

Autorizada la entrega del proyecto de la alumna:

Chloé Monthieu

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Julio Montes Ponce de León

Fdo:

Fecha:

V°B° del Coordinador de Proyectos

Susana Ortiz Marcos

Fdo:

Fecha:



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)**

**INGENIERÍA EN ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

---

**Estudio técnico económico de la  
extracción de los lípidos de las  
microalgas para la producción de  
biodiesel.**

---

Director: Julio Montes Ponce de León.

**Autor: Chloé MONTHIEU**

**Madrid, Junio 2010.**



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA EXTRACCIÓN DE LOS LÍPIDOS DE LAS MICROALGAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.**

*AUTOR: MONTHIEU, CHLOÉ*

*DIRECTOR: MONTES PONCE DE LEÓN, JULIO*

*ENTIDAD COLABORADA: ICAI UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS*

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Este proyecto tiene un primer objetivo: analizar los costes de una etapa de producción del aceite obtenido de las algas para ser empleado como materia prima en el proceso de generación de biodiesel como forma de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles.

La producción de Biodiesel a partir de microalgas está todavía en una etapa de desarrollo a escala de laboratorio. No se conoce de manera precisa el coste global de producción de biodiesel, es preciso analizar las diferentes etapas de su producción para determinar la viabilidad económica de su producción industrial.

Este proyecto se ha concentrado en el análisis de los cuatro métodos existentes para la etapa de extracción del aceite de las microalgas. Esta etapa es una de las más costosas en el proceso global de producción de Biodiesel.

El proyecto se ha empezado por un estudio del Biodiesel. Se han destacado las características físico-químicas que debe tener este biocombustible para que satisfaga las normas europeas. Esas características permiten ver la compatibilidad de las propiedades del Biodiesel con respecto al petrodiesel, además de presentar las ventajas medioambientales, económicas y socioeconómicas que aporta. Además se ha estudiado el mercado del Biodiesel a nivel mundial y de hecho se muestra la necesidad de encontrar una nueva fuente de materia prima.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Se ha destacado el potencial de las microalgas para la producción de biodiesel, así como las ventajas de estas con respecto a las otras plantas oleaginosas. Las microalgas fueron elegidas porque existen numerosas especies que son ricas en triglicéridos, es decir que pueden ser la materia prima del Biodiesel. El cultivo de microalgas presenta muchas ventajas con respecto a los cultivos terrestres. Las microalgas presentan una tasa de crecimiento y una producción de aceite por área mucho mayor que los cultivos terrestres. No requieren grandes superficies para su producción.

Se han identificado alrededor de 40 000 especies de microalgas que se pueden clasificar. Para la producción de Biodiesel se utilizan microalgas provenientes de los grupos chlorophyceae y las cianobacterias. En este proyecto se ha seleccionado una especie de microalga, la chlorella vulgaris como base para elegir los equipos de extracción de aceite y para obtener los datos económicos que implica. La microalga chlorella vulgaris puede ser una de las microalgas más apropiadas para la producción de biodiesel. Ha sido también seleccionada porque es una de las microalgas más utilizadas en la industria y se tiene más experiencia de cultivo y extracción de aceite. Así, los datos encontrados pueden ser más fiables.

La producción de Biodiesel a partir de las microalgas es un proceso constituido, en términos generales, por las etapas elementales de producción de biomasa de microalgas, recuperación de la biomasa, extracción de los lípidos y transesterificación.

El presente trabajo se ha focalizado en el análisis técnico económico de los diferentes métodos de la etapa de extracción del aceite.

La primera opción es la **extracción mecánica mediante prensas**. En este proceso las microalgas deben ser previamente desecadas. Existen varios métodos como el secador solar, el tambor rotatorio y el secador spray. Se ha hecho una



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

valorización económica de estos tres métodos de secado y se ha llegado a la conclusión que el secador solar es el método de deshidratación menos costoso, sobre todo por su bajo consumo energético. Sin embargo, este método presenta el inconveniente de ser lento y de necesitar una superficie de secado grande.

Luego, se extrae el aceite de las algas por prensado. El punto débil de este método es que su rendimiento es relativamente bajo, alrededor de 65%. Por eso, generalmente se combina este método con una **extracción por solventes orgánicos, ciclohexanos**. La extracción por solventes orgánicos es básicamente un proceso de difusión de un solvente en las células que contienen aceite como materia prima, dando como resultado una solución de aceite en solvente. La desventaja de la utilización de solventes para la extracción de aceites es el peligro inherente al trabajar con productos químicos. Los solventes químicos presentan riesgos de explosión.

Estas dos etapas, extracción con prensa y la extracción con solventes orgánicos, son capaces de obtener más del 95% del aceite total presente en las algas. Sin embargo, teniendo en cuenta la etapa de deshidratación de las algas, representa un coste global de equipo y un consumo energético muy elevado. Se ha estimado un coste total de la etapa de extracción de 1,90€/kg de aceite extraído.

El segundo método es la **extracción enzimática** donde se utilizan enzimas para degradar las paredes celulares para facilitar la separación del aceite y de las proteínas. Es un método puramente químico presenta la desventaja de ser sumamente dependiente y sensible a varios factores, como son la temperatura y la humedad, difíciles de controlar en una fábrica.

Por otra parte, no existe experiencia suficiente en el manejo y transporte de las enzimas. Existen pocas empresas que se dediquen a la producción de enzimas.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Hasta ahora, no se ha utilizado este método de extracción de lípidos de las microalgas. No se han encontrado datos sobre equipos o rendimientos en aceites. Hay estudios en curso, que pueden determinar la viabilidad de este proceso.

El tercer método es la **extracción por ultrasonidos**. Se ha utilizado un aparato de ultrasonidos para crear burbujas de cavitación en el solvente. La explosión de estas burbujas en las proximidades de las paredes celulares provoca su ruptura y la liberación del aceite que contiene.

Una de las principales ventajas de esta técnica comparada con otros métodos convencionales es que requiere una instrumentación simple y rápida. Se obtiene un rendimiento bastante elevado, que puede alcanzar más 80% dependiendo del tipo de alga. Adicionalmente, el emisor de ultrasonidos no ocupa mucho espacio ni supone un aumento de precio muy grande con respecto a los equipos habituales de extracción. Se ha obtenido un coste total de extracción de aceite de 1,72€/kg de aceite extraído.

El último método es la **extracción con fluidos supercríticos**. En este proceso, se licúa el dióxido de carbono y se calienta a presión para que actúe como solvente en la extracción de aceites.

El coste de inversión es alto comparado con la extracción por ultrasonidos, además hay que añadir el consumo de dióxido de carbono que aumenta este coste. Sin embargo, su punto fuerte es que consigue un alto rendimiento de producción de aceite, alrededor de un 95%. Se ha estimado un coste de extracción de aceite de 1,88€/ kg de aceite extraído.

Para cada método, se ha destacado el coste de la tecnología, su consumo energético y su rendimiento en aceite. Estos datos han permitido determinar cuál es el mejor método desde el punto de vista económico. A partir de los datos obtenidos para cada método, se ha hecho un estudio económico utilizando como



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

indicador el VAN en función de dos parámetros: el precio de venta del aceite crudo y el contenido en lípidos de las microalgas. En la tabla siguiente se resumen los resultados obtenidos.

Mejor método en función de dos parámetros							
<i>Precio de venta del aceite extraído €/kg</i>							
<i>% en lípidos</i>	0,48	0,65	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10
30	Ultras						
40	Ultras	Ultras	Ultras	Ultras	Ultras	FSC	FSC
50	Ultras	Ultras	Ultras	FSC	FSC	FSC	FSC
60	Ultras	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC
70	Ultras	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC
80	FSC						

Tabla Recapitulativa del mejor método de extracción del aceite en función del contenido en lípidos de las microalgas y del precio de de venta del aceite extraído. FSC: Fluido Supercrítico. Ultras: Ultrasonido. Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este estudio, se ha llegado a la conclusión de que la extracción por ultrasonido o la extracción con fluidos supercriticos son los mejores desde el punto de vista económico y de rendimiento en la producción.

Los resultados de este proyecto indican que se pueden reducir el coste de la etapa de extracción de aceite de microalgas a través una selección del método que mejor se adapte al tipo de microalga y al precio de venta del aceite crudo.

De este estudio se puede prever que en un futuro próximo la obtención de biodiesel a partir de microalgas sea un proceso viable económica y técnicamente.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

**TECHNICAL-ECONOMIC STUDY OF THE EXTRACTION OF LIPIDS FROM  
MICROALGAE FOR THE PRODUCTION OF BIODIESEL**

**SUMMARY OF THE PROJECT**

The first aim of this project is to analyze the cost of the phase of production of oil obtained from algae in order to be employed as a raw material in the process of generation of Biodiesel to reduce our dependence on fossil combustibles.

The production of Biodiesel from microalgae is still in a development stage at a laboratory scale. The global cost of the Biodiesel production is not known precisely, it is necessary to analyze the different steps of its production in order to determine the economic viability of its industrial production.

This project is focused on the analysis of the four existing methods of oil extraction. This phase is one of the most expensive in the global process of production of microalgae.

The project begins with the study of Biodiesel. It underlines the physico-chemical characteristics that the biocombustible must have to satisfy European norms. These characteristics have permitted to show the compatibility of Biodiesel with petrodiesel, and it presents the environmental, socioeconomic and economics advantages that it brings. Furthermore, it studies the world market of Biodiesel, and in that sense shows the necessity of finding a new source of raw material.

The potential of microalgae for the production of Biodiesel and also its advantages compared to other oleaginous plants have been underlined. Microalgae have been chosen because there exists numerous species which



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

are rich in triglycerides, which is the raw material of Biodiesel. The culture of microalgae presents many advantages compared to land cultures. Microalgae have a rate of growth and a production of oil much higher than those of land cultures. They do not need important surface for their production.

About 40 000 species of microalgae have been identified, they can be classified in different groups. For Biodiesel production are used microalgae from the chlorophyceae and cianobacteria group. In this project, a microalgae specie has been selected, the chlorella vulgaris. This microalgae will serve as a base to choose the equipment for the oil extraction and to obtain the economic information that's it implicates. The Chlorella vulgaris could be one of the most appropriate microalgae for the production of Biodiesel. It has also been selected because it is one of the microalgae most used in the industry and with which we have the most experience in culture and in oil extraction. Therefore, the information found could be more reliable.

The production of Biodiesel from microalgae is a process which is formed by the elemental phases of production of biomass of microalgae, recollection of biomass, extraction of lipids and transesterification.

This present work concentrates on the technical-economic analysis of the different methods of oil extraction.

The first option is the mechanic extraction by press. In this process, the microalgae have to be previously dried. There exist several methods to dry microalgae such as spray drying, drum drying and solar drying. An economic valorization of these three methods has been done, and has led to the conclusion that solar drying is the method which is less expensive; it could be explained by its low consumption in energy. However, this method presents the inconvenient to be slow and to require a bigger drying superficie.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Then, the oil is extracted from the microalgae by pressing. The weak point of this method is the yield of oil obtained is quite low, around 65%. Therefore, this method is usually combined with an organic solvent extraction. This extraction is basically a diffusion process of a solvent in the cells that contain oil, the result is a solution of oil in the solvent. The disadvantage of the use of solvents for the extraction of oil is the danger working with chemical products. The chemical solvents represent a risk of explosion.

These two steps, extraction with a press and the extraction with organic solvents are capable to obtain more than 95% of the total oil present in the algae. However, if the drying method is taken in account, it represents a global cost of equipment and an energetic consumption relatively high. It has been estimated that the total cost of this extraction is 1,90€/ kg of oil extracted.

The second method is the enzymatic extraction where enzymes are used to degrade the cellular walls to facilitate the separation of the oil and the proteins. It's a purely chemical method which presents the disadvantage to be dependant and sensible to several factor such as temperature and humidity, difficult to control in a fabric.

From another side, there isn't enough experience in the manipulation and in the transport of the enzymes. There exist very few companies that are dedicated to the production of enzymes.

Until now, this method has never been used for the extraction of lipids of microalgas. There hasn't been found information on the equipments and on their yield in oil. There are studies in process that can determine the viability of this method.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

The third extraction is the extraction by ultrasound. A machine of ultrasound is used to create cavitations bubbles in the solvent. The explosion of these bubbles near the cellular walls causes its rupture and the liberation of the oil that it contains.

One of the principle advantages of this technique compared with the other methods is that it requires instrumentation simple and fast. A yield quite high is obtained; it can reach 80% depending on the type of algae. In addition, the transmitter of ultrasound doesn't need much space and doesn't suppose a very high increase of the price comparing with the equipments of extraction. It has been obtained a total cost of extraction of oil of 1,72€/kg of oil extracted.

The last method is the extraction with supercritical fluids. In this process, the carbon dioxide is liquefied and warmed up under pressure to act like a solvent in the extraction of oil.

The investment cost is high compared to the extraction by ultrasound, furthermore the consumption of carbon dioxide needs to be added which increases the cost. However, the strong point is that it reaches a high yield of production of oil, around 95%. It has been estimated a cost in the extraction of oil of 1,88€/kg of oil extracted.

For each method, the technology cost, the energetic consumption as well as the yield in oil have been outlined. This information has permitted to determine which method is the best from the economic point of view. From this data obtained for each method, an economic study has been done using the Net Present Value depending on two parameters: the sale price of the crude oil and the content of oil in the microalgas. In the following table are resumed the results obtained.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Best method depending on two parameters							
<i>Sale Price of the extracted oil €/kg</i>							
<i>% en lipids</i>	0,48	0,65	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10
30	Ultras						
40	Ultras	Ultras	Ultras	Ultras	Ultras	FSC	FSC
50	Ultras	Ultras	Ultras	FSC	FSC	FSC	FSC
60	Ultras	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC
70	Ultras	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC
80	FSC						

**Recapitulative table of the best method of extraction of oil depending on the content of oil in the microalgae and on the sale price of the oil extracted. FSC: Supercritical Fluid. Source: Ultras: Ultrasound. Own elaboration.**

As a result of this study, the conclusion it comes to is that the extraction by ultrasound or the extraction con supercritical fluids are the best methods from an economic point of view.

The result of this project indicates that the cost of the extraction phase can be reduced by choosing the methods which is best adapted to the type of microalgae and to the sale price of the oil extracted.

From this study, it can be predicted that in a close future, obtaining Biodiesel from microalgae could be a viable process economically and technically.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

## ***Índice***

<b>1.Introduccion y Planteamiento del proyecto.....</b>	<b>.21</b>
1.1. Motivación y contexto del proyecto .....	22
1.2. Objetivos generales y justificación .....	24
1.3. Metodología y recursos.....	25
1.4. Estructura de la memoria.....	26
<b>2. Presentacion del Biodiesel.....</b>	<b>29</b>
2.1. Introducción .....	30
2.2. El Biodiesel como biocarburante .....	30
2.3. Definición del biodiesel .....	31
2.4. Propiedades del Biodiesel .....	32
2.4.1. Propiedades físico-químicas .....	32
2.4.2. Materias Primas .....	34
2.5. Ventajas y desventajas del Biodiesel .....	36
2.5.1. Ventajas .....	36
2.5.2. Inconvenientes .....	39
2.6. Uso del Biodiesel a nivel mundial.....	42



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

<b>3. Las microalgas como materia prima para la producción de Biodiesel.....</b>	<b>45</b>
3.1. Definición de las microalgas.....	46
3.2. Especies de microalgas .....	46
3.3. El potencial del biodiesel a partir de microalgas .....	48
3.4. Las ventajas de las microalgas .....	50
3.5. Contenido de aceite en las microalgas.....	53
<b>4. Proceso general de producción de Biodiesel a partir de las microalgas.....</b>	<b>57</b>
4.1. Esquema del proceso de producción de biodiesel a partir de las microalgas .....	58
4.2. Producción de la biomasa de microalgas .....	59
4.2.1. Métodos de cultivo de la Chlorella Vulgaris .....	59
4.2.1.1. Cultivo de microalgas en estanques.....	59
4.2.1.2. Cultivo de microalgas en fotobioreactores.....	61
4.2.1.3. Comparación entre los fotobioreactores y los estanques .....	65
4.2.2. Materias Primas necesarias para el cultivo de la Chlorella vulgaris.....	67
4.3. La recuperación de la biomasa.....	69
4.3.1. La Floculación .....	70
4.3.2. La Centrifugación .....	70
4.3.3. La Filtración.....	71



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

4.4. Extracción del aceite de las microalgas .....	72
4.5. Conversión en Biodiesel .....	74
<b>5. Los diferentes metodos de extraccion del aceite de las microalgas.....</b>	<b>78</b>
5.1. Introducción .....	79
5.2. Proceso de extracción mecánica a partir de algas desecadas.....	80
5.2.1. Proceso de deshidratación de las algas. ....	80
5.2.2. Equipos de deshidratación de las algas.....	81
5.2.3.Extracción mecánica del aceite de algas desecadas. ....	91
5.2.3.1.Descripción del proceso.....	91
5.2.3.2.Descripción del equipo .....	91
5.2.4. Extracción con solventes orgánicos de las algas desecadas.....	93
5.2.4.1. Descripción del proceso.....	93
5.2.4.2. Descripción del equipo .....	94
5.3. La extracción enzimática .....	95
5.3.1. Descripción del proceso.....	95
5.3.2. Descripción del equipo .....	97
5.4. La extracción con ultrasonidos .....	98
5.4.1. Descripción del proceso.....	98
5.4.2. Los equipos ultrasonidos .....	100
5.5. Extracción por fluidos supercriticos .....	102
5.5.1. Descripción del proceso.....	102



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

5.5.2.El equipo..... 105

**6. Estudio Economico.....108**

6.1. Introducción ..... 109

6.2. Las Hipótesis..... 110

6.3. El coste de la producción de biomasa de microalgas ..... 110

6.4. Los diferentes métodos de extracción de aceite de microalgas en  
función del rendimiento y costo..... 112

6.4.1. La extracción con algas deshidratadas..... 113

6.4.1.1. Proceso de deshidratación de las microalgas ..... 113

6.4.1.2. Proceso de extracción del aceite combinado: extracción con prensa y  
extracción con solventes orgánicos..... 118

6.4.2. La extracción con Fluidos Supercriticos..... 121

6.4.3. Extracción con ultrasonidos..... 123

6.5. Comparación de los resultados ..... 126

6.6. Análisis de Sensibilidad..... 127

**7. Estudio del Impacto Medioambiental.....134**

7.1. El biodiesel y sus impactos beneficiosos sobre el medio ambiente.135

7.1.1. EL biodiesel y el efecto invernadero ..... 135

7.1.2. El biodiesel y la salud humana..... 136

7.1.3. La biodegradabilidad y toxicidad del biodiesel ..... 137



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

7.2. El biodiesel y su impacto negativo .....	137
7.2.1. La deforestación.....	137
7.3. El impacto ambiental positivo de la utilización de microalgas como materia prima .....	138
7.3.1. El cultivo de las microalgas no afecta al mercado de los alimentos .....	138
7.3.2. El cultivo de las microalgas no necesita la destrucción de bosques o selvas.....	139
7.3.3. El cultivo de las microalgas sin emisiones de dióxido de carbono de más a la atmosfera.....	139
<b>8. Conclusiones.....</b>	<b>141</b>
<b>9. Bibliografía.....</b>	<b>147</b>



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

***Índice de Tablas***

Tabla 1: Comparación del Diesel y del Biodiesel para algunos parámetros.

Tabla 2: Producción mundial de Biodiesel en 2008.

Tabla 3: Comparación de algunas fuentes de Biodiesel.

Tabla 4: Tasa de crecimiento máxima de microalgas y tiempo de duplicación.

Tabla 5: Contenido en aceite de microalgas.

Tabla 6: Comparación de los estanques y fotobiorreactores.

Tabla 7: Características de los dos sistemas utilizados para la cultivación de las algas.

Tabla 8: Composición y parámetros de cultivo de la *Chlorella vulgaris*.

Tabla 9: Características del equipo del secador spray.

Tabla 10: Características del equipo de tambor rotatorio.

Tabla 11: Características del secador solar.

Tabla 12: Características de la prensa de extracción de aceite.

Tabla 13: Características del equipo para la extracción con solventes.

Tabla 14: Características del equipo de ultrasonidos.

Tabla 15: Densidad, viscosidad de diferentes fluidos.

Tabla 16: Características del equipo de extracción con fluidos supercríticos.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Tabla 17: Estimación del coste de la biomasa de microalga en función del método de producción.

Tabla 18: Datos económicos del secador solar.

Tabla 19: Datos económicos tambor rotatorio.

Tabla 20: Datos económicos del secador spray.

Tabla 21: Datos económicos de la extracción con algas desecadas.

Tabla 22: Calculo del FNC para la extracción con algas desecadas.

Tabla 23: Datos económicos de la extracción con FSC.

Tabla 24: Calculo del FNC para la extracción con FSC.

Tabla 25: Datos económicos del equipo de ultrasonidos.

Tabla 26: Calculo del FNC para la extracción por ultrasonidos.

Tabla 27: Comparación de los datos económicos entre los diferentes métodos.

Tabla 28: Comparación del VAN cambiando dos parámetros (Extracción con algas deshidratadas).

Tabla 29: Comparación del VAN cambiando dos parámetros (Extracción con FSC).

Tabla 30: Comparación del VAN cambiando dos parámetros (Extracción con ultrasonidos).

Tabla 31: El método de extracción más interesante en función de dos parámetros.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

***Índice de Gráficos***

Grafico 1: Producción de Biodiesel en el mundo en el año 2008.

***Índice de Figuras***

Figura 1: esquema general del proceso de producción de Biodiesel a partir de microalgas.

