

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MÁSTER EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL

ESTUDIO SOBRE EL MODELADO Y CONTROL
DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE CULTIVO
DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTORES
PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

Curso 2012/2013

Alumno/a:

María José Vélez Tamayo

Director/es:

Dr. José Luis Guzmán Sánchez
Dr. José Carlos Moreno Úbeda



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
Departamento de Informática



TRABAJO FIN DE MÁSTER
MÁSTER EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL
POSGRADO EN INFORMÁTICA

ESTUDIO SOBRE EL MODELADO Y CONTROL DE
LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE CULTIVO DE
MICROALGAS EN FOTOBIOREACTORES PARA
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

María José Vélez Tamayo

Dirigida por: Dr. José Luis Guzmán Sánchez y Dr. José Carlos Moreno Úbeda

Almería, Diciembre 2012

TRABAJO FIN DE MÁSTER
MÁSTER EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL
POSGRADO EN INFORMÁTICA



ESTUDIO SOBRE EL MODELADO Y CONTROL DE
LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE CULTIVO DE
MICROALGAS EN FOTOBIORREACTORES PARA
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

por
María José Vélez Tamayo

Para la obtención del
Título del Máster en Informática Industrial
Posgrado en Informática

Director

Director

Autor

Dr. José Luis Guzmán Sánchez Dr. José Carlos Moreno Úbeda María José Vélez Tamayo

**Estudio sobre el Modelado y Control de las Condiciones
Óptimas de Cultivo de Microalgas en Fotobiorreactores
para Producción de Biodiésel**

Índice

I. Introducción.....	5
II. Biodiésel.....	7
A. Introducción al Biodiésel.....	7
B. Evolución Histórica del Biodiésel.....	7
C. Definición de Biodiésel.....	8
D. Propiedades del Biodiésel.....	8
E. Caracterización y Estudio del Producto y del Mercado.....	9
F. Una Mirada Objetiva sobre el Biodiésel.....	13
III. Fuentes de Materia Prima.....	15
A. Aceites Vegetales Tradicionales, 1ª Generación.....	15
B. Materias Primas Alternativas, 2ª Generación.....	15
IV. Microalgas como Materia Prima Alternativa.....	17
A. Características generales de las microalgas.....	17
B. Características relevantes de los cultivos de microalgas para la producción de biodiésel.....	18
C. Potencial del biodiésel a partir de microalgas.....	18
D. Contenido lipídico de las microalgas.....	18
E. Síntesis de lípidos.....	20
F. Condiciones ambientales que afectan a la acumulación de lípidos.....	21
V. Producción de la Biomasa de Microalgas.....	22
A. Métodos de cultivo.....	22
B. Métodos de recolección.....	26
C. Extracción de lípidos de microalgas.....	27
VI. Estrategias Actuales de Modelado y Control de Fotobiorreactores.....	27
A. Dinámica del sistema y modelos.....	28
B. Estrategias de control.....	36
C. Resultados obtenidos en experimentos en fotobiorreactores.....	39
VII. Producción de Biodiésel de Microalgas.....	40
VIII. Economía de la Producción de Biodiésel a partir de Microalgas.....	40
IX. Conclusión y Futuros Trabajos.....	41
Agradecimientos.....	42
Referencias.....	43

Estudio sobre el Modelado y Control de las Condiciones Óptimas de Cultivo de Microalgas en Fotobiorreactores para Producción de Biodiésel

María José Vélez Tamayo

Máster en Informática Industrial

Postgrado en Informática

Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Almería.

Abstract— The current state of development, technological advances in processes and growth of the company has increased the consumption of fossil fuels at a rate that is almost unbearable. In addition we also consider the current oil price escalation and an attempt to reduce CO₂ emissions worldwide. For that urgently demand alternative energy sources, with a prominent option biofuels (biodiesel). In the last few decades has increased research related to the production of fuels from biomass, microalgae postulated as a good alternative to this situation, due to the high lipid content and profile suitable for obtaining biofuels they offer. Producing biodiesel from microalgae culture system requires a large-scale collection, with the challenge of reducing the cost per unit area. A large-scale microalgae need carefully controlled conditions and optimal natural environment. Hence, the importance of a good modeling and control of growth and the optimum conditions for that purpose. The purpose of this paper is to provide an overview of the current status of this alternative bioenergy, by analyzing the basics of it.

Resumen— La situación actual de desarrollo, avances tecnológicos en los procesos y crecimiento de la sociedad ha incrementado el consumo de combustibles fósiles, a un ritmo que se hace casi insostenible. Además, a este aspecto se suma el actual escalado del precio de petróleo y un intento por reducir las emisiones de CO₂ a nivel mundial. Por tanto, se demandan urgentemente fuentes alternativas de energía, siendo una opción destacada los biocombustibles (biodiésel). En las últimas décadas han aumentado considerablemente las investigaciones relacionadas con la producción de combustibles a partir de biomasa, postulándose las microalgas como una destacada alternativa a esta situación, debido al elevado contenido de lípidos y perfil idóneo para la obtención de biocombustibles que éstas ofrecen. Producir biodiésel a partir microalgas requiere un sistema de cultivo y recolección a gran escala, con el reto actual de reducir el costo por unidad de área. A gran escala, las microalgas necesitan condiciones cuidadosamente controladas y un ambiente natural óptimo. De ahí la importancia de un buen modelado y control del crecimiento, así como de las condiciones óptimas para tal fin. El objeto de este trabajo es

el de proporcionar una visión general sobre el estado actual de esta alternativa bioenergética, mediante el análisis de los fundamentos de la misma.

Keywords- Microalgae, biodiesel, modeling, control, renewable energies

Palabras clave- Microalgas, biodiésel, modelado, control, energías renovables.

I. INTRODUCCIÓN

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. Sin embargo, el uso del petróleo no sólo significa el consumo de recursos no sustentables y precios en alza sino que también aumentan las emisiones de gases responsables del calentamiento global. Este incremento se puede confirmar observando el aumento después de la Segunda Guerra Mundial (1945), como se muestra en la Fig. 1 [1], [2].

