



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Biotecnología de microalgas. Producción de biodiésel

Memoria

Elvira Navarro López

Septiembre de 2011

Directores: José María Fernández Sevilla

Francisco Gabriel Acién Fernández

Índice

Índice	2
Resumen.....	2
1. Introducción	2
2. Materiales y métodos.....	6
3. Resultados	16
4. Conclusiones.....	28
5. Bibliografía.....	30

Resumen

Debido a la situación planteada actualmente como consecuencia del agotamiento de los combustibles fósiles, el aumento del precio del petróleo o la creciente preocupación ambiental, se demanda urgentemente la búsqueda de fuentes de energía alternativas basadas en procesos sostenibles, renovables y respetuosos con el medio ambiente. En este contexto, la producción de biodiésel resulta ser una de las alternativas que ofrece mejores expectativas.

Durante este trabajo se revisan las vías existentes para la producción de biodiésel por transesterificación catalítica. Además se tratará de llevar a cabo el diseño y evaluación de la propuesta de instalación de una planta para producción de biodiesel a partir de la transesterificación de aceites procedentes de la microalga *Nannochloropsis* en un medio con catalizador ácido (ácido sulfúrico 98%) mediante el uso del simulador Super Pro Designer. Se abordará la evaluación de diversos aspectos económicos del proceso con el fin de determinar la rentabilidad del mismo bajo distintas condiciones.

1. Introducción

En este siglo la humanidad afronta una grave problemática debido al agotamiento de los combustibles fósiles, el incremento del precio del petróleo y la creciente preocupación

medioambiental. Esta situación demanda urgentemente fuentes alternativas de energía basadas en procesos sostenibles, renovables y respetuosos con el ambiente. Una alternativa energética que ha resultado muy atractiva en los últimos años es el biodiésel [1].

El biodiésel es un biocombustible líquido producido a partir de aceites vegetales y grasas animales, siendo la colza, el girasol y la soja las materias primas más empleadas para este fin. Las propiedades del biodiésel son prácticamente las mismas que las del gasóleo de automoción en cuanto a densidad y número de cetano. Además, presenta un punto de inflamación superior. Por todo ello, el biodiésel puede mezclarse con el gasóleo para su uso en motores e incluso sustituirlo totalmente si se adaptan éstos convenientemente.

El biodiésel se define como los ésteres monoalquílicos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceite vegetal o grasas animales. Sin embargo, los ésteres más usados son los de metanol y etanol, obtenidos a partir de transesterificación de cualquier tipo de aceites vegetales o grasas animales o de la esterificación de ácidos grasos, debido a su bajo coste y sus ventajas físicas y químicas.[3].

El biodiésel es una alternativa energética que ha ganado una especial atención en el mercado global. Países como Alemania y EEUU lo han usado e implementado con éxito en las dos últimas décadas en los vehículos. A pesar de esto, muchas veces ha sido cuestionado y aún está sujeto a superar varios problemas y muchos prejuicios. Es por eso que se hace necesario seguir investigando procedimientos que hagan esta alternativa más viable técnica, social y económicamente. [1][2].

1.1 Propiedades del biodiésel

En contraste con el diésel de petróleo, el biodiésel ofrece varias ventajas ya que es una fuente de energía renovable y biodegradable (se degrada cuatro veces más rápido que el diésel) y

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria

produce menos emisiones indeseables (CO, hidrocarburos aromáticos policíclicos, partículas de hollín, óxidos de azufre y nitrógeno, metales) durante su combustión debido a su estado oxigenado, siendo éstas por ende menos nocivas (tabla_1).

Emission (kg/100 km)	Biodiesel 100 %	Biodiesel 30 %	Diesel
CO	0.37	0.43	0.46
Hydrocarbons	0.03	0.04	0.04
NO _x	2.73	3.37	3.64
Particulate matter	0.62	1.48	1.85
CO ₂	0.87	3.53	4.67
SO ₂	0	1.14	1.62

Tabla_1. Comparación entre los niveles de emisiones del biodiesel (puro y mezclado) y el diesel de petróleo en motores de automóviles [4].

Además, posee propiedades lubricantes que reducen el desgaste del motor y es un material seguro para su transporte, almacenamiento y manejo debido a su baja volatilidad y relativamente elevado punto de inflamación (150°C). El biodiésel puede utilizar la infraestructura actual de almacenamiento y distribución para el diesel de petróleo. Asimismo, debido a la similitud de las propiedades físicas y químicas del diesel de petróleo con las del biocombustible (tabla_2), su uso no requiere modificación alguna en los motores diésel convencionales, por lo que puede ser empleado en éste en mezclas biodiésel-diésel de petróleo al 2% (B2), 5% (B5) y 20% (B20). [4].

Methyl ester of oil	Kinematic viscosity	Cetane number	Thermal power	Meeting point (°C)	Flash point	Density	Sulphur content
	($\cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)		(MJ/L)		(°C)	(kg/L)	(% w)
Babassu ¹	3.6 (37.8 °C)	63	31.8	4	127	879	
Corn, used ³	6.2 (30 °C)	63.9	42.3		166	884	0.0013
Diesel ²	2.8 (30 °C)	58	42.7		59	833	0.05
Olive ¹	5.7 (37.8 °C)	62	33.5	13	164	880	
Olive ²	4.4 (40 °C)	64.3-70	32.4			875	
Peanut ¹	4.9 (37.8 °C)	54	33.6	5	176	883	
Rapeseed, used ³	9.5 (30 °C)	53	36.7		192	895	0.002
Rapeseed ²	4.2 (40 °C)	51-59.7	32.8			882	
Soybean ¹	4.5 (37.8 °C)	45	33.5	1	178	885	
Soybean ²	4.0 (40 °C)	45.7-56	32.7			880	
Sunflower ¹	4.6 (37.8 °C)	49	33.5	1	183	860	

Tabla_2. Propiedades físico-químicas del biodiésel obtenido a partir de distintos aceites vegetales [4].

1.2 Materias primas para producción de biodiésel

Las materias primas más comunes utilizadas en España para la fabricación de biodiésel son los aceites de fritura usados y el aceite de girasol (el contenido medio en aceite es de 44% por lo que en España es una de las mejores opciones en lo que a agricultura energética se refiere).

Tanto en España como a nivel internacional, se puede decir que la producción de biodiésel tiende a provenir mayoritariamente de los aceites extraídos de plantas oleaginosas, especialmente girasol y colza. En todo caso, para la producción de biodiésel se puede emplear cualquier materia que contenga triglicéridos. A continuación se exponen las principales materias primas [3]:

- Aceites vegetales convencionales: Aceite de girasol, colza, soja, coco o palma.
- Aceites vegetales alternativos: Aceite de *Brassica carinata*, *Cynara cardunculus*, *Camelina sativa*, *Crambe abyssinica*, *Pogonius* o *Jatropha curcas*.
- Aceites de semillas modificadas genéticamente: Aceite de girasol de alto oleico.
- Grasas animales: Sebo de vaca o sebo de búfalo.
- Aceites de frituras usados.
- Aceites de otras fuentes: Aceites de producciones microbianas o aceites de microalgas.