Figura 2: Un estanque tipo circuito.

Figura3: Foto de un cultivo de microalgas en estanque.

Figura 4: Un fotobioreactor tubular con tubos horizontales paralelos.

Figura 5: Foto de un fotobioreactor tubular vertical.

Figura 6: Mecanismo de reacción de transesterificación.

Figura 7: Foto de un secador spray.

Figura 8: Esquema del funcionamiento de un secador spray.

Figura 9: Tambor rotatorio doble.

Figura 10: Tambor singular y tambor doble.

Figura 11: Foto de la prensa de extracción de aceite.

Figura 12: Equipos experimentales utilizados para la extracción por ultrasonidos.

Figura 13: Foto del equipo de ultrasonidos.

Figura 14: Diagrama de fases solido/liquido/gas.

Figura 15: Esquema básico de un extractor de fluidos supercriticos.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

# 1.

## Introducción y planteamiento del proyecto

---



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **1.1. Motivación y contexto del proyecto**

La sociedad actual es una gran consumidora de energía y el combustible principal es el petróleo. La crisis energética de 1973 provocó una estabilización e incluso una ligera disminución de la demanda ante los constantes aumentos del precio del crudo.

El encarecimiento de la energía, el agotamiento a medio plazo de los recursos petrolíferos, la dependencia energética de muchos de los países económicamente desarrollados, así como los graves problemas medioambientales asociados, han impulsado el urgente desarrollo de alternativas energéticas ambientalmente sostenibles, renovables y económicas.

Actualmente, se ha replanteado una estrategia energética global en distintos países. Se basa en el fomento de la eficiencia y el ahorro energético así como la búsqueda de nuevas fuentes de energía que nos permiten disminuir la actual dependencia de las fuentes de origen fósil.

Los biocarburantes, desde hace algunos años, son considerados como una respuesta posible, pero su producción vía las plantas oleaginosas no podría cubrir por sí sola nuestras necesidades energéticas. La principal crítica concierne a la superficie cultivada necesaria.

El cultivo de microalgas presenta muchas ventajas con respecto a los cultivos terrestres. Por un lado presenta una tasa de crecimiento y una producción de aceite por área mucho mayor que los mayores cultivos terrestres. No requiere grandes superficies para su producción.

Desde los finales de los años 70, los Estados Unidos estudiaron la producción de nuevos carburantes, con el fin de prever la decadencia del petróleo. Los estudios, hechos sobre las microalgas, fueron una base para una fuente



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

prolífica de biodiesel. Hoy, diferentes empresas y laboratorios de investigación persiguen este trabajo, procurando optimizar la bio producción y las técnicas de extracción de microalgas.

Las microalgas fueron elegidas porque existen numerosas especies naturales que son ricas en triglicéridos, es decir aceite que es la materia prima del biodiesel. Si producen suficientemente biomasa, podríamos cosechar estas microalgas y extraer los aceites.

La extracción de aceite de las microalgas, es uno de los temas más debatidos actualmente dado que es uno de los procesos más costoso en el proceso de producción global del biodiesel.

Esta etapa puede determinar la sostenibilidad económica de la obtención de biodiesel a partir de las microalgas.

Existen diferentes procesos para extraer los lípidos de las microalgas para la producción posterior de biodiesel: *extracción con algas desecadas*, *extracción por ciclohexanos*, *extracción enzimática*, *extracción por ultrasonidos* y *extracción por líquidos supercríticos*. Este proyecto se centra en el estudio comparativo técnico económico de los diferentes procesos para la producción posterior de biodiesel.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **1.2. Objetivos generales y justificación**

En este trabajo se va a estudiar la producción de biodiesel utilizando como materia prima microalgas. Se va a destacar las propiedades de este tipo de biocombustibles frente a otros de origen vegetal, los tipos de algas que se utilizan, los distintos procedimientos que se realizan para la obtención de biodiesel a partir de algas, el desarrollo de investigaciones para la producción de este tipo de biocombustible en el mundo, así como las ventajas y las desventajas de utilizarlo.

Se tendrá que elegir el tipo de alga más apropiado para la producción de biodiesel para que sea el más interesante posible al nivel de su composición físico-química, así como contenido en aceite.

Se recopilará información sobre las diferentes técnicas de extracción de los lípidos a partir de las microalgas explicando de manera detallada cada proceso y los distintos equipos utilizados. Se hará una comparación de las diferentes técnicas de extracción con el fin de encontrar cual es el mejor del punto de vista económico.

Se hará una valorización de la viabilidad técnica y económica de los diferentes procesos. En cada tecnología hay un coste y un rendimiento en la producción de aceite. Estos dos factores van a ser determinantes en el resultado económico de esta etapa.

Finalmente, se elegirá el mejor proceso de extracción de lípidos de microalgas combinando el porcentaje de lípidos contenidos en las algas y el precio de la biomasa de las microalgas.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Se plantean como objetivos paralelos, la adquisición de conocimientos personales sobre el proceso de producción de biodiesel de manera general, la ampliación de conocimientos sobre las diferentes técnicas de extracción, la dimensión medioambiental del uso de las microalgas para obtener biocarburantes y por fin, la introducción de nociones sobre la economía de un proceso de extracción de biodiesel al nivel industrial.

### **1.3. Metodología y recursos**

En primer lugar, para realizar ese tipo de proyecto, hay que familiarizarse con el tema y tener una visión general de los problemas eventuales que pueden surgir para la elaboración de este trabajo. Ya que el tema de la producción de biodiesel a partir de microalgas es relativamente nuevo, la familiarización con el proceso de producción de biodiesel a partir de las microalgas se ha conseguido en gran parte mediante la búsqueda de información en Internet, y también mediante libros y revistas en Bibliotecas universitarias o nacionales.

Esta parte ha consistido no solo en agrupar información pero también en organizarla y resumirla con el fin de establecer un orden lógico para responder a la problemática del proyecto.

En segundo lugar, la búsqueda de información sobre datos técnicos (detalle de los procesos) y económicos (costes del equipo, de los componentes a nadir, del consumo energético, del rendimiento en aceite...) de las diferentes tecnologías que existen para la extracción de los lípidos de las micro algas se ha recurrido a Internet, a bibliografía y al contacto con especialistas en estas áreas.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Estos datos sirven para el estudio económico. Se ha requerido una búsqueda exhaustiva para poder tener una información fiable de los precios reales del mercado.

En tercer lugar, en paralelo con las búsquedas y con el estudio económico, se hizo la redacción de la memoria, recopilando las informaciones, los gráficos, las tablas y la bibliografía útiles. Se intentó redactar de la forma más clara, con los datos más relevantes para la buena comprensión del proceso de producción de biodiesel a partir de las microalgas.

Por fin, se presentan los resultados del estudio económico, las conclusiones y por último el resumen del proyecto.

Para el estudio económico se ha tenido en cuenta la forma la más clara y adecuada para lo que se quería destacar, el mejor método de extracción de aceite del punto de vista económico. En el análisis de sensibilidad, se ha tenido en cuenta los factores que cambian en la extracción de aceites, es decir el porcentaje de lípidos contenidos en las microalgas y el precio de la biomasa de microalga.

#### **1.4. Estructura de la memoria**

La primera parte de la memoria trata de la introducción y del planteamiento del proyecto. Contiene la motivación, los objetivos generales, la metodología, los recursos, la planificación y por fin la estructura de la memoria.

La segunda parte de este trabajo describe por un lado el biodiesel con el contexto de su desarrollo, su evolución en el mercado mundial, el desarrollo de investigaciones para la producción de este tipo de biocombustible en el mundo, así como las ventajas y las desventajas de utilizarlo.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Después, un parte en el trabajo desarrolla las microalgas como posible fuente de materia prima del biodiesel. Se destacan las ventajas y desventajas frente a otras oleaginosas de utilizar las microalgas, como su contenido en lípido que depende en gran parte de la especie de microalga y su capacidad de crecimiento muy rápido.

Luego, se explica de manera esquematizada el proceso general de producción de biodiesel a partir de las microalgas.

En una otra parte, se desarrolla de manera más detallada, las diferentes etapas del proceso de producción del biodiesel. Para cada etapa se elige parámetros que parecen los más interesantes para la producción posterior de biodiesel. Se elige el tipo de alga, el medio de cultivo, la manera de cosechar la biomasa de microalgas... Todos estos parámetros influyen luego en el proceso de extracción del aceite de las microalgas.

En la segunda parte del proyecto, se describe los diferentes métodos de extracción de las microalgas; la extracción mecánica con prensa con o sin la combinación con la extracción con solventes orgánicos, la extracción por fluidos supercríticos, la extracción con ultrasonidos y la extracción enzimática. Se explica el proceso general de cada proceso, el equipamiento utilizado y los datos que le caracterizan. Estos datos son posteriormente utilizados en el estudio económico.

En una tercera parte se hace el estudio económico de los diferentes métodos de extracción de aceite explicados anteriormente. En esta parte, se ha basado en presupuestos generales como son el lugar de ubicación de la planta



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

teórica de biodiesel y la producción anual de biodiesel. En los diferentes procesos de producción de biodiesel a partir de microalgas, se ha elegido los métodos más interesantes como el cultivo de las microalgas y el método de recuperación de la biomasa.

En una última parte, se analizan los resultados obtenidos al estudio económico y se concluye sobre su viabilidad.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

# 2.

## Presentación del Biodiesel

---



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **2.1. Introducción**

El biodiesel es conocido desde mediados del siglo XIX gracias a los trabajos de Rudolf Diesel, inventor del motor. Utilizó el aceite de maíz como combustible durante una demostración de la adaptabilidad de dicho motor.

La crisis de los recursos petrolíferos ha sido el motor para la búsqueda de nuevas fuentes de energía, y se desarrolló en este contexto el biodiesel como biocombustible alternativo.

Por otro lado, la creciente preocupación por el calentamiento global ha permitido que la generación de energía mediante el aprovechamiento de productos naturales sea considerada como una de las industrias del futuro. El biodiesel, por ejemplo, es un biocombustible ecológico y biodegradable que se obtiene a partir de materias primas renovables como las grasas vegetales. La producción de biodiesel es limpia y no genera residuos no reutilizables.

### **2.2. El Biodiesel como biocarburante**

Los biocombustibles se pueden presentar en forma sólida (residuos vegetales, fracción biodegradable de los residuos urbanos o industriales), líquida (bioalcoholes, biodiesel) o gaseosa (biogás, hidrógeno). Los biocarburantes son combustibles para la automoción producidos a partir de la biomasa y considerados como una energía renovable.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Los biocarburantes se generan a partir de procesos biológicos. Presentan una gran cantidad de ventajas frente los carburantes fósiles, entre ellas producir bastante menos cantidad de dióxido de carbono en su ciclo de vida, principal gas causante del efecto invernadero. Los biocarburantes utilizan recursos inagotables que son excelentes para reemplazar los combustibles que se producen a base de petróleo, el cual escasea y por otro lado produce grandes efectos contaminantes en la atmósfera, como el efecto invernadero entre muchos otros. Estos tipos de biocombustibles, están caracterizados por la posibilidad de aplicación a los actuales motores de combustión interna.

### **2.3. Definición del biodiesel**

El biodiesel es un biocombustible que se presenta en estado líquido y se obtiene a partir de recursos renovables: aceites vegetales, grasas animales y metanol.

La ASTM (American Society for Testing Materials) define al biodiesel como un ester mono alquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o grasas animales, para utilizarlos en motores Diesel.

Diversos aceites han sido probados para la producción de biodiesel, generalmente los que abundan en la zona o país de investigación. En Estados Unidos se utiliza principalmente el aceite de maíz, mientras que en Europa se utiliza más el aceite de colza. Otros países como Malasia han explorado la palma africana, y Nicaragua el tempate. Los países tropicales investigan la utilización del aceite de coco y de palma. La producción depende del coste de la materia prima.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Los componentes básicos de los aceites y grasas son los triglicéridos, los cuales provienen tanto de los ácidos grasos saturados como insaturados. Dependiendo de estas y otras características del origen de los triglicéridos se obtendrá un biodiesel con unas calidades u otras.

El biodiesel tiene propiedades similares al combustible diesel de petróleo, se pueden mezclar ambos en cualquier proporción, sin ningún tipo de problema.

En Francia, al porcentaje de biodiesel puro que se encuentra en el combustible, se le denomina porcentaje de biomasicidad. Así, el biodiesel B30 tiene un 30% de esteres grasos y un 70% de diesel petrolífero. El biodiesel B100 solo contiene esteres grasos.

## **2.4. Propiedades del Biodiesel**

### **2.4.1. Propiedades físico-químicas**

Las propiedades del biodiesel son muy similares a las del diesel del petróleo, por eso los motores no necesitan ninguna modificación para poder utilizarlo.

En la Tabla 1 se hace una comparación entre las propiedades de un diesel y de un biodiesel. Como se observa, algunas son muy parecidas, pero otras difieren bastante.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Propiedad	Unidad	Diesel	Biodiesel
<b>UNE-EN 590</b>			
<b>Propiedades estándar</b>			
<i>Densidad (15°C)</i>	Kg/m <sup>3</sup>	820 - 860	875 - 900
<i>Viscosidad (40°C)</i>	Mm <sup>2</sup> /s	2,00 - 4,50	3,50 - 5,00
<i>Punto de ignición</i>	°C	>55	>110
<i>Contenido de azufre</i>	% (peso)	<0,20	<0,01
<i>Numero de cetano</i>		>46	>51
<b>Propiedades adicionales</b>			
<i>Contenido de oxígeno</i>	% (peso)	0	10,9
<i>Poder calorífico</i>	MJ/dm <sup>3</sup>	35,6	32,9
<i>Grado de eficiencia</i>	%	38,2	40,7

Tabla 1: Comparación del diesel y del biodiesel para algunos parámetros. [www.werackiberica.es, “Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel”, J. Ignacio Ciria].

Esta tabla muestra la comparación del biodiesel con un gasoil. De esta comparación podemos destacar las siguientes conclusiones.

El punto de ignición del biodiesel es significativamente superior al del diesel, por lo que le garantiza un manejo mucho más seguro en el manipuleo y almacenaje.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

El número de cetano del biodiesel tiende a ser más alto. El número de cetano es una medida de la calidad de ignición de un combustible, influye en las emisiones de humo y en la calidad de la combustión. Con un mayor número de cetano hay un mejor arranque en frío, un menor ruido en el motor, a mayor vida útil del motor y menores emisiones.

El azufre contribuye al desgaste del motor y a la aparición de depósitos que varían considerablemente en importancia dependiendo en gran medida de las condiciones de funcionamiento del motor. También pueden afectar al funcionamiento del sistema de control de emisiones y a límites medioambientales.

Las emisiones de dióxido de azufre producidas por el biodiesel son prácticamente nulas, ya que contiene una cantidad despreciable de azufre. Las emisiones de todos los contaminantes principales son netamente bajas.

El poder calorífico no se modifica notablemente aunque es aproximadamente un 10% inferior en el biodiesel, sin embargo en la práctica no es despreciable.

#### **2.4.2. Materias Primas**

El biodiesel se obtiene a partir de grasas de origen vegetal.

Entre las principales materias primas para la elaboración de biodiesel se puede mencionar:



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

- *Aceites vegetales convencionales*: estos han sido los aceites de semillas oleaginosas como el girasol, la colza y la soja.
  
- *Aceites vegetales alternativos*: en la mayoría de los países se están haciendo estudios con el fin de encontrar cultivos específicos nuevos que se adapten mejor a las condiciones particulares de los suelos y que a su vez, presenten buenas propiedades para el aprovechamiento por parte del sector energético.
  
- *Aceites vegetales modificados genéticamente*: los aceites y las grasas se diferencian principalmente en su contenido en ácidos grasos. Los aceites con proporciones altas de ácidos grasos insaturados disminuyen su estabilidad a la oxidación, ocasionando un mayor índice de yodo. Por lo tanto, los aceites con elevado contenido de insaturaciones pueden ser modificados genéticamente para reducir esta proporción. Un ejemplo es el aceite de girasol de alto contenido oleico.
  
- *Aceites de fritura usados*: esta constituye la materia prima más barata, y con su utilización se evitan costos de tratamiento como residuo. Sin embargo, este aceite suele incluir un elevado porcentaje de impurezas y de humedad, lo que obliga a un pre tratamiento para limpiarlo. Esta limpieza requiere altos niveles energéticos, debido a las elevadas temperaturas, decantación y eliminación de humedad, implícitos en el proceso. Además la recolección de estos aceites es problemática y con él no se podría cubrir más que un pequeño porcentaje de la demanda del biodiesel. Por lo tanto, la producción de biodiesel a partir de aceites de fritura usados es una



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

cuestión más relacionada con el reciclado y el aporte ecológico que una verdadera alternativa energética.

- *Aceites de otras fuentes:* en la actualidad se ha desarrollado una producción de lípidos de composiciones similares a los aceites vegetales, mediante procesos microbianos, a partir de algas, microalgas, bacterias y hongos.

## **2.5. Ventajas y desventajas del Biodiesel**

La producción y utilización del biodiesel presenta una serie de ventajas respecto a los combustibles de origen fósil, los cuales se discuten a continuación.

### **2.5.1. Ventajas**

Se ha distinguido tres tipos de ventajas para el uso y la producción de biodiesel: las ventajas medioambientales, las ventajas económicas y las ventajas socioeconómicas.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### ➤ Ventajas medioambientales

El ciclo biológico en la producción y el uso del biodiesel reduce aproximadamente en 80% las emisiones de anhídrido carbónico, y casi 100% las emisiones de dióxido de azufre.

El biodiesel disminuye de forma notable las principales emisiones de los vehículos, como son el monóxido de carbono y los hidrocarburos volátiles, y las partículas, en los motores diesel. El biodiesel supone un ahorro de entre un 25% a un 80% de las emisiones de dióxido de carbono producidas por los combustibles derivados del petróleo, constituyendo así un elemento importante para disminuir los gases invernadero producidos por el transporte.

El biodiesel no incide negativamente en la contaminación de los suelos o de aguas debido a su carácter biodegradable. Además, su producción supone una alternativa de uso de aquellas tierras agrícolas que, por razones de mercado, están siendo abandonadas por los agricultores, evitando así los fenómenos de erosión y desertificación.

El hecho de que el biodiesel sea biodegradable hace su manejo y transporte más seguro. Por ejemplo, su punto de inflamación es de aproximadamente 150°C mientras que el del diesel es de 50°C.

El punto de inflamación se utiliza como mecanismo limitante del exceso de alcohol en el combustible. Es de vital importancia debido a los requerimientos legales en lo que corresponde a la seguridad en el manejo y almacenaje del combustible.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

➤ Ventajas económicas

El uso del biodiesel puede extender la vida útil de los motores. En efecto, el biodiesel posee mejores cualidades lubricantes que el combustible de diesel petróleo. Además, es el único combustible alternativo que funciona en cualquier proporción con el combustible diesel de petróleo.

La oficina de presupuesto del Congreso, y el Departamento Americano de Agricultura, junto con otros organismos han determinado que el biodiesel es la opción más económica de combustible alternativo que reúne todos los requisitos del Energy Policy Act.

La utilización del biodiesel permitirá disminuir la importación de gasoil, por lo tanto de los combustibles fósiles, otorgando una mayor seguridad en cuanto al abastecimiento energético.

➤ Ventajas socioeconómicas

La producción de biodiesel constituye una alternativa para aquellas tierras agrícolas muertas. De esta forma, se fijaría la población en el ámbito rural en países no europeos, manteniendo los niveles de trabajo y renta, y fomentándola creación de diferentes industrias.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Igualmente, mejora la relación productos primarios/ petróleo, y representa la única respuesta económicamente válida a los subsidios del sector agropecuario en los países industriales.

#### **2.5. 2. Inconvenientes**

A pesar de sus muchas ventajas, el uso de biodiesel también presenta algunas desventajas.

##### ➤ Desventajas medioambientales

La explotación de plantaciones de palma para la producción de aceite (utilizadas para hacer biodiesel) fue responsable de un 87% de la deforestación de Malasia hasta el año 2000. En Sumatra y Borneo, millones de hectáreas de bosque se convirtieron en tierra de cultivo de estas palmeras y en los últimos años se ha conseguido doblar esa cifra, la tala y los incendios perdura. El famoso parque nacional Tanjung Puting de Kalimantan fue deforestado por completo. Orangutanes, gibones, rinocerontes, tapires tigres, panteras nebulosa, etc... se van a extinguir por la destrucción del hábitat. Pero los gobiernos, mientras Europa siga comprando su aceite de palma para hacer biodiesel, seguirán promoviendo el cultivo de estas plantas para su propio beneficio.

El rendimiento promedio para oleaginosas como girasol, maíz, arroz, algodón, soja o ricino ronda los 900 litros de biodiesel por hectárea cosechada. Esto puede hacer que sea poco práctico para países con poca superficie cultivable;



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

sin embargo, la gran variedad de semillas aptas para su producción (muchas de ellas complementarias en su rotación o con subproductos utilizables en otras industrias) hace que sea un proyecto sostenible.

El mercado creciente de producción de biodiesel a partir de aceite vegetales comestibles, requerirá del uso de enormes extensiones de terreno fértil, situación que podría conllevar a crisis alimentarias ante la escasez de suelos cultivables. En el caso particular del sureste asiático y Brasil, el considerable incremento en su tasa de producción de biodiesel a partir de soya y palma, ha ocasionado problemas ambientales inherentes a la deforestación de regiones tropicales. En consecuencia se ha planteado el uso de aceites no comestibles procedentes de cultivos marginales tales como *Jatropha curcas* (piñón), *Calophyllum inophyllum* y *ricinus communis* (higuerilla). Estos cultivos marginales no requieren terrenos fértiles, ya que proliferan en suelos áridos, pobres en nutrientes, con altos niveles de radiación y baja precipitación.