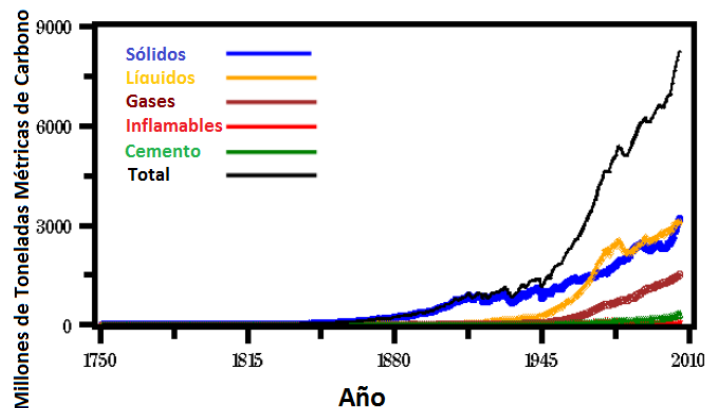


Fig. 1. Emisiones de carbono provenientes de combustibles fósiles [1].

El cambio climático es uno de los más graves desafíos que la humanidad tiene planteados en el siglo XXI. El calentamiento de la Tierra ya no es una amenaza virtual, sino una realidad. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) [3], que buscaba reforzar la conciencia pública a escala mundial sobre el cambio climático, lo definió como “*el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial*”. En el actual modelo energético, que es un sistema abierto, el hombre adiciona a la atmósfera elevadas cantidades de dióxido de carbono (CO₂) a un ritmo tal que la naturaleza es incapaz de reciclar dicho compuesto. Este CO₂ de origen antropogénico se debe básicamente al cambio en el uso del suelo (principalmente por la deforestación) y a las emisiones por el uso de los combustibles fósiles.

Como consecuencia de este aumento en la atmósfera, la radiación térmica alcanza la tierra atravesando la atmósfera con más facilidad que la radiación térmica de la tierra se transfiere al espacio, produciendo un calentamiento en todo el planeta. Este fenómeno es conocido como “*el efecto invernadero*”.

A consecuencia de este calentamiento se producirán impactos climáticos con las siguientes consecuencias [4]:

- Ascenso del nivel del mar.
- Incremento de los fenómenos meteorológicos extremos tales como: lluvias torrenciales, sequías, deshielos, tormentas tropicales (huracanes y tsunamis), olas de calor y de frío.
- Extinción de especies y destrucción de ecosistemas.
- Acidificación de los océanos.
- Crisis sociales y económicas.

El calentamiento climático está a la orden del día; el informe Stern y el cuarto informe del IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) han confirmado este grave problema, así como sus costos, consecuencias sociales y económicas. El calentamiento del planeta podría significar costos que alcancen hasta un 20% del PIB de la economía mundial. Aún con las mejores tasas de crecimiento económico convencional, los daños ocasionados a las sociedades por la variación significativa y más violenta del clima las superarán [5]. Este cuarto informe del IPCC ha dejado claro que las causas fundamentales del cambio climático son humanas; el consumo de combustibles fósiles y la deforestación ocupan los primeros lugares de su explicación.

Considerando países industrializados a los miembros de la OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), Medio Oriente, el resto de Europa y la ex-URSS, con respecto al consumo de energía existe una gran inequidad, teniendo en cuenta que en ellos habita un 26,5% de la población mundial, mientras que sin embargo se consume aproximadamente el 64% de la energía primaria [6]. Esto se refleja también en el consumo de energía per cápita: por

ejemplo, un habitante de Estados Unidos emite 4 veces más gases de efecto invernadero que uno de China, 2,4 veces más que uno de España, 14 veces más que uno de India o Colombia y 518 veces más que uno de Somalia [7]. Es necesario (aunque utópico) que los países tomen medidas para un reparto adecuado y justo de la energía, así como frenar el incremento en la demanda de combustibles fósiles, aumentar la diversidad del abastecimiento energético y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Actualmente, el agotamiento de las reservas de petróleo constituye un grave problema, pues al ritmo actual de consumo las reservas mundiales se agotarían en menos de 40 años [2]. La alta dependencia que el mundo tiene del petróleo, la inestabilidad que caracteriza al mercado internacional y las fluctuaciones de los precios de este producto, han llevado a que se busquen nuevas formas de energía más económicas y renovables como la energía solar, eólica, hidroeléctrica, y el uso de biocombustibles, entre otras [8], [9]. Los biocarburantes, en los últimos años son considerados como una de las opciones destacadas, pero su producción vía las plantas oleaginosas no podría cubrir por sí sola las necesidades energéticas, siendo la superficie cultivada necesaria una de sus principales críticas [10].

La materia prima para obtener biocombustibles puede ser cualquiera que contenga triglicéridos: semillas oleaginosas, aceites usados, grasas animales, etc.; pero en las últimas décadas ha aumentado las investigaciones relacionadas con la producción de combustibles a partir de biomasa, postulándose las microalgas como una buena alternativa a esa solución [133].

El uso de microalgas para la producción de biodiésel es una alternativa ventajosa debido al elevado contenido de lípidos y perfil idóneo para la obtención del biocombustible que éstas ofrecen. Aunadas a lo anterior, otras características de las microalgas son su elevada eficiencia fotosintética, su capacidad de crecer tanto en aguas marinas, dulces, residuales y salobres, así como una velocidad de crecimiento relativamente alta. No obstante, los sistemas de cultivo de microalgas actualmente presentan ciertas limitaciones tales como la dificultad de mantenimiento, elevados costos de operación para la producción y recolección de la biomasa, y dificultades en un escalamiento que permita mantener las condiciones óptimas, entre otras. Ante estos inconvenientes, la optimización de los sistemas de cultivo de microalgas es imprescindible. Es sumamente importante, para producir biodiésel usando esta tecnología, requerir de sistemas de cultivos y recolección a gran escala, con el reto de reducir el costo por unidad de área, y en los que se necesitan condiciones cuidadosamente controladas y un ambiente natural óptimo; de ahí la importancia de un buen modelado y control del crecimiento, siendo ésta la motivación del presente trabajo [11].

