	prEN 14107
POFF	°C	Según época y país		EN 116

**Fuente:** UNE 14214 [11]

Tabla 4 Emisiones estimadas provisionales de las materias primas de biocarburantes y biolíquidos, resultantes del cambio indirecto del uso de la tierra (gCO<sub>2</sub>eq/M)

Grupo de materias primas	MEDIA (*)	Intervalo interpercentil derivado del análisis de sensibilidad (**)
Cereales y otros cultivos ricos en almidón	12	8 a 16
Azúcares	13	4 a 17
Oleaginosas	55	33 a 66

(\*) Los valores medios aquí incluidos representan una media ponderada de los valores de materias primas modelados individualmente.

(\*\*) La serie aquí incluida refleja el 90 % de los resultados utilizando los valores de los percentiles cinco y noventa y cinco resultantes del análisis. El percentil cinco sugiere un valor por debajo del cual se realizaron el 5 % de las observaciones (o sea, el 5 % de los datos totales usados mostraron resultados inferiores a 8, 4 y 33 gCO<sub>2</sub>eq/M). El percentil noventa y cinco sugiere un valor por debajo del cual se realizaron el 95 % de las observaciones (o sea, el 5 % de los datos totales usados mostraron resultados inferiores a 16, 17 y 66 gCO<sub>2</sub>eq/M).

**Fuente:** Directiva (UE) 2015/1513 del parlamento europeo y del consejo, 9 de septiembre de 2015, Diario Oficial de la Unión Europea. [12]

→Especificaciones técnicas:

Tabla 5. Objetivos globales nacionales en relación con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía final en 2020

	Cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía final bruta, 2005 (S <sub>2005</sub> )	Objetivo para la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía final bruta, 2020 (S <sub>2020</sub> )
Bélgica	2,2 %	13 %
Bulgaria	9,4 %	16 %
República Checa	6,1 %	13 %
Dinamarca	17,0 %	30 %
Alemania	5,8 %	18 %
Estonia	18,0 %	25 %
Irlanda	3,1 %	16 %
Grecia	6,9 %	18 %
España	8,7 %	20 %
Francia	10,3 %	23 %
Italia	5,2 %	17 %
Chipre	2,9 %	13 %
Letonia	32,6 %	40 %
Lituania	15,0 %	23 %
Luxemburgo	0,9 %	11 %
Hungría	4,3 %	13 %
Malta	0,0 %	10 %
Países Bajos	2,4 %	14 %
Austria	23,3 %	34 %
Polonia	7,2 %	15 %
Portugal	20,5 %	31 %
Rumanía	17,8 %	24 %
Eslovenia	16,0 %	25 %
Eslovaquia	6,7 %	14 %
Finlandia	28,5 %	38 %
Suecia	39,8 %	49 %
Reino Unido	1,3 %	15 %

**Fuente:** Directiva 2009/28/EC of the european parliament and of the council, 23 april 2009, Official journal of the European Union [13]

### **III.1.3. Descripción del proceso de fabricación y requerimientos de usuario.**

#### Descripción del proceso:

A continuación, describiremos la secuencia de procesos que regirá nuestra planta conceptual para la producción del biodiesel.

Secuencia de procesos:

- 1. Recepción de la materia prima.** La materia prima será proporcionada por RAFRINOR S.L., como bien se ha mencionado anteriormente.
- 2. Almacenamiento de la materia prima.** En segundo lugar, se procederá a la instalación en el exterior de la planta los tanques de almacenamiento.
- 3. Pretratamiento de la materia prima.** Según RAFRINOR, S.L. se estima que cada litro de aceite usado en el sector hostelero se caracteriza por [14]:

→ 85 % de aceite propiamente dicho.

→ 10 % de agua con restos de materia orgánica y aceite.

→ 5 % son lodos compuestos por 10 % de agua, 30 % de materia orgánica y 60 % de aceite.

Para el procesado del aceite desechado por el sector hostelero, es decir, de nuestra materia prima, se debe realizar un tratamiento con el fin de acondicionar el compuesto a las condiciones de operación. Este tratamiento consiste en una serie de operaciones, como son, el filtrado, desgomado y secado.

→ El filtrado es necesario ya que los aceites desechados de procesos de fritura contienen una gran cantidad de sólidos suspendidos. La operación se realiza a temperatura ambiente. Normalmente se trabajan con tamices de 5 micras aproximadamente.

→ El desgomado tiene como objetivo eliminar aquellas sustancias que se caracterizan por ser coagulables y que se separan a través de un proceso de hidratación (por lecturas, se puede decir, que normalmente el valor es un 20% del volumen inicial del aceite a tratar). Siendo estas la parte no correspondiente a la glicerina, es decir, los minerales, sales, fosfatos, proteínas y otros.

→ Secado. Finalmente, se eleva la temperatura a un intervalo de 90°C -100°C para eliminar el máximo porcentaje de agua, con fin de evitar que se produzca saponización al realizar la transesterificación. Antes de ser introducido al reactor, lo enfriaremos hasta la temperatura ambiente 25°C.

Para realizar los cálculos, se ha tratado el aceite como si fuese Trioleína (como bien se ha mencionado reiteradamente), ya que se trata de un triglicérido que hace referencia a tres unidades de ácido oleico, uno de los ácidos que predominan en la composición del aceite usado de cocina. Composición real del aceite usado de cocina [14]:

-Ácido Oleico: 20,33%

-Ácido Linoleico: 68,5%

-Ácido Palmítico: 6,15%

-Ácido Esteárico: 5,00%

#### **4. Mezclador del alcohol y catalizador seleccionados para la transesterificación.**

- Alcoholes. Los alcoholes que se emplean en el proceso de transesterificación, pueden ser primarios o secundarios con cadenas formadas entre 1 y 8 átomos de carbón. Encontramos alcoholes como el Metanol, Etanol, Propanol, Butanol y Amilalcohol. Los dos primeros mencionados son los más utilizados en la industria.

El metanol y etanol se caracterizan por no ser miscibles a temperatura ambiente con los triglicéridos, por ello se debe realizar una agitación mecánica con el fin de que favorezca la transferencia de masa. Focalizando en nuestro alcohol seleccionado, metanol, en los primeros minutos de la reacción se forman una serie de emulsiones (ya

que el metanol si es soluble en los ésteres metílicos y en la glicerina) que se disuelven con facilidad provocando una capa inferior rica en glicerol y una capa superior rica en ésteres metílicos (biodiesel).

La gran desventaja que presenta el uso del metanol es que proviene del gas natural, un combustible fósil. Con lo cual este aspecto no contribuye a la sostenibilidad y el biodiesel producido no sería del todo natural (bio).

- Catálisis. El uso de un catalizador en la reacción de transesterificación proporciona una mejora en la reacción, proporción y rendimiento. Si no se hiciese uso de un catalizador, la reacción debería de transcurrir a temperaturas por encima de 250°C. Es muy importante seleccionar de qué naturaleza va a ser el catalizador ya que va a determinar los límites de composición con respecto a la materia prima, además de las condiciones y operaciones posteriores a la reacción de transesterificación.

Podemos encontrar 3 tipos diferentes de catálisis:

1. Catálisis básica: Son los más utilizados a nivel industrial para el proceso de transesterificación, ya que permite trabajar en condiciones moderadas (temperaturas inferiores a 100°C), con tiempos de reacción de 1 hora.

Por contraposición, el uso de este tipo de catalizadores puede provocar saponificación (formación de jabones), debido a su contenido de agua, impurezas y ácidos grasos libres (AGL) es sumamente elevado, con lo que se deberá de realizar un pretratamiento de la materia prima (como bien se ha mencionado anteriormente), y el producto secundario que se obtiene en el proceso de transesterificación (glicerina) deberá de ser tratado, al igual que el biodiesel, para obtener la pureza deseada.

En nuestro caso utilizaremos como catalizador hidróxido de sodio, que lo mezclaremos con el alcohol de transesterificación (metanol), para formar metóxido de sodio, compuesto que presenta mayor rendimiento en menores tiempos de reacción, es decir, mayor actividad, en consecuencia, incrementaremos el coste del procesado.

2. Catálisis ácida: Los catalizadores ácidos necesitan temperaturas más elevadas a 100°C, además para obtener una conversión razonable (aprox. Un 80%) necesitan más de

3 horas de tiempo de reacción. La gran ventaja que produce su uso es que no se forman jabones.

3. Catálisis enzimática: La catálisis enzimática se lleva a cabo mediante lipasas (enzimas que desintegran grasas en ácidos grasos), pueden intervenir en la reacción de transesterificación independientemente del medio en el que se encuentren (medio acuoso o no acuoso). Se caracterizan por tener conversiones elevadas, como en la catálisis básica, pero en este caso, es capaz de operar a temperaturas inferiores de 50°C. La desventaja que acarrea su uso, es por el elevado coste de las lipasas.

En la siguiente tabla se resumen las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de catálisis:

Tabla 6. Ventajas e inconvenientes de los diferentes tipos de catálisis en el proceso de transesterificación.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>CATALIZADOR HOMOGÉNEO BÁSICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Corto tiempo de reacción.</li> <li>- Suaves condiciones de reacción.</li> <li>- Bajo coste.</li> <li>- Gran disponibilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Saponización. En concentraciones superiores al 2% se forman jabones.</li> <li>- Hidratación del catalizador en contacto con el aire.</li> </ul>
<b>CATALIZADOR HETEROGENEO BÁSICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Corto tiempo de reacción.</li> <li>- Suaves condiciones de reacción.</li> <li>- El catalizador se recupera fácilmente.</li> <li>- Catalizador reutilizable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Saponización. En concentraciones superiores al 2% se forman jabones.</li> <li>- Contaminación de productos por lixiviación en fase éster.</li> </ul>
<b>CATALIZADOR HOMOGÉNEO ÁCIDO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Largo tiempo de reacción.</li> <li>- Las condiciones de reacción pueden ser suaves.</li> <li>- No reacciona con el contenido de ácidos grasos libre y agua presentes en la materia prima.</li> <li>- Eficaz con materia prima de baja calidad,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lenta velocidad de reacción.</li> <li>- Posible generación de corrosión en los equipos.</li> <li>- Difícil separación del catalizador.</li> </ul>

<p><b>CATALIZADOR HETEROGENEO ÁCIDO</b></p>	<p>proporcionando un producto de calidad.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- No reacciona con el contenido de ácidos grasos libre y agua presentes en la materia prima.</li> <li>- Eficaz con materia prima de baja calidad, proporcionando un producto de calidad.</li> <li>- El catalizador se recupera fácilmente.</li> <li>- Catalizador reutilizable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Condiciones de reacción: elevadas temperaturas, y largos tiempos de reacción.</li> <li>- Consumo energético elevado.</li> <li>- Contaminación de productos por lixiviación en fase éster.</li> </ul>
<p><b>ENZIMÁTICO</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No reacciona con el contenido de ácidos grasos libre y agua presentes en la materia prima.</li> <li>- Eficaz con materia prima de baja calidad, proporcionando un producto de calidad.</li> <li>- La reacción puede transcurrir a temperaturas más bajas que en los catalizadores homogéneos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Condiciones de reacción: tiempos largos.</li> <li>- Elevado coste de material.</li> <li>- Sensible a la presencia de alcohol, provocando la inhibición de la enzima.</li> </ul>

**Fuente:** Kee Lam, Man. Tcong Lee. Kcat, Rahman, Mohamed, Abdul, School of chemical engineering, univertisti sains malaysia, (31/03/2010). "Homogeneous, heterogenous and enzymatic catalysus for transterificatio of high free fatty acid oil to biodiesel.pag 506. [15]

La experiencia demuestra que por cada litro de aceite a procesar se utiliza 0,166 litros de metanol y 7,5 gramos de NaOH, pero se puede determinar la cantidad a utilizar a través de la titulación. La titulación consiste en una reacción entre el aceite vegetal y el catalizador en la cual en vez de utilizar Metanol (alcohol que utilizaremos para realizar la transesterificación), se utiliza alcohol Isopropílico, debido a que este último no reacciona con el aceite. Por ejemplo, en un 1L de agua destilada disolvemos 1g de NaOH

y en 10 ml de alcohol isopropílico disolvemos 1 ml de aceite vegetal. Cuando ambas disoluciones estén diluidas, adicionamos 1 ml de la primera disolución a la segunda, a continuación, mediremos el pH. Repetiremos esta operación hasta que el pH se vuelva básico, ya que esto indicará que los ácidos grasos libres se han neutralizado y la cantidad de mililitros de NaOH/agua utilizados, es igual al número de gramos de NaOH que se deben de usar por litro de aceite vegetal en la reacción del biodiesel.

## 5. Transesterificación.

El proceso que vamos a utilizar en este trabajo para la obtención de biodiesel es la transesterificación. Retomando lo descrito en los apartados anteriores, entendíamos por transesterificación, la reacción que se produce por los aceites o grasas, es decir, por moléculas triglicéridos (principal componente del aceite vegetal y la grasa animal) que contienen entre 15-23 átomos, con un alcohol de bajo peso molecular, en nuestro caso metanol, en presencia de un catalizador alcalino (NaOH), dando lugar a ésteres y glicerina como productos.