- Desventajas debido a las características físico-químicas del biodiesel

Debido a su mejor capacidad solvente con respecto al petrodiesel, los residuos existentes en el depósito son disueltos y enviados al motor por la línea de combustible, pudiendo atascar los filtros, caso que se da únicamente cuando se utiliza por primera vez después de haber estado consumiendo diesel mineral.

Tiene una menor capacidad energética, aproximadamente un 3% menos, aunque esto, en la práctica, no es tan notorio ya que es compensado con el mayor índice cetano, lo que produce una combustión más completa con menor compresión.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Ciertas hipótesis sugieren que se producen mayores depósitos de combustión y que se degrada el arranque en frío de los motores, pero esto aún no está documentado.

Otros problemas que presenta se refieren al área de la logística de almacenamiento, ya que es un producto hidrófilo y degradable, por lo cual es necesaria una planificación exacta de su producción y expedición. El producto se degrada notoriamente más rápido que el petrodiesel.

Hasta el momento, no está claro el tiempo de vida útil del biodiesel; algunos sostienen que posee un tiempo de vida muy corto (meses), mientras que otros afirman que su vida útil llega incluso a 10 años o más. Pero todos concuerdan que depende de su manipulación y almacenamiento.

#### ➤ Desventajas económicas

La mayor desventaja actual del biodiesel es que su producción es más cara que la del diesel convencional fósil. Como medida, en algunos países el biodiesel no paga impuestos al Estado, por lo que se puede vender a menor precio a los consumidores. En Estados Unidos, el Departamento de Agricultura ha establecido un subsidio para los refinadores que usen el aceite de soja como una materia de base del biodiesel.

En España, el mayor coste de producción de biodiesel se compensa con una tasa fiscal inferior, de forma que el precio del biocarburante sea igual al del petro carburante.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

## **2.6. Uso del Biodiesel a nivel mundial**

Europa fue el principal mercado de biodiesel en 2009, con una cuota de producción del 49,8%, seguida por el continente americano (32,8%) y la región Asia-Pacífico (4,4%). La participación europea disminuye desde 2001, mientras crece en las otras dos regiones. Los cinco principales productores son Alemania, EE.UU., Francia, Argentina y Brasil, que juntos producen el 68,4% del total del biodiesel del mundo. Australia es el mayor productor en la región Asia-Pacífico, seguido de China y la India.

Estados Unidos, con el 17,7%, fue el segundo mayor productor de biodiesel en el mundo en 2009, y se prevé que alcance los 2.822 millones de litros en 2010 y 6.453 millones en 2020. El Gobierno promueve la producción y utilización de biodiesel a través de diversos incentivos y medidas encuadrados en el programa Renewable Fuel Standard 2 (RFS), cuya revisión favoreció el uso de 42 000 millones de litros de combustibles renovables en 2009 y la posibilidad de alcanzar los 136 000 en 2022.

En la industria del biodiesel en España, se destaca que se hacen progresos hacia una mayor producción. Es ya el séptimo productor en Europa. El Plan de Energías Renovables y la exención del impuesto especial de hidrocarburos se citan como los dos principales incentivos que han permitido el aumento del mercado.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

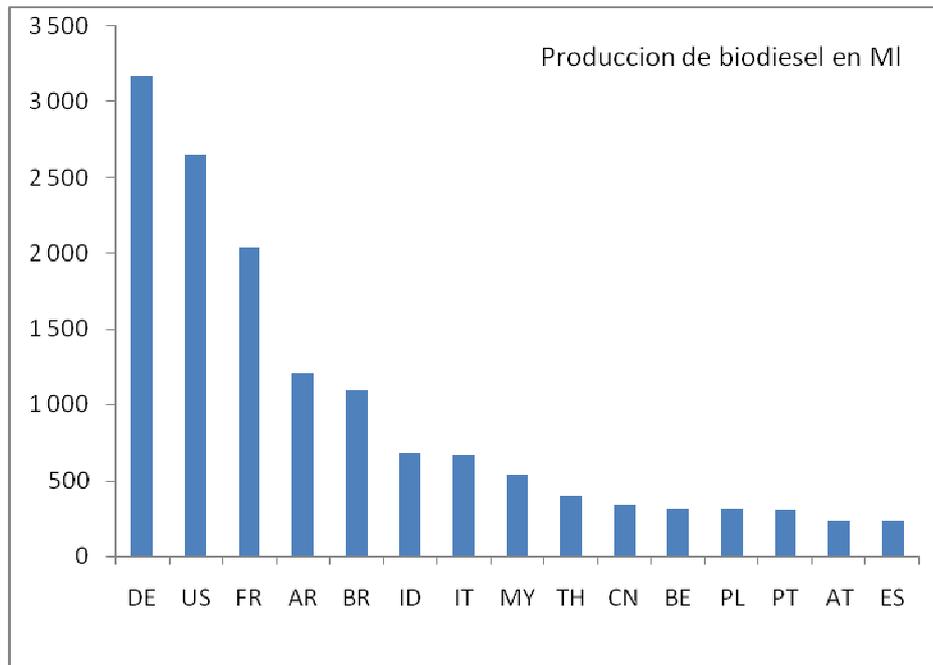


Grafico 1: Producción de biodiesel en el mundo en el año 2008 [European Biodiesel Board, [www.ebb-eu.org/](http://www.ebb-eu.org/)].



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

<b>País</b>		<b>Producción (MI)</b>	<b>% de producción</b>
<b>DE</b>	Alemania	3 175	19,7
<b>US</b>	Estados Unidos	2 650	16,5
<b>FR</b>	Francia	2 044	12,7
<b>AR</b>	Argentina	1 205	7,5
<b>BR</b>	Brasil	1 100	6,8
<b>ID</b>	Indonesia	684	4,3
<b>IT</b>	Italia	670	4,2
<b>MY</b>	Malasia	541	3,4
<b>TH</b>	Tailandia	394	2,4
<b>CN</b>	China	338	2,1
<b>BE</b>	Bélgica	312	1,9
<b>PL</b>	Polonia	310	1,9
<b>PT</b>	Portugal	302	1,9
<b>AT</b>	Austria	240	1,5
<b>ES</b>	España	233	1,4
	Otros	1 888	11,7
	<b>TOTAL</b>	<b>16 084</b>	<b>100</b>

Tabla 2: Producción mundial de biodiesel en 2008. [European Biodiesel Board, <http://www.ebb-eu.org/>].



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

# 3.

## Las microalgas como materia prima para la producción de biodiesel

---



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **3.1. Definición de las microalgas**

Las microalgas y cianobacterias son microorganismos que utilizan la luz como fuente de energía para fijar el dióxido de carbono. Estos microorganismos (agrupados con el nombre genérico de microalgas) cuyo tamaño varía del micrómetro a la centena de micrómetros, se encuentran en abundancia en los medios acuáticos (océanos, ríos, lagos, etc.). Como algunos vegetales terrestres, en ciertas circunstancias, el carbono es absorbido en forma de lípidos (principalmente triglicéridos), lo que permite considerar utilizar esos microorganismos para producir biocombustibles.

Se pueden encontrar en hábitats diversos tales como aguas marinas, dulces, salobres, residuales o en el suelo, bajo un amplio rango de temperaturas, pH y disponibilidad de nutrientes.

Desde la antigüedad, las microalgas se han usado como alimento humano, sin embargo es hasta ahora que han atraído la atención para la investigación de su potencial biotecnológico.

### **3.2. Especies de microalgas**

La biodiversidad de las microalgas es enorme, se han identificado alrededor de 40 000 especies aunque se estima que existen más de 100 000, de las cuales con frecuencia se desconoce su composición bioquímica y metabolismo.

Las microalgas se clasifican de acuerdo a varios parámetros tales como la pigmentación, ciclo de vida, morfología y estructura celular.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

La *bacillariophyceae* (diatomea) son una clase de microalgas unicelulares planctónicas de 2  $\mu\text{m}$  a 1 mm. Viven en todos los medios acuáticos, agua dulce o marina constituyendo una parte importante del fitoplancton. Las paredes de sus células contienen sílice polimerizada, y almacenan carbón en diversas formas, en aceites naturales o polímeros de carbohidratos.

Las *chlorophyceae* son una de las clases de algas verdes, que se distinguen básicamente por a su morfología ultraestructural. Existen alrededor de 2000 especies diferentes. Son muy abundantes en aguas continentales como lagos, ríos y albercas. Estas algas almacenan principalmente almidón, pero también aceites pueden ser producidos bajo ciertas condiciones. Destaca la “Dunaliella”, “Haematococcus” y la “Chlorella”.

La *chrysophyceae* (algas doradas o algas verde-amarillas) es un grupo de algas que viven principalmente en agua dulce. Se encuentran en la mayoría de los lagos y lagunas de aguas dulces limpias y frías, y algunas especies son marinas. Existen alrededor de 1000 especies conocidas. Producen y almacenan aceites naturales y carbohidratos.

Las *cyanobacterias* también llamadas cyanophyceae o algas verdeazuladas, son un grupo de bacterias (procariotas). Son conocidas más de 7500 especies. Las cianobacterias comparten con algunas otras bacterias la habilidad de tomar el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) del aire y reducirlo amoniaco ( $\text{NH}_4^+$ ), una forma de nitrógeno que todas las células pueden aprovechar. Destaca la “Spirulina” por su uso biotecnológico y como alimento por su alto contenido en proteínas (hasta 70% del peso).



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Generalmente, para la producción de biodiesel utilizamos microalgas que provienen de los grupos de chlorophyceae y de las cianobacterias.

Las microalgas contienen, como todos los organismos vivos, una fracción de lípidos. En condiciones normales, su proporción es débil, y los lípidos son principalmente constituidos de fosfolípidos et glicolípidos difícilmente utilizables en un biocombustible.

### **3.3. El potencial del biodiesel a partir de microalgas**

Como fue mencionado anteriormente, dentro de las fuentes utilizadas para la obtención de aceites vegetales podemos encontrar a las plantas verdes y a las algas.

Reemplazando todo el combustible consumido en el transporte en los Estados Unidos con biodiesel requiere 0,53 mil millones de m<sup>3</sup> de biodiesel anual. Las cosechas de aceite, los residuos de grasa de la cocción o grasa animal no pueden satisfacer esta demanda.

Por ejemplo, para satisfacer solo la mitad de las necesidades de los EEUU en combustible para transporte se requeriría una superficie de cultivo de las fuentes existentes de biodiesel que no son posibles. En la Tabla 3., en la cuarta columna, está calculado la superficie que esta expresada como el porcentaje de la superficie total actual de cosecha en los EEUU. Respeto al aceite de palma que



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

tiene rendimiento mayor, Sería necesario el 24% del total de la tierra de cultivo para alcanzar solo el 50% de las necesidades de combustible.

Cosecha	Rendimiento en aceite (L/ha)	Superficie de terreno necesario (M ha) <sup>a</sup>	% del terreno de cultiva existente en EEUU <sup>a</sup>
Grano	172	1540	846
Soja	446	594	326
Coco	2689	99	54
Aceite de palma	5950	45	24
Microalga <sup>b</sup>	136 900	2	1,1
Microalga <sup>c</sup>	58 700	4,5	2,5

Tabla 3: Comparación de algunas fuentes de biodiesel [“Biodiesel from microalgae”, Yusuf Chisti, 2008].

<sup>a</sup> para responder a la necesidad de 50% de las necesidades de combustible en EEUU.

<sup>b</sup> 70% de aceite en biomasa.

<sup>c</sup> 30% de aceite en biomasa.

El biodiesel de microalgas es el único biocombustible renovable que tiene el potencial de reemplazar en gran parte el petróleo derivado por los combustibles del transporte sin afectar de manera negativa el suministro de alimentos y otros productos cultivados.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

El escenario cambia radicalmente si se utilizan las algas para producir biodiesel. Entre 1 y 3% del de la superficie total de cultivo de los EEUU sería suficiente para producir biomasa de algas para satisfacer 50% de las necesidades de biocombustible. El rendimiento del aceite de las microalgas dadas en la Tabla 3 está basado en una productividad de biomasa demostrada experimentalmente en fotobioreactores.

Mirando la Tabla 3., las microalgas aparecen como la única fuente de biodiesel que tiene el potencial de reemplazar completamente el diesel fósil. A diferencia de las otras cosechas de aceite, las microalgas crecen rápidamente y muchas tienen un contenido alto de aceite. El contenido de aceite en microalgas puede exceder 80% del peso de la biomasa seca. Además, las microalgas comúnmente doblan su biomasa en un intervalo de 24 horas.

### **3.4. Las ventajas de las microalgas**

Según algunos especialistas, existe una mayor ventaja comparativa en la utilización de las algas para la producción de biodiesel con respecto a las plantas verdes. Esta ventaja reside en la capacidad de acumular lípidos pero también en su alta rendimiento fotosintético.

Estas propiedades permiten alcanzar un potencial productivo (en términos de producción de aceite por hectárea por año) que es mucho más alto que los de colza o girasol, como se puede ver en la Tabla 4.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Este rendimiento fotosintético muy elevado que caracteriza las microalgas corresponde a la relación entre la energía luminosa incidente y la energía acumulada en la planta. En condiciones óptimas, estudios en laboratorios estiman que se necesitan 10 moles de fotones para fijar un mole de  $\text{CO}_2$ . La teoría de la fotosíntesis afirma que 8 moles de fotones son necesarios para activar sucesivamente los fotosistemas. Los dos moles de fotones suplementarios se invierten por las necesidades mínimas de energía de la célula y las diferentes pérdidas inevitables.

Si se considera que en medio un mol de carbono en la célula corresponde a una energía de 475kJ, y que un mol de fotones a una energía media de 217kJ, el rendimiento teórico medio es de 22%. Sin embargo, solo 45% del espectro solar es explotable por los fotosistemas. Entonces el rendimiento máximo de la fotosíntesis con respecto a la luz solar es 9,9%.

Estos rendimientos importantes tienen como primera consecuencia unas tasas de crecimiento celulares muy elevadas, y una fuerte productividad por hectárea. Las microalgas, puestas en ciertas condiciones de cultivo doblan su biomasa dentro de 24 horas, la cosecha de microalga se realiza diariamente no anualmente. Esto es la primera ventaja destacable de la utilización de las microalgas como fuente de producción de aceite para la producción posterior de biodiesel.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Microalga	Tasa de crecimiento máxima (día <sup>-1</sup> )	Tiempo de duplicación (día)
<b>Botryococcus braunii</b>	0,20	3,40
<b>Chlamydomonas reinhardii</b>	3,80	0,18
<b>Chlorella vulgaris</b>	1,84	0,37
<b>Dunaliella tertiolecta</b>	3,50	0,20
<b>Isochrysis galbana</b>	2,0	0,34
<b>Navicula muralis</b>	2,63	0,26
<b>Pleurochrysis carterae</b>	0,65	1,10
<b>Rhodomonas salina</b>	0,60	1,15
<b>Spirulina platensis</b>	0,50	1,38
<b>Thalassiosira pseudonana</b>	2,48	0,27

Tabla 4: Tasa de crecimiento máxima de microalgas y tiempo de duplicación. [“La production de biocarburant lipidique avec des microalgues: promesses et défis.”, J.P.Cadoret y O.Bernard, 2008].

Las algas tienen una mucha mayor capacidad de absorber CO<sub>2</sub> con respecto a las plantas verdes, sin sufrir la inhibición del proceso fotosintético bajo condiciones de intensa incidencia lumínica. Naturalmente, la producción de microalgas tiene como característica la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Finalmente, el agua utilizada en los cultivos de microalgas puede ser salada o dulce. Si es salada, la concentración de sales puede ser dos veces la concentración de agua marina.

### **3.5. Contenido de aceite en las microalgas.**

Como ha sido mencionado anteriormente, las algas verdes tienen un importante contenido de lípidos. La gran capacidad de las algas de aumentar su tamaño poblacional a una elevada velocidad, junto con su alto contenido de lípidos hace que las algas son fuentes ideales para la producción de biodiesel.

El rendimiento en aceite de las microalgas depende de la especie de microalga.

La tabla siguiente expresa el contenido en aceite (% en base a peso seco).



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

Microalga	Contenido de aceite ( % en base a peso seco)
<b>Botryococcus braunii</b>	29-75
<b>Chlorella protothecoides</b>	15-55 <sup>1</sup>
<b>Chlorella sp</b>	28 - 32
<b>Cyclotella DI-35</b>	42
<b>Dunaliella tertiolecta</b>	71.4 <sup>2</sup>
<b>Hantzschia DI-160</b>	66
<b>Isochrysis sp.</b>	7-33
<b>Nannochloris</b>	6-63
<b>Nannochloropsis</b>	31-68
<b>Neochloris oleoabundans</b>	35-54
<b>Nitzschia sp</b>	45-50
<b>Phaeodactylum tricornutum</b>	31
<b>Pleurochrysis carterae</b>	32-35 <sup>3</sup>
<b>Scenedesmus TR-84</b>	45
<b>Stichococcus</b>	9-59
<b>Tetraselmis suecica</b>	15-32
<b>Thalassiosira pseudonana</b>	21 -31 <sup>4</sup>

Tabla 5: Contenido en aceite de las microalgas (% en base a peso seco). [Sheehan y al. 1998 (salvo para <sup>1</sup> Xu (2006), <sup>2</sup> Takagi y (2006), <sup>3</sup> Moheimani & Borowitzka (2006), <sup>4</sup> Brown (1996)).]

A pesar de que los lípidos se producen naturalmente por las algas, bajo ciertas condiciones, su producción puede ser estimulada y se pueden obtener concentraciones mayores en lípidos. Normalmente, esto ocurre cuando las células son expuestas a condiciones de stress, en condiciones anoxias, con bajas densidades de nutrientes como el fósforo o el nitrógeno, o con temperaturas o



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

niveles de incidencia de luz extremos. De hecho, como mecanismo de supervivencia, las células aumentan considerablemente el almacenaje de lípidos ya que no se detiene la fijación de dióxido de carbono.

El método artificial más común para inducir el almacenaje de lípidos es disminuir el suministro de nitrógeno, lo cual produce que las células detengan su división y comienzan a almacenar su energía en forma de lípidos.

Sin embargo, estas condiciones de fuerte productividad no pueden ser mantenidas durante un tiempo largo ya que conducen a menudo a un paro del crecimiento, y después un tiempo, al autoconsumo de las reservas de lípidos producidos.

La optimización de la productividad en lípidos debe pasar por un compromiso entre el crecimiento (entonces sin carencia) y producción de aceite (con un stress ralentizando el crecimiento).

Aunque no puede decirse que haya una especie de algas que sea la mejor para la producción de biodiesel, se puede afirmar que las diatomeas y las algas verdes son las que resultan más prometedoras. En cualquier caso conviene seleccionarlas entre las especies locales teniendo siempre en cuenta el medio en el que se va a realizar su cultivo.

Para este estudio es necesario elegir una especie de microalga que luego servirá para la extracción de aceite. La realización y la eficiencia de las varias etapas en el proceso de producción de biodiesel son altamente dependientes de la composición química de la microalga.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

La microalga *chlorella vulgaris* que contiene 30% de lípidos en base a su peso seco, ha sido una de las microalgas más utilizadas, sobre la cual se puede encontrar datos relevantes y fiables, de hecho es la microalga que fue elegida para este proyecto.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

# 4.

## Proceso general de producción de biodiesel a partir de las microalgas



## Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

### 4.1. Esquema del proceso de producción de biodiesel a partir de las microalgas

La producción de biodiesel a partir de las microalgas es un proceso conformado, en términos generales, por las etapas elementales de producción de biomasa rica en lípidos, recuperación o cosecha de la biomasa, extracción de los lípidos y transesterificación, como se indica en la Figura 1.

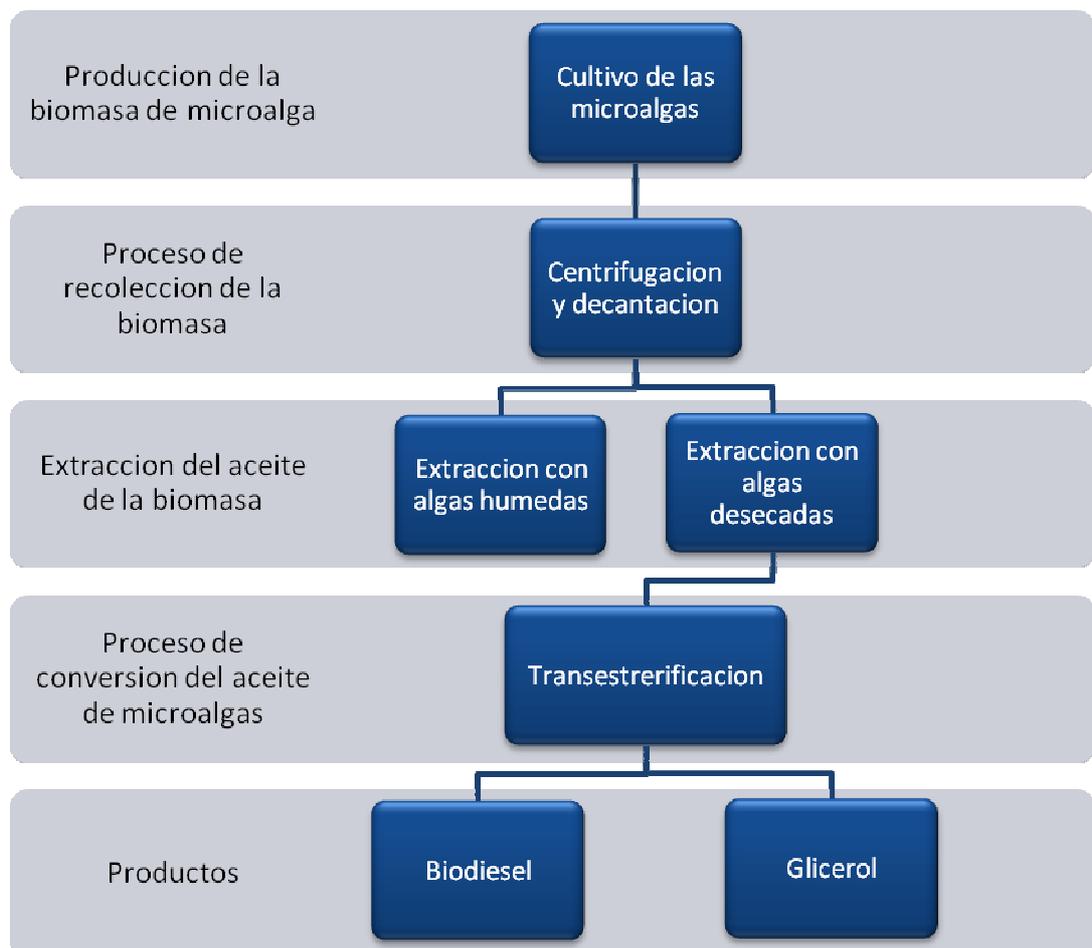


Figura 1: Esquema general del proceso de producción de biodiesel a partir de las microalgas. [Elaboración propia].