Teniendo en cuenta que el coste de la materia prima representa aproximadamente el 70% del coste total de producción de biodiésel, será necesario partir de materias primas cuyos cultivos tengan las mayores productividades por hectárea o aceites de bajo coste como los aceites usados [5].

2. Materiales y métodos

Para llevar a cabo la simulación se utilizará el software Super pro designer, ya que se trata de un simulador potente muy utilizado para todo tipo de procesos industriales que además permite realizar un detallado estudio económico una vez implementado el proceso en el simulador.

A continuación se realiza una breve descripción de todos los procesos a partir de los cuales se puede llevar a cabo la producción de biodiésel.

2.1 Procesos de producción de biodiesel

Desde un punto de vista técnico no es viable la utilización directa de aceites vegetales en motores diesel debido entre otras razones a su elevada viscosidad, baja estabilidad frente a la oxidación (y las posteriores reacciones de polimerización), y a su baja volatilidad, lo que provoca la formación de una cantidad relativamente alta de cenizas como consecuencia de la combustión incompleta. Por todos estos motivos los aceites vegetales tienen que ser procesados con el fin de que puedan adquirir las propiedades necesarias para poder usarlos en los motores diésel. Los posibles procesos de producción son pirólisis, microemulsión y transesterificación. [5].

- a) **Pirólisis o cracking:** Consiste en la aplicación de energía térmica en presencia de aire u oxígeno para producir una modificación química. La descomposición térmica de los triglicéridos da lugar a compuestos de varias clases entre los que se incluyen alcanos, alquenos, alcanodienos, compuestos aromáticos y ácidos carboxílicos. Los diferentes tipos de aceites vegetales presentan grandes diferencias en la composición del aceite descompuesto térmicamente.
- b) **Microemulsión:** La microemulsión con alcoholes tales como metanol, etanol o 1-butanol tiene por objeto disminuir la viscosidad del biodiesel. Las microemulsiones

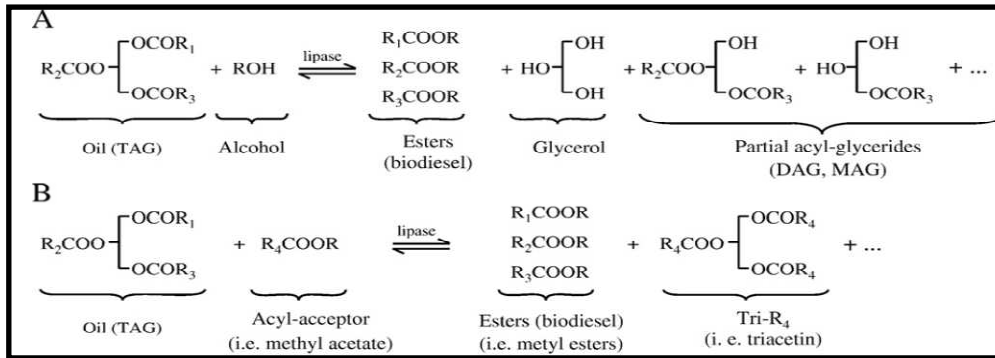
son dispersiones (de aceite, agua, tensioactivos y a menudo, una pequeña molécula, llamada co-tensioactivo) isotrópicas, transparentes y termodinámicamente estables. Mediante este proceso se puede obtener un combustible de baja viscosidad pero la inyección de este combustible en un motor no resulta eficiente y da lugar a una combustión incompleta.

Puesto que este método y la pirolisis no resultan viables económicamente y además dan lugar a un biodiésel de baja calidad, el método que generalmente se aplica es la transesterificación.

c) **Transesterificación:** Este método consiste en la reacción entre triacilgliceroles (contenidos en el aceite) y un aceptor de grupos acilo. Dependiendo de la naturaleza de estos aceptores se distingue:

- Si el aceptor es un ácido carboxílico: Acidólisis.
- Si el aceptor es un alcohol: Alcohólisis.
- Si se trata de otro ester: Interesterificación.

De estos tres, solo la alcohólisis y la interesterificación tienen interés a la hora de producir biodiesel. En ambos procesos el sustrato de partida es triacilglicerol (aceites), y si la transformación es cuantitativa dará lugar a ésteres monoalquílicos (biodiésel) y a glicerol (alcohólisis) u otro triacilglicerol (en el caso de interesterificación). (Figura_1).



Figura_ 1. Transesterificación de aceites para obtener biodiesel por alcoholólisis (A) interesterificación (B) [5].

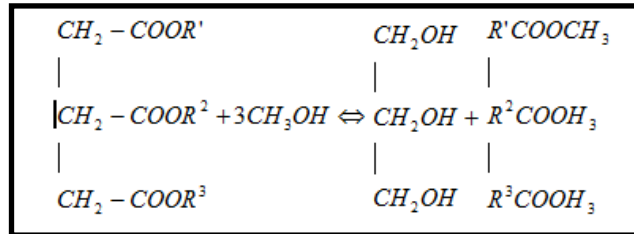
Lo más frecuente, es usar como grupo aceptor de acilos un alcohol, particularmente metanol, y en menor extensión etanol. Sin embargo, también puede llevarse a cabo la alcoholólisis con otros alcoholes como propanol, butanol, isopropanol, tert-butanol, alcoholes ramificados y octanol aunque incrementaría mucho el coste total de la operación. Con respecto a la posibilidad de utilizar metanol o etanol cabe destacar que el metanol es más barato, más reactivo y los ésteres metílicos de los ácidos grasos son más volátiles que los correspondientes ésteres etílicos. Sin embargo, el etanol es menos tóxico y puede obtenerse a partir de fuentes renovables por fermentación, al contrario que el metanol que se obtiene de fuentes fósiles no renovables como el gas natural.

A partir de este punto nos centraremos en la producción de biodiesel por transesterificación, y más concretamente en la alcoholólisis.

2.1.1 Producción de biodiésel por transesterificación (alcoholólisis)

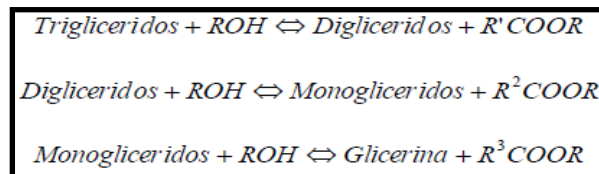
Como ya hemos visto anteriormente, el método más común para producir biodiesel es la transesterificación que consiste en una reacción química catalizada en la que interviene el aceite vegetal o la biomasa que se quiere transformar y un alcohol como aceptor de grupos

acilo, para dar lugar a los correspondientes ésteres monoalquílicos (biodiésel) [1]. La reacción global de transesterificación usando metanol (metanólisis) es la siguiente:



Figura_ 2. Reacción global de la metanólisis.