Se puede llevar a cabo en una gran diversidad de reactores, actualmente se están investigando:

- Mezcladores estáticos: El proceso se realizaría de manera continua. Se sustituiría el uso de un reactor de tanque agitado por un tubo con elementos mezcladores estáticos que bombearán a los reactivos, produciendo un menor tiempo de reacción (30 min aprox.)
- Reactores con microcanales: son reactores que bifurcan las corrientes provocando un número alto de microcanales. La división de estos canales provoca una mayor área por unidad de volumen, y acorta las distancias de difusión, produciendo así una mejora en la transferencia de calor y de materia. Alcanza conversiones entre 90-99% con tiempo de reacción de escasos minutos (4-6).
- Reactores de flujo oscilatorio: se caracterizan por ser reactores tubulares que contienen placas perforadas. El caudal es bombeado de manera pulsante, mejorando la transferencia de masa y de calor. Su tiempo de reacción es el mismo que en los mezcladores estáticos, pero con conversiones de 90%.
- Reactores con cavitación: el fenómeno de cavitación se produce cuando la presión en un punto del líquido resulta inferior a la tensión del vapor, formando cavidades llenas de vapor o de gas en el seno de un líquido en movimiento.

- **Reactores rotativos:** consiste en un juego de tubos, uno externo y otro interno que está en continuo rodamiento. Entre ambos tubos se genera una delgada capa con un flujo. Este flujo permite que la transferencia tanto de calor como de materia sea rápida, llegando a obtener tiempos de residencia de 40 segundos y conversiones de 98%.
6. **Almacenamiento de biodiesel.** El biodiesel generado se almacenará en depósitos, que estarán cubiertos de nitrógeno, para evitar su oxidación.
7. **Venta.** Se contratará a una empresa de transporte con el fin de hacer llegar el producto final a su destinatario para su posterior uso.

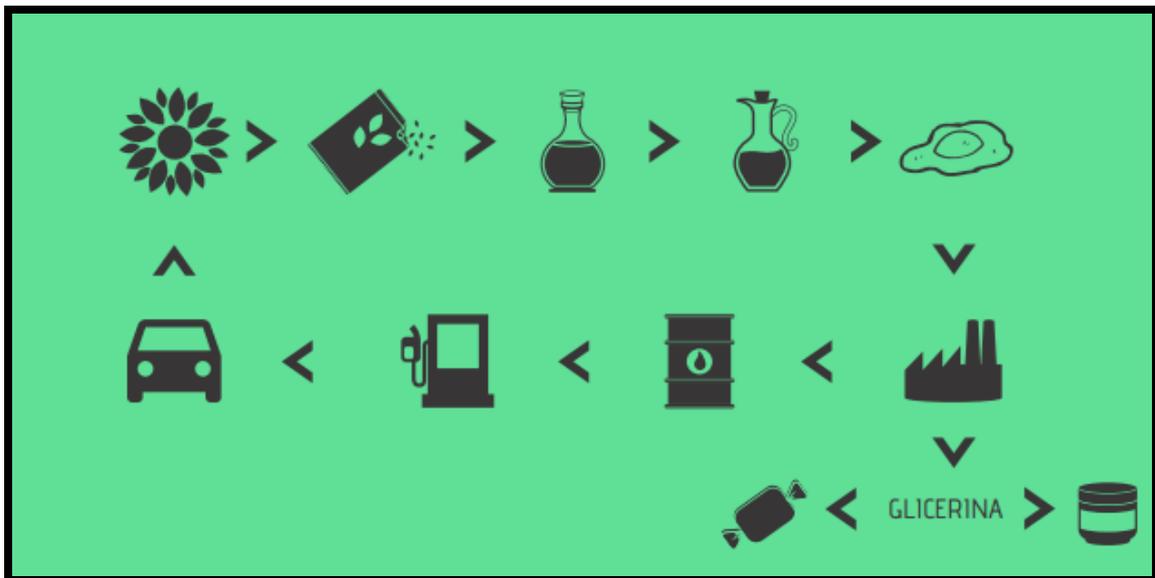


Ilustración 26. Ciclo Biodiesel.

Requerimientos del proceso:

A continuación, expondremos las materias primas y los servicios adicionales que se utilizarán en el proceso:

1. Materias primas que se emplearán para el proceso del biodiesel:
  - Aceite usado de fritura proporcionado por RAFRINOR S.L. Al realizar los cálculos consideramos el triglicérido como únicamente Trioleína.
  - Sosa cáustica al 98% de pureza.

- Metanol como alcohol de transesterificación al 99,9% de pureza.
  - Agua.
2. Servicios adicionales:
- Agua a 65°C que circule por la camisa del reactor provocando una transferencia de calor por convección.
  - Agua a 18°C para condensar el vapor del metanol a la salida del reactor.
  - Energía a 220 V.

El objetivo principal es obtener unos valores dentro de los establecidos por la norma EN14214.

### III.1.4. Balances de materia

❖ Balance de materia en el mezclador del alcohol y catalizador:

Sabiendo que:

-  $\rho_{\text{Trioleína}} (25\text{ }^{\circ}\text{C}; 1\text{ atm}) = 0,909\text{ g/cm}^3$

-  $\rho_{\text{Metanol}} (25\text{ }^{\circ}\text{C}; 1\text{ atm}) = 0,7918\text{ g/cm}^3$

-  $P_{\text{mMetanol}} = 32,04\text{ g/mol}$

-  $P_{\text{mNaOH}} = 39,997\text{ g/mol}$

- Pureza de NaOH es del 98%.

- Pureza del Metanol es del 99,9%

- Flujo de aceite por lote que entra en cada reactor  $\dot{m}_{L,R} = 1,344\text{ t}/(\text{lote} \cdot \text{reactor})$

Como la planta contará con 2 mezcladores (por motivos de rentabilidad, además previniendo que en el caso de que se produzca un fallo en uno, haya otro y no sea necesaria detener la producción en la planta), que cada uno de ellos debe proporcionar la suficiente cantidad para suministrar a 2 reactores (por cada mezclador instalado suministrará a 2 reactores), se debe multiplicar el flujo de aceite por lote que entra en cada reactor a tratar, es decir:

Ec. 9

$$n^{\circ} \text{ reactores} * m_{L,R} = 2 \text{ (reactores)} * 1,344 \left( \frac{t}{\text{lote} * \text{reactor}} \right) = 2,688 \frac{t}{\text{lote}}$$

Aplicando un cambio de unidades:

Ec. 10

$$\dot{V}_{L,R} = \frac{2,688 \left( \frac{t}{\text{lote}} \right) * \frac{1 * 10^6 \text{ (g)}}{1 \text{ (ton)}}}{0,909 \left( \frac{g}{\text{cm}^3} \right) * \frac{1000 \text{ (cm}^3\text{)}}{1 \text{ (L)}}} = 2948,29 \frac{L}{\text{lote}}$$

Con lo que finalmente, se calcula el flujo del catalizador a la entrada del mezclador:

Ec. 11

$$\dot{m}_{\text{NaOH},M} = \frac{7,5 \text{ (gramos de NaOH)}}{1 \text{ (L de Trioleina)}} * 2948,29 \left( \frac{L \text{ de Trioleina}}{\text{lote}} \right) = 22112,175 \text{ gramos de } \frac{\text{NaOH}}{\text{lote}}$$

Recordando que la pureza era del 98%:

Ec. 12

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{NaOH},M} &= 22112,175 \text{ gramos de } \frac{\text{NaOH}}{\text{día} * \text{lote}} + (1 - 0,98) * 22112,175 \frac{\text{gramos de NaOH}}{\text{lote}} \\ &= 22554,41 \frac{\text{gramos de NaOH}}{\text{lote}} \end{aligned}$$

A continuación, se calculará el flujo de metanol en el mezclador:

Ec. 13

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{CH}_3\text{OH},M} &= \frac{0,166 \text{ (litros de CH}_3\text{OH)}}{1 \text{ (L de Trioleina)}} * 2948,29 \left( \frac{L \text{ de Trioleina}}{\text{lote}} \right) \\ &= 489,42 \frac{\text{litros de CH}_3\text{OH}}{\text{lote}} \end{aligned}$$

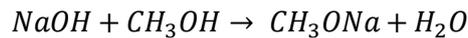
Recordando que la pureza del alcohol era del 99,9%:

Ec. 14

$$\begin{aligned}\dot{V}_{\text{CH}_3\text{OH},M} &= 489,42 \frac{\text{litros de CH}_3\text{OH}}{\text{lote}} * (1 - 9,99) * 489,42 \frac{\text{litros de CH}_3\text{OH}}{\text{lote}} \\ &= 489,91 \frac{\text{litros de CH}_3\text{OH}}{\text{lote}}\end{aligned}$$

Se prosigue a realizar el balance de materia que caracteriza al mezclador, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La relación molar de la reacción es 1:1.
- El NaOH es el reactivo limitante y el Metanol entra en exceso.
- Reacción para obtener la solución de metóxido de sodio:



En primer lugar, se realizarán una serie de ajustes en las unidades:

Ec. 15

$$\dot{n}_{\text{NaOH},M} = \frac{\dot{m}_{\text{NaOH},M}}{P_{\text{mNaOH}}} = \frac{22.554,41 \left( \frac{\text{gramos de NaOH}}{\text{lote}} \right)}{39,997 \left( \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} = 563,90 \frac{\text{moles de NaOH}}{\text{lote}}$$

Ec. 16

$$\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH},M} = \frac{\dot{V}_{\text{CH}_3\text{OH},M}}{\rho_{\text{Metanol}}(25^\circ\text{C}; 1 \text{ atm})} = \frac{489,91 \left( \frac{\text{litros de CH}_3\text{OH}}{\text{lote}} \right)}{0,7918 \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) * \frac{1000 \text{ (cm}^3\text{)}}{1 \text{ (L)}}} = 387.910,27 \frac{\text{g}}{\text{lote}}$$

Ec. 17

$$\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH},M} = \frac{\dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH},M}}{P_{\text{mMetanol}}} = \frac{387.910,27 \left( \frac{\text{gramos de CH}_3\text{OH}}{\text{lote}} \right)}{32,04 \left( \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} = 12.107,06 \frac{\text{mol de metanol}}{\text{lote}}$$

Sabiendo que reaccionan todos los moles NaOH (anteriormente se ha mencionado que se considera el reactivo limitante), a la salida del mezclador se obtendrá:

$$\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH},M} = 11.543,16 \text{ moles de metanol/lote}$$

$$\dot{n}_{2\text{CH}_3\text{ONa},M} = 563,90 \text{ moles de metóxido de sodio/lote}$$

$$\dot{n}_{2\text{H}_2\text{O},M} = 563,90 \text{ moles de agua/lote}$$

Sabiendo que:

$$- Pm_{\text{Metóxido de sodio}} = 54,03 \text{ g/mol}$$

$$- Pm_{\text{Agua}} = 18 \text{ g/mol}$$

Y recopilando lo anterior:

Ec. 18

$$\begin{aligned} \dot{m}_{2\text{CH}_3\text{OH},M} &= \dot{n}_{2\text{CH}_3\text{OH},M} * PM_{\text{Metanol}} = 11.543,16 \frac{\text{moles de metanol}}{\text{lote}} * 32,04 \left( \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) \\ &= 369842,8464 \frac{\text{g de metanol}}{\text{lote}} \end{aligned}$$

Ec. 19

$$\begin{aligned} \dot{m}_{2\text{CH}_3\text{ONa},M} &= \dot{n}_{2\text{CH}_3\text{ONa},M} * PM_{\text{Metóxido de sodio}} = 563,90 \frac{\text{moles de metóxido de sodio}}{\text{lote}} * 54,03 \left( \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) \\ &= 30.467,517 \frac{\text{g de metóxido de sodio}}{\text{lote}} \end{aligned}$$

Ec. 20

$$\dot{m}_{2\text{H}_3\text{O},M} = \dot{n}_{2\text{H}_3\text{O},M} * PM_{\text{Agua}} = 563,90 \frac{\text{moles de Agua}}{\text{lote}} * 18 \left( \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) = 10.150,2 \frac{\text{g de agua}}{\text{lote}}$$

En la siguiente tabla se pueden observar con claridad los resultados obtenidos al realizar el balance de materia en el mezclador:

Tabla 7. Valores obtenido del B.M. en el mezclador.