## **4.2. Producción de la biomasa de microalgas**

### **4.2.1. Métodos de cultivo de la Chlorella Vulgaris**

La selección del sistema de cultivo es un otro factor clave que afecta de manera significativa la eficiencia y el costo-eficiencia del proceso de producción de biodiesel.

Los únicos métodos practicables de producción de microalgas a gran escala son el cultivo en estanques y en fotobiorreactores.

#### **4.2.1.1. Cultivo de microalgas en estanques**

El cultivo de microalgas en estanques ha sido utilizado desde los años 1950.

Un estanque está hecho de un canal de recirculación en curva cerrada que normalmente tiene una profundidad de 0,3 metros. Los estanques se componen de piscinas descubiertas expuestas al sol. La mezcla y la circulación están producidas por una rueda de pédalo.

Durante el día, el cultivo está alimentado continuamente por la rueda de pédalo donde el flujo empieza. En los estanques, el enfriamiento se hace solo por evaporación. La temperatura fluctúa dentro del ciclo diurno y estacional. Las pérdidas en agua pueden ser importantes. La productividad puede ser afectada por una contaminación de algas no deseadas. La concentración en biomasa se reduce



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

porque los estanques no tienen una agitación adecuada y no son sostenibles en condiciones de baja luminosidad.

El cultivo en estanques parece menos costoso que los fotobiorreactores, porque cuestan menos de construir y operar. Aunque los estanques son de costo bajo, tienen una baja productividad en biomasa comparado a los fotobiorreactores.

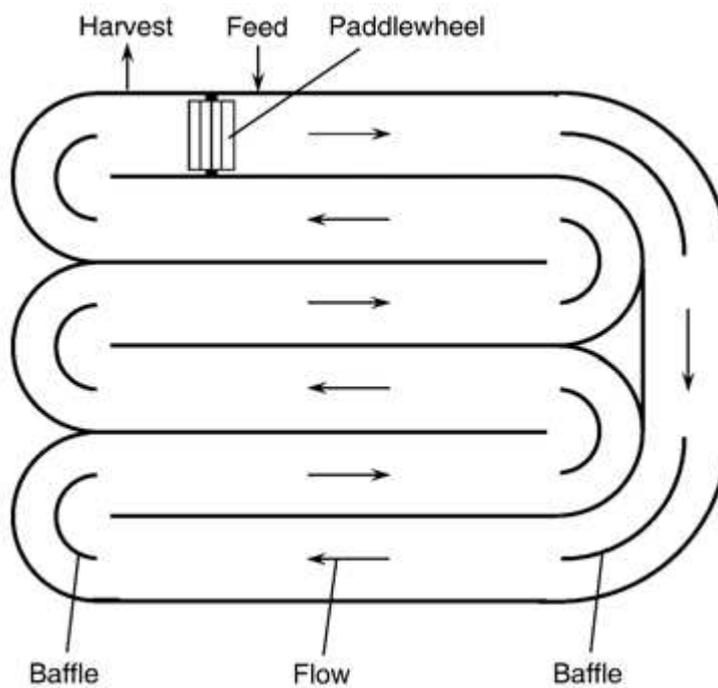


Figura 2: Un estanque tipo circuito [Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae", 2007]



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.



Figura 3: Foto de un cultivo de microalgas en estanques. [www.biodisol.com].

#### 4.2.1.2. Cultivo de microalgas en fotobioreactores

A diferencia de los estanques, los fotobioreactores permiten un cultivo de especies únicas de micro algas sin contaminaciones.

Un fotobioreactor tubular consiste en tubos rectos transparentes en plástico o vidrio en el que se hace circular de forma horizontal un medio de cultivo. Los tubos colectores de sol miden generalmente 0,1m como máximo de diámetro. El diámetro del tubo está limitado por la luminosidad que se puede alcanzar en la zona central de forma que es necesario alcanzar una luminosidad uniforme para asegurar una alta productividad en biomasa. El caldo de microalgas circula desde un depósito al colector solar y regresa al mismo lugar.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

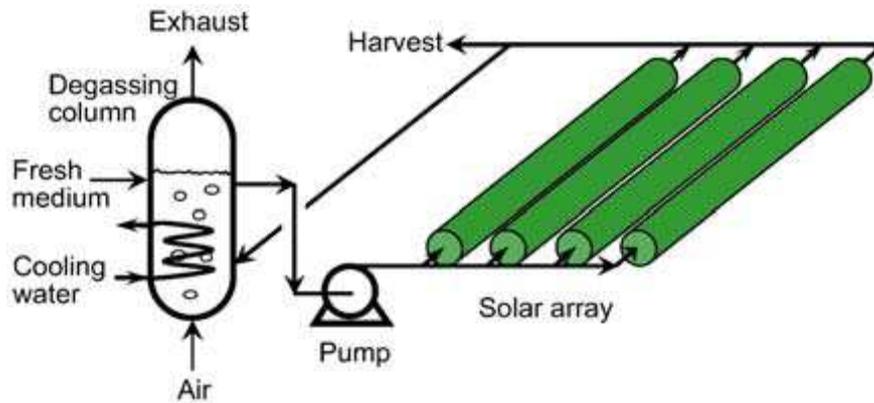


Figura 4: Un fotobioreactor tubular con tubos horizontales paralelos. [Y.Chisti, Biotechnology Advances 25, 2007]



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**



Figura 5: Foto de un fotobioreactor tubular vertical. [[www.algaegeek.com](http://www.algaegeek.com)].

El colector solar está orientado para maximizar la captura de la luz del día. En una disposición típica, los tubos solares están dispuestos paralelamente entre ellos. Los tubos están siempre orientados Norte – Sur. El suelo debajo del colector



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

solar esta a menudo pintado en blanco, o cubierto de hojas blancas de plástico para incrementar reflexión.

Se impide la sedimentación de la biomasa en los tubos manteniendo un flujo turbulento, producido por una bomba que puede ser mecánica o mediante un impulso de aire.

La fotosíntesis genera oxígeno. En una alta irradiación, el rendimiento máximo de generación de oxígeno en un fotobiorreactores tubular típico puede ser  $10 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ min}^{-1}$ . Una concentración alta del oxígeno disuelto en combinación con una alta luminosidad produce un daño foto-oxidativo a las células de las algas. Para prevenir la inhibición y este daño, el máximo nivel de oxígeno disuelto no debe exceder alrededor de 400% del valor de la saturación del aire. El oxígeno no puede ser eliminado dentro del tubo del fotobiorreactor. Eso limita su longitud máxima condicionada por el oxígeno necesario. El cultivo debe periódicamente regresar a la zona de desgasificación (ver la Figura 4) en donde se elimina el oxígeno mediante burbujeo con aire. Típicamente, un tubo continuo su longitud no debe exceder de 80m.

Cuando el caldo se mueve dentro del tubo del fotobiorreactor, el consumo de carbono provoca el aumento del pH. Adicionalmente, pueden ser necesarias inyecciones de dióxido de carbono a intervalos dentro de los tubos para prevenir la limitación del carbono y el incremento excesivo del pH.

Los fotobiorreactores requieren ser enfriados durante las horas de la luz del día. Es necesario el control de la temperatura por la noche. Se puede reducir. La pérdida de la biomasa de noche debido a la respiración bajando la temperatura en ese periodo. Los fotobiorreactores exteriores se pueden enfriar de manera efectiva y económica utilizando un intercambiador de calor.



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

#### 4.2.1.3. Comparación entre los fotobioreactores y los estanques

Seleccionar un método de producción de biomasa de microalgas apropiado requiere una comparación de las capacidades de los estanques y de los fotobioreactores.

Variable	Fotobioreactores	Estanques
Producción de biomasa anual (kg)	100 000	100 000
Productividad volumétrica ( $\text{kg m}^{-3}\text{d}^{-1}$ )	1,535	0,117
Productividad en superficie ( $(\text{kg m}^{-2}\text{d}^{-1})$ )	0,048	0,035
Concentración de la biomasa en caldo ( $\text{kg m}^3$ )	4,00	0,14
Índice de dilución ( $\text{d}^{-1}$ )	0,384	0,250
Superficie necesaria ( $\text{m}^2$ )	5681	7828
Rendimiento en aceite ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ )	136,9 <sup>a</sup> /58,7 <sup>b</sup>	99,4 <sup>a</sup> /42,6 <sup>b</sup>
Sistema geométrico	132 tubos paralelos/unidad; 80m de longitud, 0,06 de diámetro.	976m <sup>2</sup> /estanque; 12m de largo, 82 de longitud, 0,30 de profundidad.
Número de unidades	6	8

Tabla 6: Comparación de los estanques y fotobioreactores. [“Biodiesel from microalgae”, Y. Chisti, 2007].

<sup>a</sup> basado en un 70% de aceite en peso en la biomasa.

<sup>b</sup> basado en un 30% de aceite en peso en la biomasa.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Esta comparación está hecha para una producción anual de biomasa de 100 000 kg. Los dos métodos de producción consumen la cantidad idéntica de carbono dióxido. Los fotobioreactores tienen un rendimiento en aceite por hectárea mucho más grande que los estanques. Eso se puede explicar por la productividad volumétrica de la biomasa de los fotobioreactores que es 13 veces más grande en comparación con los de los estanques. Los dos métodos de producción, con estanque o fotobioreactores son técnicamente viables.

<b>Fotobioreactores</b>	<b>Estanques</b>
<b>Desarrollado a una escala de laboratorio, pero todavía no utilizado a escala, no comercial.</b>	Demostrado a gran escala, pero no a nivel comercial.
<b>Permite el cultivo de especies sin contaminación.</b>	Propensa a contaminación por algas no deseadas.
<b>La pérdida de agua puede ser controlada.</b>	Pérdidas de agua por evaporación.
<b>Puede ser más controlado pero requiere mayores cantidades de energía para mezclar y mantener la temperatura.</b>	Difícil de controlar la temperatura con el día/noche y las variaciones estacionales.
<b>Lleva a soluciones más concentradas en biomasa.</b>	Lleva a soluciones con concentraciones baja de biomasa.
<b>Permite una provisión de nutrientes más fácil y más exacta.</b>	Requiere una cantidad más importante de nutrientes.

Tabla 7: Características de los dos sistemas utilizados para la cultivación de las algas. ["Algae - The future for bioenergy?" IEA Bioenergy Ex Co64 Workshop.]



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

El fotobioreactor tubular parece el más adecuado para producir biomasa de microalgas en la escala necesaria para la producción de biocombustible. Como se puede ver, es el método de cultivo que reúne más ventajas.

Se considera que para este proyecto se utiliza fotobioreactores exteriores, para producir microalga en un cultivo continuo. El índice de dilución es un tercio del volumen del bioreactor por día durante las horas de la luz del día. La temperatura de cultivo debe ser entre 20°C y 30°C.

La concentración de la chlorella vulgaris en el caldo del fotobioreactor es de 3,8 kg m<sup>-3</sup> o 0,5 g. L<sup>-1</sup> en promedio. Se estima el ritmo de producción entre 20 y 30 g.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>.

#### **4.2.2. Materias Primas necesarias para el cultivo de la Chlorella vulgaris**

Para el cultivo de microalgas es necesario tener grandes cantidades de agua, para el crecimiento y la producción de aceite. Las fuentes de agua pueden ser variadas. Pueden ser aguas residuales provenientes del sector agropecuario o urbano, aguas salinas provenientes del mar o aguas dulces de ríos o lagos.

En el proceso de cultivo de microalgas, el agua no está contaminada, es reutilizable en casi su totalidad. La cantidad total de agua necesaria es alrededor de 4 litros por kg de alga seca.



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

Como se ha dicho anteriormente, la acumulación de lípidos en algas se produce durante periodos de stress ambiental, incluyendo crecimiento en medios con bajas condiciones de nutrientes. Para inducir stress en cultivos de para producción de biodiesel una de las estrategias es disminuir la cantidad de compuestos nitrogenados.

En la Tabla 7 se indica el suministro de nutriente y dióxido de carbono para producir 1 kg de microalga *Chlorella vulgaris* en dos métodos de cultivo, uno con una dosis baja de nitrógeno y la otra con una cantidad normal (la Tabla 7).

Parámetro	Normal	Bajo N
Proteínas (g.kg <sup>-1</sup> )	282	67
Lípidos (g.kg <sup>-1</sup> )	175	385
Carbohidratos (g.kg <sup>-1</sup> )	495	529
Valor calefacción (MJ.kg <sup>-1</sup> )	17,5	22,6
Carbono (g.kg <sup>-1</sup> )	480	538
Nitrógeno (g.kg <sup>-1</sup> )	46	10,9
Fosforo (g.kg <sup>-1</sup> )	9,9	2,4
Potasio (g.kg <sup>-1</sup> )	8,2	2
Magnesio (g.kg <sup>-1</sup> )	3,8	0,9
Sufre (g.kg <sup>-1</sup> )	2,2	0,5
Dióxido de carbono (kg.kg <sup>-1</sup> )	1,8	2,0
Ritmo de crecimiento (día <sup>-1</sup> )	0,99	0,77
Productividad (g.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup> )	24,75	19,25

Tabla 8: Composición y parámetros de cultivo de *Chlorella vulgaris* [“Life-Cycle Assessment of Biodiesel production from microalgae”, Laurent Lardon, Arnaud Helias, 2009].



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Se asume que la cantidad total de nutrientes está ajustada para lograr una eficiencia elevada. El nitrógeno se suministra como nitrato cálcico, el fósforo como superfosfato, el potasio como cloruro de potasio y el magnesio como fosfato de magnesio.

El dióxido de carbono se inyecta presurizado en los fotobioreactores.

### **4.3. La recuperación de la biomasa**

La cosecha de la biomasa requiere una o más etapas de separación líquido – sólido. La biomasa puede ser recolectada por centrifugación, filtración o en ciertos casos por sedimentación gravitacional. Estos procesos pueden ser precedidos por una etapa de floculación.

La recolección de la biomasa puede ser problemática ya que las células de las algas tienen una dimensión pequeña (alrededor de 3 a 30  $\mu\text{m}$  de diámetro). La concentración es relativamente pequeña ( $<0,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  de la biomasa seca).

Algunos de los métodos de recolección están indicados en los párrafos siguientes.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **4.3.1. La Floculación**

Las microalgas presentan una carga superficial negativa que evita la agregación de las células en suspensión. Para evitar ese efecto, se añaden compuestos químicos coagulantes o floculantes, que permiten que la carga superficial sea neutralizada. Idealmente los floculantes deberían ser económicos, no tóxicos y efectivos con una baja concentración.

Las sales metálicas son floculantes o coagulantes eficaces. Las sales comúnmente utilizadas incluyen cloruro ferrico ( $\text{FeCl}_3$ ), sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , alumbre) y sulfato ferrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ).

A veces, una floculación eficaz se logra simplemente cambiando el pH del caldo de las algas. La floculación puede ser lograda con valores de pH entre 11,8 y 12, sin añadir otros floculantes. Este método ha separado 95% de la biomasa de las algas de la suspensión. En otros casos, valores extremos de pH puede causar efectos adversos.

La recolección por floculación es un método a menudo demasiado costoso para operaciones de gran escala, y puede ser económicamente no viable.

### **4.3.2. La Centrifugación**

La centrifugación es un método por el cual se pueden separar sólidos de líquidos de diferente densidad mediante una centrifugadora, la cual imprime a la mezcla un movimiento rotatorio con una fuerza mayor que la de la gravedad, provocando la sedimentación de los sólidos o de las partículas de mayor densidad.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

La centrifugación puede ser rápida, lo que implica un consumo grande de energía. La centrifugación es uno de los procesos más ampliamente utilizados porque separa la biomasa de forma eficiente y sin necesidad de añadir compuestos químicos.

#### **4.3.3. La Filtración**

Las prensas de filtro que operan con presión o vacío son satisfactorias para separar algas relativamente grandes como la *spirulina platensis*, pero fallan para obtener organismos que tienen dimensiones bacteriológicas como *chlorella*, *dunaliella* o *scenedesmus*.

Las membranas de micro filtración y la ultrafiltración son alternativas posibles para la separación de microalgas. La micro filtración es adecuada para células frágiles, pero los procesos de producción de biomasa a partir de algas a gran escala generalmente no utilizan este tipo de filtración.

Para una producción a gran escala, la centrifugación es el método más interesante desde un punto de vista económico.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

#### **4.4. Extracción del aceite de las microalgas**

Las etapas de separación de la biomasa y la extracción de los compuestos de interés son de vital importancia ya que pueden constituir una gran parte de los costes del proceso. Para ello, las microalgas deben separarse primero del medio de cultivo en el que se encuentran diluidas, y después extraerse los componentes buscados (aceite) de las células.

El proceso de extracción depende de factores intrínsecos de las microalga como su tamaño o su tipología. En ese estudio, se ha elegido la microalga *Chlorella vulgaris* que contiene 30% de lípidos de su peso seco.

Este proceso de extracción depende también de la tecnología seleccionada para la obtención de aceite, donde se exigen elevados rendimientos de forma económica.

Tanto la separación del aceite como de otros bioproductos de su medio de cultivo, exige la selección de las tecnologías óptimas para tal fin, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

En este párrafo se presenta sucintamente los diferentes métodos de extracción que existen. Posteriormente, se verá con detalle cada método con su valoración de costo para elegir el método mejor económicamente para la producción posterior de biodiesel.

Se puede extraer el aceite de las algas con algas deshidratadas o con algas húmedas.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

La primera opción mecánica es la **extracción mediante prensas**. Las algas deben ser previamente desecadas. Existen varios métodos como el secador solar, el tambor rotativo y el secador spray. Es un método simple que extrae el aceite de las algas secas exprimiéndolas.

El método de extracción con prensa se puede utilizar junto con el método de **extracción con solventes orgánicos** que permite obtener rendimiento grande en aceite.

El segundo método es la **extracción enzimática** donde se utilizan enzimas para degradar las paredes celulares. Es un método puramente químico donde entran muchos factores que pueden afectar la extracción.

La tercera extracción es el método de **extracción con fluidos supercríticos**. En este proceso, se licua el dióxido de carbono y se calienta a presión para que actúe como solvente en la extracción de aceites.

El último método es la **extracción con ultrasonidos**. Un aparato de ultrasonido se utiliza para crear burbujas de cavitación en el solvente. La explosión de estas burbujas en las proximidades de las paredes celulares puede provocar su ruptura y la liberación del aceite que contiene.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **4.4. Conversión en Biodiesel**

Desde un estricto punto de vista, el biodiesel es exclusivamente el éster metílico producido a partir del aceite extraído de las microalgas.

La reacción química como proceso industrial utilizado en la producción de biodiesel es la transesterificación (también llamada alcoholisis) aunque también sea también posible obtenerlo por esterificación.