Sin embargo, este proceso ocurre en tres reacciones consecutivas y reversibles:



Figura_ 3. Reacciones de la metanólisis

Como puede observarse en la figura_3, el triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada paso se cede una molécula de éster metílico. Cabe destacar que la formación de la base de la glicerina, inmisible con los ésteres metílicos, juega un papel importante en el desplazamiento de la reacción a la derecha, permitiendo alcanzar conversiones cercanas al 100%. [3].

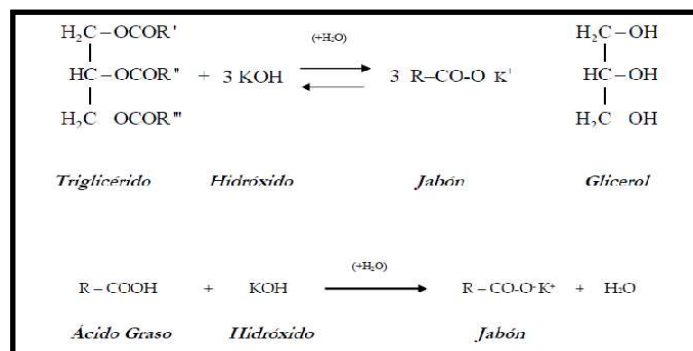
Para llevar a cabo la reacción de transesterificación y que esta sea posible desde un punto de vista cinético es necesario el uso de catalizadores. Los catalizadores empleados para llevar a cabo la transesterificación de los triglicéridos se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Catalizadores ácidos (Ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico o ácido sulfónico)

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria

- Catalizadores heterogéneos.
- Catalizadores Alcalinos. (NaOH, KOH, NaOMe)
- Catalizadores enzimáticos (lipasas)

Actualmente los procesos de producción de biodiesel a nivel industrial utilizan catalizadores básicos ya que actúan mucho más rápido y permiten operar en condiciones moderadas. El inconveniente que presentan este tipo de catalizadores es que tienen que ser anhidros para evitar que se produzcan reacciones secundarias como la saponificación y que los triglicéridos deben contener una baja proporción de ácidos grasos libres (<0,5%) para evitar que se neutralicen con el catalizador y se formen jabones que conllevan una disminución del rendimiento. (Figura_4). [3][5].



Figura_4. Reacciones secundarias de saponificación y neutralización.

Otro inconveniente del método a través de catalizadores alcalinos es que se deben tratar los efluentes alcalinos generados, lo que supone el consumo de una gran cantidad de agua durante las etapas de lavado y purificación, por lo que no resulta ser un método demasiado respetuoso con el medioambiente. Además, del proceso se obtiene como subproducto glicerol, que debe ser separado debido a su alta viscosidad y que a menudo se encuentra contaminado por el catalizador alcalino empleado, por lo que su purificación no resulta sencilla.

En el caso de que los aceites vegetales presenten un alto contenido en ácidos grasos libres será más conveniente utilizar un catalizador ácido. Con este no se forman jabones aunque requieran mayores temperaturas y una relación molar de sustrato mucho mayor.

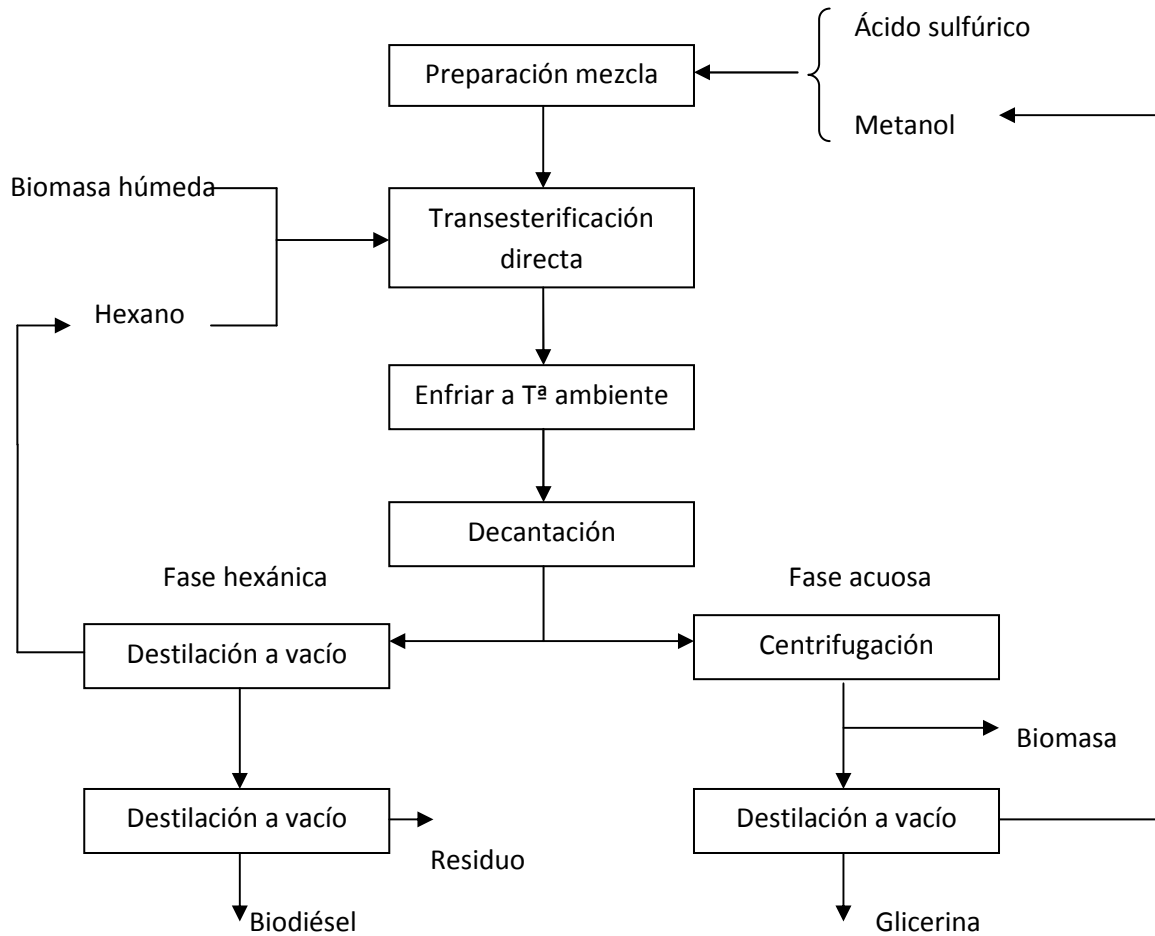
La biomasa procedente de las microalgas no se puede comparar con un aceite porque es mucho más compleja y es necesario usar una extracción líquido-líquido hexano/agua (en realidad entre una fase hexánica con metanol y una fase acuosa con metanol) para separar el resto de componente. Un aceite se va transesterificando en presencia de ácido o base sin problemas porque hay ausencia de agua. En presencia de agua el uso de una base fuerte (las más fuertes son los hidróxidos alcalinos) produciría jabones. Los jabones son polares y se quedarían en la fase acuosa.