Sustancia	PM (g/mol)	Cantidad(g/lote)	Moles/lote
ENTRADAS			
NaOH	39,997	22.554,41	563,90

CH <sub>3</sub> OH	32,04	387.910,27	12.107,06
SALIDAS			
CH <sub>3</sub> ONa	54,03	30.467,517	563,90
H <sub>2</sub> O	18	10.150,2	563,90
CH <sub>3</sub> OH	32,04	369.842,84	11.543,16

❖ Balance de materia de reactor de transesterificación:

Condiciones a tener en cuenta para realizar el balance de materia:

- Temperatura: 60°C.
- Todo el NaOH está disuelto en el metanol, formando metóxido de sodio.
- El reactivo limitante es el AUF, equivalente a la Trioleína, con lo que el reactivo en exceso será el metanol.
- Relación molar de la reacción 1:3.
- Conversión de un 98% (valor medio de conversión que se obtiene al realizar la transesterificación AUF con un catalizar básico y un alcohol).
- Reacción de transesterificación:

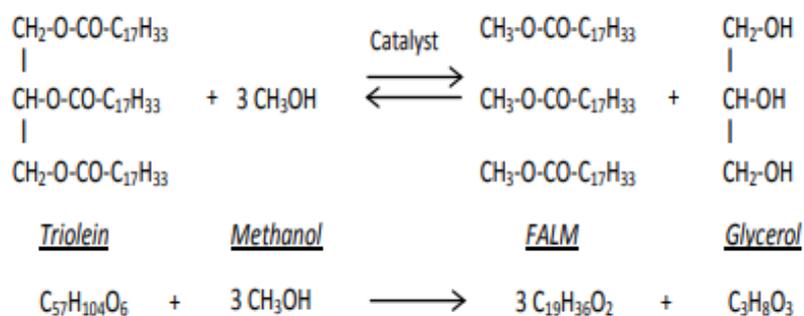


Ilustración 27. Reacción de transesterificación. [17]

A la hora de realizar los cálculos, a la cantidad de metanol se le añadirá la cantidad de agua obtenida y de metóxido. A esta solución se denominará solución de metóxido, que en la reacción expuesta en *la Imagen 10*, hace referencia al metanol.

Recopilación de datos necesarios para la resolución:

- $\dot{m}_{L,R} = 1,344 \frac{\text{ton}}{\text{reactor} \cdot \text{lote}} = 1,344 * 10^6 \frac{\text{g}}{\text{reactor} \cdot \text{lote}}$
- Pm Metanol = 32,04 g/mol
- Pm Trioleina = 885,400 g/mol
- Pm FALM (Éster metílico) = 296,478 g/mol
- Pm Glicerol = 92,094 g/mol
- $\dot{m}_{1\text{CH}_3\text{OH},M} = \dot{m}_{2\text{CH}_3\text{OH},M} + \dot{m}_{2\text{CH}_3\text{ONa},M} + \dot{m}_{2\text{H}_3\text{O},M} = 369.842,84 + 30.467,517 + 10.150,2 = 410.460,557 \frac{\text{g}}{\text{lote}}$

Se obtendrá el flujo por reactor de la solución de metanol:

Ec. 21

$$\dot{m}_{1\text{CH}_3\text{OH},R} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de mezcladores} * \dot{m}_{1\text{CH}_3\text{OH},M}[34]}{\text{n}^\circ \text{ de reactores}} = \frac{2 * 410.460,557 \left(\frac{\text{g}}{\text{lote}}\right)}{4 \text{ (reactores)}}$$

$$= 205.230,29 \frac{\text{g}}{\text{lote} * \text{reactor}}$$

Utilizando la conversión, la estequiometría de la reacción y el flujo de entrada que se ha definido del triglicérido (Trioleina); se puede obtener la cantidad de éster metílico que se ha generado:

Ec. 22

$$\dot{m}_{L,R,E,R} = 1,344 * 10^6 \frac{\text{g de Trioleina}}{\text{reactor} * \text{lote}} * \frac{3 \text{ moles de éster metílico} * 296,478 \frac{\text{g de éster metílico}}{\text{moles de éster metílico}}}{1 \text{ mol de Trioleina} * 885,400 \frac{\text{g de Trioleina}}{\text{moles de Trioleina}}}$$

$$* \frac{98 \text{ g de Trioleina}}{100 \text{ g de Trioleina}} = 1.323.120,97 \frac{\text{g de éster metílico}}{\text{reactor} * \text{lote}}$$

$$\dot{m}_{L,R,E,R} = 1,32 \frac{\text{t de éster metílico}}{\text{reactor} * \text{lote}}$$

Ec. 23

$$\dot{m}_{L,R,G,R} = 1,344 * 10^6 \frac{\text{g de Trioleina}}{\text{reactor} * \text{lote}} * \frac{1 \text{ moles de glicerol} * 92,094 \frac{\text{g de glicerol}}{\text{mol de glicerol}}}{1 \text{ mol de Trioleina} * 885,400 \frac{\text{g de Trioleina}}{\text{moles de Trioleina}}} * \frac{98 \text{ g de Trioleina}}{100 \text{ g de Trioleina}} = 135.979,589 \frac{\text{g de glicerol}}{\text{reactor} * \text{lote}}$$

$$\dot{m}_{L,R,G,R} = 0,13 \frac{\text{ton. de glicerol}}{\text{reactor} * \text{lote}}$$

$$\dot{m}_{L,R,M,R} = 223.927,64 \frac{\text{g de metanol}}{\text{reactor} * \text{lote}}$$

Tabla 8. Valores obtenidos al realizar el B.M. de la reacción de transesterificación

Sustancia	PM (g/mol)	Cantidad(g/(lote*Reactor))	Moles/lote
ENTRADAS			
C <sub>57</sub> H <sub>104</sub> O <sub>6</sub>	39,997	1,344*10 <sup>6</sup>	33.602,52
CH <sub>3</sub> OH*	32,04	205.230,29	6.405,44
SALIDAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> **	296,478	1.323.120,97	4.462,79
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> **	92,094	135.979,589	1.476,53
CH <sub>3</sub> OH(g)	32,04	59.749,33	1.864,83

\* Metanol + agua + metóxido de sodio, \*\* contienen pequeñas cantidades de metanol, NaOH y jabones (saponización)

❖ Balance de materia de la separación del biodiesel-glicerina:

Los productos obtenidos a la salida de los 4 reactores se introducirán en la centrifugadora para proceder a la separación del biodiesel y el glicerol:

Ec. 24

$$\begin{aligned} \dot{m}_{E,G,C} &= n^{\circ} \text{ reactores} * (\dot{m}_{L,R,E,R} + \dot{m}_{L,R,G,R}) \\ &= 4 \text{ (reactores)} \\ &* \left( 1.323.120,97 \frac{\text{g de éster metílico}}{\text{reactor} * \text{lote}} + 135.979,589 \frac{\text{g de glicerol}}{\text{reactor} * \text{lote}} \right) \\ &= 5.836.402,236 \frac{\text{g de éster metílico + glicerol}}{\text{lote}} \end{aligned}$$

Tabla 9. Valores obtenidos al realizar el B.M en la centrifugadora

Sustancia	PM (g/mol)	Cantidad(g/lote)	Moles/lote
ENTRADAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> + C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	303,15	5.836.402,236	19.252,52
SALIDAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> **	296,478	5.292.483,88	17.851,18
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> **	92,094	543.918,356	5.906,12

\* NOTA: se han despreciado los valores por pérdidas.

❖ Balance en el tanque de mezclado del biodiesel con el agua:

El producto obtenido (éster metílico) se mezcla con agua para proceder a su limpieza y que cumpla las condiciones impuestas por las normas vigentes. Teniendo en cuenta que para el lavado con agua necesitaremos un 1/3 de la cantidad de biodiesel (metil éster) a lavar, es decir:

-Flujo de Biodiesel en la corriente de salida de la centrifugadora:

$$\dot{m}_{E,T.M} = 5.292.483,88 \text{ g/lote}$$

-Flujo de agua para tratar dicha cantidad:

Ec. 25

$$\dot{m}_{A,T.M} = \frac{1}{3} * 5.292.483,88 \left( \frac{\text{g}}{\text{lote}} \right) = 1.764.161,29 \left( \frac{\text{g}}{\text{lote}} \right)$$

Tabla 10. Valores obtenidos en el B.M del tanque de mezclado

Sustancia	PM (g/mol)	Cantidad(g/lote)	Moles/lote
ENTRADAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> **	296,478	5.292.483,88	17.851,18
H <sub>2</sub> O	18	1.764.161,29	98.008,96
SALIDAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	-	7.056.645,17	-

❖ Balance de materia en la centrifugadora del lavado del biodiesel:

Sabiendo que el porcentaje de impurezas que se habrán extraído del biodiesel al realizar este lavado será del 1% obtenemos:

Tabla 11. Valores obtenidos al realizar el B.M centrifugadora de lavado

Sustancia	PM (g/mol)	Cantidad(g/lote)	Moles/lote
ENTRADAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	-	7.056.645,17	-

+			
H <sub>2</sub> O			
SALIDAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> *	296,478	5.239.559,041	17.672,67
H <sub>2</sub> O	18	1.817.086,12	100.949,22

\* C<sub>19</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub> con un pequeño porcentaje de agua.

❖ Balance de materia en el secado del biodiesel:

Se elimina un 2% del porcentaje de agua para que cumpla los parámetros de las normas establecidas:

Tabla 12. Balance de materia en el secador.

Sustancia	PM (g/mol)	Cantidad(g/lote)	Moles/lote
ENTRADAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> *	296,478	5.239.559,041	17.672,67
SALIDAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> *	296,478	5.134.767,86	17.319,22
H <sub>2</sub> O	18	104.791.1	5.821,73

\* C<sub>19</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub> con un pequeño porcentaje de agua

Diseño conceptual de un proceso para la obtención de biodiesel a partir de aceite usado de fritura

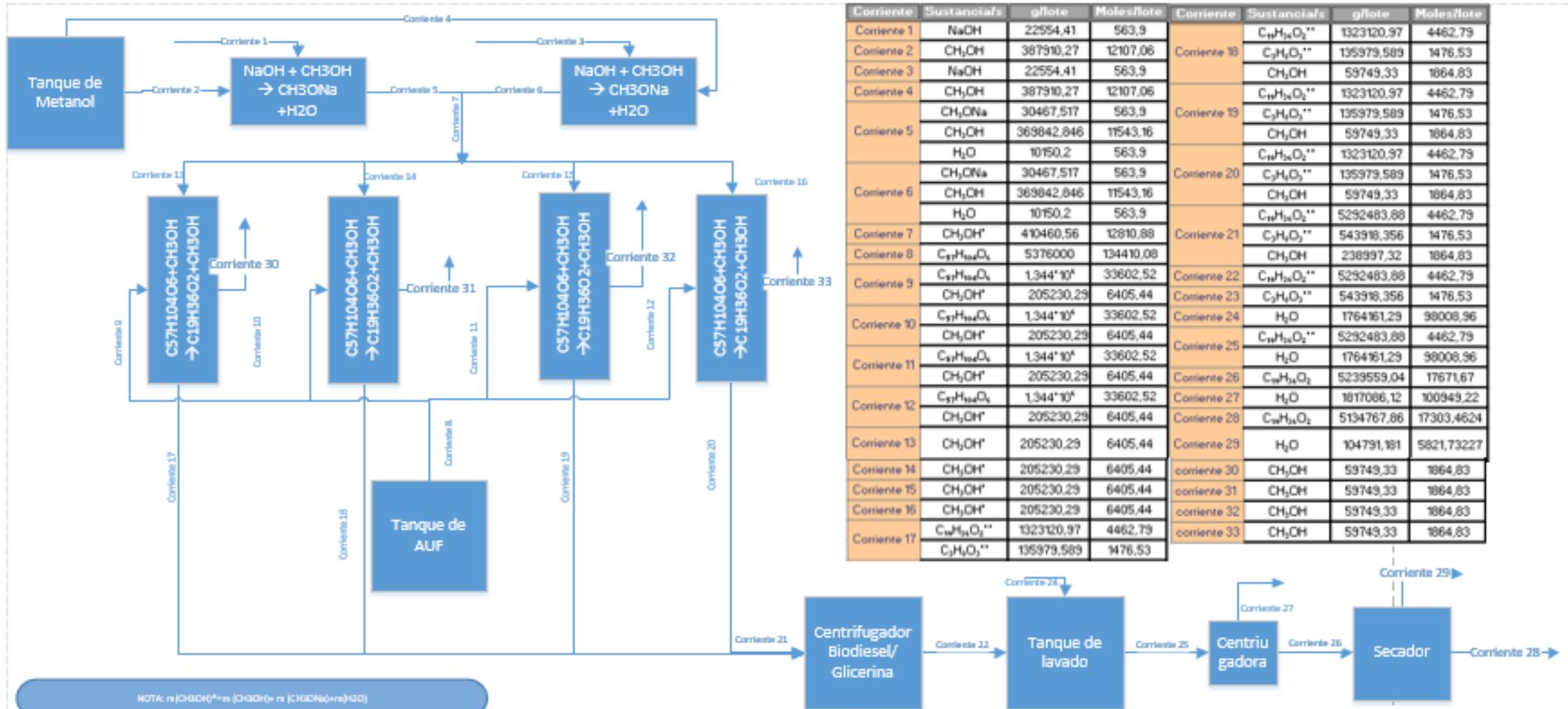


Ilustración 28. Diagrama de balances de masa por operación del proceso de producción de biodiesel

### III.1.5. Balances de energía

El principio que rige a los balances de energía (B.E) es la ley de conservación de la energía, la cual dictamina que la energía ni se destruye ni puede crearse (1ª ley de la termodinámica). Nuestro balance de energía va a ser cerrado, es decir, la masa no va a atravesar los límites del sistema durante el tiempo definido para el balance de energía. También es importante recalcar que en el proceso de biodiesel planteado es isobárico ( $\Delta P=0$ ), se trabaja a presión constante (1 atm).

Se realizarán los balances de energía en el mezclador de la solución metanol y NaOH, ya que si se trabaja a 40°C facilita el procesado y del reactor, donde se produce la reacción de transesterificación, ya que esta requiere una temperatura de 60°C para confirmar su viabilidad. Como valor de la temperatura de referencia, se ha tomado la media de la temperatura que se caracteriza por tener el lugar donde se sitúa RAFRINOR S.L., 18°C, lo que es equivalente a 291,15 K.