El objetivo de este trabajo es proporcionar una visión general del estado actual de esta alternativa bioenergética. En

primer lugar (Sección II), se realizará una introducción al biodiésel, así como una pequeña reseña de su evolución histórica, además de resumir sus generalidades y enumerar algunas propiedades. En esta sección se realiza un estudio y caracterización del producto y del mercado, y se presenta una mirada objetiva sobre este biocombustible, enumerando una serie de ventajas y desventajas para motivar y entender la importancia que tiene en el panorama actual energético. En la Sección III, se presentan las distintas materias primas de las cuales se puede obtener biodiésel; para centrarse en las microalgas como fuente de materia alternativa (Sección IV), donde se recogerán sus características generales, las características relevantes de los cultivos para producción de biodiésel, el potencial del biodiésel a partir de microalgas, el contenido lipídico y su síntesis, y las condiciones ambientales que afectan a la acumulación de lípidos. La Sección V se centra en la producción de microalgas. En esta sección se describen los métodos de cultivo más comunes a nivel industrial e investigador, sus características más significativas, los métodos de recolección y la forma de extracción de los lípidos. En la Sección VI, se recogen las estrategias actuales de modelado y control de las condiciones de crecimiento de biomasa para estos biorreactores. En la Sección VII un se muestra un esquema global para la producción de biodiésel de microalgas. A continuación (Sección VIII), se presenta la factibilidad económica del biodiésel de microalgas. Y por último (Sección IX), se muestran las conclusiones y posibles trabajos futuros en esta línea.

II. BIODIÉSEL

A. *Introducción al Biodiésel*

Se entienden por biocombustibles aquellos que son obtenidos a partir de biomasa, materia orgánica de origen animal o vegetal, y son considerados, por tanto, como una fuente de energía renovable. Se pueden presentar en diferentes formas: sólida (fracción biodegradable de residuos urbanos o industriales, residuos vegetales), líquida (biodiésel, bioetanol) o gaseosa (biogás). Los más usados son los biocombustibles líquidos, los cuales se emplean en calderas para la producción de calor y electricidad o en motores de combustión interna, en cuyo caso se denominan biocarburantes [13].

El biodiésel es obtenido mediante una reacción química (transesterificación) de una grasa animal o aceite vegetal con un alcohol. La reacción requiere un catalizador y da lugar a los ésteres alquílicos, a los cuales se denomina biodiésel. Este combustible se presenta en forma líquida y posee unas prestaciones similares a las del diésel obtenido a partir de petróleo.

Este biocarburante podría sustituir parcial o totalmente a los combustibles de origen fósil en motores de combustión interna. La producción y utilización de los biocarburantes en el

sector del transporte presenta una serie de ventajas medioambientales, energéticas y socioeconómicas respecto a los combustibles de origen fósil. Desde un punto de vista medioambiental, el uso de biocarburantes contribuye a reducir las emisiones de gases contaminantes. Además, ayudan a la eliminación de residuos en los casos en que éstos se usen como materia prima en la fabricación de biocarburantes (por ejemplo, los aceites usados en la fabricación de biodiésel). Desde un punto de vista energético, los biocarburantes constituyen una fuente de energía renovable y limpia. Por otro lado, su utilización reduce la dependencia energética de los combustibles fósiles. Y si se tienen en cuenta aspectos socioeconómicos, comparando los biocarburantes respecto de otras energías alternativas, por ejemplo la proporcionada por el hidrógeno, el reemplazo de los combustibles fósiles por biocarburantes en el sector de transporte sería realizado con menos costes, debido a que no se requerirían grandes cambios en la tecnología que se utiliza actualmente, ni en el sistema de distribución. En el caso de usar la energía obtenida a través del hidrógeno que se basa en una tecnología completamente distinta, serían necesarios numerosos cambios en el stock de capital. Esto no descartaría el desarrollo y estudio de nuevas fuentes de energía, sino que los biocombustibles tendrían un mayor crecimiento en un corto plazo [12].

El abastecimiento regular de energía limpia y renovable es uno de los mayores retos de la humanidad. Se buscan combustibles que suplan las necesidades energéticas de la población y al mismo tiempo protejan al medio ambiente, aunque los biocombustibles no son una solución al problema energético por sí solos. El biodiésel puede ser sólo una solución parcial. Además, su producción y uso aún tienen barreras sociales, ambientales, técnicas y políticas que superar o por lo menos aclarar [14].

B. *Evolución Histórica del Biodiésel*

La utilización de biocarburantes por primera vez se remonta a finales del siglo XIX y principios del XX. En la Exposición Mundial de París en 1900 se mostró por primera vez un prototipo de motor diésel que utilizaba aceite de cacahuete. Su inventor, Rudolph Diesel, tenía previsto que el futuro motor (en contraposición con los de vapor de la época) funcionara con aceites vegetales, y así fue hasta los años 20 [15].

Sin embargo, la alta viscosidad de estos aceites (aproximadamente 10 veces más que en el diésel) fue limitante en su utilización, debido a que esto implicaba una pobre atomización del combustible y se obtenía una combustión incompleta. También el alto punto de ignición y su tendencia a oxidarse térmicamente, que favorecían la formación de depósitos en las boquillas de los inyectores y una disminución de la lubricidad, complicaron su uso. No obstante, se intentó modificar sus propiedades para aproximarse a las del diésel, por medio de métodos como la dilución o microemulsión, la pirólisis o la transesterificación [16]. Sin embargo, la irrupción

del petróleo en el mercado a un precio barato, además de ser razonablemente eficiente y fácilmente disponible, hizo que enseguida el diésel se convirtiese en el combustible más utilizado, relegando a los aceites vegetales a un plano inferior [17].