Por lo tanto, se propone el uso de la catálisis ácida en presencia de metanol, con lo que los ácidos grasos se separan como metil esters y una pequeña cantidad de ácidos grasos que se extraen todos en la fase hexánica.

Otra opción, que no se analiza aquí, sería obtener aceite de microalgas como un primer paso y luego transesterificarlo. En tal caso si existiría la disyuntiva, pero no se ha llegado a obtener aún aceite de microalgas de suficiente pureza para la transesterificación.

2.1.2 Transesterificación con catálisis ácida

A continuación nos centraremos ya en el proceso seleccionado, producción de biodiésel por transesterificación con catálisis ácida, e identificaremos en el siguiente diagrama de bloques (figura_5) las etapas del proceso que se simulará y las condiciones de operación para llevarlas a cabo en cada caso.



Figura_5. Diagrama de bloques del proceso de producción de biodiésel por catálisis ácida

Proposición de condiciones de operación y materia prima.

Para analizar el proceso bajo diferentes condiciones se empleará como materia prima biomasa procedente de microalgas pero con un contenido en ácidos grasos que hipotéticamente variará entre un 10 y un 60%.

Tal y como se puede observar en el diagrama de bloques del proceso (Figura_5), la primera etapa consistirá en la preparación de la mezcla formada por el catalizador (ácido sulfúrico 98%) y el alcohol (metanol) que se utilizará como grupo aceptor de acilos.

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel. Memoria

Una vez mezclados estos componentes se llevará la mezcla a un tanque agitado donde se introducirá la biomasa procedente de la microalga y el solvente seleccionado, en este caso hexano. El solvente tiene la función de arrastrar los ésteres metílicos que quedarán en la capa hexánica una vez formados.

En este reactor de tanque agitado es donde tendrá lugar la transesterificación de los ácidos grasos contenidos en la biomasa para dar lugar a los ésteres metílicos que constituyen el biodiésel. Para llevar a cabo esta reacción se fijará una temperatura de 50°C y agitación en el interior del tanque durante una hora.

Una vez completada la reacción se dejarán enfriar los productos a temperatura ambiente, para posteriormente llevarlos a un decantador en el que tendrá lugar la separación de las fases acuosa y hexánica. La primera de estas fases estará formada por glicerol (subproducto de la reacción), metanol, la biomasa residuo y agua, mientras que en la fase hexánica se quedará nuestro producto de interés, es decir, los ésteres metílicos, un pequeño porcentaje de ácidos grasos que no se han transformado y el hexano.

A partir de este punto el proceso se separa en dos líneas distintas. Comenzaremos por analizar la línea correspondiente a la fase acuosa.

Una vez separada la fase acuosa en el decantador, se dirige a una columna de destilación a vacío que se pondrá en marcha con el fin de separar la biomasa residuo del resto de la corriente. Se desechará el residuo y el resto se introducirá en otro destilador a vacío del que se obtendrán dos corrientes, por una parte el metanol que se recirculará al tanque de mezcla y por otra parte el glicerol y el agua que se llevarán a otro destilador a vacío con el fin de evaporar el agua y obtener finalmente la glicerina como subproducto. Hay que tener en cuenta que la glicerina purificada tiene un alto valor en el mercado, sin embargo, los costes asociados

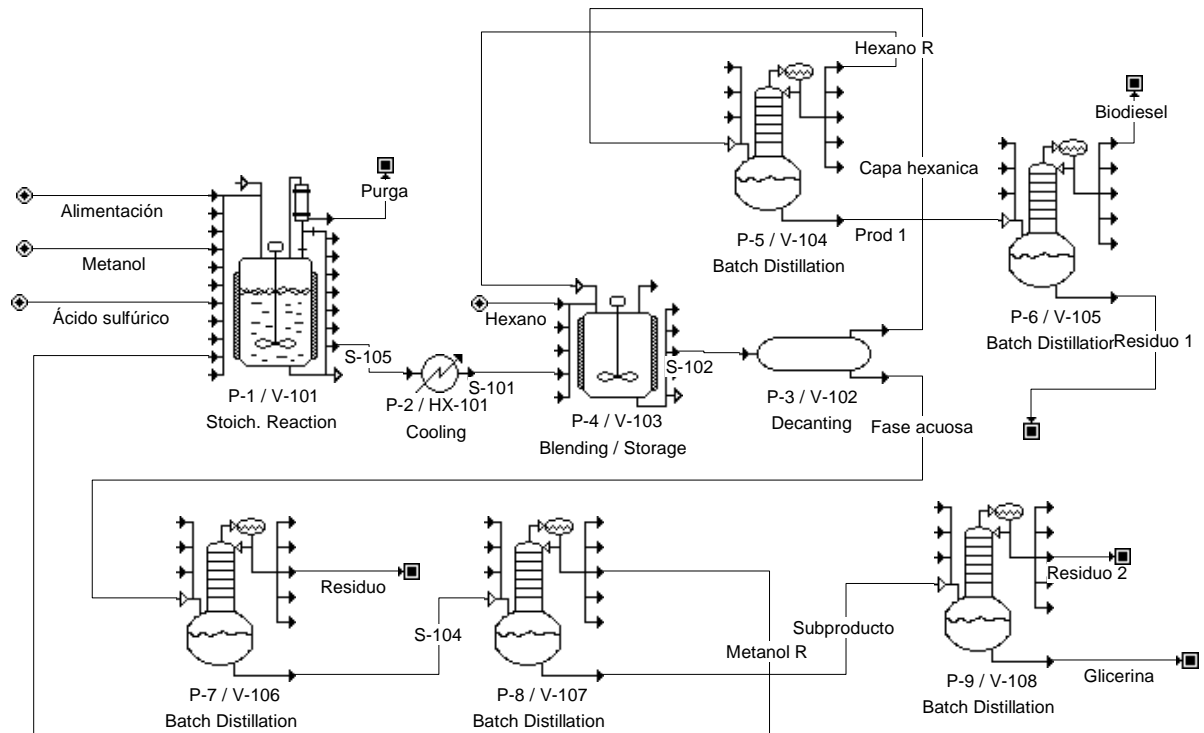
a su purificación serían tan elevados que en ningún momento podría ser rentable el proceso. Por este motivo, la glicerina que aquí se obtiene no tendrá un elevado porcentaje de pureza pero podrá venderse a un determinado precio que se determinará posteriormente.