Los balances planteados se han realizado en régimen estacionario.

Se procede a plantear el análisis del balance de materia para cada etapa del proceso que requiera un incremento de energía:

❖ Balance de energía del mezclador NaOH/CH<sub>3</sub>OH:

Se aplica la 1ª Ley termodinámica para sistemas abiertos:

Ec. 26

$$\sum_e \left[ \dot{m}_{e1} \cdot \left( h_{e1} + \frac{1}{2} \cdot v_{e1}^2 + g \cdot z_{e1} \right) \right] - \sum_s \left[ \dot{m}_{s1} \cdot \left( h_{s1} + \frac{1}{2} \cdot v_{s1}^2 + g \cdot z_{s1} \right) \right] + \sum q_{s.c} + \sum W$$
$$= \frac{dU_{v.c}}{dt} + \frac{dEp_{v.c}}{dt} + \frac{dEc_{v.c}}{dt}$$

A continuación, mediante las especificaciones del proceso, se irá simplificando el modelo matemático:

- I. Como bien se ha mencionado anteriormente, se considera que se trabaja en régimen estacionario; el cambio en la energía potencial y cinética no es significativo. Además, se caracteriza por ser un

sistema cerrado, con lo cual, se puede despreciar el calor perdido por convección hacia los alrededores. Con todo ello, se considera que:

$$\frac{dU_{v.c}}{dt} = \frac{dEp_{v.c}}{dt} = \frac{dEc_{v.c}}{dt} = 0$$

Con lo que:

Ec. 27

$$\sum_e \left[ \dot{m}_{e1} \cdot \left( h_{e1} + \frac{1}{2} \cdot v_{e1}^2 + g \cdot z_{e1} \right) \right] - \sum_s \left[ \dot{m}_{s1} \cdot \left( h_{s1} + \frac{1}{2} \cdot v_{s1}^2 + g \cdot z_{s1} \right) \right] + \sum q_{s.c} + \sum W = 0$$

Por consiguiente, los parámetros que determinan la variación de energía potencial y cinética, también se pueden despreciar:

Ec. 28

$$\sum_e [\dot{m}_{e1} \cdot (h_{e1})] - \sum_s [\dot{m}_{s1} \cdot (h_{s1})] + \sum q_{s.c} + \sum W = 0$$

Se sabe que:

Ec. 29

$$W = \int P_{ext} \cdot dV$$

Dado que el volumen permanece constante:

$$dV = 0 \rightarrow W=0$$

Con lo que:

Ec. 30

$$\sum_e [\dot{m}_{e1} \cdot (h_{e1})] - \sum_s [\dot{m}_{s1} \cdot (h_{s1})] + \sum q_{s.c} = 0$$

Finalmente, se obtiene la siguiente ecuación:

Ec. 31

$$\sum m_s h_s - \sum m_e h_e = Q$$

Donde se conoce que:

- ✓  $\dot{m}_e = Q_f \cdot \rho$
- ✓  $h_e = h^\circ + \int_{T^\circ}^{T_{fe}} \bar{C}_{pf} dT = h^\circ + \bar{C}_{pf} \cdot (T_f - T^\circ)$
- ✓  $\dot{m}_s = Q_f \cdot \rho$
- ✓  $h_s = h^\circ + \int_{T^\circ}^{T_f} \bar{C}_{pf} dT = h^\circ + \bar{C}_{pf} \cdot (T - T^\circ)$
- ✓ Q=el calor de la mezcla (energía intercambiada cuando se disuelve un sólido o un gas en un líquido, dos líquidos o dos gases distintos).

Se recopilan los datos necesarios:

Tabla 13. Capacidades caloríficas, flujos máxicos y temperaturas del primer mezclador

Sustancia	Cp (kJ/(kg*K))	Cantidad(kg/lote)	Temperatura(K)
ENTRADAS			
NaOH	3,33	22,55	291,15
CH <sub>3</sub> OH	2,549	38,79	291,15
SALIDAS			
CH <sub>3</sub> ONa	2,261	30,47	313,15
H <sub>2</sub> O	4,18	10,15	313,15

CH <sub>3</sub> OH	2,549	369,842	313,15
--------------------	-------	---------	--------

Ec. 32

$$Q_{\text{Mezclador}} = \left( (30,47 \left( \frac{\text{kg}}{\text{lote}} \right) * 2,261 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) * (313,15(\text{K}) - 291,15(\text{K})) + (10,15 \left( \frac{\text{kg}}{\text{lote}} \right) * 4,18 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) * (313,15(\text{K}) - 291,15(\text{K})) + (369,842 \left( \frac{\text{kg}}{\text{lote}} \right) * 2,549 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) * (313,15(\text{K}) - 291,15(\text{K})) \right) - \left( (22,55 \left( \frac{\text{kg}}{\text{lote}} \right) * 3,33 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) * (313,15(\text{K}) - 291,15(\text{K})) + (38,79 \left( \frac{\text{kg}}{\text{lote}} \right) * 2,549 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) * (313,15(\text{K}) - 291,15(\text{K})) \right) = 19.361,74 \text{ kJ/lote}$$

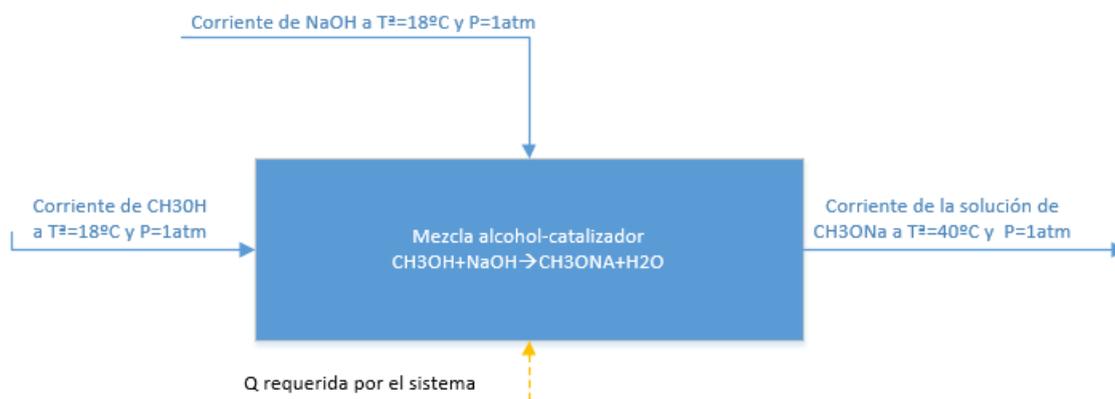


Ilustración 29. Balance de energía en el mezclador.

❖ Balance de energía para el reactor:

Tabla 14. Capacidades caloríficas, flujos másicos y temperaturas del reactor de transesterificación

Sustancia	C <sub>p</sub> (kJ/(kg·k))	Cantidad(kg/lote)	Temperatura(K)
ENTRADAS			
C <sub>57</sub> H <sub>104</sub> O <sub>6</sub>	2,057	1344	291,15
CH <sub>3</sub> OH*	2,549	205,23	313,15
SALIDAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> **	2,23	1323,12	333,15

$C_3H_8O_3^{**}$	1,25	135,98	333,15
------------------	------	--------	--------

Se parte des del mismo balance de energía (se obvia el calor latente, ya que no se produce ningún cambio de fase.

Ec. 33

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{reactor}} &= \left( 1.323,12 \left( \frac{\text{kg}}{\text{lote}} \right) * 2,23 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right) * (333,15(\text{K}) - 291,15(\text{K})) \right) \\
 &+ \left( 135,98(\text{kg}/\text{lote}) * 1,25 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right) * (333,15(\text{K}) - 291,15(\text{K})) \right) \\
 &- \left( 1.344 \left( \frac{\text{kg}}{\text{lote}} \right) * 2,057 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right) * (333,15(\text{K}) - 291,15(\text{K})) \right) \\
 &+ \left( 205,23 \left( \frac{\text{kg}}{\text{lote}} \right) * 2,549 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right) * (333,15(\text{K}) - 313,15(\text{K})) \right) \\
 &= 5.350,14 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

El calor que suministra al proceso es de 5.350,14 kJ, condición fundamental para llevar a cabo la reacción completa de transesterificación, ya que la temperatura constante permite una velocidad de reacción y unas condiciones adecuadas para el progreso de esta reacción, permitiendo así, obtener un mayor rendimiento de producto.

A continuación, se establecerá la masa de agua que se necesita para producir el intercambio de calor:

Ec. 34

$$Q_{\text{total}} = m_{\text{H}_2\text{O}} * C_{p\text{H}_2\text{O}} * \Delta T + m_{\text{H}_2\text{O}} * \lambda_{\text{H}_2\text{O}}$$

Dado que no se produce un cambio de fase, el último término es despreciable.

Ec. 35

$$5350,14 \text{ (kJ)} = m_{\text{H}_2\text{O}} * 4,18 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right) * (333,15 \text{ (K)} - 291,15 \text{ (K)}) + 0$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 30,47 \text{ kg de agua}$$

En conclusión, se necesitarán 30,47kg de agua, la cual se empleará como elemento de transferencia de calor por convección en el calentamiento de los reactivos y así conseguir la temperatura ideal para que transcurra la reacción de transesterificación.

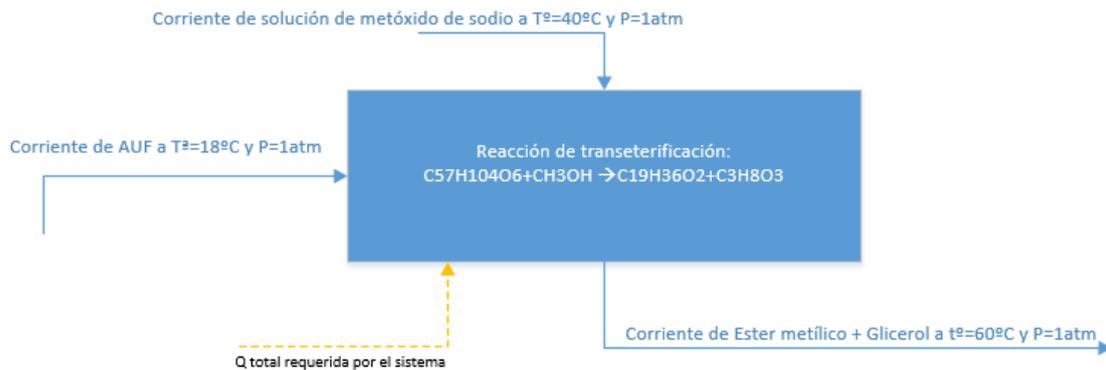


Ilustración 30. Balance de energía en el reactor.

❖ Balance de energía el secador:

Se elevará la temperatura hasta 110 °C, con el fin de evaporar el agua de limpieza y las impurezas que se hayan diluido.

Tabla 15. Capacidades caloríficas, flujos máxicos y temperaturas del secador

Sustancia	Cp (kJ/(kg*K))	Cantidad(kg/lote)	Temperatura(K)
ENTRADAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> *	2,23	5239,56	333,15
SALIDAS			
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	2,23	5134,776	383,15
H <sub>2</sub> O (g)	4,18	104,79	383,15

El balance de materia es el siguiente:

$$\sum m_s h_s - \sum m_e h_e = Q$$

Donde se conoce que:

- ✓  $\dot{m}_e = Q_f \cdot \rho$
- ✓  $h_e = h^\circ + \int_{T^\circ}^{T_{fe}} \bar{C}_{pf} dT = h^\circ + \bar{C}_{pf} \cdot (T_f - T^\circ)$
- ✓  $\dot{m}_s = Q_f \cdot \rho$
- ✓  $h_s = h^\circ + \int_{T^\circ}^{T_f} \bar{C}_{pf} dT = h^\circ + \bar{C}_{pf} \cdot (T - T^\circ)$
- ✓  $Q$ =el calor de la mezcla (energía intercambiada cuando se disuelve un sólido o un gas en un líquido, dos líquidos o dos gases distintos).