Durante la Segunda Guerra Mundial, y ante la escasez de combustibles fósiles, cobraron importancia las investigaciones llevadas a cabo por Otto y Vivacqua en Brasil. Pero no fue hasta la década de los 80 cuando los biocombustibles experimentaron un verdadero desarrollo industrial como respuesta a la crisis energética del momento, y del elevado coste del petróleo. En 1982 se llevaron a cabo las primeras técnicas con biodiésel en Austria y Alemania, pero no fue hasta el año 1985 en Silberberg (Austria) cuando se construyó la primera planta piloto productora de RME (Rapeseed Methyl Ester), es decir, ésteres metílicos procedentes de aceite de semilla de colza [12].

En la actualidad países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiésel en automóviles. A pesar de ello la percepción actual es que en principio los biocarburantes no podrían sustituir totalmente a los combustibles fósiles, pero sí complementarlos en forma de diferentes mezclas con el fin de reducir la dependencia respecto del petróleo. Además, pueden utilizar la misma red logística de distribución que los combustibles fósiles [12].

C. Definición de Biodiésel

La ASTM (American Society for Testing Materials) define al biodiésel como un éster mono alquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables para utilizarlos en motores diésel.

El biodiésel o FAME (Fatty Acid Methyl Ester) se presenta como un combustible líquido que puede ser obtenido a partir de bases renovables como los aceites vegetales, grasas animales, aceites usados o microalgas; los cuales están constituidos por moléculas (ésteres) de ácidos grasos y glicerol. A este último los aceites y grasas le deben su elevada viscosidad. Por transesterificación se reemplaza el glicerol (alcohol trivalente) por un alcohol monovalente (“más ligero”), usualmente metanol o etanol, formándose moléculas más pequeñas (ésteres monoalquílicos o FAME) con una viscosidad similar a la del combustible diesel derivado del petróleo. También se produce glicerina como subproducto, sustancia que tiene numerosos usos en diversas industrias [17], [18]. Este proceso se rige por la reacción química, Fig. 2.

Dependiendo de las características del origen de los triglicéridos se obtendrá un biodiésel con unas cualidades u otras. El producto que se obtiene es muy similar en propiedades al gasóleo, y es apto para sustituir parcial o totalmente al gasoil en motores diésel, sin que sean necesarias conversiones, regulaciones o ajustes especiales del motor [16],

[19].

El uso del biodiésel como combustible y aditivo ha sido probado en Estados Unidos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA). Ha sido catalogado como un combustible limpio, siempre y cuando sus características físico-químicas se encuentren dentro de las especificaciones de las normas europeas. La norma estándar es la UNE EN 14214 (en el caso de Norteamérica la norma estándar es la ASTM D6751) [20].

D. Propiedades del Biodiésel

En la Tabla I se hace una comparación entre las propiedades de un diésel y un biodiésel.

TABLA I
COMPARACIÓN DEL DIÉSEL Y DEL BIODIÉSEL PARA ALGUNAS
PROPIEDADES [21], [22].

Propiedad	Diésel UNE-EN-590	Biodiésel UNE-EN-14214
Prop. estándar		
Densidad (15 °C) (Kg/m ³)	820-860	875-900
Viscosidad (40 °C) (M·m ² ·s ⁻¹)	2,00-4.50	3,50-5,00
Punto de ignición (°C)	>55	>100
Contenido de azufre (% peso)	<0,20	<0,01
Número de cetano	>46	>51
Prop. adicionales		
Contenido de oxígeno (% peso)	0	10,9
Poder calorífico (MJ·dm ⁻³)	35,6	32,9
Grado de eficiencia	38,2	40,7

Como se observa, algunas de las propiedades son parecidas, en cambio hay diferencias notables en otras. Caben destacar las conclusiones que se comentan a continuación.

El punto de ignición es significativamente superior al del diésel, por lo que se asegura un manejo más seguro y fiable en la manipulación y el almacenaje.

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, mayor vida útil del motor y menores emisiones. En el caso del biodiésel este número de cetano tiende a ser más alto.

El azufre contribuye al desgaste del motor y a la aparición de

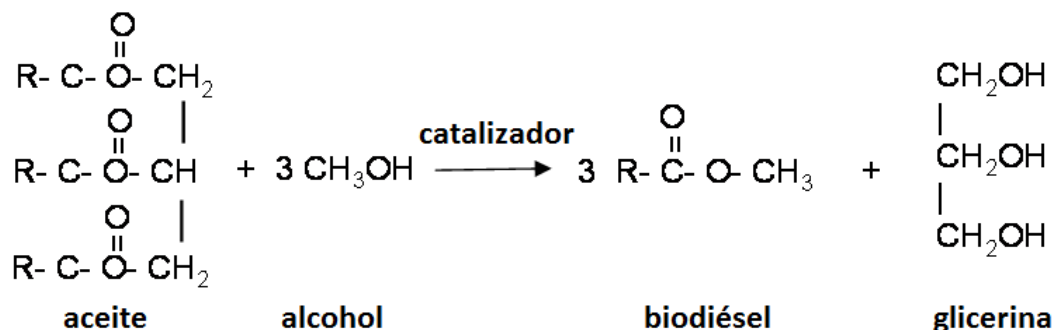


Fig. 2. Reacción de transesterificación de un aceite para la obtención de biodiésel [17].

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. Esta es otra de las propiedades que favorecen el uso de biodiésel.

Las emisiones de dióxido de azufre producidas por el biodiésel son prácticamente nulas, ya que contiene una cantidad despreciable de azufre. En general, 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 biodiésel, sin embargo en la práctica es despreciable.