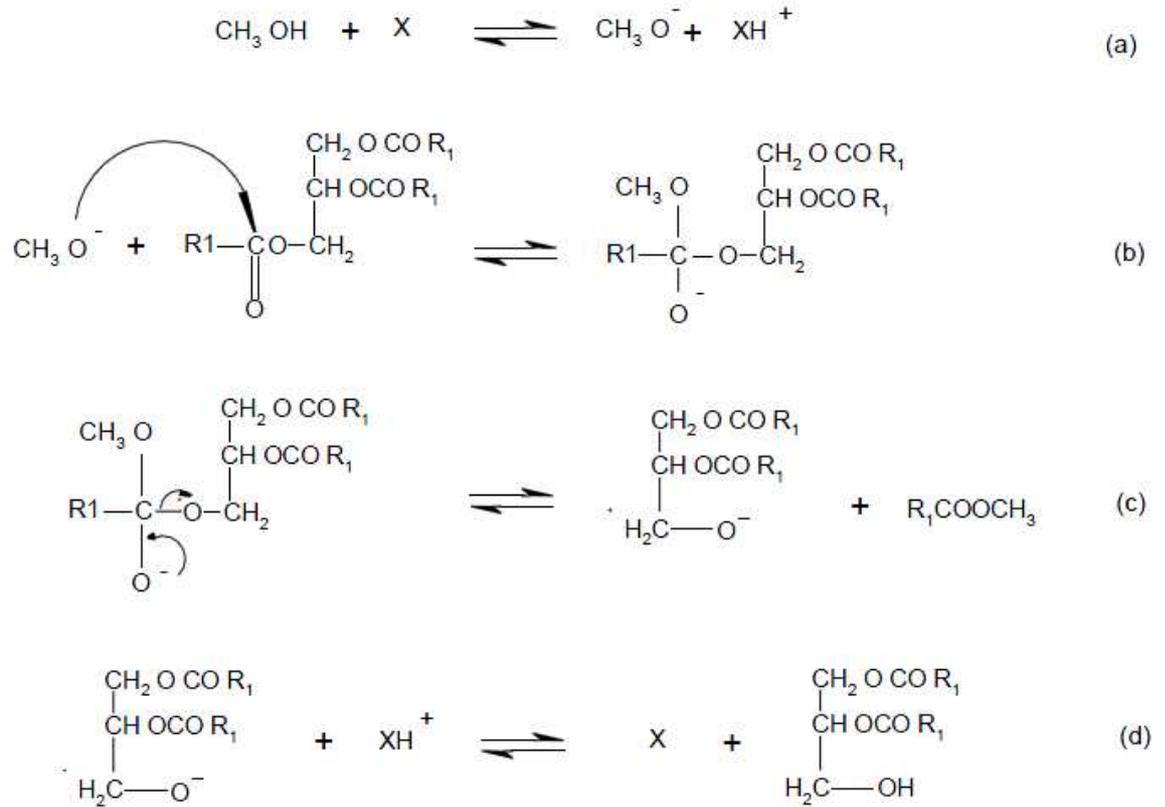
La transesterificación consiste en la reacción de los aceites (triglicéridos) con un alcohol de bajo peso molecular que es casi siempre metanol en presencia de un catalizador alcalino que es generalmente el hidróxido de sodio NaOH, para producir metilesteres y glicerina.

Se mejora la velocidad de la reacción con un catalizador y consiguientemente su rendimiento final.

Normalmente se trabaja a presión atmosférica y temperatura de unos 65°C. Es necesaria una agitación rápida y constante para una correcta mezcla en el reactor del aceite, el catalizador y el alcohol. Hacia el fin de la reacción, la agitación debe ser menor para permitir que el glicerol se separe de la fase éster. La transesterificación consta de tres reacciones consecutivas y reversibles (figura 6) y se desarrolla en una proporción molar de alcohol a triglicérido de 3 a 1.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**



R1 = radicales alquilo , X = catalizador

Figura 6: Mecanismo de reacción de transesterificación. [“Transesterification of Vegetable Oils”. J. Braz. Chem Soc. Vol. 9 N° 1 ].

El primer paso (a), el alcohol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) reacciona con el catalizador básico.

R1 es el grupo alquílico que forma parte de la cadena del ácido graso del triglicérido.



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

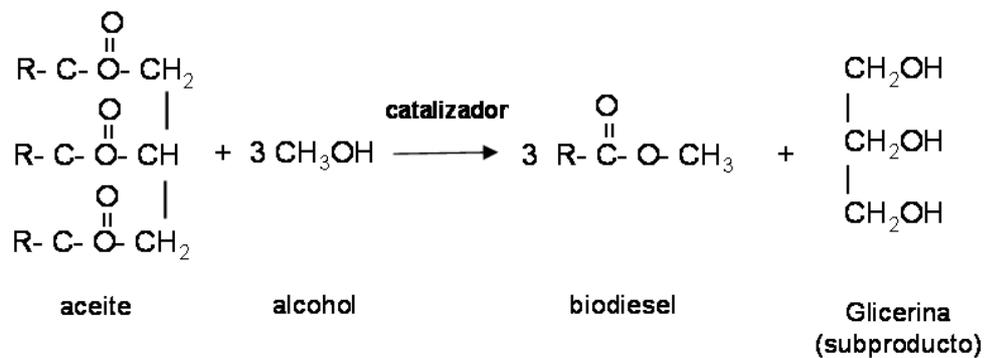
En el segundo paso (b), el radical cargado negativamente ( $\text{CH}_3\text{O}^-$ ) reacciona con el doble enlace del grupo carbonilo del triglicérido.

En el paso (c) se forma una molécula de ester alquílico ( $\text{R1COO CH}_3$ ). En este caso, se trata del metilester.

En el paso (d) se regenera el catalizador formándose un diglicérido.

Las pasos (a) y (d) se repiten hasta la desaparición del triglicérido con la formación del monoalquilester y glicerina como productos finales.

La expresión general de la estequiometría molar de la transesterificación con metanol es la siguiente:



El alcohol que se utiliza generalmente es el metanol, por ser el más económico.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

El subproducto originado, la glicerina se separa del biodiesel. Tenía un valor económico añadido que podía compensar una parte de los gastos porque se podía utilizar para la fabricación de cremas para las manos, jabones, pastas dentífricas, lubricante. El exceso de producción puede cuestionar actualmente esta afirmación.

El rendimiento final que se suele obtener es alrededor de 95%.

Después del refinado, el biodiesel puede ser utilizado como biocombustible. Su naturaleza química no contiene azufre, no es tóxico y es altamente biodegradable.

En la fabricación de los metilésteres, una etapa fundamental después de la reacción, es la de separación del producto principal del resto de subproductos que se encuentran en el medio, especialmente, de la glicerina y el metanol residual. En el proceso convencional, se hace usualmente mediante un lavado con agua, y una destilación del producto final.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

# 5.

## Los diferentes métodos de extracción del aceite de las microalgas

---



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **5.1. Introducción**

Después del proceso de filtración o centrifugación, la biomasa de microalgas pasa por el proceso de extracción de aceite.

Esta etapa del proceso de producción de biodiesel tiene un papel muy importante ya que representa una parte significativa del costo total de producción de biodiesel. La viabilidad y la rentabilidad de una planta de producción de biodiesel dependerán en gran parte del proceso de extracción de aceite que ha elegido.

Como ha sido mencionado anteriormente, esta parte se centra en la descripción y en la comparación de los diferentes métodos de extracción de los lípidos de las microalgas.

Para cada método de extracción del aceite de las microalgas, se hace una breve descripción del proceso y del equipo utilizado con una referencia a la empresa que ha proporcionado la información. Además, para cada parte se analiza la rentabilidad en la extracción del aceite y por fin el costo del equipo y su consumo energético.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

## **5.2. Proceso de extracción mecánica a partir de algas desecadas.**

### **5.2.1. Proceso de deshidratación de las algas.**

Esta etapa de extracción de aceite puede ser precedida por una etapa de deshidratación, como es en el caso de la extracción mecánica con prensa. En los otros métodos, la biomasa de microalgas se utiliza directamente.

La deshidratación de las microalgas se puede hacer al sol utilizando un secador solar, con un secador spray, o con un tambor rotativo. Estos son los métodos más utilizados para el secado de las microalgas. Se obtiene un producto seco y duro que se puede guardar indefinidamente.

Posteriormente, se analizan esos tres métodos, con el fin de ver cuál es el más ventajoso teniendo en cuenta su rendimiento y costo, para una planta de producción de biodiesel que se ubicaría en el sur de España.

Es importante encontrar el balance entre la eficiencia del secado y la relación costo-rendimiento par maximizar el rendimiento final en aceite.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **5.2.2. Equipos de deshidratación de las algas.**

#### 5.2.2.1. El Secador Spray

##### 5.2.2.1.1. Descripción del proceso

El secado por spray (o atomización) es un método aplicado para secar o formar partículas con soluciones acuosas u orgánicas, emulsiones, en química industrial y en la industria alimentaria. El secado por spray se puede utilizar para conservar los alimentos o simplemente como un método de secado rápido.

El secado spray comienza con la atomización del líquido de alimentación en un rocío de gotas en spray. Luego, dichas gotas son puestas en contacto con una corriente de aire caliente en la cámara de secado. El spray es producido por una tobera de atomización. La evaporación de la humedad de las gotas y la formación de partículas secas ocurre en condiciones controladas de temperatura y flujo de aire. El polvo se descarga continuamente en la cámara de secado y también se recuperan los gases de escape por medio de un ciclón. El proceso completo generalmente no dura más que unos pocos segundos.

Existe una gama muy amplia de productos que utilizan el sistema de secado por spray, que mantiene las propiedades físico-químicas de los productos y que en algunos casos llega a mejorar esas propiedades. Los ejemplos más comunes de productos son leche en polvo, sopas instantáneas, detergentes, etc.

El secador spray es también usado para la preservación de los alimentos. Mediante este proceso simple y ultrarrápido, se consigue secar los sólidos solubles, con la más alta calidad, preservando las características esenciales de los



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

mismos. Este proceso también ofrece ventajas en la reducción de los pesos y volúmenes.

**5.2.2.1.2. Descripción del equipo**



Figura 7: Foto de un secador spray de la empresa ICF & WELKO.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

El producto se encuentra alojado en el tanque de alimentación (1). Se impulsa a través de un filtro (2) por la bomba (3) por el conjunto de tuberías y accesorios hasta el atomizador (5).

El quemador del horno (8) y su cámara (7) proveen la temperatura necesaria para el corriente de aire caliente, que forzada por el ventilador (15), circula a través del dispersor (10) distribuyéndose uniformemente alrededor del disco del atomizador del cual fluye el líquido pulverizado.

El líquido pulverizado choca con el aire caliente, produciéndose el secado de forma casi instantánea debido al tamaño de la gota. Cae en forma de polvo en el interior de la cámara de secado (11), siendo aspirado por el ventilador (15) llevado por la tubería de interconexión (16) hasta el ciclón (13) que es encargado de separar el polvo del aire y extraerlo en forma de producto terminado. El producto sale mediante una válvula rotatoria (14).



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

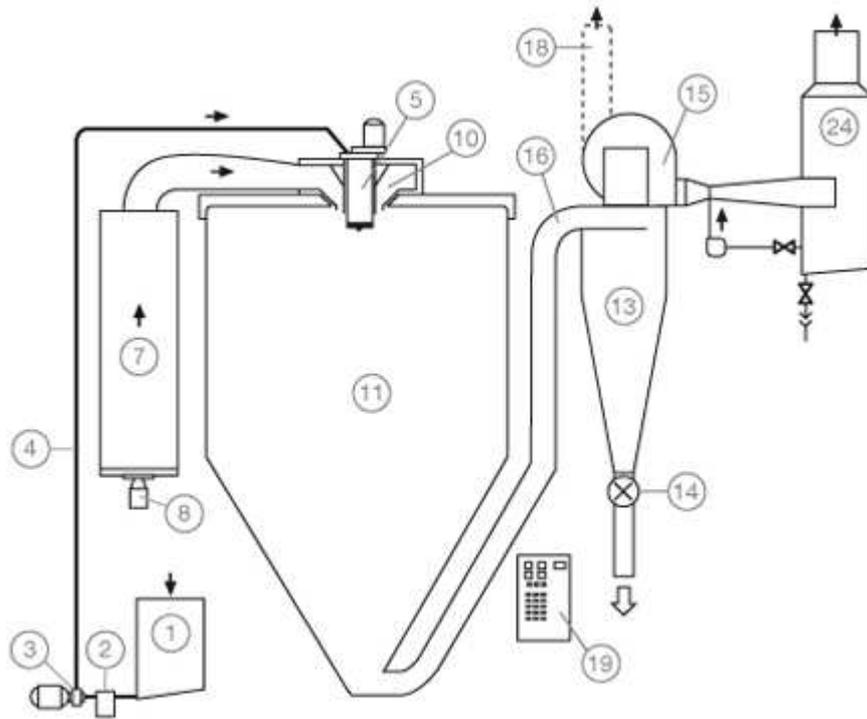


Figura 8: Esquema del funcionamiento de un secador spray [Secador Spray Galaxie 2520].

El secador spray tiene la ventaja de tener un alto rendimiento de secado, alrededor de 95%, y el proceso de deshidratación de las microalgas es ultrarrápido.

Sin embargo, el coste del equipo es elevado y su consumo importante.

Como ejemplo, un secador spray de la empresa GEA Process Engineering de una capacidad de producto final de 265 kg/hora, tiene las características siguientes.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

<b>Costos</b>	<b>Secador Spray</b>
<b>Coste equipo</b>	45 000 €
<b>Coste energético</b>	80 kWh es decir 4,80€/hora
<b>Coste componentes</b>	105kg/h de combustible a 0,50€/kg es decir 52,5€/hora
<b>Porcentaje de humedad vaporizado</b>	95%

Tabla 9: Características del equipo del secador spray de la empresa GEA Process Engineering.

#### 5.2.2.2. El Tambor Secador

##### 5.2.2.2.1. Descripción del proceso

El principio de este método de secado es la aplicación de soluciones acuosas en un rotador, preferiblemente chapado con cromo, en un tambor climatizado. La materia que tiene que ser secada y se calienta durante algunos segundos y se produce la consiguiente deshidratación que origina la apertura de la pared celular.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

**5.2.2.2.2. Descripción del equipo**



Figura 9: Tambor rotatorio doble de la empresa Buflovak.

El tambor secador se compone de uno o dos cilindros horizontales de cromo, un bastidor soporte, un sistema de alimentación del producto, una espátula y auxiliares. La estructura típica de un solo tambor (imagen a) o de uno doble t (imagen b) se muestran en la Figura 10. El diámetro de tambores típicos fluctúa entre 0,5m a 6 m y su longitud entre 1m y 6m.



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

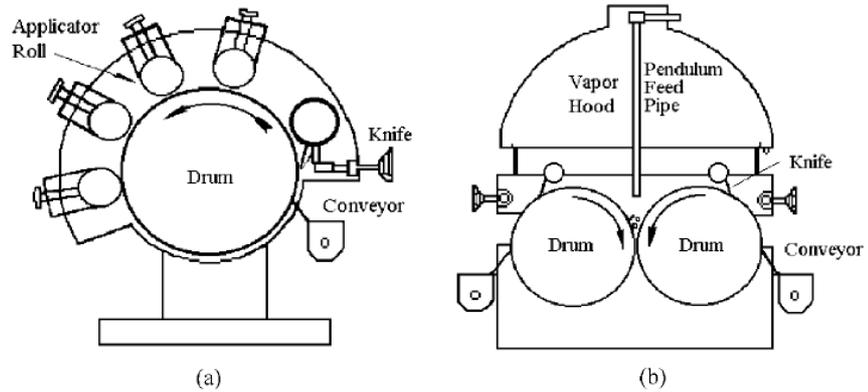


Figura 10: Tambor singular y doble tambor. [www.kpmtechnology.com].

El método de aplicación del producto dentro del tambor depende de la viscosidad del producto y de su concentración.

Las dificultades encontradas con el método de alimentación utilizado para las algas están relacionadas con el balance de alimentación del producto. Si el ritmo de alimentación es demasiado rápido, el producto empezara a hervir antes de que este pegado al tambor y se secará, lo que puede provocar un calentamiento parcial y la destrucción de algas.

Un único tambor rotativo de la Empresa Co. Qingdao machines ORB con una capacidad de 417kg/hora tiene, por ejemplo, las características siguientes.

Costos	Secado con tambor rotativo
Coste equipo	33 600€
Coste energético (consumo)	42 kWh es decir 2,52€/hora
Coste componentes	/
Porcentaje de humedad vaporizado	70%

Tabla 10: Características del equipo de tambor rotatorio de la Empresa Co. Qingdao machines ORB.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Aunque el tambor secador tiene unos altos costes costos de inversión y de consumo energético, es una alternativa fiable para producir un producto bacteriológico seguro. Sin embargo, para las microalgas el porcentaje de deshumectación no es suficiente ya que para la extracción posterior de aceite con la prensa, requiere que un mínimo 90% de secado.

#### 5.2.2.3. El Secador Solar

##### 5.2.2.3.1. Descripción del proceso

La desecación es un sistema muy antiguo de conservación de alimentos.

El proceso de secado puede ser aplicado a todo tipo de alimentos, desde vegetales y hortalizas hasta carnes y pescados, pasando por frutas, especias, hierbas aromáticas, setas, etc.

Cuando se habla de secado solar, se entiende el uso de la radiación solar como una fuente de energía para el proceso de secado.

##### 5.2.2.3.2. Descripción del equipo

Existen dos tipos de secadores solares. Uno es el secador solar indirecto en donde la radiación solar es captada por un colector por donde circula una cierta cantidad de aire. Este flujo de aire se calienta e ingresa a la cámara de secado en donde se encuentra el producto que se va a secar. El aire caliente pasa por el producto eliminando el contenido de humedad de la cámara.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

La otra forma de secado es el secado directo. En este caso la radiación solar incide directamente por el producto a secar, adquiriendo así la energía de evaporización necesaria. Luego, se elimina por el aire tomado del exterior la humedad formada en los alrededores del producto.

La radiación solar directa provoca la degradación de la clorofila de la masa de alga, obteniéndose un producto de mejor color. Del otro lado, la radiación solar directa puede provocar que la masa de alga se recaliente. Este método depende fuertemente de la climatología.

En el segundo caso de radiación solar indirecta, no se recalienta la masa de algas, y la velocidad del secado es mayor pero el producto final es menos atractivo y su coste es mayor. Hoy en día, es el método más utilizado para la deshidratación de las algas.

La inversión inicial para el equipo necesario para el secador solar propuesto por la Empresa Arkatechnology es 17 500€ para un secador solar industrial de 40m<sup>2</sup>.

En el caso del secador solar indirecto, el único consumo de energía que se tiene durante el proceso es el consumo de los ventiladores y el calentamiento del aire necesario para evaporar el agua contenido en las microalgas.

Si se considera que el secador solar está puesto en el sur de España, considerando la irradiación solar a lo largo del año, se estima que en promedio se puede secar 2400 kg de biomasa en 16 horas con el tamaño del secador industrial propuesto. Esto representa un consumo medio de energía de 10 kWh, lo cual representa un costo aproximado de 0,60€/hora.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

<b>Costos</b>	<b>Secador solar</b>
<b>Coste equipo</b>	17 500€
<b>Coste energético (consumo)</b>	0,60€/hora
<b>Coste componentes</b>	/
<b>Rendimiento en des humectación</b>	90%

Tabla 11: Características del secador solar de Arkatechnology.

El secador solar es probablemente el método de deshidratación menos costoso utilizado en esta etapa. Sin embargo, este método es lento y requiere una superficie de secado grande.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **5.2.3. Extracción mecánica del aceite de algas desecadas.**

#### **5.2.3.1. Descripción del proceso**

Cuando las algas están secas retienen el aceite, que puede ser extraído con una prensa de aceite. Muchas empresas de aceite vegetal utilizan una combinación mecánica y solventes químicos para la extracción del aceite.

#### **5.2.3.2. Descripción del equipo**

La prensa extrae el aceite mecánicamente mediante fricción lo que da lugar a una generación de calor. El aceite producido se desliza por las superficies metálicas. El rendimiento depende de la presión que se ejerza.

La presión interna en una prensa es de 2800 a 3000 kg/cm<sup>2</sup>, que produce el consiguiente desgaste. En el aceite se puede encontrarse material de desgaste de hierro, en el producto final en pequeñas cantidades.

Aquí se presenta una prensa de la Empresa Alvan Blanch de Inglaterra.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**



Figura 11: Foto de la prensa modelo XP 100 de extracción de aceite de Alvan Blanch.

La prensa tiene grandes posibilidades de ajustes.

La prensa procesa alrededor de 150 kg materia por hora. Se puede ajustar la presión en la cámara de prensado mientras que está en marcha.

Dispone de una serie de sensores que interrumpen la operación cuando existe un impedimento. Esto puede ser muy interesante para una máquina que está diseñada para estar en marcha las 24 horas por día todos los días del año.

La máquina dispone de un motor, imanes en las entradas, posibilidad de precalentar la semilla a una temperatura determinada para mantener una producción bien definida y estable.

Las características de esta máquina se indican en la tabla siguiente.



## Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

Costos	Extracción con Prensa
Coste equipo	11 940€
Coste energético	9,2 kWh es decir 0,55 €/hora
Coste componentes	/
Rendimiento en aceite	65%

Tabla 12: Características de la prensa XP 100 de extracción de aceite de Alvan Blanch.

Mientras que no existan otros procesos más eficientes, el más simple es usar una prensa para extraer un porcentaje entre 65 y 70% del aceite de algas.

### 5.2.4. Extracción con solventes orgánicos de las algas desecadas

#### 5.2. 4.1. Descripción del proceso

La extracción con el método de expeler/exprimir puede usarse solo o combinado con la extracción con solventes orgánicos.

Se puede extraer aceite de las algas usando productos químicos. Los dos métodos comúnmente utilizados son la extracción con solventes orgánicos y la extracción Soxhlet que es más utilizada a nivel laboratorio.

Se han utilizado benceno y éter, pero la sustancia química más empleada para la extracción con solvente es el ciclohexano, que es relativamente barato.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

La extracción con solventes es básicamente un proceso de difusión de un solvente en las células que contienen aceite como materias prima, dando como resultado una solución de aceite en solvente.

Después de que el aceite se haya extraído por el método de expeler/ exprimir, se mezcla la pulpa restante con ciclohexano para extraer el aceite residual. El aceite se disuelve en el ciclohexano, y la pulpa se elimina de la solución. Se separan el aceite y el ciclohexano por destilación. El disolvente recuperado se recicla para volver a ser utilizado y la biomasa residual se puede dedicar a fines energéticos, alimentación animal o como materia prima para extracción de otros compuestos de valor añadido. De esta forma, si se emplea un disolvente adecuado se producirá un aceite muy similar al obtenido a partir de los cultivos vegetales que a se utilizan para la producción de biodiesel.