\*NOTA: En la corriente de salida del agua hay que tener en cuenta el calor latente y el calor sensible, ya que este compuesto sufre un cambio de estado. ( $\lambda_{H_2O,vap}=2257$  kJ/kg). Es decir, la entalpía para el agua se definirá de la siguiente forma:

Ec. 36

$$h_{s,H_2O} = \bar{C}_{H_2O} \cdot (T_{ebullición} - T_e) + \bar{C}_{H_2O} \cdot \lambda_{H_2O, vap} + \bar{C}_{H_2O} \cdot (T_s - T_{ebullición})$$

Resolviendo:

Ec. 37

$$\left( 104,79(\text{kg/lote}) \cdot \left( 4,18 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \cdot (373,15(\text{K}) - 333,15(\text{K})) + 4,18 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \cdot 2257 + 4,18 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \cdot (383,15(\text{K}) - 373,15(\text{K})) \right) + 5134,776 \cdot 2,23 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \cdot (383,15(\text{K}) - 333,15(\text{K})) \right) - (5239,56 \cdot 2,23 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \cdot (383,15(\text{K}) - 333,15(\text{K}))) = Q$$

$$Q = 998.833,79 \text{ kJ}$$

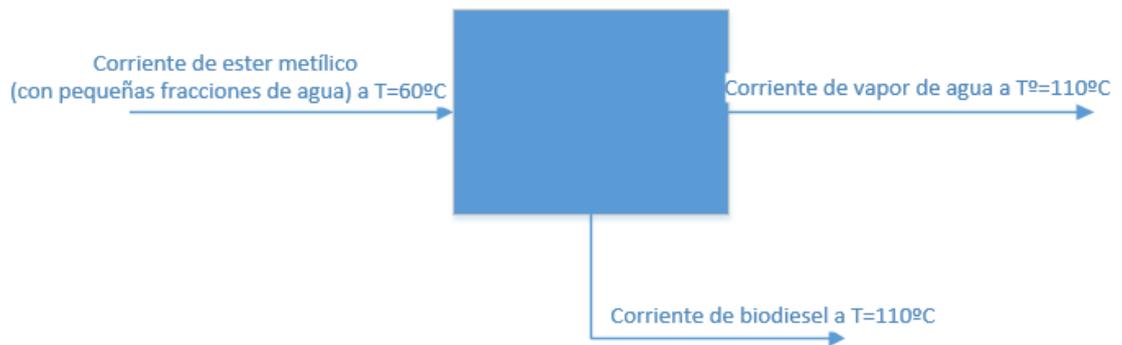


Ilustración 31. Balance de energía en el secador

### III.1.6. Dimensionado del equipo

Se ha procedido únicamente a realizar el diseño de aquella maquinaria que requiere un dimensionado específico en el proceso.

#### Tanque de almacenamiento de Metanol:

Para el diseño de los tanques se ha tenido en cuenta las consideraciones que dictamina ASME (American Society Of Mechanical Engineers). De las cuales podemos destacar:

➤ **Sobredimensionamiento:**

Para aumentar la seguridad en el procesado y cumplir con las medidas de seguridad establecidas, la temperatura, el volumen y la presión se ha multiplicado por un factor de 1,2. Esto quiere decir, que se ha realizado un sobredimensionamiento de un 20% más de la capacidad a procesar.

➤ **Elección y características de los materiales:**

En el tanque de almacenamiento de metanol debemos de seleccionar un material resistente a la corrosión, como bien puede ser el acero inoxidable AISI 316.

Para realizar los cálculos consideraremos:

- Margen de corrosión (C1) 1 mm.
- Margen de fabricación (C2) 1 mm.

- Tensión máxima asimilable (S) 939,05 atm.
- Factor de soldadura (E) 0,85.

Parámetros de diseño:

➤ Volumen:

Inicialmente se requiere 978,84 Litros de metanol por cada lote que se realice. Al día, como bien se ha mencionado anteriormente, se realizan 12 lotes, por lo que la cantidad diaria equivaldrá a:

Ec. 38

$$V_{fluido,T} = 978,84 * 12 = 11.746,08 \text{ L/día}$$

Ec. 39

$$V_{fluido,T} = 11,746 \text{ m}^3/\text{día}$$

El volumen del fluido, debe de ocupar un 80% del volumen del tanque, con lo que el volumen del tanque contará con un volumen total de:

Ec. 40

$$V_{T,M} = 1,2 * V_{fluido,T} = 1,2 * 11,746 = 14,0952 \text{ m}^3/\text{día}$$

Se realizarán los cálculos para un volumen de 14,00 m<sup>3</sup>/día

A continuación, procederemos al diseño. El volumen necesario para realizar el proceso se repartirá entre un fondo superior semiesférico y una carcasa cilíndrica con el fondo plano inferior, obteniendo:

Ec. 41

$$V_{T,M} = V_{cilindro} + V_{semiesférica} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h_{cilindro} + \frac{2 * \pi * r^3}{3}$$

Suponiendo un diámetro de 1,5 m.

➤ Presión del diseño:

Para proceder a calcular la presión del diseño (PD), se ha de conocer:

- Presión de operación ( $P_{op}$ ): 1 atm.
- Presión hidrostática ( $P_{Hidro}$ ): hace referencia a la presión provocada por la columna del fluido. La posición del tanque es vertical:

Ec. 42

$$P_{Hidro} = \rho * g * h_{fluido}$$

- $\rho_{Fluido}$ , en este caso se trata de la densidad del metanol en las condiciones de operación (792 kg/m<sup>3</sup>)
- $g$ , hace referencia a la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $h_{Fluido}$ , altura de la columna del fluido. Suponiendo un diámetro de 1,5 m, al igual que se ha realizado en los cálculos anteriores.

Ec. 43

$$V_{fluido,T} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h_{fluido} \rightarrow h_{fluido} = 7,92 \text{ m}$$

Obtenemos la presión hidrostática:

Ec. 44

$$P_{Hidro} = 792 * 9,81 * 7,92 = 61.534,6 \text{ Pa} = 0,60 \text{ atm}$$

Finalmente obtenemos la presión del diseño:

Ec. 45

$$P_{D,1} = (P_{op} + P_{Hidro}) = (1 + 0,6) = 1,6 \text{ atm}$$

Aplicando el factor de seguridad (20%):

Ec. 46

$$P_D = (P_{op} + P_{Hidro}) * 1,2 = 1,6 * 1,2 = 1,92 \text{ atm}$$

➤ Temperatura:

Un factor importante a considerar es el punto de inflamación del metanol (12°C). Se deberá de proteger el tanque de cualquier posible contacto con una llama o chispa, evitando así el riesgo de una posible inflamación. Además de cumplir con la normativa que dictamina la ITC (instrucción técnica complementaria).

- Espesor de la pared del cilindro ( $t_{\text{cilindro}}$ ):  
Para el cálculo del espesor de la pared se empleará la siguiente fórmula:

Ec. 47

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{P_D * R}{S * E - 0,6 * P_D} + C_1 + C_2$$

Dónde, deberemos de realizar las siguientes conversiones de unidades:

- $P_D = 1,92 \text{ atm} \rightarrow P_D = 28,21 \text{ psi}$
- $R = 0,75 \text{ m} \rightarrow R = 29,53 \text{ in}$
- $C_1 = 1 \text{ mm} \rightarrow C_1 = 0,039 \text{ in}$
- $C_2 = 1 \text{ mm} \rightarrow C_2 = 0,039 \text{ in}$
- $S = 939,05 \text{ atm} \rightarrow S = 13800,23 \text{ psi}$

Sustituimos:

Ec. 48

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{28,21 * 29,53}{939,05 * 0,85 - 0,6 * 28,21} + 0,039 + 0,039 = 1,14 \text{ in}$$

- Espesor de la pared del cilindro ( $t_{\text{esfera}}$ ):

Ec. 49

$$t_{\text{esfera}} = \frac{P_D * R}{2 * S * E - 0,2 * P_D} + C_1 + C_2$$

Sustituimos:

Ec. 50

$$t_{\text{esfera}} = \frac{28,21 * 29,53}{2 * 13800,23 * 0,85 - 0,2 * 28,21} + 0,039 + 0,039 = 0,11 \text{ in}$$

### Tanque de almacenamiento de AUF

Para el diseño del tanque de almacenamiento de AUF también se tendrá en cuenta los mismos parámetros expuestos en el diseño de tanque de almacenamiento del metanol.

➤ Volumen:

Ec. 51

$$m_{AUF} = 1,334 * 10^6 \left(\frac{g}{lote}\right) * 12 \left(\frac{lote}{día}\right) = 1600800 \text{ g/día}$$

Ec. 52

$$V_{AUF} = \frac{1600800 \left(\frac{g}{día}\right)}{0,909 \left(\frac{g}{cm^3}\right)} = 17610561,06 \text{ cm}^3 = 17,61 \text{ m}^3/día$$

El volumen del fluido, debe de ocupar un 80% del volumen del tanque, con lo que el volumen del tanque contará con un volumen total de:

Ec. 53

$$V_{T,M} = 1,2 * V_{AUF} = 1,2 * 17,61 = 21,132 \text{ m}^3/día$$

Se realizarán los cálculos para un volumen de 22,00 m<sup>3</sup>/día.

A continuación, procederemos al diseño. El volumen necesario para realizar el proceso se repartirá entre un fondo superior semiesférico y una carcasa cilíndrica con el fondo plano inferior, como en el dimensionado anterior, además también se supondrá un diámetro de 1,5 m.

➤ Presión del diseño:

- Presión de operación ( $P_{op}$ ): 1 atm.
- Presión hidrostática ( $P_{Hidro}$ ): hace referencia a la presión provocada por la columna del fluido. La posición del tanque es vertical:

Ec. 54

$$P_{Hidro} = \rho * g * h_{fluido}$$

- $\rho_{Fluido}$ , en este caso se trata de la densidad del metanol en las condiciones de operación (909 kg/m<sup>3</sup>)
- $g$ , hace referencia a la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $h_{Fluido}$ , altura de la columna del fluido. Suponiendo un diámetro de 1,5 m, al igual que se ha realizado en los cálculos anteriores.

Ec. 55

$$V_{AUF} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h_{fluido} \rightarrow h_{fluido} = 9,97 \text{ m}$$

Obtenemos la presión hidrostática:

Ec. 56

$$P_{Hidro} = 909 * 9,81 * 9,97 = 88.862,77 \text{ Pa} = 0,88 \text{ atm}$$

Finalmente obtenemos la presión del diseño:

Ec. 57

$$P_{D,1} = (P_{op} + P_{Hidro}) = (1 + 0,88) = 1,88 \text{ atm}$$

Aplicando el factor de seguridad (20%):

Ec. 58

$$P_D = (P_{op} + P_{Hidro}) * 1,2 = 1,88 * 1,2 = 2,256 \text{ atm}$$

#### Mezclador de metanol + catalizador

El mezclador es alimentador por dos corrientes. La primera corriente procede del tanque de metanol con un flujo de 489,91 L/lote. La segunda corriente hace referencia a del catalizador, que como bien se ha mencionado anteriormente, se suministra de forma manual al mezclador. Se caracteriza por tener un caudal de 22554,41 g de NaOH/lote.

Se elige un tiempo de residencia ( $\tau$ ) de 30 min, tiempo medio (obtenido a través de lectura) para que se produzca un contacto favorable.

Parámetros de diseño:

- Volumen:

Ec. 59

$$V_{M,fluido} = Q_{V,CH_3OH} + Q_{V,NaOH}$$

Cambiamos las unidades del caudal de NaOH:

Ec. 60

$$Q_{V,NaOH} = \frac{Q_{M,NaOH}}{\rho_{NaOH}} = \frac{22554,41 \left(\frac{g}{lote}\right)}{2,13 \left(\frac{g}{cm^3}\right)} = 10588,92 \frac{cm^3}{lote}$$

Ec. 61

$$Q_{V,NaOH} = 10588,92 \frac{cm^3}{lote} * \frac{0,001 L}{1 cm^3} = 10,59 L/lote$$

Con lo que:

Ec. 62

$$V_{M,fluido} = 489,91 + 10,59 = 500,50 L$$

Aplicando el sobredimensionamiento del 20%:

Ec. 63

$$V_{M,tanque} = 500,50 * 1,2 = 600,60 L$$

➤ Diámetro y altura:

Tomando como referencia:

Ec. 64

$$1,5 * D = H$$

Sabiendo que:

Ec. 65

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * H$$

Sustituimos:

Ec. 66

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * 1,5 * D$$

Obtenemos:

$$D = 7,99 \text{ m}$$

$$H = 11,98 \text{ m}$$

Al tanque diseñado se lo incorporará un agitador industrial estándar serie V. (agitador diseñado por Novatec fluid System S.A.) con el fin de homogenizar y disolver los compuestos que intervienen en el proceso. Además debe de presentar una alta eficiencia y ser resistente a la corrosión. Se adapta a las características del proceso a llevar a cabo. Características:

- Densidad máxima: 1200 Kg/m<sup>3</sup>.
- Viscosidad máxima: 1000 Cps.
- Temperatura máxima: 40 °C.
- Material estándar: 304SS (Acero inoxidable).
- Motoreductor estándar: 220/440 V. 60Hz. 3PH.
- Apto para depósitos de más de 10.000 L y de 12 metros de altura.

#### Reactor de transesterificación

Debido a la falta de información cinética, y que únicamente se conoce la presión (1 atm) y temperatura (60 °C) del proceso, se diseñará el volumen del reactor aplicando el tiempo de residencia:

Ec. 67

$$V = Q * \tau$$

Siendo:

- $Q$  (Aceite + metanol\*)=1575,39 L/(R\*I)
- $\tau$ =90 min/l

Nota: Metanol\*=Metanol + NaOH

Obtenemos:

Ec. 68

$$V = Q * \tau = 1575,39 \left( \frac{L}{R * l} \right) * \frac{12 l}{día} * \frac{1 día}{24 h} * \frac{1 h}{60 min} * 90 (min) = 1181,54 L$$

### Centrifugadora

La separación del biodiesel y glicerina generada a través de la reacción, se llevará a cabo mediante una bomba centrífuga. Operación que se caracteriza por ser más rápida que la decantación, obteniendo así una mayor eficiencia (productividad). Se ha seleccionado la separadora RSE/RSI ya que esta especializada en los procesos de transesterificación [18].

Esta centrifugadora también será utilizada para el lavado posterior.