E. Caracterización y Estudio del Producto y del Mercado

En la actualidad, el uso de biocarburantes está evolucionando hacia un mercado a escala mundial, emergiendo desde la utilización aislada, aunque todavía con un grado de desarrollo alejado del máximo. Como obstáculo a dicho desarrollo se plantean principalmente razones de coste, entre otras. Las políticas europeas para introducir los biocombustibles en el sector transporte fijaban como objetivos un 5,75% para 2010 y un 8% para 2020, en contenido energético (dentro de un Plan Europeo global de sustituir el 20% de los combustibles convencionales por combustibles alternativos para 2020). En España el porcentaje de biocarburante usado en este sector ha ido creciendo desde 1994, estando su uso prácticamente extendido en Europa. Además, el biodiésel se utiliza como sustituto del gasóleo C de calefacción [12].

PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A NIVEL MUNDIAL

La producción mundial de biodiésel era prácticamente insignificante a principios de la década de los 90, debido a la caída del precio del crudo que se produjo en aquellos años. Luego, con las subidas posteriores de este recurso, la producción de biodiésel se revitalizó.

La producción ha experimentado un crecimiento exponencial desde su primera producción industrial hace unos 20 años. No alcanzaba los cien mil metros cúbicos en 1992, pero en el año 2000 se acercaba al millón y siguió creciendo a

ritmo notable hasta multiplicarse por 4 en el quinquenio siguiente. Este avance se explica por el hecho de que en los últimos años el panorama del sector ha cambiado por completo. La escalada del precio del petróleo fue enfrentada por la decisión de la Unión Europea (UE) de incrementar la participación de los biocombustibles renovables en su matriz energética, con el objetivo de diversificar la oferta, alcanzar cierto grado de autoabastecimiento energético y reducir las emisiones netas de carbono. Además, entre 2005 y 2007 se generalizan las leyes en distintos países del mundo que establecen incentivos fiscales y cortes de mezcla obligatorios, dando un nuevo impulso al sector. De esta forma se produce la entrada de una nueva serie de jugadores, entre los que destacan los Estados Unidos, Brasil y Argentina, dispuestos a responder tanto a la demanda de su respectivo mercado como a la del mercado mundial. A pesar de la aparición de nuevos productores, la UE seguiría siendo el ámbito de concentración de la industria, tanto del lado de la oferta como de la demanda. Así, en el año 2007 se alcanzaron 8,9 millones de toneladas, situándose como principal productor Alemania con 2 millones de toneladas, seguida de Estados Unidos con 1,2 millones, Francia con 1,15 millones e Italia con 550000 toneladas [24]. En la Fig. 3 se observa el crecimiento de la producción mundial de biodiésel en el período 2002-2008.

En la Tabla II se muestra la producción de biodiésel en distintos países en el año 2008, en la que siguen encabezando el ranking Alemania, EEUU y Francia.

TABLA II
RANKING MUNDIAL DE PRODUCTORES DE BIODIÉSEL EN 2008, EN MILLONES DE TONELADAS [23].

Rank	País	Producción
1	Alemania	2,819
2	EEUU	2,327
3	Francia	1,815
4	Brasil	1,027
5	Argentina	0,960
6	Italia	0,595
7	Malasia	0,420
8	Bélgica	0,277
9	Polonia	0,275
10	Portugal	0,268
11	Dinamarca/Suecia	0,231
12	Austria	0,213
13	España	0,213
14	Reino Unido	0,207

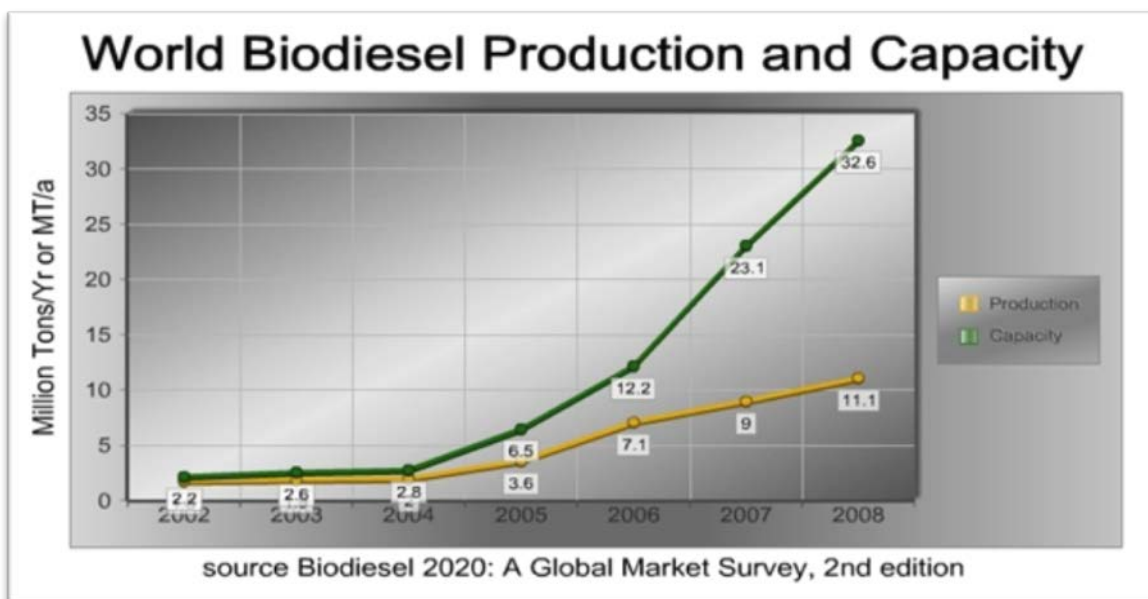


Fig. 3. Producción Mundial de Biodiésel 2002-2008 en millones de toneladas [24].

En 2009, Europa fue el principal mercado de biodiésel con una cuota de producción del 49,8%, seguida por el continente americano con el 32,8% y la región Asia-Pacífico 4,4%; produciéndose unos 15 millones de toneladas en total. La participación europea disminuye desde 2001, mientras crece en las otras dos regiones. Los cinco principales productores son Alemania, EEUU, Francia, Argentina y Brasil, que juntos producen el 68,4% del total del biodiésel del mundo. Australia es el mayor productor en la región Asia-Pacífico, seguido de China y la India [23].