La desventaja de la utilización de solventes para la extracción de aceites es el peligro inherente al trabajar con productos químicos. Los solventes químicos presentan riesgos de explosión.

Estas dos etapas, extracción con prensa y la extracción con solventes orgánicos, serán capaces de sacar más del 95% del aceite total presente en las algas.

#### **5.2. 4.2. Descripción del equipo**

Se considera que es necesario 1,5 kg de solventes (ciclohexano) para tratar 1kg de microalgas después de la extracción de aceite por prensado.

El Grupo AGICO oferta el equipo completo con mezclador, filtrador y destilador a un precio de 16 542 € para una capacidad de 150 kg de biomasa por hora. Se ha solicitado información de una maquina con la misma capacidad que la



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

prensa de extracción. El coste en ciclohexano necesario al principio para poner en marcha la máquina está incluido en este precio. Se pierde alrededor de 0,05kg del solvente para cada kilo de biomasa. El resto se recicla. Entonces para cada hora se debe añadir 10,5 kg de ciclohexano a un precio de 0,91€/kg, es decir 9,56€/hora de ciclohexano.

<b>Costos</b>	<b>Extracción con solvente orgánico</b>
<b>Coste equipo (mezclador, filtrador, destilador)</b>	16 560 €
<b>Coste energético</b>	67kWh €/h es decir 4,02€/h
<b>Coste componentes</b>	0,91€/kg de ciclohexano ICIS Pricing (feb.2010)
<b>Rendimiento en aceite</b>	95% (junto con la prensa)

Tabla 13: Características del equipo para la extracción con solventes del Grupo AGICO.

## **5.3. La extracción enzimática**

### **5.3.1. Descripción del proceso**

La extracción enzimática se apoya en la utilización de agua como disolvente y en enzimas que degradan las paredes celulares para facilitar la separación del aceite y de las proteínas. El aceite que se encuentra dentro de células de las algas, está vinculado con una importante cantidad de carbohidratos



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

como almidón, celulosa, y pectinas. El contenido de la célula está rodeado por una pared espesa que debe ser abierta para que se liberen las proteínas y el aceite. Después de la apertura por degradación enzimática, se utiliza vapor para el fraccionamiento de los componentes.

Las enzimas utilizadas pueden ser celulasa o glicoproteinasa. La celulasa es la enzima que se encarga de la descomposición de la celulosa de las plantas. La celulosa es un polisacárido que forma la membrana de las células vegetales y que constituye la principal materia estructural de los vegetales, especialmente las paredes. La glicoproteinasa provee las mismas funciones que la celulasa pero es más efectivo en las paredes celulares de las microalgas, cuya estructura contiene más glicoproteínas que celulosas.

Este método, que se llama “hidrólisis enzimática”, es ventajoso porque no genera productos tóxicos durante el proceso productivo. No se utiliza hexano u otros solventes orgánicos, hay menos riesgos medioambientales. Los productos obtenidos son de calidad superior.

Además, las enzimas pueden ser recicladas y volver a utilizarse en un próximo proceso extractivo. En consecuencia se trata de un proceso mucho menos contaminante, debido a que se obtiene un producto biodegradable con el uso de un reactivo que también es biodegradable.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **5.3.2. Descripción del equipo**

En la actualidad, la hidrólisis enzimática se produce mediante una enzima proveniente de *Cándida* antártica. En Argentina, por ejemplo, han hecho investigaciones para utilizar esta técnica, sin embargo en Argentina no existen empresas que se dediquen a inmovilizar enzima, no queda otro remedio más que importarlas. Inmovilizar enzimas implica aislarlas, por ejemplo, de algún órgano como hígado porcino o producirlas por biotecnología y luego pegarlas a una matriz polimérica para asegurar que perduran durante y después del proceso de producción. Al estar inmovilizadas las enzimas se favorece su procesamiento. En la etapa final se filtra la mezcla resultante y puede separarse fácilmente el producto obtenido de los reactivos utilizados para obtener las enzimas.

La extracción enzimática del aceite ofrece grandes ventajas, sin embargo es considerablemente más costoso que el proceso tradicional de extracción con solventes orgánicos por ejemplo.

En la mayor parte de los casos, los costos variables per tonelada son constantes. Pero, los costos fijos son cuatro veces más importantes para una capacidad veinte veces más grande. Por eso, la extracción enzimática puede ser rentable con una producción anual de aproximadamente 60 000 toneladas de microalgas por año.

La extracción enzimática presenta el inconveniente de ser sumamente dependiente y sensible a varios factores, como la temperatura, la humedad, difíciles de controlar en una fábrica.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Además, como se ha mencionado, no existe experiencia suficiente en el manejo y transporte de las enzimas. Existen pocas empresas que se dediquen a la producción de enzimas.

Hasta ahora, no se ha utilizado este método de extracción de lípidos de las microalgas. No se han encontrado datos sobre equipos o rendimientos en aceites. Hay estudios en curso, pero los resultados obtenidos hasta ahora no parecen prometedores.

## **5.4. La extracción con ultrasonidos**

### **5.4.1. Descripción del proceso**

Uno de los métodos más prometedores para realizar una disrupción para recuperar productos intracelulares de las microalgas consiste en la aplicación de ultrasonidos de alta frecuencia.

La extracción asistida por ultrasonido utiliza sonidos de alta frecuencia (aproximadamente 20 KHz), con el fin de desprender el compuesto buscado de la materia vegetal. Las partículas sólidas y líquidas vibran y se aceleran ante la acción ultrasónica, como resultado el soluto pasa rápidamente de la fase sólida al solvente.

Los fenómenos físicos que afectan la extracción de sustancias se ven afectados por la sonificación. Al reducir el tamaño de las partículas de la materia vegetal se aumenta el área de exposición al solvente y a la cavitación. El ultrasonido además facilita la rehidratación del tejido si se están utilizando



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

materiales secos al abrir los poros, lo cual a su vez incrementa el transporte de masa de los constituyentes solubles por difusión y procesos osmóticos.

En la figura siguiente se observan distintos equipos experimentales comúnmente utilizados en la extracción de sustancias asistida por ultrasonidos.

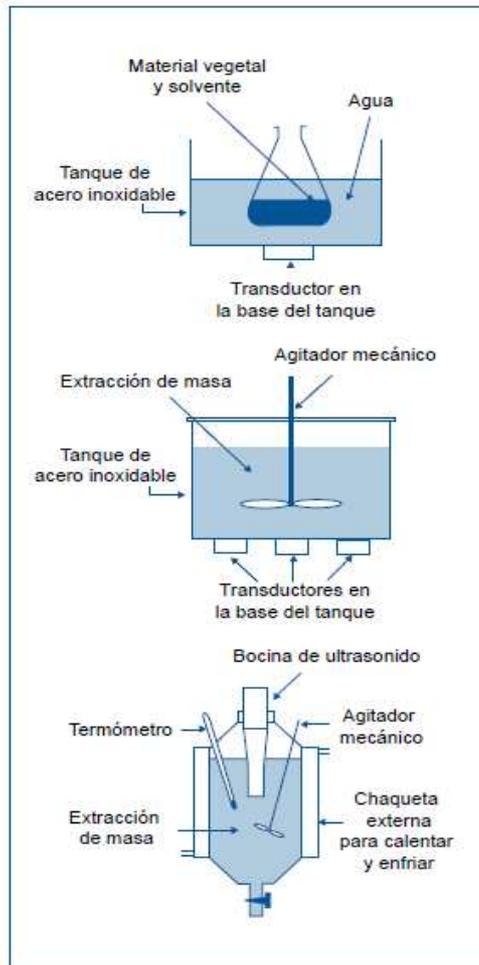


Figura 12: Equipos experimentales utilizados para la extracción por ultrasonidos. [“Extracción de sustancias asistida por ultrasonido (eua)” Tecnología en Marcha. Vol. 20-4 - Octubre - Diciembre 2007 P. 30-40].

No es difícil la extracción asistida por ultrasonidos en laboratorio utilizando un baño, equipos que son fácilmente adquiribles en el mercado de varias marcas internacionales. También se pueden conseguir equipos de casas comerciales a escala industrial para utilizar en procesos como homogeneización,



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

emulsificación, dispersión, molienda y limpieza. Hay empresas en el mercado internacional que ofrecen el diseño de equipos para llevar a gran escala los descubrimientos en laboratorio. Algunos investigadores han propuesto diseños de equipos de extracción asistida por ultrasonido para ser utilizados en la industria.

#### **5.4.2. Los equipos de ultrasonidos**



Figura 13: Foto de el equipo de ultrasonido UIP 16 000 de Hielscher.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

La empresa alemana Hielscher fabrica un equipo de ultrasonidos a escala industrial.

El UIP 10000, es el producto más adecuado para la extracción de aceites de microalgas. Su consumo energético es 32 kWh, y tiene un rendimiento que puede alcanzar más de 80%, dependiendo del tipo de microalga.

La capacidad de la maquina es de 120kg/h de biomasa de microalgas. En la tabla siguiente se destacan las características esenciales de la maquina.

<b>Costos</b>	<b>Extracción con ultrasonidos</b>
<b>Coste equipo</b>	22 980 €
<b>Coste energético</b>	32 kWh es decir 1,92 €/hora
<b>Coste componentes</b>	/
<b>Rendimiento en aceite</b>	>80%

Tabla 14: Características del equipo de ultrasonidos UIP 10 000 de Hielscher.

Una de las principales ventajas de esta técnica es que comparado con otros métodos convencionales requiere una instrumentación simple y rápida. Adicionalmente, el emisor de ultrasonidos no ocupa mucho espacio ni supone un aumento de precio muy grande con respecto a los equipos habituales de extracción.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

## 5.5. Extracción por fluidos supercríticos

### 5.5.1. Descripción del proceso

Un fluido supercrítico es un cuasi-estado con propiedades intermedias entre líquidos y gases, como se puede ver en la Tabla 15.

	Densidad (g/mL)	Viscosidad (g/cm×s)	Difusividad (cm <sup>2</sup> /s)
<b>Gas</b>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>
<b>Líquido</b>	1	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-6</sup>
<b>Fluido Supercrítico</b>	0,2-0,9	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>

Tabla 15: Orden de magnitud de fluidos en densidad, viscosidad y difusividad. [“Extracción de compuestos bioactivos de microalgas mediante fluidos supercríticos”, José Antonio Mendiola León, 2008].

Tiene la propiedad de difundirse a través de los sólidos como un gas, y de disolver los materiales como un líquido. Adicionalmente puede cambiar rápidamente la densidad con pequeños cambios en la temperatura o presión. Estas propiedades le hacen apropiado como un sustituto de los solventes orgánicos en los procesos de extracción.

En un diagrama de fases clásico como el de la Figura 14, las curvas de fusión, sublimación y vaporización, muestran las zonas de coexistencia de dos fases. Hay un punto de coexistencia de tres estados que se llama el punto triple



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

(PT). El cambio de estado se asocia a un cambio brusco de densidad y, para que se produzca, es necesario un aporte extra de energía denominado entalpía de cambio de estado. Sin embargo, por encima del punto crítico (PC), este cambio de densidad no se produce, por eso se podría definir este punto como aquel por encima del cual no se produce la licuefacción al presurizar, ni gasificación al calentar. Un fluido supercrítico es aquel que se encuentra por encima de dicho punto.

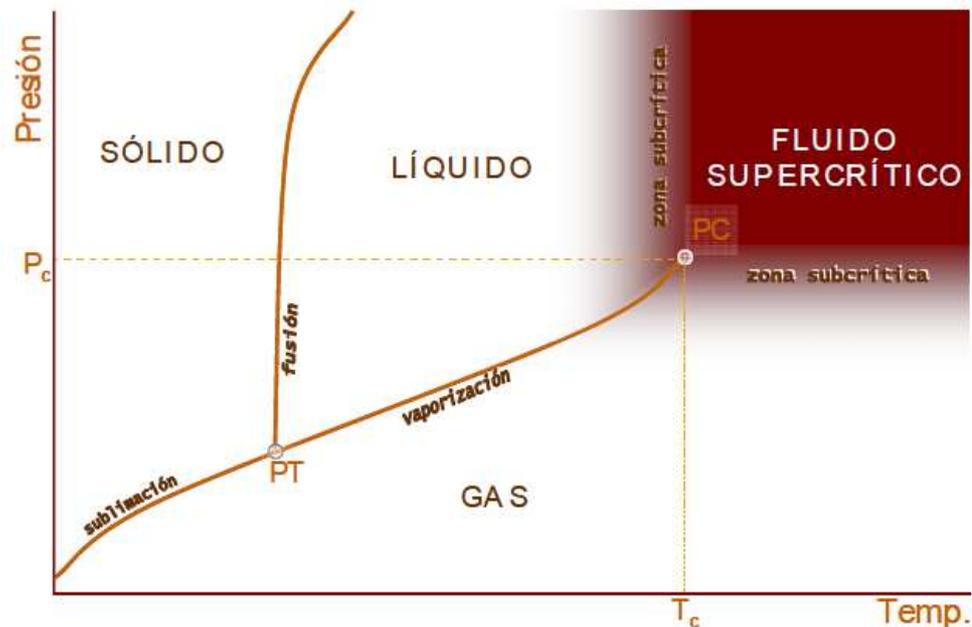


Figura 14: Diagrama de fases sólido/líquido/gas.  $P_c$ : Presión crítica;  $T_c$ : Temperatura crítica; PT: punto crítico; PT: punto triple. [“Extracción de compuestos bioactivos de microalgas mediante fluidos supercríticos”, José Antonio Mendiola León, 2008].

Esta región supercrítica tiene unas propiedades que la hacen peculiar.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Primero, la densidad que se encuentra por encima del punto crítico depende de la presión y de la temperatura, pero en cualquier caso está más cercana de los líquidos que a la de los gases.

Segundo, la viscosidad es mucho más baja que la de los líquidos, lo que le confiere propiedades hidrodinámicas muy favorables.

Tercero, la bajísima tensión superficial permite una alta penetrabilidad a través de sólidos porosos y lechos empacados.

Los coeficientes de difusividad son mucho mayores que en líquidos por lo que la transferencia de materia es más favorable.

Un fluido debe poseer una serie de propiedades, además de las anteriormente mencionadas, para poder emplearse como disolvente en la industria.

El dióxido de carbono es el fluido supercrítico más utilizado debido a que no es tóxico, no inflamable, no corrosivo, incoloro, es de bajo precio, se elimina fácilmente y no deja residuos. Además, sus condiciones críticas son relativamente fáciles de alcanzar.

Los líquidos con densidades similares incrementan la probabilidad de interacción entre el dióxido de carbono y el sustrato, de forma similar a la que haría un disolvente. Las difusividades de los gases, similares a las de los fluidos supercríticos, son uno o dos órdenes de magnitud mayor que los líquidos permitiendo una transferencia de masa excepcional. Además, una baja viscosidad, similar a la de los gases, permite a los fluidos supercríticos penetrar los microporos de la matriz del material para extraer los componentes deseados, en el



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

caso de las microalgas, sería el aceite. La sinergia creada por la combinación de densidad, viscosidad, difusividad, y la dependencia de la presión y temperatura, confieren a los fluidos supercriticos una capacidad excepcional para la extracción.

La extracción con fluidos supercriticos resulta, específicamente con el dióxido de carbono, una alternativa interesante para la extracción y el fraccionamiento de aceites vegetales, porque no posee los inconvenientes de los disolventes orgánicos tradicionales, tal como se ha mencionado anteriormente.

Sin embargo la ventaja principal de utilizar el dióxido de carbono supercrítico está en la pureza del aceite obtenido por este medio en comparación con los aceites obtenidos con solventes orgánicos tradicionales.

Durante la extracción, el dióxido de carbono es licuado bajo presión y se calienta hasta el punto de fusión. Este fluido licuado actúa como disolvente en la extracción del aceite.

#### **5.5.2. El equipo**

Los elementos mínimos que deben incluir un equipo de extracción supercrítico se pueden ver en el esquema de la Figura 1. El dióxido de carbono, que proviene de la botella A es impulsado por la bomba B, hasta que en la celda de extracción C, donde se encuentra la materia prima a extraer, se alcanza la presión de trabajo, controlada por la válvula D.

La celda de extracción se encuentra termostatada para poder operar en condiciones de temperatura controlada (superior a la temperatura crítica). Los componentes de la materia prima disueltos o arrastrados por el dióxido de carbono



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

precipitan en el separador E debido a la disminución del poder solvente del dióxido de carbono al reducir la presión. En caso de que sea necesaria la adición de modificadores F, estos suelen mezclarse con la corriente de CO<sub>2</sub> a baja presión antes de la bomba de CO<sub>2</sub> G.

Este método consigue extraer el 95% del aceite por sí mismo.

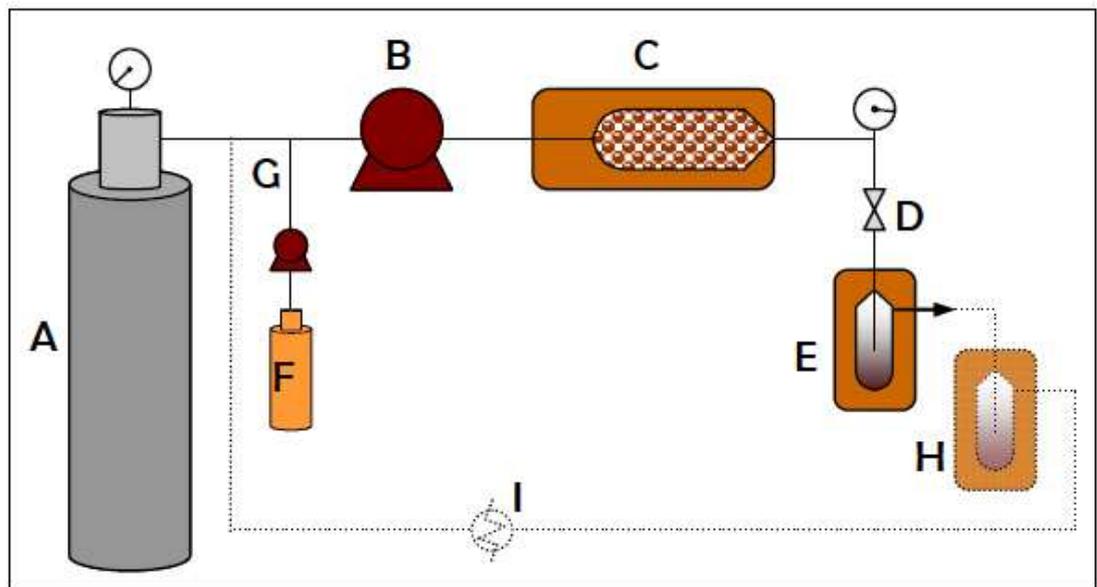


Figura 15: Esquema básico de un extractor de fluidos supercríticos. [“Extracción de compuestos bioactivos de microalgas mediante fluidos supercríticos”, José Antonio Mendiola León, 2008].

La Empresa UHDE High Pressure Technology tiene varios equipos de Fluidos Supercríticos que se pueden adaptar a la capacidad deseada dependiendo de la materia prima. Para este proyecto, se ha elegido una maquina de una capacidad de proceso de 95kg de biomasa por hora. Es la maquina cual se acerca más de las capacidades de trabajo que otras maquinas utilizadas para los otros métodos de extracción.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

El dióxido de carbono suministrado se pierde a 0,04 % por hora, es decir que se pierde 2,04 kg de CO<sub>2</sub> por hora, con un coste de 1,22€/hora.

El coste de la cantidad de dióxido de carbono dentro del ciclo en funcionamiento está comprendido en el coste del equipo.

<b>Costos</b>	<b>Extracción con fluidos supercriticos</b>
<b>Coste equipo</b>	66 690€
<b>Coste energético</b>	0,6kWh per kg of biomasa es decir 3,42€/h
<b>Coste componentes</b>	51kg de CO <sub>2</sub> / hora 0,6€/kg de CO <sub>2</sub>
<b>Rendimiento en aceite</b>	95%

Tabla 16: Características del equipo de FSC de la Empresa UHDE High Pressure Technology.

El coste de inversión es alto comparado con la extracción por ultrasonidos, sin embargo, se consigue un alto rendimiento de producción de aceite, alrededor de un 95%.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

---

# 6.

## Estudio Económico

---



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **6.1. Introducción**

En este capítulo se va a estudiar la influencia cual es la influencia del método de extracción del aceite de las microalgas en el precio final del producto.

Con este fin se ha hecho sólo una comparación del coste de la etapa de extracción del aceite en €/kg de aceite extraído. Las etapas que preceden y que vienen después de la etapa de extracción son las mismas para los distintos métodos, así que no es necesario introducir estas etapas de la producción de biodiesel para determinar qué método de extracción es el mejor desde el punto de vista económico.

Por otra parte, se ha calculado el Valor Actual Neto (VAN) para comprobar que método es el más rentable en esta etapa del proceso total de producción de biodiesel.

Además, se ha realizado un análisis de sensibilidad para la variación de dos parámetros económicos que son el precio de venta del aceite de microalga sin refinar y el porcentaje de lípidos presentes en las microalgas.



## Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

### 6.2. Las Hipótesis

Los supuestos generales para la planta de producción de biodiesel:

- La planta se situaría en el Sur de España, en un campo costero con acceso al mar.
- Se utiliza la microalga *Chlorella vulgaris* que tiene alrededor de 30% de lípidos de su peso seco.
- Se procesan 10 000 toneladas de biomasa de microalgas por año.
- Se trabaja 320 días por año, las máquinas pueden estar en marcha al máximo 16 horas por día.

### 6.3. El coste de la producción de biomasa de microalgas

El coste de la producción de la biomasa es una parte importante del coste del biocombustible producido con microalgas.