### Bombas

Definimos la bomba como una máquina hidráulica capaz de transformar la energía mecánica (accionada) en energía hidráulica de un fluido incompresible. El término de fluido incompresible se refiere a un líquido o incluso a una mezcla de ellos y sólidos. Cuando incrementamos la energía del fluido, también se produce un aumento en su presión, altura y velocidad, efecto relacionado con el principio de Bernoulli.

Se utilizarán bombas de acero inoxidable, que permitan emplear fluidos tanto de baja como de alta viscosidad. Se buscará además una alta eficiencia y un fácil mantenimiento.

Existe una gran variedad de bombas, de las cuales podemos encontrar:

- Bombas rotodinámicas:  
Su funcionamiento se basa en el intercambio de cantidad de movimiento que se establece entre la máquina y el fluido. Son:
  1. Bombas de flujo mixto.
  2. Bombas centrífugas.
  3. Bombas axiales.
  
- Bombas de desplazamiento positivo:  
Su funcionamiento se basa en la hidrostática. Consiste en el movimiento del fluido causado por una disminución en el volumen.  
Estas bombas están formadas por una cámara que cuando se produce la succión, aumenta su volumen, y cuando se produce la impulsión, disminuye. Son:
  1. Bombas reciprocantes.

## 2. Bombas rotativas o rotoestáticas.

En la planta diseñada, se hará uso de bombas rotativas o rotoestáticas, en concreto la R.Z 2.5 de vacuubrand.

El funcionamiento de esta bomba se basa en recluir el fluido en uno o varios compartimentos. De estos compartimentos se desplazará a la entrada de la bomba, que se caracteriza por tener una presión más baja que a la salida, para posteriormente ser impulsada hacia la salida.

### **III.1.7. Descripción general de instalación.**

Como es común encontrar en las industrias de producción del biodiesel, la producción se realizará a través de cargas o lotes, ya que se utilizan materias heterogéneas, de esta forma facilitamos el mantenimiento, procesado y control de la planta. Aunque en la sección de posterior al reactor donde se realiza la transesterificación se podría considerar un proceso continuo.

En primer lugar, se introduce el catalizador básico, NaOH con 98% de pureza (corriente 1) de forma manual al mezclador de tipo agitador MB-CLQX. En este mezclador también se introduce el alcohol seleccionado para llevar a cabo la transesterificación, Metanol con 99,9% de pureza (corriente 2), pero al contrario que el catalizador, la alimentación de este se realizará de forma automática desde un tanque de almacenamiento. En el mezclador se producirá la solución de metóxido, teniendo en cuenta que el NaOH suministrado reaccionará con el metanol, habiendo de este último en exceso. Se ha seleccionado este mezclador ya que se ajusta a las condiciones de agitación (para facilitar la disolución) y temperatura (se opera a 40°C). A su vez, se está realizando la misma operación en el segundo tanque de mezcla MB-CLQX instalado. En este mezclador se introducen la corriente 3 (NaOH) y corriente 4 (Metanol).

A continuación, se introducen las corrientes obtenidas de la salida de los mezcladores (corriente 5 y 6) que cada una contiene 369842,84 g de metanol/lote, 30467,52 g de metóxido/lote y 10150,2 g de agua/lote en el reactor, junto a la corriente 7 que se bifurca

en 4 corrientes (corrientes 8, 9, 10 y 11), cada una de estas corrientes corresponderán a las corrientes de entrada de los 4 reactores. Cada una de estas corrientes estarán compuestas por 1,344 toneladas de Trioleína y 0,205 toneladas de solución de metanol (metanol + agua + metóxido de sodio). La temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso de obtención del biodiesel es de 60°C, teniendo en cuenta que el punto de ebullición del metanol a la presión atmosférica es de 64°C. El tiempo de reacción determinado es 90 min. El reactor seleccionado es un reactor de tipo batch, el cual nos permitirá obtener grandes conversiones. Las corrientes de salida de los reactores estarán definidas por 1323120,97 g de éster metílico /lote, 135979,589 g de glicerol/lote y por último el metanol en exceso (59749,33 g/lote). En mismo reactor se efectuará el calentamiento necesario para que la reacción transcurra a la temperatura anteriormente mencionada, esta transferencia de calor se realizará a través de una camisa por la cual circulará agua.

Se procederá a separar el éster metílico y glicerol mediante el empleo de un centrifugadora que opera en continuado, a baja presión (1 atm). El glicerol se venderá a la industria alimentaria o farmacéutica, para economizar más el proceso, y se purificará el biodiesel separado. La purificación se realizará gracias al uso del agua. Por cada litro de éster metílico a limpiar, se añadirán 1/3 de agua. Con lo que si la corriente de entrada al mezclador contiene 5292483,88 g de éster metílico/lote, la corriente 20, definida por el agua, deberá de tener 1764161,29 g/lote.

En un separador CF105-J, separaremos el metil éster purificado del agua con las impurezas retiradas. Obteniendo finalmente 523955,091 g de biodiesel por cada lote procesado.

Diagrama de producción de flujo:

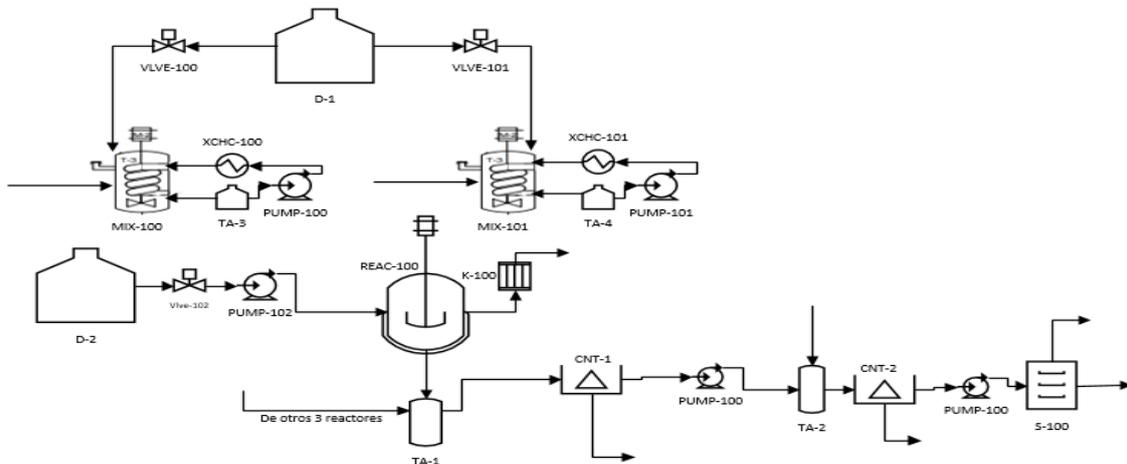


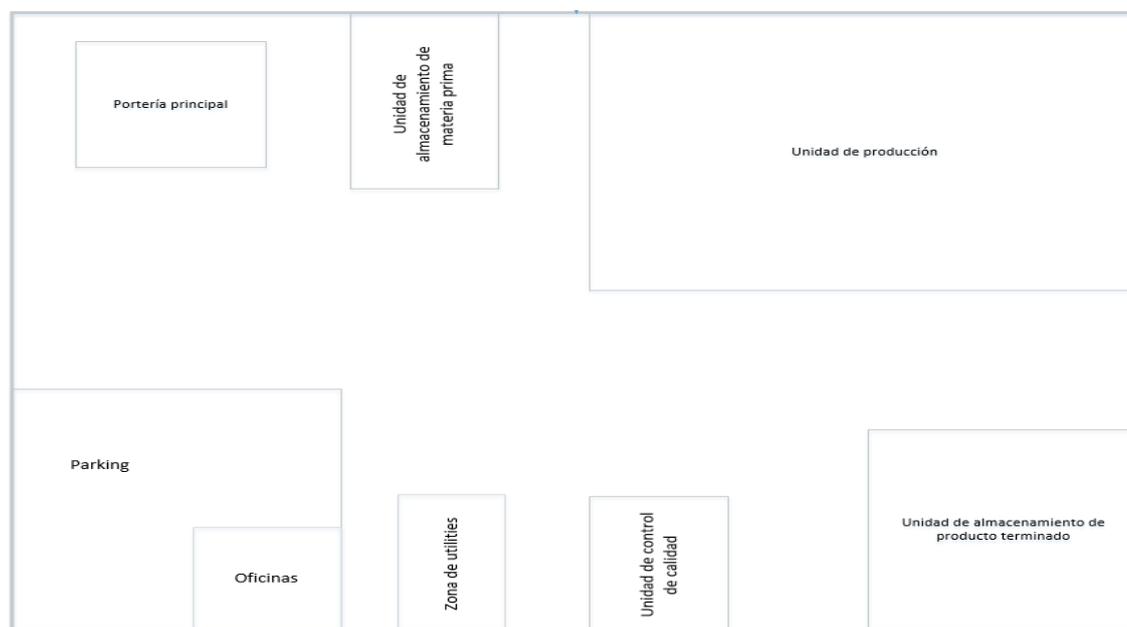
Ilustración 32. Diagrama de flujo del proceso

### III.1.8. Ubicación y estimación económica.

Para todo diseño se ha de determinar el “plot plant”. Esto nos permite ver con claridad la distribución fragmentada de cada parte de la planta, con el fin de optimizar su espacio lo máximo posible y realizar futuras ampliaciones.

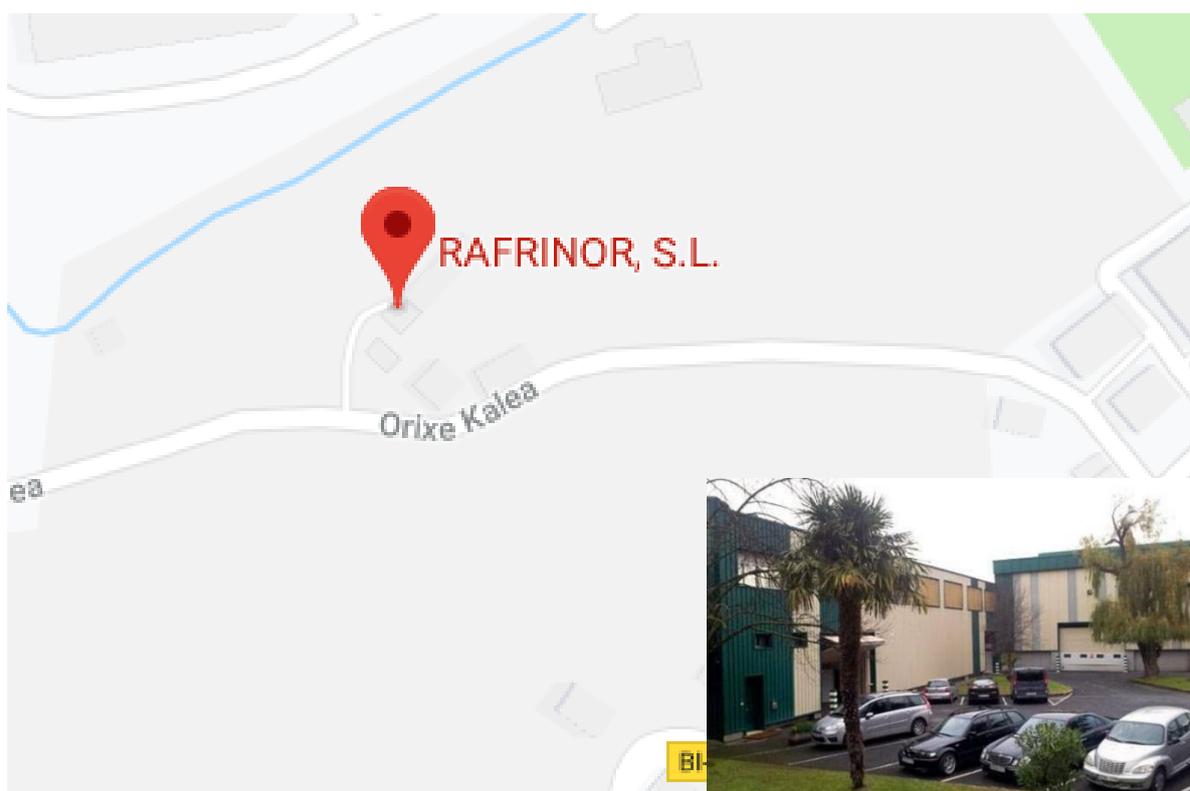
Para la distribución tenemos que tener en cuenta una serie de restricciones, de las cuales destacamos:

- El espacio entre la unidad de servicio y la de procesos debe de ser de 30,48 metros (mínimo).
- El espacio de las unidades de almacenamiento (metanol, y AUF) y la unidad de proceso debe de ser de 45,72 metros (mínimo).
- El espacio del reactor y la unidad de control debe de ser de 15,24 metros (mínimo).
- En concordancia al tamaño del equipo, el espacio que debe de haber entre uno y otro es de 1,5 metros (mínimo). Facilitando de esta forma el mantenimiento.
- Las áreas personales no deben ubicarse próximas al área de almacenamiento, carga o descarga y procesamiento de productos.