Ahora analizaremos la fase hexánica. Una vez separada en el decantador, se introducirá la corriente en un destilador a vacío que funcionará con una temperatura de 45°C y una presión de 10mbar. En esta primera fase se separará el hexano que será nuevamente introducido en el proceso con el fin de disminuir los costes asociados a las materias primas. Finalmente para purificar los ésteres metílicos obtenidos se empleará otro destilador a vacío que operará en este caso a una temperatura de 200°C y una presión de 10mbar. Se desechará el residuo y obtendremos finalmente nuestros ésteres metílicos (biodiésel) purificados.

Modelización del proceso propuesto usando un programa de diseño asistido

Se llevará a cabo la simulación del proceso mostrado anteriormente a través del software super pro designer. El diagrama de flujo que representa el proceso se muestra en la siguiente figura (Figura_6):

Biología de microalgas. Producción de Biodiésel. Memoria



Figura_ 6. Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiésel.

Para llevar a cabo la simulación se partirá de distinta composición de la biomasa empleada como materia prima para la producción de biodiésel, de modo que se simularán los casos en los que la biomasa de partida tenga un contenido en ácidos grasos del 10%, 20%, 40% y 60%, para determinar en qué medida influye dicho contenido en el proceso.

Asimismo, se evaluará la rentabilidad del proceso asignando diferentes precios de venta para el biodiésel obtenido que estarán comprendidos entre 10-50 euros/kg. Se calculará el valor actual neto (VAN) y la tasa de interés del mercado (TIR) con el fin de encontrar el precio del producto a partir del cual será rentable el proceso.

Para la simulación, se especifican en la siguiente tabla las cantidades de cada materia prima cargadas inicialmente en el reactor. Hay que tener en cuenta que el hexano se recirculará casi por completo, quitando una pequeña fracción que se perderá durante la evaporación. El

metanol, sin embargo, es un reactivo en la reacción de transesterificación, por lo que se consumirá en gran parte durante la misma y se recirculará el resto.

Contenido en TG (%)	Materias primas			
	Biomasa (kg/ciclo)	Metanol (L/ciclo)	Ácido sulfúrico (L/ciclo)	Hexano (L/ciclo)
10	1100	395,08	146,86	395,08
20	550	395,08	146,86	395,08
40	275	395,08	146,86	395,08
60	183,33	395,08	146,86	395,08

Tabla_ 3. Cantidades de materia primas empleadas en el primer ciclo.

3. Resultados

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos a través de la simulación.

En primer lugar, se realizará un estudio económico en el que se incluirán los costes de inmovilizado, gastos e ingresos para los cuatro casos supuestos en los que varía el contenido en triglicéridos de la biomasa.

Estudio económico

Se estimará en primer lugar el coste fijo de los equipos para cada composición de partida, así como los gastos asociados al proceso y los beneficios procedentes de la venta del biodiésel y la glicerina para cada precio fijado. De este modo podremos obtener un coste de producción por kilogramo de biodiésel y fijar un precio que nos permita obtener beneficio.

Contenido en triglicéridos: 10%

En la siguiente tabla (tabla_4) se pueden observar los costes de inmovilizado para el primer caso:

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria

Código	Equipo	Coste unidad (€)	Cantidad	Total (€)
V-101	Tanque agitado	236.745,1092	1	236.745,1
HX-101	Cambiador calor	708,8176921	1	708,8177
V-103	Almacenamiento	175.786,7876	1	175.786,8
V-102	Decantador	22.682,16615	1	22.682,17
V-104	Destilador vacío	243.833,2861	1	243.833,3
V-105	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
V-106	Destilador vacío	252.339,0984	1	252.339,1
V-107	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
V-108	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
	Total			1.529.629

Tabla_ 4. Coste de los equipos para 10% de TG

A continuación se estimarán los gastos totales del proceso para una biomasa con contenido del 10% en triglicéridos además de determinar los ingresos procedentes de la venta de los productos, biodiésel y glicerina, para varios precios de venta de biodiésel, con el fin de seleccionar aquel que nos ofrezca un mejor margen de beneficios.

	Coste (€)
Equipos	1.529.629
Instalación	1.065.394,103
Tuberías	306.209,243
Instrumentación	298.320,243
Electricidad	153.104,6215
Edificios	1.117.096,243
Aislamiento	46.073,14999
Servicios	306.209,243
Acondicionamiento	229.656,9322
Total	5.051.692,241

Tabla_ 5. Otros gastos asociados al proceso.

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria

Materia prima	Precio (€/kg)	Cantidad (kg)	Coste (€/año)
Biomasa	1	1.452.000	1.452.000
Metanol	0,3	79.595,08	23.878
Ácido sulfúrico	0,1	193.861	19.386,1
Hexano	0,3	10.391	4.870,5

Tabla_ 6. Costes asociados a las materias primas.

Teniendo en cuenta que según las condiciones establecidas la producción anual de biodiésel será de 142.946 kg/año y la de glicerina 15.003 kg/año, el rendimiento obtenido en la transformación de los triglicéridos en ésteres metílicos será el siguiente:

$$kg\ TG\ iniciales = 1.452.000 \frac{kg\ biomasa}{año} * 0,1 \frac{kg\ TG}{kg\ biomasa} = 145.200 \frac{kg\ TG}{año}$$

$$Rendimiento = \frac{142.946 \frac{kg\ biodiésel}{año}}{145.200 \frac{kg\ TG}{año}} = 0,9844 \frac{kg\ biodiésel}{kg\ TG} * 100 = 98,44\%$$

A continuación se estimarán los ingresos procedentes de la venta de los productos, teniendo en cuenta que la glicerina se venderá siempre a un precio fijo de 1€/kg y que en el caso del biodiésel se probarán varios precios de venta comprendidos entre 10 y 50 €/kg con el fin de establecer cuál es el precio mínimo al que se podría vender este producto sin comprometer la rentabilidad del proyecto.