El coste de la biomasa de microalgas varía bastante en función del método de cultivo de las microalgas.

Como ha sido explicado en la segunda parte de este trabajo, el cultivo de las microalgas en estanque y en fotobiorreactores tiene una productividad y un coste de inversión significativamente diferente.

El cultivo en estanque permite una producción de biomasa seca de microalgas de alrededor de 70 ton/ha/año. Su CAPEX (Capital Expenditure) alcanza 75 000€ por hectárea y su OPEX (Operational Expenditure) es alrededor de 40 000 € por hectárea por año.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

En comparación, los fotobioreactores con una exposición directa al sol, tienen una productividad que puede llegar hasta 175 ton/ha/año. Su CAPEX alcanza 374 000 € por hectárea, pero puede llegar hasta 2,2 millones de euros para fotobioreactores con una iluminación óptima con una luz artificial. Su OPEX es significativamente superior que el del cultivo en estanques.

El coste de la biomasa de microalgas seca en función de método de cultivo y de la producción anual de biomasa, varía según la tabla siguiente:

	<b>Fotobioreactores</b>		<b>Cultivo en estanque</b>	
<b>Producción de biomasa anual (t)</b>	100	10 000	100	10 000
<b>Coste para producir 1 kg de biomasa de alga (€)</b>	2,21	0,35	2,84	0,45

Tabla 17: Estimación del coste de la biomasa de microalga en función del método de producción. [“Biodiesel from microalgae”, Yusuf Chisti, 2007].

El coste de producción de la biomasa baja de manera significativa cuando se producen a gran escala con una producción anual de 10 000 toneladas por año.

En este estudio, se considerará que se utilizan fotobioreactores ya que a largo plazo es el método que permite producir biomasa de microalga a menor coste. De acuerdo con estas consideraciones se parte de que el coste de producción de 1kg de biomasa de microalga (peso seco) en esta planta es 0,35 €.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

#### **6.4. Los diferentes métodos de extracción de aceite de microalgas en función del rendimiento y costo.**

Se utiliza la microalga *Chlorella vulgaris* que contiene 30% de lípidos de su peso seco.

En el análisis de sensibilidad se estudiará el hecho de que las microalgas contengan del 10 al 90% de lípidos en su peso seco.

El precio de aceite de microalga extraído se ha calculado en función del precio actual del biodiesel. Para que sea competitivo, el precio del biodiesel debe ser el máximo al precio del petrodiesel actual.

El precio de petrodiesel en España en Abril 2010 era de 1,04€/L. Este precio se compone de 20% de impuestos, 9% de distribución y marketing, 52% del coste del aceite crudo y 19% de gastos de refinado.

El proceso de refinado es el mismo para el diesel y el biodiesel, así que se considera que es el mismo porcentaje y gasto.

Se ha calculado que el coste del aceite de microalga crudo tiene que ser el máximo 0,54€/L, es decir 0,48€/kg con una densidad  $\rho = 0,887 \text{ kg/L}$ .

Para comparar los costes de los diferentes métodos de extracción del aceite de las microalgas, se ha considerado el coste del equipo, del consumo energético, los componentes a añadir, el rendimiento en aceite, necesarios para procesar una misma cantidad de biomasa por día.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Se supone que las máquinas de cada método operan durante las 16 horas diarias, se procesan 1920 kg de biomasa por día con la extracción por ultrasonidos, 1520kg por día para la extracción con FSC y 2400 kg por día con la extracción con algas deshidratadas.

Así, se ha decidido procesar 1520kg de biomasa de microalgas por día por cada método.

### **6.4.1. La extracción con algas deshidratadas.**

#### **6.4.1.1. Proceso de deshidratación de las microalgas**

En este método de extracción hay que considerar que el método de deshidratación de las microalgas, puede ser con un secador solar, un tambor rotatorio o un secador spray.

En este apartado se ha comparado los diferentes métodos con el fin de elegir cuál sería el mejor en términos de costes.

Para cada método de deshidratación se ha considerado el coste del equipo, su capacidad en kilogramos de biomasa por hora, el consumo energético por hora y el coste de otros componentes por hora.

Si se ponen todas las máquinas en marcha durante las 16 horas diarias, la capacidad máxima para cada método es: 2400 kg de biomasa por día para el secador solar, 6672 kg para el tambor rotativo y 4240 kg para el secador spray. Por eso se limita a un secado de 2400 kg de biomasa de alga por día como base de comparación.

El tambor rotatorio es operativo 5,80 horas por día, el secador spray 9,05 horas por día.



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

Las tablas siguientes muestran los diferentes datos obtenidos para cada equipo, según se detallaron anteriormente.

Al final se ha calculado el coste de la etapa de deshidratación de la biomasa de microalga tomando en cuenta únicamente los factores que varían en los distintos métodos de secado. Ese coste permite dar una base de comparación para esos métodos.

<b>Deshidratación con secador solar</b>		
Coste equipo	17500,00	€
Capacidad del equipo	2400,00	kg/día
Coste de la biomasa algal	0,35	€/kg
Consumo energético	0,60	€/h
Coste otros componentes (CO <sub>2</sub> )	0,00	€/h
Coste diario	849,60	€
Rendimiento diario	2400,00	kg de biomasa secada
<b>Rentabilidad</b>		
Inversión inicial	17500,00	€
Coste anual	271872,00	€
Coste total sobre un año	289372,00	€



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Rendimiento anual	768000,00	kg de biomasa secada
<b>Coste de secado</b>	<b>0,38</b>	<b>€/kg de biomasa secada</b>

Tabla 18: Datos económicos secador solar [Empresa Arkatechnology].

<b>Deshidratación con tambor rotatorio</b>		
Coste equipo	33600,00	€
Capacidad del equipo	417,00	kg/h
Coste de la biomasa algal	0,35	€/kg
Consumo energético	2,52	€/h
Coste otros componentes (CO2)	0,00	€/h
Coste diario	861,13	€
Rendimiento diario	2418,60	kg de biomasa secada
<b>Rentabilidad</b>		
Inversión inicial	33600,00	€
Coste anual	275560,32	€



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Coste total sobre un año	309160,32	€
Rendimiento anual	773952,00	kg de biomasa secada
<b>Coste de secado</b>	<b>0,40</b>	<b>€/kg de biomasa secada</b>

Tabla 19: Datos económicos tambor rotatorio [Empresa Co. Qingdao machines ORB].

<b>Deshidratación con secador spray</b>		
Coste equipo	45000,00	€
Capacidad del equipo	265,00	kg/h
Coste de la biomasa algal	0,35	€/kg
Consumo energético	0,60	€/h
Coste otros componentes (CO2)	52,50	€/h
Coste diario	1319,94	€
Rendimiento diario	2398,25	kg de biomasa secada



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

<b>Rentabilidad</b>		
Inversión inicial	45000,00	€
Coste anual	422381,60	€
Coste total sobre un año	467381,60	€
Rendimiento anual	767440,00	kg de biomasa seca
<b>Coste de secado</b>	<b>0,61</b>	<b>€/kg de biomasa seca</b>

Tabla 20: Datos económicos secador spray [Empresa GEA Process Engineering].

Los costes finales obtenidos nos indican el método que tiene los costes más interesantes para la misma cantidad de biomasa a secar. Aquí, se han considerado factores variables como son los costes del equipo, el consumo energético y de otros componentes adicionales.

El porcentaje de deshumectación cambia para cada método pero no afecta el proceso ya que en todos es alrededor de 90%, valor mínimo necesario para pasar luego a la prensa.

El método menos costoso según las tablas es el secador solar que se ha estimado a 0,38€/ kg de biomasa seca.

Además, según las hipótesis, la planta de producción se sitúa en una zona con una irradiación solar importante al sur de España, lo que confirma la utilización de este equipo para la deshidratación de las algas.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

**6.4.1.2. Proceso de extracción del aceite combinado: extracción con prensa y extracción con solventes orgánicos.**

En la extracción mecánica, se ha considerado junto el secador solar, la prensa y los equipos para la extracción con solventes.

Para el proceso de extracción de algas deshidratadas por secado solar, con extracción mecánica con una prensa, seguida de una extracción con solventes orgánicos, se ha considerado el total de los costes de los equipos de estos tres procesos, el total de los costes de los consumos energéticos y el coste del ciclohexano utilizado para la extracción con solvente. Se pierde alrededor de 0,05kg del solvente por cada kilo de biomasa tratada. El resto se recicla. Entonces para cada hora se debe añadir 10,5 kg de ciclohexano a un precio de 0,91€/kg, es decir 9,56€/hora de ciclohexano.

Como se ha mencionado, el rendimiento total del aceite que puede ser extraído con este método es de 95%.

El coste final de la extracción del aceite obtenido se ha obtenido a partir de los factores que cambian en cada método de extracción, es decir el coste del equipo, el consumo energético, los componentes a añadir y el rendimiento en aceite. Este coste nos da un factor de comparación entre los tres métodos.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

<b>Extracción con algas desecadas</b>		
Coste equipo (secador solar + prensa + solvente)	46 000,00	€
Rendimiento en aceite	0,95	
Capacidad de las máquinas	150,00	kg/h
Coste de la biomasa algal	0,35	€/kg
% de lípidos en la biomasa	0,30	
Consumo energético (Total)	5,17	€/h
Coste otros componentes (ciclohexano)	9,56	€/h
<b>Coste diario</b>		
Coste diario	679,02	€
Rendimiento diario en aceite	431,78	kg de aceite
<b>Rentabilidad</b>		
Inversión inicial	46000,00	€
Coste anual	217287,36	€
<b>Coste total sobre un año</b>		
Coste total sobre un año	263287,36	€
<b>Rendimiento anual en aceite</b>		
Rendimiento anual en aceite	138168,00	kg de aceite
<b>Coste de la extracción</b>		
Coste de la extracción	<b>1,91</b>	<b>€/kg de aceite</b>

Tabla 21: Datos económicos de la extracción con algas desecadas. [ Alvan Blanch, Grupo AGICO, Empresa Arkatechnology]



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

Para el método de extracción con algas deshidratadas, se obtiene un coste de la extracción de aceite de 1,91 €/kg de aceite extraído.

El Valor Actual Neto se ha calculado estudiando únicamente los factores que cambian en cada método.

El VAN se ha calculado de la siguiente manera:

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{FNC_i}{(1+r)^i}$$

I es la inversión que corresponde al coste del equipo, FNC es el flujo neto de caja para cada uno de los periodos y r la tasa de descuento a considerar. Se ha elegido una tasa de descuento de 6,5%

	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>
<b>Inversión</b>	-46000,00		
<b>Costes anuales</b>		-217287,36	-217287,36
<b>Ingresos</b>		66320,64	66320,64
<b>Amortizaciones (10 años)</b>		-4600,00	-4600,00
<b>TOTAL antes impuestos</b>	-46000,00	-155566,72	-155566,72
<b>Impuestos (30%)</b>	-13800,00	-46670,016	-46670,016
<b>TOTAL FNC</b>	-59800,00	-202236,74	-202236,74

Tabla 22: Calculo del FNC para la extracción con algas desecadas.



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

El VAN que corresponde a este método es de **-1 421 263,44 €**.

#### 6.4.2. La extracción con Fluidos Supercríticos.

De la misma manera que para la extracción con algas deshidratadas, se ha calculado el coste de la etapa de extracción del aceite y el valor del VAN.

En este método de extracción con fluidos supercríticos solo se necesita utilizar una máquina se caracteriza por un costo de inversión alto y una utilización del CO<sub>2</sub>. El rendimiento total en aceite es 95%.

<b>Extracción con FSC</b>		
Coste equipo	66690,00	€
Rendimiento en aceite	0,95	
Capacidad de la máquina	95,00	kg/h
Coste de la biomasa algal	0,35	€/kg
% de lípidos en la biomasa	0,30	
Consumo energético	3,42	€/h
Coste otros componentes (CO <sub>2</sub> )	1,22	€/h
Coste diario	606,24	€
Rendimiento diario en aceite	433,20	kg de aceite



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

<b>Rentabilidad</b>		
Inversión inicial	66690,00	€
Coste anual	193996,80	€
Coste total sobre un año	260686,80	€
Rendimiento anual en aceite	138624,00	kg de aceite
<b>Coste de la extracción</b>	<b>1,88</b>	<b>€/kg de aceite</b>

Tabla 23: Datos económicos de la extracción con FSC [Empresa UHDE High Pressure Technology].

Para la extracción con fluidos supercríticos, se ha estimado un coste de extracción de 1,88€/kg de aceite extraído.

El VAN se calcula de la misma manera que anteriormente y se obtiene la tabla siguiente para el cálculo de flujo neto de caja.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>
<b>Inversión</b>	-66690,00		
<b>Costes anuales</b>		-193996,80	-193996,80
<b>Ingresos</b>		66539,52	66539,52
<b>Amortizaciones (10 años)</b>		-6669,00	-6669,00
<b>TOTAL antes impuestos</b>	-66690,00	-134126,28	-134126,28
<b>Impuestos (30%)</b>	-20007,00	-40237,88	-40237,88
<b>TOTAL FNC</b>	-86697,00	-174364,16	-174364,16

Tabla 24: Calculo del FCN para la extracción con FSC.

Se obtiene un VAN de **-1 258 376,88 €**.

### 6.4.3. Extracción con ultrasonidos

De la misma manera que para las otras extracciones se ha calculado el coste de la etapa de extracción del aceite y el valor del VAN.

En este método de extracción con ultrasonidos solo se necesita utilizar una maquina no intervienen otros componentes. El rendimiento total en aceite es 80%.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

<b>Extracción por ultrasonidos</b>		
Coste equipo	22980,00	€
Rendimiento en aceite	0,80	
Capacidad de la máquina	120,00	kg/h
Coste de la biomasa algal	0,35	€/kg
% de lípidos en la biomasa	0,30	
Consumo energético	1,92	€/h
Coste otros componentes	0,00	€/h
Coste diario	557,78	€
Rendimiento diario en aceite	365,76	kg de aceite
<b>Rentabilidad</b>		
Inversión inicial	22980,00	€
Coste anual	178490,88	€
Coste total sobre un año	201470,88	€
Rendimiento anual en aceite	117043,20	kg de aceite
<b>Coste de la extracción</b>	<b>1,72</b>	<b>€/kg de aceite</b>

Tabla 25: Datos económicos del equipo de ultrasonidos [UIP 10 000 de Hieschler].



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

La extracción por ultrasonidos obtiene un coste de extracción de aceite de 1,72€/kg de aceite extraído.

El VAN se calcula de la misma manera que anteriormente y se obtiene la tabla siguiente para el cálculo de flujo neto de caja.

	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>
<b>Inversión</b>	-22980,00		
<b>Costes anuales</b>		-178490,88	-178490,88
<b>Ingresos</b>		56180,73	56180,73
<b>Amortizaciones (10 años)</b>		-2298,00	-2298,00
<b>TOTAL antes impuestos</b>	-22980,00	-124608,14	-124608,14
<b>Impuestos (30%)</b>	-6894,00	-37382,44	-37382,44
<b>TOTAL FNC</b>	-29874,00	-161990,59	-161990,59

Tabla 26: Cálculo del FNC para la extracción por ultrasonidos.

Se obtiene un VAN de **-1 121 499,37 €**



## Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

### 6.5. Comparación de los resultados

La tabla de comparación siguiente permite destacar el método que parece tener el menor coste de extracción de aceite de microalga y la valor del VAN más interesante.

Método	Extracción con algas deshidratadas	Extracción con FSC	Extracción con ultrasonidos
Coste de la extracción (€/ kg de aceite)	1,91	1,88	1,72
VAN	-1 421 263,44 €	-1 258 376,88 €	-1 121 499,37 €

Tabla 27: Comparación de los datos económicos entre los diferentes métodos de extracción.

Comparando el coste de extracción de aceite de cada método, los valores de la extracción con algas deshidratadas y la extracción con fluidos supercríticos son parecidos. Desde este punto de vista, la extracción con ultrasonidos tiene un coste de extracción de aceite más interesante.

Los VAN son todos negativos, eso se explica porque esta etapa es aislada en todo el proceso por lo tanto hay otras etapas que compensan. Si se considera el proceso de producción de biodiesel en su conjunto, se puede incluir los ingresos de los coproductos que se generan durante el proceso de transesterificación como la glicerina y los ácidos grasos.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

El VAN que parece el más interesante es el de la extracción con ultrasonidos, se confirma que es el método más rentable entre los tres considerados.

## **6.6. Análisis de Sensibilidad.**

En este apartado se ha considerado la posibilidad que las microalgas utilizadas tengan un porcentaje en lípidos que varía entre 10 y 80% del contenido de su peso seco en lípidos.

Además, se ha considerado un aumento del precio de venta del aceite de las microalgas del 0,48 a 1,10 €/kg.

Se ha jugado sobre estos dos parámetros con el fin de encontrar los criterios para hacer que esa etapa sea lo más rentable posible.

Mirando las tres tablas siguientes, se puede destacar el VAN mínimo positivo para cada método.

Para el método de extracción del aceite con la prensa combinado con la extracción con solventes orgánicos, el VAN mínimo positivo se ha obtenido con un precio de venta del aceite de 1,00€/kg y un porcentaje de lípidos contenido en las microalgas de 50%.

Para el método de extracción del aceite con los fluidos supercríticos, el VAN mínimo positivo esta obtenido con un precio de venta del aceite de 0,65€/kg y con un contenido de lípidos en las microalgas de 70%.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Para el método de extracción del aceite con ultrasonidos, el VAN mínimo positivo se ha obtenido con un precio de venta del aceite de 0,80€/kg y un porcentaje de lípidos en las microalgas de 60%.

Comparando el método de extracción por ultrasonidos y el método de extracción con FSC, se destaca que para que el método FSC sea más interesante que el método con ultrasonidos y para un precio de aceite bajo, se necesita un porcentaje elevado en lípidos. Por ejemplo, se ve que a partir de un porcentaje de 60% en lípidos y con un precio del aceite de 0,65€/kg, el método FSC se vuelve más interesante que el de ultrasonidos.

O sea que el método con ultrasonidos es el más interesante cuando se cultivan microalgas pobres en lípidos. Sin embargo, si se utiliza microalgas ricas en lípidos el método FSC es el mejor.

El tercer método de extracción no tiene ningún interés comparando con esos dos, en cualquier configuración resulta ser el menos interesante.

En la última tabla se ha destacado el mejor método en función del precio de venta del aceite y del porcentaje de lípidos contenidos en las microalgas.

Así, se puede destacar que para el menor precio de venta del aceite extraído y para un bajo y medio alto contenido en lípidos en las microalgas, es decir hasta 70% de contenido en lípidos, el método de extracción mejor es el de ultrasonidos. A medida que sube el precio de venta del aceite, el método de extracción con ultrasonidos depende del porcentaje de lípidos en las microalgas. Es decir que para un precio de venta del aceite extraído entre 0,65 y 0,70€/kg, el método de extracción con ultrasonidos es mejor hasta un contenido en lípidos de



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

50% en las microalgas. Asimismo, para un precio de venta del aceite extraído entre 0,80 y 0,90€/kg, el método de extracción con ultrasonidos es mejor hasta un porcentaje en lípidos de 40% en las microalgas. Para un precio de venta del aceite extraído entre 1,00 y 1,10€/kg, el método de extracción con ultrasonidos es mejor hasta un porcentaje más bajo en lípidos, es decir 30% en las microalgas

Como resumen, para establecer el mejor método de extracción de aceite hay que tomar en cuenta dos parámetros: el porcentaje en lípidos contenido en las microalgas y el precio de venta del aceite extraído. En función de estos parámetros se utilizara o el método de extracción con ultrasonidos o el método de extracción con fluidos supercríticos.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

		Extracción con algas deshidratadas								
		Precio de venta del aceite extraído €/kg								
% en lípidos	0,48	0,65	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10			
30	-1 421 263,44 €	-1 215 149,02 €	-1 154 527,14 €	-1 033 283,36 €	-912 039,59 €	-790 795,82 €	-669 552,04 €			
40	-1 227 273,40 €	-952 454,18 €	-871 625,00 €	-709 966,63 €	-548 308,27 €	-386 649,91 €	-224 991,54 €			
50	-1 033 283,36 €	-689 759,34 €	-588 722,86 €	-386 649,91 €	-184 576,95 €	17 496,00 €	219 568,96 €			
60	-839 293,33 €	-427 064,50 €	-305 820,72 €	-63 333,18 €	179 154,37 €	421 641,91 €	664 129,46 €			
70	-645 303,29 €	-164 369,66 €	-22 918,59 €	259 983,55 €	542 885,69 €	825 787,82 €	1 108 689,96 €			
80	-451 313,25 €	98 325,19 €	259 983,55 €	583 300,28 €	906 617,01 €	1 229 933,73 €	1 553 250,46 €			

Tabla 28: Comparación del VAN cambiando dos parámetros (Extracción con algas deshidratadas).