*Ilustración 33. Distribución de planta.*

La planta se ubicará en Ortuella, Vizcaya. Se ha decidido instalarlo en el mismo lugar donde se ubica esta empresa, ya que de esta forma, conseguimos que en la misma empresa donde recolectan el aceite usado industrialmente y doméstico, gracias a los puntos de recogida estratégicos que ha instalado a través de un acuerdo con el ayuntamiento, se procese. Provocando a la empresa un mayor beneficio.



*Ilustración 34. Localización de la planta*

La planta contará con un área de 1000 m<sup>2</sup>.

### **III.1.9. Estimación económica de la inversión.**

#### Análisis de rentabilidad

Se realizará un análisis de rentabilidad para determinar si el proyecto planteado es económicamente factible o no. Se realizará un flujo de caja (salidas y entradas netas económicas que define a la empresa o proyecto) para calcular los indicadores económicos.

- **Inversiones:**
  - ✓ **Inversiones fijas:**

Equipos:

En la siguiente tabla se describe el presupuesto establecido para la obtención de los equipos necesarios para el proceso de obtención del Biodiesel:

Tabla 16. Inversión de equipos.

<b><u>Inversión en equipos</u></b>			
<b>Equipos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
T-101 (Depósito Metanol)	1		- €
T-102 (Depósito AUF)	1		- €
T-103 (Depósito de agua)	1		- €
M-101 (Mezclador MeOH + NaOH)	2	8.921,81 €	17.843,62 €
P-101 (Bomba centrífuga)	6	5.905,58 €	35.433,47 €
R-101 (Reactores)	4	27.350,86 €	109.403,45 €
C-101 (Centrifugadora)	2	72.345,00 €	144.690,00 €
TK-101 (Tanque de lavado agua-biodiesel)	1	70.802,38 €	70.802,38 €
S-101 (Secador)	1	49.343,74 €	49.343,74 €
<b><u>Total=</u></b>			<b>427.516,66 €</b>

Terreno y obras a realizar:

En la siguiente tabla se presenta una estimación del coste del terreno y las obras a realizar, asumiendo que el metro cuadrado en Ortuella (viscaya) ronda el valor de 2136 euros y que el coste medio de construcción por metro cuadrado en España es de 1200 euros:

Tabla 17. Coste obras y terrenos.

<b><u>Obras y terrenos</u></b>		
<b>Unidad</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Coste (€)</b>
Zona de utilities	90	108.000,00 €
Unidad de producción	230	276.000,00 €
Unidad de almacenamiento de producto	100	120.000,00 €
Unidad de almacenamiento de materia prima	120	144.000,00 €
Unidad de control de calidad	30	36.000,00 €
Portería principal	20	24.000,00 €
Parking	90	108.000,00 €
Oficinas	40	48.000,00 €

En total, asumiríamos un coste de:

Coste Terreno	2136	1.537.920,00 €
Coste construcción	1200	864.000,00 €
Total=		2.401.920,00 €

#### Inversión en muebles y enseres

En base de la lectura realizada de otros proyectos, se ha tomado el valor de 50.000,00 € para destinarlos a la obtención de muebles y equipos de oficina, tales como teléfonos, ordenadores, impresoras, escritorios...

#### Inversiones diferidas

Este tipo de inversiones se realizan en bienes y servicios intangibles que son fundamentales en dicho proyecto u empresa, pero no intervienen de forma directa en la producción. La gran diferencia conforme a las inversiones fijas es que están sujetas a amortización y su recuperación se produce a largo plazo.

Tabla 18. Inversiones diferidas.

<u>Inversiones diferidas</u>	
Activos intangibles	Coste (€)
Gastos de instalación, organización y constitución jurídica de la empresa	95.000,00 €
Estudios previos requeridos (factibilidad del proyecto)	9.500,00 €
Pagos realizados por captación de personal	25.000.000,00 €
Software	10.000.000,00 €
Total	35.104.500,00 €

#### Costos de operación

- **Costos directos**
  - **Materia prima**

Tabla 19. Costos de materia prima.

<u>Costos de materia prima</u>			
Materia prima	Precio (€/t)	Cantidad (t)	Coste total (€)
Metanol	360	289,1942794	104.109,94 €
NaOH	400	165,0165017	66.006,60 €
AUF	550	20000	11.000.000,00 €
Total=			11.170.116,54 €

- **Mano de obra directa**  
Para realizar los cálculos se tendrá en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Días laborables: 312 días.
2. Horas diarias hábiles: 24 horas, divididas en tres turnos de 8 horas.
  - Turno de mañana: 6:00h - 14:00h.
  - Turno medio día: 14:00h - 22:00h.
  - Turno de noche: 22:00h - 6:00h.
3. Semanas hábiles por cada trabajador: 49 semanas hábiles (52 semanas/año - 3 semanas/año).
  - Turnos por persona anuales:

Ec. 69

$$T_{P.A} = 49 \left( \frac{\text{semana}}{\text{año}} \right) * 6 \left( \frac{\text{turnos}}{\text{semana}} \right) = 294 \frac{\text{turnos}}{\text{año}}$$

- Turnos de operación anuales:

Ec. 70

$$T_{O.A} = 330 \left( \frac{\text{semana}}{\text{año}} \right) * 3 \left( \frac{\text{turnos}}{\text{semana}} \right) = 990 \frac{\text{turnos}}{\text{año}}$$

- Personas necesarias para llevar a cabo todos los turnos:

Ec. 71

$$\frac{990 \frac{\text{turnos}}{\text{año}}}{294 \frac{\text{turnos}}{\text{año}}} = 3,37 \text{ Personas}$$

4. Requerimientos de personas por equipos:

Tabla 20. Requerimiento de personas por equipos.

Equipos	Cantidad	Personas por equipo por turno	Personas por turno
T-101 (Depósito Metanol)	1	0,1	0,1
T-102 (Depósito AUF)	1	0,1	0,1
T-103 (Depósito de agua)	1	0,1	0,1
M-101 (Mezclador MeOH + NaOH)	2	0	0
P-101 (Bomba centrífuga)	6	0	0
R-101 (Reactores)	4	0,5	2
C-101 (Centrifugadora)	2	0	0
TK-101 (Tanque de lavado agua-biodiesel)	1	0,1	0,1
S-101 (Secador)	1	0	0
Válvulas	7	0	0
Intercambiadores	5	0,1	0,5
		Total=	2,9

Personas necesarias para llevar a cabo el proceso:  $3,37 * 2,9 = 9,773$  personas  
 $\approx$  10 personas.

5. Salario base medio de un operario en España 1.434€/mes

Coste de mano de obra directa 172.080€/año

- Costos indirectos
  - Mano de obra indirecta
 Suponiendo que la mano de obra indirecta está compuesta por:
  - ✓ 2 ingenieros
  - ✓ 3 supervisores
  - ✓ 2 operarios de mantenimiento

Tabla 21. Costos mano de obra indirecta.

Puesto de trabajo	nº de empleados	Salario base (€)	Factor prestacional (%)	Coste total mensual (€)	Coste total anual (€)
Ingeniero	2	2.177,33 €	1,60%	4.424,34 €	53.092,10 €
Supervisores	3	1.787,50 €	1,60%	5.448,30 €	65.379,60 €
Operarios de mantenimiento	2	1.808,17 €	1,60%	3.674,19 €	44.090,34 €
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>5.773,00 €</b>	<b>4,80%</b>	<b>13.546,84 €</b>	<b>162.562,03 €</b>

### Gastos de administración y ventas

Tabla 22. Gastos de administración y ventas.

Puesto de trabajo	nº de empleados	Salario base (€)	Factor prestacional (%)	Coste total mensual (€)	Coste total anual (€)
Gerente administrativo y financiero	1	1.244,33 €	1,6%	1.264,24 €	15.170,91 €
Secretaria	1	1.462,92 €	1,6%	1.486,32 €	17.835,88 €
Jefe de ventas y compras	1	2.739,08 €	1,6%	2.782,91 €	33.394,90 €
Jefe de producción	1	2.190,33 €	1,6%	2.225,38 €	26.704,54 €
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>7.636,67 €</b>	<b>6%</b>	<b>7.758,85 €</b>	<b>93.106,24 €</b>

## Gastos generales

Tabla 23. Gastos generales.

Gastos varios	€
Coste mensual de transporte	500.000,00 €
Coste mensual de limpieza y jardinería	11.000,00 €
Coste mensual de seguridad y vigilancia	1.500,00 €
Coste mensual de mensajería	10.000,00 €
Total gastos varios mensuales	522.500,00 €
Total gastos varios anuales	6.270.000,00 €

## Capital de trabajo

Se calculará mediante el método del periodo de desfase. Este método permite calcular la cuantía de la inversión en capital de trabajo que ha de financiarse, desde el momento en el que se posee los insumos, hasta en el instante que se recupera el capital invertido en la venta del producto.

La fórmula que permite establecer el capital de trabajo es:

$$K_T = \frac{\text{Costo total de operación anual}}{\text{Días laborables al año}} * \text{Número de días del ciclo productivo}$$

Sabiendo que:

- ✓ Costo total de operación anual

Tabla 24. Costes generales de operación.

Costes de operación	€
Costos totales de materia prima	11.170.116,54 €
Costos de mano de obra directa	172.080,00 €
Costos de mano de obra indirecta	162.562,03 €
Total	11.504.758,57 €

- ✓ Días laborables al año: 310 días.
- ✓ Número de días del ciclo productivo: 30 días.

Sustituyendo:

$$K_T = \frac{11.504.758,57 \text{ €}}{310 \text{ días}} * 30 \text{ días} = 1.113.363,73 \text{ €}$$

### Ingresos

Los factores que se ha de tener en cuenta para la determinación de ingresos son:

- ✓ Cantidad de biodiesel producida: 20.000 toneladas =.
- ✓ Precio de biodiesel: 0,67€/l
- ✓ Cantidad de glicerol producida: 2.036 toneladas
- ✓ Precio glicerol: 20€

Obtendríamos un beneficio anual por la venta de biodiesel de 14.741.474,15€, y por la venta del glicerol 40.720,00€. Con lo que hace un beneficio total de 14.782.194,15€.

### Flujo de caja

Se realiza el flujo de caja de los próximos 10 años suponiendo que aumenta un 10% de la producción cada año. Se obtiene los siguientes egresos e ingresos:

Tabla 25. Flujo de egresos.

Flujo de egresos	
Año	Valor
1	17.695.784,81 €
2	18.812.796,47 €
3	19.929.808,12 €
4	21.046.819,78 €
5	22.163.831,43 €
6	23.280.843,08 €
7	24.397.854,74 €
8	25.514.866,39 €
9	26.631.878,05 €
10	27.748.889,70 €
Total=	227.223.372,57 €

Tabla 26. Flujo de ingresos.

Flujo de ingresos	
Año	Valor
1	24.136.413,64 €
2	26.550.055,01 €
3	29.205.060,51 €
4	32.125.566,56 €
5	35.338.123,21 €
6	38.871.935,53 €
7	42.759.129,09 €

8	47.035.042,00 €
9	51.738.546,20 €
10	56.912.400,81 €
Total=	384.672.272,55 €

### VAN y TIR

La tasa interna de retorno, o tasa interna de rentabilidad (TIR) de una inversión, viene definida como la tasa de interés por el cual el valor actual neto o valor presente, término que adquiere las siglas de VAN o VPN, es igual a cero. El valor actual neto son calculados a través del flujo de caja realizado previamente, recopilando todas aquellas cantidades futuras (tanto flujos positivos como negativos) al presente.

Con el uso de estos parámetros conseguimos observar la rentabilidad del proyecto. Cuanto más alto es valor del TIR, mayor rentabilidad. Este valor es el que dictaminará la factibilidad del proyecto, con lo que su aceptación o rechazo del mismo.

Conforme al valor actual de una inversión se podría decir que es la medida de rentabilidad neta absoluta que proporciona el proyecto, es decir, mide en el momento inicial del proyecto, el incremento de importe que proporciona a inversor en términos absolutos, sin tener en cuenta la inversión inicial que se ha efectuado para llevarse a cabo dicho proyecto.

Tabla 27. Flujo efectivo neto.

Flujo de efectivo neto (ingresos - egresos)	
Año	Valor
1	6.440.628,83 €
2	7.737.258,54 €
3	9.275.252,38 €
4	11.078.746,78 €
5	13.174.291,78 €
6	15.591.092,45 €
7	18.361.274,35 €
8	21.520.175,60 €
9	25.106.668,15 €
10	29.163.511,11 €
Total=	157.448.899,98 €

Tabla 28. Formulación de datos para el cálculo del VAN y TIR

Formulación de datos	
f1=	6.440.628,83 €
f2=	7.737.258,54 €
f3=	9.275.252,38 €
f4=	11.078.746,78 €
f5=	13.174.291,78 €
f6=	15.591.092,45 €
f7=	18.361.274,35 €
f=8	21.520.175,60 €
f9=	25.106.668,15 €
f10=	29.163.511,11 €
n=	10
i(tasa de interes)	0,1
lo=	37.933.936,66 €

Finalmente, se realiza el cálculo mediante el programa Excel, utilizando el comando “VNA” para obtener el VAN y “TIR” para obtener el TIR:

Tabla 29. VAN y TIR

VAN:	47.185.172,34 €
TIR:	27%

Se puede observar con claridad que la inversión inicial se recupera una vez transcurrido 10 años, y con creces. Esto es debido a que los ingresos anuales sobrepasa el valor de los costos y gastos de proceso.