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria

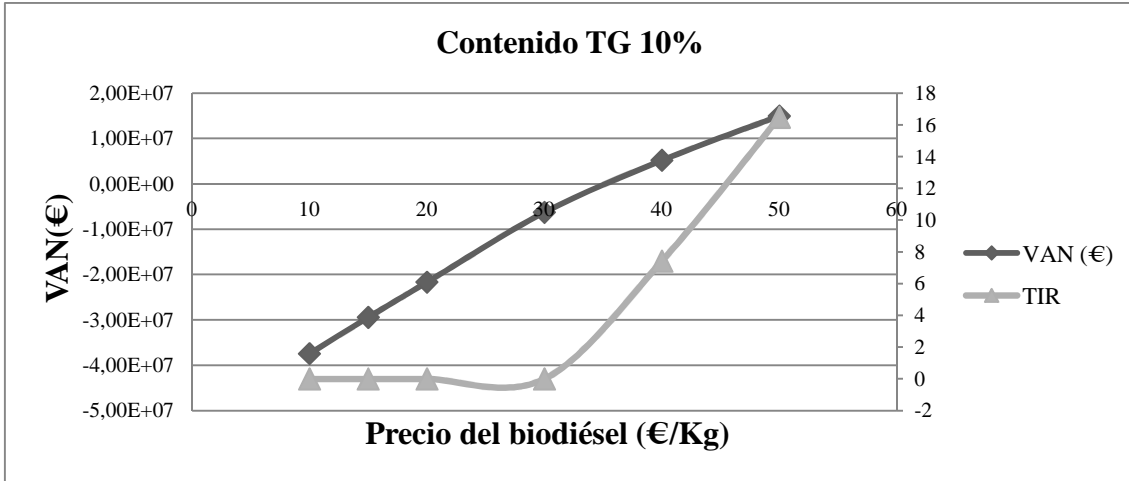
Precio biodiésel (€/kg)	Ingresos (€/año)
10	1.429.685,30 €
15	2.144.173,50 €
20	2.858.661,75 €
30	4.288.357,04 €
40	5.718.032,32 €
50	7.147.008,79 €
Glicerina	15.003,00 €

Tabla_ 7. Ingresos procedentes de la venta de biodiésel y glicerina.

Por último se estimarán el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), que son parámetros que se estudian para determinar la viabilidad del proyecto. De este modo se podrá establecer el coste unitario de producción de biodiésel (VAN=0), y fijar el precio de venta a partir del cual el proceso será rentable y se recuperará la inversión inicial (VAN>0).

Precio (€/kg)	VAN (€)	TIR (%)
10	-37.439.750,50 €	0
15	-29.413.807,77 €	0
20	-21.665.721,58 €	0
30	-6.273.745,39 €	0
40	5.180.748,51 €	7,42
50	14.955.344,49 €	16,48

Tabla_ 8. VAN y TIR para biomasa con 10% en TG



Figura_ 7. Representación gráfica de VAN y TIR frente a precio por kg de biodiésel.

Como se puede observar en la gráfica el VAN=0 se obtiene para un precio de venta del biodiésel de 35 (€/kg) aproximadamente, por lo tanto, se debería fijar un precio superior a este para que el proceso tuviera cierta rentabilidad.

Contenido en triglicéridos: 20%

Repetimos el mismo proceso que el descrito anteriormente para un contenido en triglicéridos de la biomasa de 20,40 y 60%.

Código	Equipo	Coste unidad (€)	Cantidad	Total (€)
V-101	Tanque agitado	218.315,8492	1	218.315,8
HX-101	Cambiador calor	708,8176921	1	708,8177
V-103	Almacenamiento	175.786,7876	1	175.786,8
V-102	Decantador	22.682,16615	1	22.682,17
V-104	Destilador vacío	243.833,2861	1	243.833,3
V-105	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
V-106	Destilador vacío	228.948,1145	1	228.948,1
V-107	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
V-108	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
	Total			1.487.808

Tabla_ 9. Coste de los equipos para 20% en TG

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria

	Coste (€)
Equipos	1.487.808
Instalación	1.000.865,04
Tuberías	297.703,43
Instrumentación	267.520,43
Electricidad	148.851,72
Edificios	1.050.004,45
Aislamiento	44.655,51
Servicios	290.703,43
Acondicionamiento	173.546,81
Total	4.761.658,82

Tabla_ 10. Otros costes asociados al proceso.

Materia prima	Precio (€/kg)	Cantidad (kg)	Coste (€/año)
Biomasa	1	726.000	726.000
Metanol	0,3	79.595,08	23.878
Ácido sulfúrico	0,1	193861,9	19.386,2
Hexano	0,3	10391,43	4870,5

Tabla_ 11. Costes asociados a las materias primas.

Puesto que la producción anual de biodiésel obtenida es de 142.946 kg/año y la de glicerina de 15.003 kg/año se puede calcular el rendimiento de transformación de los triglicéridos en ésteres metílicos de la siguiente forma:

$$kg\ TG\ iniciales = 726.000 \frac{kg\ biomasa}{año} * 0,2 \frac{kg\ TG}{kg\ biomasa} = 145.200 \frac{kg\ TG}{año}$$

$$Rendimiento = \frac{142.946 \frac{kg\ biodiésel}{año}}{145.200 \frac{kg\ TG}{año}} = 0,9844 \frac{kg\ biodiésel}{kg\ TG} * 100 = 98,44\%$$

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria

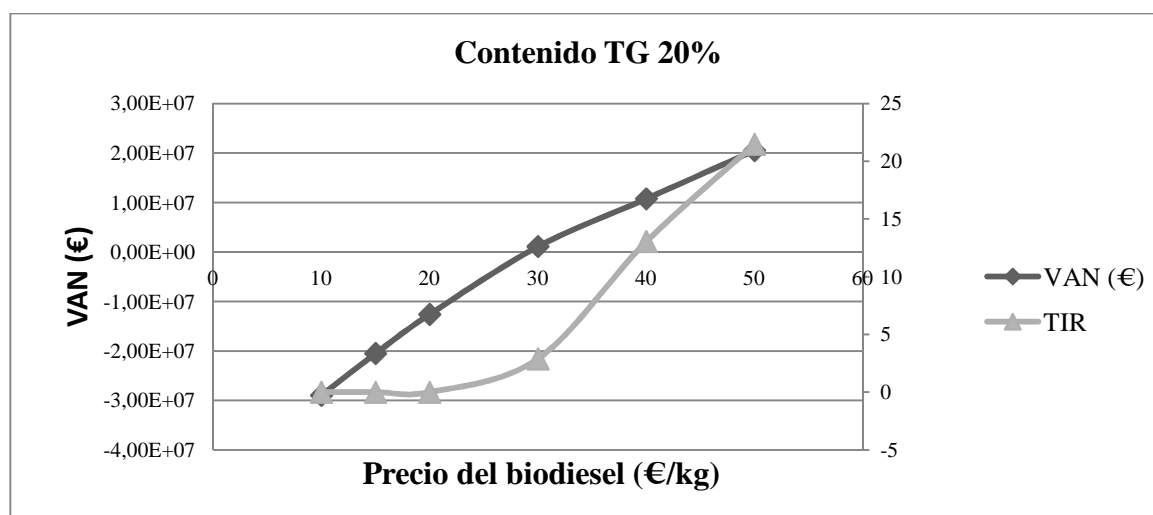
En base a los datos de producción, se estiman los ingresos que se obtendrían para cada precio de venta del biodiésel fijado (tabla_12).

Precio biodiésel (€/kg)	Ingresos (€/año)
10	1.429.685,30 €
15	2.144.173,50 €
20	2.858.661,75 €
30	4.288.357,04 €
40	5.718.032,32 €
50	7.147.008,79 €
Glicerina	15.003,00 €

Tabla_ 12. Ingresos asociados a la venta de productos.