En el pronóstico de futuro para esta década 2010-2020, con el apoyo de los gobiernos para incrementar la independencia energética y satisfacer la demanda en el alza de energía, el mercado del biodiésel espera producir 45291 millones de litros en 2020, lo que representa una tasa acumulativa de crecimiento anual del 10,1% entre 2009 y 2020, notablemente inferior a la de la pasada década. Durante la primera década de este siglo tuvo una tasa de crecimiento anual acumulativa del 42%, y en la siguiente década continuará su expansión, aunque a un ritmo inferior al 10% [24], [25], [26].

PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A NIVEL EUROPA

La creación de un mercado europeo para biocarburantes ofrecería una oportunidad para la economía europea. La UE es el mayor productor de biodiésel en el mundo. El crecimiento más significativo se ha producido en Alemania donde el biodiésel puro (B100) tiene una exención de impuestos del 100% y existe una red de más de 1.500 estaciones distribuidoras de B100. Otros productores y consumidores significativos de biodiésel son Francia, Italia, Austria y España.

La producción de biodiésel pasó de 1,45 millones de

toneladas en 2003 a 1,85 millones de toneladas en 2004. En 2006 la capacidad de producción de la UE excedió los cuatro millones de toneladas. En la Fig. 4 se muestra la evolución de la producción desde 2002 hasta 2007 [24].

En 2008 fue el principal productor de biodiésel con más del 55% de la producción mundial llegando a los 7,7 millones de toneladas (la capacidad instalada superaba los 20 millones de toneladas), siendo líderes Alemania (2,8 millones de toneladas), Francia (1,8 millones de toneladas) e Italia (595 mil toneladas).

En un comunicado de prensa de 15 de julio de 2009, la EBB (European Biodiesel Board) [27], ofreció un resumen completo de la situación del biodiésel en la UE. En línea con la tendencia iniciada en 2007, en los dos últimos años la UE experimentó un aumento relativamente bajo en la producción de biodiésel, e incluso una reducción en los dos principales Estados miembros productores, Alemania y Francia. Un claro estancamiento de la producción de biodiésel también es evidente en los demás miembros.

El aumento de la producción de biodiésel entre 2007 y 2009 aún no está en consonancia con el ambicioso objetivo de la UE para la mitigación del cambio climático que fue señalado en el informe de Energía Renovable Directiva 2009/28. El informe reconoce que se necesitaría un importante esfuerzo en los próximos años para alcanzar el objetivo de producción europeo, que prevé entre 30 y 35 millones de toneladas en 2020 [26], [27]. Esta necesidad de crecimiento, junto con el déficit de diésel mineral que experimenta Europa –y el consiguiente peso significativo de su importación, mayoritariamente de Rusia–, puede contribuir a un rápido desarrollo del sector, con inversiones que contemplen tanto el incremento de la producción, como el fomento de la investigación.

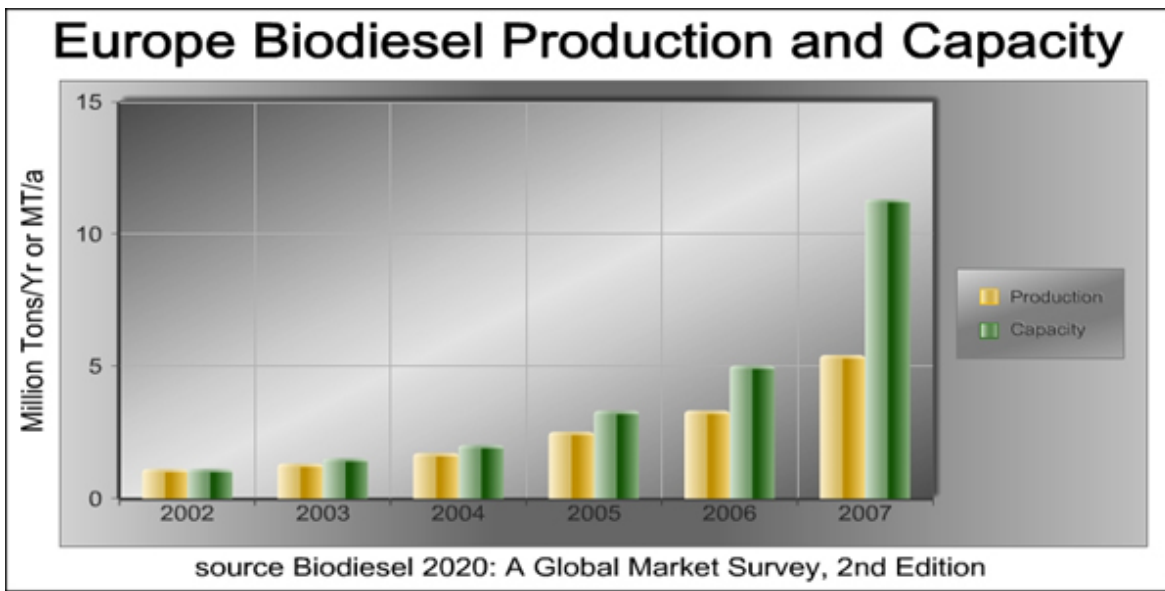


Fig. 4. Producción de Biodiésel en Europa entre 2002-2007, en millones de toneladas. Fuente: Biodiésel 2020. A Global Market Survey [24].

Sin embargo, las instalaciones han bajado drásticamente la producción a consecuencia de la competencia comercial (a veces desleal) que ejercen los biocombustibles importados desde Estados Unidos. Este hecho, unido al despertar productivo de algunos países subdesarrollados, ha afectado gravemente la rentabilidad de los productores de biodiésel de la UE desde principios de 2007.