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

<b>Extracción con Fluidos Supercríticos (FSC)</b>									
<i>Precio de venta del aceite extraído €/kg</i>									
<i>% en lípidos</i>	0,48	0,65	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10		
30	-1 258 376,88 €	-1 051 582,22 €	-990 760,26 €	-869 116,34 €	-747 472,42 €	-625 828,50 €	-504 184,59 €		
40	-1 063 746,61 €	-788 020,39 €	-706 924,45 €	-544 732,56 €	-382 540,67 €	-220 348,78 €	-58 156,89 €		
50	-869 116,34 €	-524 458,57 €	-423 088,64 €	-220 348,78 €	-17 608,92 €	185 130,95 €	387 870,81 €		
60	-674 486,07 €	-260 896,75 €	-139 252,83 €	104 035,00 €	347 322,84 €	590 610,67 €	833 898,51 €		
70	-479 855,80 €	2 665,07 €	144 582,97 €	428 418,78 €	712 254,59 €	996 090,40 €	1 279 926,20 €		
80	-285 225,54 €	266 226,89 €	428 418,78 €	752 802,56 €	1 077 186,34 €	1 401 570,12 €	1 725 953,90 €		

Tabla 29: Comparación del VAN cambiando dos parámetros. (Extracción con FSC)



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

<b>Extracción con ultrasonidos</b>									
<i>Precio de venta del aceite extraído €/kg</i>									
	0,48	0,65	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10		
<i>% en lípidos</i>									
30	-1 121 499,37 €	-946 898,23 €	-895 544,95 €	-792 838,40 €	-690 131,84 €	-587 425,29 €	-484 718,73 €		
40	-957 168,88 €	-724 367,36 €	-655 896,32 €	-518 954,25 €	-382 012,18 €	-245 070,11 €	-108 128,04 €		
50	-792 838,40 €	-501 836,49 €	-416 247,70 €	-245 070,11 €	-73 892,52 €	97 285,07 €	268 462,66 €		
60	-628 507,91 €	-279 305,63 €	-176 599,07 €	28 814,04 €	234 227,14 €	439 640,25 €	645 053,36 €		
70	-464 177,42 €	-56 774,76 €	63 049,55 €	302 698,18 €	542 346,81 €	781 995,43 €	1 021 644,06 €		
80	-299 846,94 €	165 756,11 €	302 698,18 €	576 582,33 €	850 466,47 €	1 124 350,61 €	1 398 234,76 €		

Tabla 30: Comparación del VAN cambiando dos parámetros. (Extracción con ultrasonidos).



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Mejor método en función de dos parámetros		Precio de venta del aceite extraído €/kg						
% en lípidos	0,48	0,65	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	
30	Ultras	Ultras	Ultras	Ultras	Ultras	Ultras	Ultras	
40	Ultras	Ultras	Ultras	Ultras	Ultras	FSC	FSC	
50	Ultras	Ultras	Ultras	FSC	FSC	FSC	FSC	
60	Ultras	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	
70	Ultras	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	
80	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	

Tabla 31: El método de extracción más interesante en función de dos parámetros.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

# 7.

## Estudio del Impacto Medioambiental

---



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

## **7.1. El biodiesel y sus impactos beneficiosos sobre el medio ambiente.**

Es evidente que bajo una óptica global, la utilización de biodiesel como sustitutivo del gasóleo presenta importantes ventajas de tipo ambiental.

### **7.1.1. EL biodiesel y el efecto invernadero**

La actividad humana, principalmente el uso de combustibles fósiles y la destrucción de los bosques, emiten millones de toneladas de denominados “gases de efecto invernadero” a la atmosfera, es decir de dióxido de carbonó y de metanol. Asimismo, la emisión de gases a efecto invernadero acelera el calentamiento de la atmosfera. Por eso, las estrategias a utilizar se centran en controlar y estabilizar los gases de efecto invernadero lo que ha impulsado el desarrollo de las energías renovables.

La causa del efecto invernadero se encuentra en la quema masiva de combustibles fósiles en el transcurso de cortos periodos de tiempo. La cantidad de dióxido de carbono que se emite se acumula en las capas superiores del aire.

La quema de aceite vegetal por el contrario, se desarrolla en un ciclo cerrado de carbono y produce un efecto invernadero menor. Esta emisión menor de dióxido de carbono es debida a que este gas es absorbido por fotosíntesis.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

En los resultados reportados, se aprecian reducciones netas de dióxido de carbono del 100% debido a que este gas es transformado por las plantas en oxígeno por medio del proceso de fotosíntesis.

La otra ventaja en la utilización del biodiesel reside en la reducción de emisiones de óxidos de azufre y de sulfatos. Las reducciones de  $\text{SO}_2$  son cercas de un 100% debido a la ausencia de azufre en el biodiesel. En consecuencia no se emite dióxido de azufre en su combustión ni produce lluvias acidas.

#### **7.1.2. El biodiesel y la salud humana**

El biodiesel es más seguro para respirar para las personas. En los Estados Unidos, búsquedas han mostrado que las emisiones de biodiesel han bajado el nivel de todos los hidrocarburos aromáticos poli cíclicos (HAP) y nitro HAP compuestos, comparando con exhausto de diesel. HAP y nHAP compuestos han sido identificados como potencial compuestos causantes de cáncer.

Un análisis biológico del biodiesel presenta un impacto favorable para la salud al compararlo con el análisis de diesel. En la investigación realizada se obtiene que la presencia de esteres de aceites vegetales en el diesel produce una drástica disminución del numero de partículas, con un pequeños incremento en el tamaño medio de estas partículas.

En cuanto a la distribución del diámetro medio de las partículas de biodiesel es 10 veces mayor que las del diesel, lo cual les hace más difícil de inhalar por el ser humano y que se depositen en los pulmones.



## **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **7.1.3. La biodegradabilidad y toxicidad del biodiesel**

Entre otros aspectos medio ambientales, hay que destacar que el biodiesel es 100% biodegradable y no es tóxico. Su biodegradación alcanza a ser cuatro veces más rápida al compararla con la del diesel. Además, el biodiesel es fácil y seguro de transportar, debido a su alto punto de ignición comparado con el del diesel, lo cual reafirma su potencial como energía renovable.

## **7.2. El biodiesel y su impacto negativo**

### **7.2.1. La deforestación**

Si la deforestación y las técnicas de agricultura monocultivo se utilizan para crecer cosechas de biocombustible, el biodiesel podría estar amenazando el medio ambiente.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

### **7.3. El impacto ambiental positivo de la utilización de microalgas como materia prima**

Las microalgas utilizadas como fuente de materia prima del biodiesel presentan una serie de ventajas importantes con respecto a los otros productos agrícolas que se emplean en la actualidad.

#### **7.3.1. El cultivo de las microalgas no afecta al mercado de los alimentos**

En la actualidad, grandes partidas de cereales se están destinando para producir bioetanol o biodiesel lo que provoca que estos escaseen y se eleve su precio en perjuicio de la industria alimentaria y sobretodo de las sociedades más pobres.

La obtención de biocombustibles a partir de microalgas permitirá que la tierra necesaria para el cultivo de vegetales que pueden ser utilizados como alimentos, no sea explotada. Así, no se alteraría el precio de estos ni su disponibilidad.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

#### **7.3.2. El cultivo de las microalgas no necesita la destrucción de bosques o selvas.**

Como se ha sido mencionado antes, la inmensa demanda de biocombustibles elaborados a partir de cultivos tradicionales provoca la destrucción de zonas selváticas y forestales, todo esto con el fin de ampliar la superficie cultivable. Esto repercute de manera muy negativa en nuestro ecosistema.

El cultivo de las microalgas se puede realizar en estanques localizados en áreas desérticas o en terrenos improductivos para cualquier tipo de vegetal. Así, existen centrales de producción de microalgas para biocombustibles en desiertos aprovechando de las excelentes cualidades de insolación que ofrecen.

#### **7.3 .3. El cultivo de las microalgas reduce las emisiones de dióxido de carbono a la atmosfera**

El crecimiento de las microalgas requiere dióxido de carbono que toman de la atmosfera capturándolo en sus moléculas. En el momento de su combustión ese dióxido de carbono tomado de libera y se devuelve al aire. Por lo tanto, se libera tanto dióxido de carbono como el que la microalga tomo durante su desarrollo, así, el balance final es igual a cero. Parece de esta forma paliar el efecto invernadero y a restablecer el equilibrio térmico de la planeta.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

# 8.

## Conclusiones

---



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Hoy en día, es necesario encontrar combustibles más respetuosos con el medio ambiente, que reduzcan nuestra dependencia de los combustibles fósiles y que su coste de producción sea competitivo.

Para la producción de Biodiesel, las microalgas pueden ser una de las mejores alternativas a las oleaginosas. Este proyecto ha destacado el potencial de las microalgas para la producción de biodiesel, así como las ventajas de éstas con respecto a las otras plantas oleaginosas.

Sin embargo, la producción de Biodiesel está todavía en etapa de desarrollo a escala de laboratorio. No se conoce de manera precisa el coste global de producción de biodiesel, es preciso analizar las diferentes etapas de producción para determinar la viabilidad económica de su producción industrial.

Este proyecto se ha concentrado en el análisis de la etapa de extracción del aceite de las microalgas ya que es una de las etapas más costosas en el proceso global de producción de Biodiesel. Existen actualmente cuatro métodos de extracción del aceite de las microalgas. Se han analizado para determinar cual método es el mejor del punto de vista económico. Se ha seleccionado una especie de microalga, la *Chlorella vulgaris* como base para elegir los equipos de extracción de aceite y para obtener los datos económicos.

La primera opción es la **extracción mecánica mediante prensas**. En este proceso las microalgas deben ser previamente desecadas. Existen varios métodos como el secador solar, el tambor rotativo y el secador spray. Se ha hecho una valoración económica de estos tres métodos de secado y se ha llegado a la conclusión que el secador solar es el método de deshidratación menos costoso, sobre todo por su bajo consumo energético. Sin embargo, este método presenta el inconveniente de ser lento y de necesitar una superficie de secado grande.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Luego, se extrae el aceite de las algas por prensado. El punto débil de este método es que obtiene un rendimiento relativamente bajo, alrededor de 65%. Por eso, generalmente se combina este método con una **extracción por solventes orgánicos, ciclohexanos**. La extracción por solventes orgánicos es básicamente un proceso de difusión de un solvente en las células que contienen aceite como materias prima, dando como resultado una solución de aceite en solvente. La desventaja de la utilización de solventes para la extracción de aceites es el peligro inherente al trabajar con productos químicos. Los solventes químicos presentan riesgos de explosión.

Estas dos etapas, extracción con prensa y la extracción con solventes orgánicos, son capaces de obtener más del 95% del aceite total presente en las algas. Sin embargo, hay que tener en cuenta la etapa de deshidratación de las algas, representa un coste global de equipo y un consumo energético elevado. Se ha estimado un coste total de la etapa de extracción de 1,90€/kg de aceite extraído.

El segundo método es la **extracción enzimática** donde se utilizan enzimas para degradar las paredes celulares para facilitar la separación del aceite y de las proteínas. Es un método puramente químico presenta la desventaja de ser sumamente dependiente y sensible a varios factores, como son la temperatura y la humedad, difíciles de controlar en una fábrica.

Por otra parte, no existe experiencia suficiente en el manejo y transporte de las enzimas. Existen pocas empresas que se dediquen a la producción de enzimas.

Hasta ahora, no se ha utilizado este método de extracción de lípidos de las microalgas. No se han encontrado datos sobre equipos o rendimientos en aceites. Hay estudios en curso, pero los resultados obtenidos hasta ahora no parecen prometedores.



### **Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

El tercer método es la **extracción por ultrasonidos**. Se ha utilizado un aparato de ultrasonidos para crear burbujas de cavitación en el solvente. La explosión de estas burbujas en las proximidades de las paredes celulares provoca su ruptura y la liberación del aceite que contiene.

Una de las principales ventajas de esta técnica comparada con otros métodos convencionales es que requiere una instrumentación simple y rápida. Se obtiene un rendimiento bastante elevado, que puede alcanzar más 80% dependiendo del tipo de alga. Adicionalmente, el emisor de ultrasonidos no ocupa mucho espacio ni supone un aumento de precio muy grande con respecto a los equipos habituales de extracción. Se ha obtenido un coste total de extracción de aceite de 1,72€/kg de aceite extraído.

El último método es la **extracción con fluidos supercríticos**. En este proceso, se licua el dióxido de carbono y se calienta a presión para que actúe como solvente en la extracción de aceites.

El coste de inversión es alto comparado con la extracción por ultrasonidos, además hay que añadir el consumo de dióxido de carbono que aumenta este coste. Sin embargo, su punto fuerte es que consigue un alto rendimiento de producción de aceite, alrededor de un 95%. Se ha estimado un coste de extracción de aceite de 1,88€/ kg de aceite extraído.

Para hacer estos estudios comparativos, se ha seleccionado la microalga *chlorella vulgaris*. La *chlorella vulgaris* fue elegida por sus características físico-



### Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.

químicas, así como el hecho que es actualmente la microalga con la que se tiene la más experiencia a escala industrial.

Para cada método, se ha destacado el coste de la tecnología, su consumo energético y su rendimiento en aceite. Estos datos han permitido determinar cuál es el mejor método desde el punto de vista económico. A partir de los datos obtenidos para cada método, se ha calculado el VAN en función de dos parámetros: el precio de venta del aceite crudo y el contenido en lípidos de las microalgas. En la tabla siguiente se resumen los resultados obtenidos.

Mejor método en función de dos parámetros							
<i>Precio de venta del aceite extraído €/kg</i>							
<i>% en lípidos</i>	0,48	0,65	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10
30	Ultrasonido	Ultrasonido	Ultrasonido	Ultrasonido	Ultrasonido	FSC	FSC
40	Ultrasonido	Ultrasonido	Ultrasonido	FSC	FSC	FSC	FSC
50	Ultrasonido	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC
60	Ultrasonido	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC
70	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC
80	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC	FSC

**Tabla Recapitulativa del mejor método de extracción del aceite en función del contenido en lípidos de las microalgas y del precio de de venta del aceite extraído. FSC: Fluido Supercrítico. Fuente: Elaboración propia.**

Como resultado final se puede decir que en función de estos dos parámetros, la extracción por ultrasonido o la extracción con fluidos supercriticos son los mejores desde el punto de vista económico.

La conclusión adicional del proyecto se puede decir que la utilización de microalgas como fuente de materia prima para la producción de Biodiesel presenta muchas ventajas con respecto a las oleaginosas. Su producción industrial



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

es una fuente que merece ser estudiada en profundidad. Los resultados de este estudio indican que se pueden reducir el coste de la etapa de extracción de aceite de microalgas a través una selección del método que mejor se adapte al tipo de microalga y al precio de venta del aceite crudo.

Sin embargo, otro actor importante en el proceso de producción de Biodiesel a partir de microalga, es el método de cultivo de las microalgas. El cultivo se puede hacer por fotobioreactores (interiores o exteriores) o por estanques. Esta etapa depende de varios factores como el tipo de microalga, la ubicación de la planta, la capacidad de cultivo... Representa un coste importante en el proceso global de producción de Biodiesel. Podría ser un objetivo para un próximo trabajo.

Los avances tecnológicos y las investigaciones en curso indican que la producción de Biodiesel a partir de microalgas puede ser realidad en un futuro cercano.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

# 9.

## Bibliografía

---



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

**Artículos**

- “The economics of micro-algae production and processing into biodiesel”

Autor: ThomasSchulz.

- “Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics”, 2002.

Autores: E. Molina Grima, E.-H. Belarbi, F.G. Ación Fernández, A. Robles Medina, Yusuf Chisti.

- “Microalgal biofuels: a brief introduction”, July 2009.

Autor: John R. Benemann.

- “Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds”

Autores: Richard M. Knuckeya, Malcolm R. Brown, René Robert y Dion M.F. Frampton.

- “Recovery of Biodiesel Precursors from Heterotrophic Microalga *Chlorella protothecoides*”

Autor: Peter B. Merkle

- “Harvesting microalgae (*chlamydomonas reinhardtii*) for biofuel production using wastewater treatment techniques”

Autor: Michael Fuad.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

- “Biodiesel Fuel Production from Algae as Renewable Energy”

Autores: Sharif Hossain, Aishah Salleh, Amru Nasrulhaq Boyce, Partha chowdhury y Mohd Naqiuddin.

- “Microalgal Oil Extraction and In-situ Transesterification”

Autores: Justin M. Ferrentino, Ihab H. Farag, Leland S. Jahnke,

- “Biodiesel from microalgae”, 2007.

Autores: Yusuf Chisti

- “Biodiesel from microalgae beats Bioethanol”, 2008.

Autor: Yusuf Chisti

- “Supercritical Fluids (SCF) & Supercritical Fluid Extraction (SFE)”

Autor: Thermodynamics Research Laboratory Department Chemical Engineering Systems Analysis and Futuristic

- “Aplicaciones de los Fluidos Supercríticos en la Agroindustria”, Vol 18, 53-65, 2007.

Autores: Reinaldo J. Velasco, Hector S. Villada y Jorge E. Carrera.

- “Novel solvent extraction for extraction of oil from algae biomass grown in desalination reject stream”, 2009.

Autores: L. Govindarajan Nitin Raut and Ahmed Alsaheed, Department of Mechanical & Industrial Engineering, Caledonian College of Engineering, Sultanate of Oman.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

➤ “Designs of Advanced Biofuel Factory Concepts”

Autores: James Leathers, Mathias Celina, Russ Chianelli, Steven Thoma,  
and Vipin Gupta

➤ “Supercritical Fluid Extraction and Chromatographic Analysis (HRGC-FID and HRGC-MS) of Lupinus spp. Alkaloids”

Autores: Ana C. Nossacka, Janete H. Y. Vilegas, Dietrich von Baerb y  
Fernando M. Lança

➤ “Microalgae Harvesting and Processing: A Literature Review”, 1984.

Autores: G. Shelef A. Sukenik M. Green.

➤ “Bioenergía en la Unión Europea”

Autores: Emilio Cerdá Alejandro Caparrós y Paola Ovando.

➤ “Biodiesel a partir de microalgas”, Biotechnologia Vol. 13 No 3, 2009.

Autores: Adriana Garibay Hernandez, Rafael Vazquez-Duhalt, M. dem  
Pilar Sanchez Saavedra, Leobardo Serrano Carreron, Alfredo Martinez  
Jimenez.

➤ “Procesos de Producción de Biodiesel: Uso de Materias Primas  
Alternativas y de Alta Acidez”.

Autores: Bruno O. Dalla Costa, Maria L. Pisarello, Carlos A. Querini.

➤ “Evaluación de impacto ambiental de plantas de producción de biodiesel”,  
2007.



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

Autores: Juan Manuel López Suarez y Miguel Gutiérrez Sánchez.

- “Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from microalgae”, 2009.

Autores: Laurent Lardon, Arnaud Helias, Bruno Sialve, Jean-Phimippe Steyer, Olivier Bernard.

- “Producción y Valorización de biomasa a partir de microalgas, Subproyecto A5 : Separación de la biomasa y extracción del aceite”, 2008.

Autores: Olga Gomez (Fundacion LEIA) y BTM (Biotechnologia de microalgas S.L.).

- “La production de biocarburant lipidique avec des microalgues: promesses et défis.” 2008.

Autores: Jean-Paul Cadoret y Olivier Bernard.

- “Lipid production from microalgae as a promising candidate for biodiesel production”, Vol 13, n°1, 47 – 51, April 2009.

Autores: Arief Widjaja, Department of chemical engineering, Institute of Technology Sepuluh, Indonesia.

**Presentaciones:**

- “Micro-Algae Forum Bioénergie” Autor: ANR – PNRB Paris – Feb 5 2009 Luc Haspeslagh
- “Production of microalgae biomass (scenedesmus almeriensis) in a farmer greenhouse” Autor: Emilio Molina Grima



**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel.**

- “Production of microalgae: the V-System” Autor: Dr. Theodor Fahrendorf
- “Microalgae Biofuels” Autor: John R. Benemann
- “Green Algae Product From Ultra filtration And Flocculation” Autores: Teoh Pik Neng y Rashidah Mat Resat
- “Observation and Lipid Production from Microalgae” Autor: Thu Ra
- “Second and Third Generation Biofuels:A Review of the Chemistry, Feedstocks, Processes and Projects” Autor: AIChE-Chicago Symposium 2008 Recent Developments in Refining, Energy, and Biotechnology

**Páginas web:**

- Secador Spray : GEA Process Engineering  
<http://www.gea-pe.com.ar/NAR/cmsdoc.nsf/WebDoc/webb7hfpg9>
- Tambor rotativos:KMPT Process Technology  
<http://www.kmpt.com/nc/fr/produits/filtres-krauss-maffei/>
- Secador solar: Arkatechnology  
<http://www.arkatechnologies.in/>
- Prensa/Expeller: Alvan Blanch  
<http://www.alvanblanch.co.uk/>
- Extracción por solvente: AGICO Group  
<http://www.oilseedspress.com/Solvent-Extraction/>
- Extracción por ultrasonidos: Hielscher  
[http://www.hielscher.com/index\\_fr.htm](http://www.hielscher.com/index_fr.htm)



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**

- Extracción por fluidos supercríticos: UHDE High Pressure Technology

<http://www.uhde-hpt.com/index.php?id=sf>

- Información sobre biocombustibles y microalgas:

[www.oilgae.com](http://www.oilgae.com)

[www.biodieselsapin.com](http://www.biodieselsapin.com)

[www.biodiesel.org](http://www.biodiesel.org)

[www.biodiesel.com](http://www.biodiesel.com)

[www.abengoabioenergy.com](http://www.abengoabioenergy.com)

[www.expobionergía.com](http://www.expobionergía.com)

[www.bioenerg.co.uk](http://www.bioenerg.co.uk)

[www.iica.int](http://www.iica.int)

[www.caledonbuckleouch.com](http://www.caledonbuckleouch.com)

[www.biofuelsinternationalexpo.com](http://www.biofuelsinternationalexpo.com)

[www.ers.usda.gov](http://www.ers.usda.gov)

[www.biodisol.com](http://www.biodisol.com)

[www.biomassmagazine.com](http://www.biomassmagazine.com)



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)  
Ingeniero Industrial

**Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos  
de las microalgas para la producción de biodiesel.**