Precio (€/kg)	VAN (€)	TIR (%)
10	-28.957.329,17 €	0
15	-20.519.563,37 €	0
20	-12.605.613,84 €	0
30	1.106.464,42 €	2,89
40	10.768.358,38 €	13,05
50	20.542.954,35 €	21,48

Tabla_ 13. VAN y TIR para biomasa con 20% en TG.



Figura_ 8. Representación gráfica de VAN y TIR frente a precio por kg de biodiésel.

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria

En este caso el VAN=0 se obtiene para un precio de biodiésel de 28,4 (€/kg), por lo que se deberá fijar un precio por encima de este para obtener beneficios en el proceso.

Contenido en triglicéridos: 40%

Código	Equipo	Coste unidad (€)	Cantidad	Total (€)
V-101	Tanque agitado	202.721,8599	1	202.721,9
HX-101	Cambiador calor	708,8176921	1	708,8177
V-103	Almacenamiento	175.786,7876	1	175.786,8
V-102	Decantador	22.682,16615	1	22.682,17
V-104	Destilador vacío	243.833,2861	1	243.833,3
V-105	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
V-106	Destilador vacío	228.948,1145	1	228.948,1
V-107	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
V-108	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
	Total			1.472.214

Tabla_ 14. Coste de los equipos para 40% TG.

	Coste (€)
Equipos	1.472.214
Instalación	1.232.979,87
Tuberías	294.159,34
Instrumentación	254.765,91
Electricidad	147.434,08
Edificios	985.432,46
Aislamiento	43.946,70
Servicios	294.159,34
Acondicionamiento	221.151,12
Total	4.946.242,82

Tabla_ 15. Otros gastos asociados al proceso.

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria

Materia prima	Precio (€/kg)	Cantidad (kg)	Coste (€/año)
Biomasa	1	363.000	363.000
Metanol	0,3	79.595,8	23.878
Ácido sulfúrico	0,1	193.861,9	19.381
Hexano	0,3	10.391,43	4.870,5

Tabla_ 16. Costes asociados a las materias primas.

Para un contenido en TG de la biomasa de partida del 40%, la producción de biodiésel será de 142.946 kg/año y la de glicerina de 15.003 kg/año. El rendimiento de transformación de los triglicéridos en los correspondientes ésteres metílicos es el siguiente:

$$kg\ TG\ iniciales = 363.000 \frac{kg\ biomasa}{año} * 0,4 \frac{kg\ TG}{kg\ biomasa} = 145.200 \frac{kg\ TG}{año}$$

$$Rendimiento = \frac{142.946 \frac{kg\ biodiésel}{año}}{145.200 \frac{kg\ TG}{año}} = 0,9844 \frac{kg\ biodiésel}{kg\ TG} * 100 = 98,44\%$$

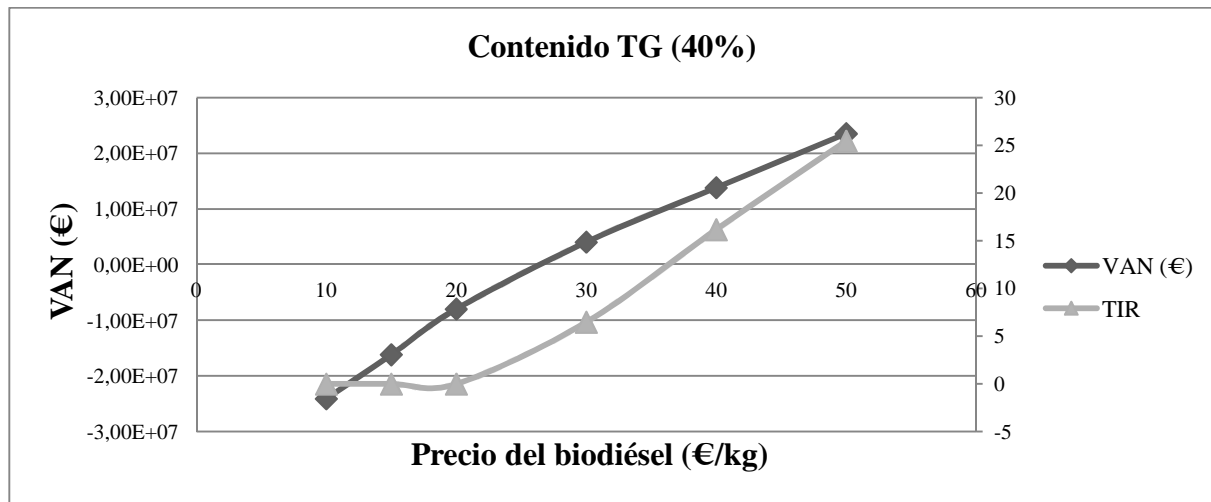
En base a los datos de producción de biodiésel se establecen los siguientes ingresos derivados de su venta (tabla_17):

Precio biodiésel (€/kg)	Ingresos (€/año)
10	1.429.685,30 €
15	2.144.173,50 €
20	2.858.661,75 €
30	4.288.357,04 €
40	5.718.032,32 €
50	7.147.008,79 €
Glicerina	15.003,00 €

Tabla_ 17. Ingresos asociados a la venta de productos.

Precio (€/kg)	VAN (€)	TIR(%)
10	- 24.064.360,65 €	0
15	- 16.150.411,11 €	0
20	- 7.961.440,32 €	0
30	4.055.854,83 €	6,48
40	13.830.450,81 €	16,17
50	23.541.962,01 €	25,45

Tabla_ 18. VAN y TIR para biomasa con 40% en TG.



Figura_ 9. Representación gráfica de VAN y TIR frente a precio por kg de biodiésel.

El coste unitario de la operación (VAN=0) es de 24,5 €/kg por lo que habrá que fijar un precio mayor por kg de biodiésel producido.

Contenido en triglicéridos: 60%

Código	Equipo	Coste unidad (€)	Cantidad	Total (€)
V-101	Tanque agitado	195.633,683	1	195.633,7
HX-101	Cambiador calor	708,8176921	1	708,8177
V-103	Almacenamiento	175.786,7876	1	175.786,8
V-102	Decantador	22.682,16615	1	22.682,17
V-104	Destilador vacío	243.833,2861	1	243.833,3
V-105	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
V-106	Destilador vacío	204.848,313	1	204.848,3
V-107	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
V-108	Destilador vacío	199.177,7715	1	199.177,8
	Total			1.441.026

Tabla_ 19. Costes de los equipos para 60% de TG.

	Coste (€)
Equipos	1.441.026
Instalación	1.185.083,07
Tuberías	287.779,98
Instrumentación	250.779,98
Electricidad	143.889,99
Edificios	967.345,87
Aislamiento	43.237,88
Servicios	287.779,98
Acondicionamiento	216.189,40
Total	4.823.112,16

Tabla_ 20. Otros gastos asociados al proceso.