Durante más de dos años, los productores de biodiésel de la UE tuvieron que competir con importantes subvenciones y el *dumping*¹ de biodiésel de los EEUU (conocido como "B99"). B99 se ha vendido en la UE con un descuento considerable, incluso a menor precio que el aceite crudo de soja. A raíz de las denuncias presentadas por la EBB en 2008, la investigación de la Comisión Europea estableció como injusta la competencia por parte de EEUU, causando un daño significativo a la industria del biodiésel de la UE, en particular en términos de rentabilidad y rendimiento de las inversiones.

En marzo de 2009 la Comisión Europea impuso derechos *antidumping* provisionales y medidas compensatorias en contra de este comercio desleal de biodiésel de EEUU. El 7 de julio de 2009, estas medidas fueron prorrogadas por 5 años más con la aprobación de los Ministerios de la UE [27].

Además de la referencia ineludible a la importación de biodiésel de Estados Unidos como origen de los principales males que aún acusan al sector, el biodiésel procedente de Argentina también alteró de manera considerable el mercado europeo. Su régimen fiscal, con gravámenes más bajos en exportaciones de producto terminado respecto a la materia prima que busca dar mayor valor agregado a la soja, ha provocado durante los últimos meses la importación masiva en

Europa de biodiésel argentino [28].

Sumado a esta situación, el sector productor de biodiésel en Alemania en 2009 estaba operando a cerca del 20 por ciento de su capacidad debido a los impuestos al combustible que recortaron su demanda. Los productores y algunos investigadores del biocombustible sostienen que el biodiésel necesita concesiones impositivas debido a que su producción es más costosa y el impacto ambiental es claramente positivo. Esta opinión hace parte de un gran debate y genera opiniones encontradas [29].

A pesar de las dificultosas condiciones del mercado, la industria del biodiésel de la UE sigue liderando el panorama mundial, lo que permite un aumento moderado en la producción respecto a años anteriores. Sin embargo, esto está muy por debajo de lo que los productores de biodiésel de la UE podrían alcanzar en un entorno más favorable. Según datos de la EBB, aproximadamente el 50% de las plantas permanecen inactivas por la disminución de su rentabilidad desde 2007 [27].

PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL EN ESPAÑA

La mayor parte de la producción española de biodiésel se fabrica a partir de aceites reciclados en España, y el resto se elabora con soja importada y otros productos oleaginosos.

Hasta el año 2000 no existía ninguna planta de producción de biocarburantes en funcionamiento en España, a partir de ahí se produjo un crecimiento exponencial en la producción de biodiésel, especialmente significativo entre el año 2004 y 2005 (Fig. 5). Los fabricantes españoles han tenido grandes dificultades para utilizar toda su capacidad industrial, dar salida comercial a su producción y rentabilizar sus inversiones debido a los mismos problemas antes comentados para la UE. El año 2008 cerró con la fabricación de aproximadamente 207

¹ Práctica en donde una empresa establece un precio inferior para los bienes exportados que para los costos de producción que tiene la empresa del país adonde se importan esos bienes, sacando competitividad a la empresa local.

mil toneladas de biodiésel frente a las 3,66 millones de toneladas de su capacidad. Esta situación desastrosa llevó a más de la mitad de las plantas al cierre o a operar a menos del 10% de su capacidad de producción [27].

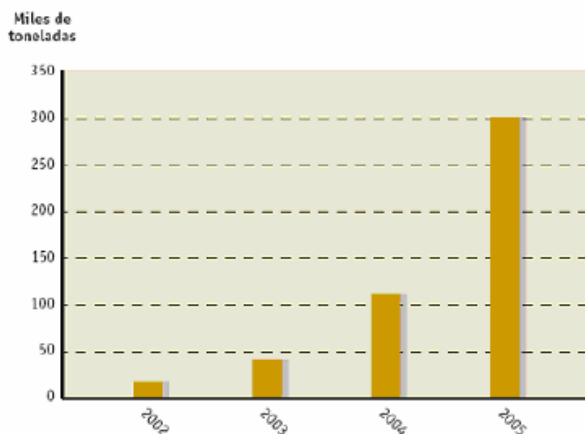


Fig. 5. Producción de Biodiésel en España desde 2002 hasta 2005.

Sin embargo, los datos contrastan con el consumo, que, según indicaban también desde la APPA (Asociación de Productores de Energías Renovables), se ha duplicado en el período 2007-2008. En esta línea se mantiene el informe que indica que “durante 2007 y 2008 el incremento del consumo no tuvo una repercusión directa sobre el mercado español porque la mayoría del biodiésel que se consumía en el país español era importado. La importación de biodiésel de otros países en 2008 alcanzó el 71%”. La importación subvencionada de EEUU, contra la que han intentado luchar a través de directivas europeas, ha lastrado las ventas españolas [30].

A pesar de estos datos, se estima que el futuro es más prometedor. Tras varios años de incertidumbre en el sector, todo parece indicar que comienza una nueva etapa en la que se incrementará el consumo de biodiésel en España. Las medidas legales adoptadas por la Unión Europea para incorporar biocombustibles en los carburantes y los aranceles impuestos para evitar las importaciones subvencionadas en origen y en destino, como las de EEUU, suponen un buen comienzo para que España pueda situarse entre los primeros puestos del mercado europeo de biodiésel. En este sentido, se recuerda que es imprescindible concretar legalmente el objetivo del 10% de obligatoriedad de la mezcla para 2011 y especificar obligaciones anuales crecientes hasta 2020 [31].

MARCO REGULATORIO Y FISCAL DE LOS BIOCARBURANTES

El marco regulatorio y de planificación que afecta a los biocarburos es factor destacado para entender la situación actual, ya que a través del mismo se persigue un desarrollo de los mercados más acelerado que el generado por oportunidad

de negocio. De esta forma se han elaborado documentos y normativas que proponen, tanto objetivos de producción o consumo de biocarburos, como posibles medidas para su cumplimiento [32], [33], [34].

1) Normativa Internacional

En el marco del Protocolo de Kyoto con la preocupación de algunos países en reducir las emisiones de CO₂, existe un proceso de elaboración de nuevas legislaciones en materia de producción energética en los países que han ratificado el protocolo.