También debemos de tener en cuenta que en los próximos años puede que aumente el precio de venta del biodiesel, esto supondrá un mayor beneficio a la empresa, además de una mayor rentabilidad, es decir, un aumento en el valor del TIR obtenido.

**IV. ESTUDIO DEL IMPACTO  
AMBIENTAL**

**ESTUDIO DEL  
IMPACTO AMBIENTAL**



## **IV.1. IMPACTO AMBIENTAL**

Químicamente, al hablar de aceites y grasas entendemos que son lípidos formados por glicéridos (ésteres glicéricos de los ácidos grasos). Los aceites hacen referencia a los lípidos de origen vegetal, y las grasas a los lípidos de origen animal.

El uso del aceite abarca un abanico de sectores (domésticos, hosteleros, industriales...). Una gran parte de estos aceites, y donde se ha enfocado el desarrollo de este trabajo es en su uso para la fritura. En este proceso de fritura el aceite sufre una serie de alteraciones que al cabo de cierto tiempo es necesario su desecho. Este aceite debería de ser recogido por empresas especializadas en su revalorización ya que, a pesar de haberle dado un primer uso, sigue teniendo cualidades idóneas para otra serie de procesos y generación de productos, como puede ser para generar biodiesel. Este proceso de revalorización permite obtener beneficio de un desecho, evita la contaminación que provoca el vertido de este desecho y además evita el uso descontrolado de combustibles fósiles, ya que se trata de una alternativa a estos.

Si se hace un mal uso del desecho obtenido, como verterlo por el fregadero, puede contaminar ríos, lagos... causando problemas y sobrecostes en las EDAR (estaciones depuradoras de aguas residuales). Se estima que un litro de aceite usado puede contaminar 40.000 litros de agua, la misma cantidad que consume un humano al año. El aceite contiene aproximadamente 5.000 veces más carga contaminante que el agua que circula por las redes de saneamiento y alcantarillas. Esto es debido a que cuando se produce su vertido y entra en contacto con el medio acuático se difunde por toda la superficie reduciendo la actividad fotosintética, la oxidación a través de la interfase aire-agua, además de aportar otros contaminantes con elevada DQO que afecta en gran medida al intercambio gaseosos y a la producción interna de oxígeno disuelto. También cabe destacar el impacto estético que se produce.

Gracias a los datos que nos ha proporcionado RAFRINOR, S.L. conocemos la cantidad que se utiliza, la que se recoge y la que se vierte (expuesto en el apartado III.1.1. Ciclo

del biodiesel). La cantidad que se estima de aceite vertido es el 69% del total que utilizamos, un número alarmante.

Para saber con exactitud cuánta agua contaminaría un litro de nuestro aceite a tratar, se debería de realizar una serie de cálculos teóricos para determinar cuál es el grado de disolución que sería necesario para cumplir con las limitaciones habituales de vertido en 3 parámetros físico-químicos, es decir, DQO, SST (Solidos suspendidos totales), aceite y grasas.

Los límites de vertido que establecen los organismos de la directiva 91/271/CEE para la DQO y los SST son de 125 mgO<sub>2</sub>/L y 35 mg/L respectivamente. En el caso de aceites y grasa 20 mg/L es el valor que Imagen en numerosas autorizaciones de vertido de las EDAR.

Exponiendo una vez más los datos proporcionados por RAFRINOR, S.L. estima que se requiere por las características físico-químicas (*tabla 2*) del aceite usado que ellos tratan un total de:

-27.200 litros de agua para alcanzar la DQO deseada.

-1.300 litro de agua para conseguir el valor de SST deseado.

-40.000 litro de agua para la concentración de aceites y grasas estipulada.

Propiedad	ACEITES			ESTERES			Diesel
	Soja	Girasol	Canola	De Soja	De Girasol	De Canola	
Viscosidad (mPa.s)	31.9	30.0	33.7	4.6	4.4	5.2	2.6
Densidad (kg/cm <sup>3</sup> )	910.78	910.78	910.78	922.77	874.83	862.85	850.86
Energía Térmica (kJ/kg)	39,623	39,575	39,709	39,800	39,800	40,449	45,343
Punto de Nube (°C)	-3.9	7.2	-3.9	2	0	10	-15
Punto de Ignición (°C)	254	274	250	171	164	180	52
Punto de Ebullición (°C, atm.)	380	380	400	350	-	340	350
Número Cetano	38	37	37	46.2	46.6	54	47

*Ilustración 35, Propiedades físico-químicas*

Con estos datos expuestos, llegamos a la conclusión que hemos expuesto anteriormente. 1 litro de aceite usado es capaz de contaminar 40.000 litros de agua.

La EDAR de Galindo (Sestao) trató en 2014 102.959.540 m<sup>3</sup>/año, lo que equivaldría a 282.080 m<sup>3</sup>/día. Considerando las características físico-químicas del aceite usado y aplicando los costes de explotación del tratamiento por metro cúbico del agua residual, esta EDAR, estima que cada litro de aceite vegetal usado que se vierte a la red de saneamiento adquiere un coste a la EDAR superior a la hora de realizar el tratamiento de 0,46 €/L equivalente a 460 €/m<sup>3</sup>. Según AEAS 2012 el precio medio en España es de 620 €/m<sup>3</sup>. El precio del tratamiento se eleva 700 veces más, coste que solo recae sobre la EDAR, y no en los ciudadanos que lo provocan. Se debería de pagar alrededor de 7,6 euros más año por familia para poder subsanar el incremento de coste en las EDAR.

También deberíamos de destacar las emisiones que produce el uso del biodiesel, producto generado a partir del aceite usado:

1. Monóxido de carbono (CO): En un motor Diésel se puede utilizar el combustible biodiesel haciendo pequeñas modificaciones para adaptarlo a este combustible, pero su uso emite un 50% menos de monóxido de carbono que el combustible Diésel convencional. Aunque es conocida la toxicidad del monóxido de carbono sobre todo en las ciudades.
2. Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>): El dióxido de azufre es nocivo tanto para el ser humano, como para nuestro medio. En el proceso de combustión de biodiesel no generamos emisiones de este compuesto ya que no está presente en el biocombustible.
3. Partículas en suspensión: Se reduce hasta un 65% con el uso del Biodiesel.
4. Productos orgánicos aromáticos: No contiene ni benceno, ni derivados, con lo que la emisividad de estos productos es nula.
5. Balance de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): el dióxido de carbono emitido durante la combustión del biodiesel es totalmente reabsorbido por los vegetales, contribuye a realizar la fotosíntesis. Es un combustible renovable.



## **V. CONCLUSIONES**

# **CONCLUSIONES**



El rendimiento del proceso es elevado, ya que se ha trabajado con una conversión muy alta, de 98%. Pero la producción total anual a tratar debería de ser más elevada, ya que la empresa para la que se ha diseñado este prototipo de planta dispone de una mayor cantidad de materia prima.

Procesando 20.000 toneladas al día se obtiene un beneficio, sin contar la inversión inicial, del proyecto de 6.293.669,90 €. Teniendo en cuenta la inversión inicial, se amortizaría el capital invertido transcurridos 5 años, generando un superávit de 709.836,31 € el sexto año. Por contraposición, si aumentamos un 10% de la producción cada año hasta alcanzar una producción 40.000 t/año, es decir, duplicar la producción, aunque sigue siendo una cifra insignificante en comparación a la cantidad de aceite que se recoge, se obtendría al quinto año un beneficio de 9.772.241,66 €, y al cabo 10 años 119.514.963,32 €.



## **VI. REFERENCIAS**

# **REFERENCIAS**

## VI. REFERENCIAS

- M. R. E. B. S., *Motor Diesel*, 2014.
- 1] M. d. A. y. D. Rural, «Estrategia de desarrollo de biocombustibles: implantaciones para el sector agropecuario.» Septiembre 2006. [En línea]. Available: <http://www.miagricultura.gov.co>.
- 2] C. f. |. E. n. renovable, «Solar-energia.net.» [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/energias-no-renovables/combustibles-fosiles>.
- 3] P. q. d. fosilización, «Servicios.educarm.es.» [En línea]. Available: <https://servicios.educarm.es/paleontologia/quimifosi.htm>.
- 4] E. P. -. E. Medioambiental, «Ambientum Portal del Medioambiente.» [En línea]. Available: [https://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/energia/el\\_petroleo.asp](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/el_petroleo.asp).
- 5] «Gov.mx.» [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157798/Que-es-el-carbon-mineral.pdf>.
- 6] Q. e. e. g. n. y. c. s. forma?, «Geologos.or.cr.» [En línea]. Available: <https://www.geologos.or.cr/la-mujer-virtuosa/>.
- 7] V. d. l. c. fósiles, «Los Combustibles Fósiles.» [En línea]. Available: <https://villalhafosil.wordpress.com/ventajas-de-los-combustibles-fosiles/>.
- 8] I. d. l. c. fósiles, «Los Combustibles Fósiles.» [En línea]. Available: <https://villalhafosil.wordpress.com/inconvenientes-de-los-combustibles-fosiles/>.
- 9]

- C. n. d. m. y. l. competencia, *Producción y balance del Biodiesel*, España:
- 10] CNMC, 2018.
- M. C. M. A.-F. a. M. F. A. J.M. Dias, «Production of biodiesel».
- 11]
- BOE, *BOE núm. 147*, 1994.
- 12]
- «Eur-lex.europa.eu,» 9 Septiembre 2015. [En línea]. Available: [https://eur-lex.europa.eu/legal-](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2015_239_R_0001&from=ES)
- 13] [content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL\\_2015\\_239\\_R\\_0001&from=ES](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2015_239_R_0001&from=ES).
- « Eur-lex.europa.eu,» 23 Abril 2009. [En línea]. Available: [https://eur-](https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF)
- 14] [lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF](https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF).
- J. A. G. U. Inigo Gozález Canal, «Aceites usado de cocina. Pronlemática ambiental, Incidencias en redes de saneamiento y coste del tratamiento en depuradoras.» Consorcio de Agua Bilbao Bizkaia, Bilbao, 2008.
- C. d. a. d. girasol, «Botanical-online,» [En línea]. Available:
- 16] <https://www.botanical-online.com/alimentos/aceite-girasol-composicion>.
- M. T. L. Kee Lam, de *Homogenous heterogenous and enzymatic catalysis for transterification of hogh free fatty acid oil to biodiesel*, Malaysia, School of chemical engineering univertisti sains malaysia, 2010, p. 506.
- E. S. Chavdar Chilev, «Simulation of biodiesel production by transterification of vegetable oils,» Univertisy of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, Bulgaria, 2014.
- GEA, «GEA,» [En línea]. Available:
- 19] <https://www.gea.com/es/products/separator-RSE-RSI-oil-refining.jsp>.

- F. Posso, «Estudio del desarrollo de las energías alternativas en  
20] Venezuela,» Universidad de los Andes, Departamento de Ciencias, Estado  
Táchira-Venezuela.
- J. A. G. U. Iñigo González Canal, «Aceites usados de cocina. Problemática  
21] ambiental, incidencias en redes de saneamiento y coste del tratamiento en  
depuradoras,» Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia, Bilbao, Bizkaia.
- V. y. d. d. petróleo, «Ejemplos.co,» [En línea]. Available:  
22] <https://www.ejemplos.co/ventajas-y-desventajas-del-petroleo/>.
- D. TAG, «Biomodel.uah.es,» [En línea]. Available:  
23] <http://biomodel.uah.es/model2/lip/tag-densidad.htm>.
- M. J. F. A. M.Sc Katty Cantero Vergara, «Repositorio.uac.edu.co,» 25junio  
24] 2010. [En línea]. Available:  
<http://repositorio.uac.edu.co/bitstream/handle/11619/1315/Simulación%20de%20un%20Proceso%20de%20Producción%20de%20Biodiesel%20por%20Lotes%200%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- E. R. A. M. B. M. C. A. Grey C. Castellar Ortega, « Scielo.org.co,» [En línea].  
25] Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n2/v12n2a10.pdf>.
- O. D. A. E. O. R. S. D. Duarte Vera, «Estudio de factibilidad de la  
26] producción de biodiesel en reactores tanque agitado continuo de laboratorio,»  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires.
- G. K. J. V. G. B. S. a. R. P. D. Clements, «Biodiesel Production,» National  
27] Renewable Energy Laboratory , Colorado, 2002-2004.
- P. c. E. C. Fernando Acosta, Manual de construcción y uso de Reactor para  
28] la producción de biodiesel a pequeña escala, Perú: Intermediate Technology  
Development Group, ITDG, 2008.

BIODAR, «Planta de producción, Almacenamiento Y distribución de  
29] Biodiesel,» BIODAR, Avilés, Asturias, 2007.

M. Fernández, «Los combustibles fósiles acaparan el 80% de la demanda  
30] mundial pese al tirón renovable,» *El boletín*, p. 1, 24 Marzo 2018.

IEA, «[iea.org](http://iea.org),» IEA, 2018. [En línea]. Available:  
31] <https://www.iea.org/renewables2018/transport/>.

I. E. Agency, «Global Energy & CO2 Status Report,» International Energy  
32] Agency, 2018.

OCDE/FAO, «Biocombustibles,» de *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas*  
33] 2017-2026, París, OECD, 2016.