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria

Materia prima	Precio (€/kg)	Cantidad (kg)	Coste (€/año)
Biomasa	1	242.00	242.000
Metanol	0,3	75.595,08	23.878
Ácido sulfúrico	0,1	193861,9	19.386,1
Hexano	0,3	10391,43	4.870,5

Tabla_ 21. Costes asociados a las materias primas.

En este caso se producirán 142.943 kg/año de biodiésel y 15.00 kg/año de glicerina. El rendimiento de transformación de los triglicéridos contenidos en la biomasa en los ésteres metílicos es:

$$kg\ TG\ iniciales = 242.000 \frac{kg\ biomasa}{año} * 0,6 \frac{kg\ TG}{kg\ biomasa} = 145.200 \frac{kg\ TG}{año}$$

$$Rendimiento = \frac{142.943 \frac{kg\ biodiésel}{año}}{145.200 \frac{kg\ TG}{año}} = 0,9844 \frac{kg\ biodiésel}{kg\ TG} * 100 = 98,44\%$$

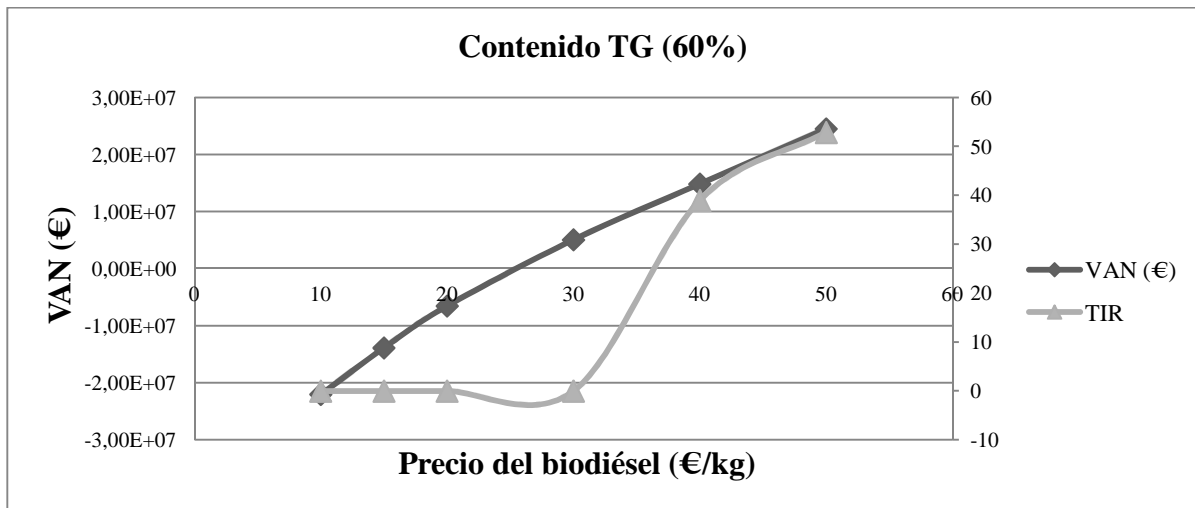
En base a los datos obtenidos de producción anual de biodiésel, los ingresos por su venta en función de los precios fijados se muestran en la siguiente tabla (tabla_22):

Precio biodiésel (€/kg)	Ingresos (€/año)
10	1.429.685,30 €
15	2.144.173,50 €
20	2.858.661,75 €
30	4.288.357,04 €
40	5.718.032,32 €
50	7.147.008,79 €
Glicerina	15.003,00 €

Tabla_ 22. Ingresos por la venta de productos.

Precio (€/kg)	VAN (€)	TIR (%)
10	- 22.014.459,88 €	0
15	- 13.865.182,87 €	0
20	- 6.526.084,49 €	0
30	5.069.464,13 €	7,73
40	14.843.351,29 €	17,27
50	24.521.548,06 €	25,39

Tabla_ 23. VAN y TIR para biomasa con 60% en TG.



Figura_ 10. Representación gráfica de VAN y TIR frente a precio por kg de biodiésel.

El coste unitario de producción de biodiésel por kg producido será de 23 €/kg, lo que se corresponde con un valor del VAN=0. Habrá que fijar por tanto, un precio superior a este (VAN>0) para que el proceso tenga rentabilidad.

4. Conclusiones

El proceso de producción de biodiésel por transesterificación con catálisis ácida analizado durante el desarrollo de este proyecto presenta un alto rendimiento en cuanto a la

Biotecnología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria

transformación de los triglicéridos contenidos en la biomasa de partida en los correspondientes ésteres metílicos que constituyen el biodiésel. Así se establece un rendimiento de 98,4% en todos los casos analizados, es decir, para un contenido en triglicéridos en la biomasa de 10, 20, 40 y 60%.

Por otra parte, en cuánto al análisis económico realizado, en la siguiente tabla (tabla_24) pueden observarse los costes unitarios de producción por kilogramo de biodiésel para los cuatro casos establecidos:

% TG	Coste de producción (€/kg)
10	35
20	28,4
40	24,5
60	23

Tabla_ 24. Coste unitario de producción por kg de biodiesel.

Según los resultados obtenidos, el coste unitario de producción de un kilogramo de biodiésel es menor cuanto mayor es el contenido en triglicéridos de la biomasa de partida. Obviamente, al ser el porcentaje en triglicéridos mayor hará falta una menor cantidad de biomasa para producir la misma cantidad de biodiésel, además los equipos para tratar dicha biomasa también serán menos costosos. Si bien, aunque para un contenido del 60% en triglicéridos el coste de producción baja del orden de 12 €/kg con respecto al procesado de la biomasa con contenido del 10%, la diferencia no es tan grande como cabría esperar, por lo que se llega a la conclusión de que el contenido en triglicéridos de la biomasa no es un factor determinante en lo que a la rentabilidad del proceso se refiere.

5. Bibliografía

- [1]. Al Zuhair. Production of biodiesel: Possibilities and challenges. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 1:57–66 (2007).
- [2] A. Garibay, R. Vázquez-Duhalt, M.P. Sánchez, L. Serrano, A. Martínez. Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología*, Año 2009, Vol. 13 No. 3.
- [3] J.M. García, J.A. García. Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol. Informe de vigilancia tecnológica. www.madrimasd.org.
- [4] J.M. Cerveró, J. Coca, S. Luque. Production of biodiesel from vegetables oils. *Grasas y aceites*, 59 (1). Enero-Marzo,76-83,2008.
- [5] A. Robles-Medina, P.A. González-Moreno, L. Esteban-Cerdán, E. Molina-Grima. Biocatalysis: Towards ever greener biodiesel production. *Biotechnology advances* 27 (2009) 398-408.

Biología de microalgas. Producción de Biodiésel.
Memoria