Algunas de las medidas más destacables con el fin de frenar el cambio climático y la reducción de la dependencia energética de Europa son:

- La reducción de un 20% de las emisiones de gases invernadero hasta 2020 en comparación con 1990. Este porcentaje podría llegar al 30% si otros países ricos se comprometen a reducciones comparables y los que están en desarrollo colaboran en este objetivo en un acuerdo global y completo a partir de 2012, fecha en que expira el Protocolo de Kioto.
- Lograr una cuota mínima de un 10% de biocombustibles (obtenido de biomasa o de materias agrícolas) en el consumo total de gasolina y gasóleo de transporte en 2020.

2) Normativa Comunitaria

- Libro Blanco para una Estrategia y un Plan de Acción Comunitarios. Energía para el futuro: fuentes de energía renovables (1997). Fija los primeros objetivos claros para las energías renovables y concretamente para los biocarburos. Considera este Plan que “los únicos medios de que se dispone para aumentar la utilización de biocombustibles líquidos son la concesión de considerables reducciones fiscales y la subvención de la producción de materias primas”.
- Libro Blanco para una política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad (2001). En este documento se insiste en los beneficios inherentes al empleo de los biocombustibles de cara a la reducción de la contaminación vial. De hecho, considera que para este objetivo “las opciones más alentadoras son los biocarburos a corto y medio plazo, el gas natural para el medio y largo plazo y el hidrógeno a más largo plazo”.
- Libro Verde "Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético". Establece que el desarrollo de los biocombustibles permitiría sustituir en 2020 el 20% del carburante diésel y la gasolina por estos productos para el transporte por carretera.
- Directiva 2003/17/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 3 de marzo de 2003. Transpuesta a través del RD 1700/2003, esta norma modifica la Directiva

98/70/CE relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo, fijando fundamentalmente el contenido de azufre máximo para gasolinas y gasóleo de automoción (clase A), a partir del 1 de enero de 2009, lo que tiene implicaciones para los biocarburantes debido a su menor contenido en azufre.

- Directiva 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de mayo de 2003. Esta Directiva es relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables de transporte. Establece que productos se consideran biocarburantes y fomentar la utilización de éstos como sustitutivos del gasóleo o la gasolina a efectos de transporte, así como obligar a los Estados Miembros a velar por que se comercialice en sus respectivos mercados una proporción mínima de biocarburantes.
- Directiva 2003/96/CE del Consejo, de 27 de octubre de 2003. Con respecto a los biocarburantes, esta Directiva, reestructura el régimen comunitario de imposición de los productos energéticos y de la electricidad. Aconseja establecer un marco comunitario que permita a los Estados Miembros *“eximir o reducir los impuestos especiales para los biocarburantes que favorezca un mejor funcionamiento del mercado interior y ofrezca una seguridad jurídica adecuada a los Estados miembros y a los agentes económicos”*.
- Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del consejo, de 23 de abril de 2009. Directiva relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, en base a la cual se deroga la Directiva 2003/30/CE. Establece un marco común para el fomento de la energía procedente de fuentes renovables.

3) Normativa del Estado Español

España, como país miembro de la UE, debe cumplir con los compromisos aprobados sobre las energías renovables. El nuevo marco del sector sitúa como objetivo vinculante alcanzar el 20% en el consumo de renovables para el año 2020. De este porcentaje se extrae como objetivo para los biocombustibles un 12%.

F. Una Mirada Objetiva sobre el Biodiésel

El biodiésel es una alternativa que ha ganado una especial atención en el mercado global, aunque muchas veces ha sido cuestionado y aún está sujeto a superar varios problemas y muchos prejuicios. Una herramienta para medir el coste energético de un producto es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que tiene en cuenta todas las operaciones y tratamientos que se desarrollan desde la obtención de la materia prima utilizada hasta el producto terminado. Sin embargo, trabaja con parámetros y variables con un amplio margen de error que arroja resultados diferentes según la

fuente y que pueden ser manipulados [35]. Por estas razones el balance de emisiones de efecto invernadero ofrece muchas posibilidades o provoca que muchos grupos (algunos de ellos ambientalistas) rasguen sus vestiduras.

Existe un estudio del ACV aplicado a los biocarburantes, llevado a cabo por el CIEMAT por encargo del Ministerio de Medio Ambiente, según el cual los biocarburantes que se producen en España reducen las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el gasóleo y la gasolina [36].

Es muy importante y necesario conocer las ventajas del biodiésel y sus deficiencias para intentar corregirlas. Este reto debe motivar a trabajar de modo más intenso, buscando espacios, insumos y procedimientos que hagan esta alternativa más viable técnica, social y económicamente.

VENTAJAS

Actualmente los países de la Unión Europea, Estados Unidos, Francia, Brasil, Argentina y Colombia, entre muchos otros, han apoyado la utilización de biocombustibles con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, impulsar la descarbonización de los combustibles del transporte, diversificar las fuentes de su abastecimiento, desarrollar alternativas al petróleo a largo plazo, utilizar tierras ociosas y reforestar la capa vegetal [37]. Se espera también que el incremento de la producción de biocombustibles ofrezca nuevas oportunidades para diversificar la renta y el empleo en las zonas rurales o de bajos recursos [14].

✓ *Disminución en emisiones contaminantes*

Un estudio hecho por la EPA en el año 2002, muestra que la utilización de este biocombustible presenta ventajas medioambientales, ya que usándolo puro se logra una reducción del 90% de hidrocarburos (HC) y una reducción del 75-90% en hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). De igual manera reduce las emisiones de dióxido de carbono (78% menos) y dióxido de azufre (SO₂), material particulado (MP), metales pesados, monóxido de carbono (CO), y compuestos orgánicos volátiles [38]. Por otro lado el biodiésel puede aumentar o disminuir los óxidos de nitrógeno (NO_x) dependiendo del método de medición y del tipo de motor [39]. Según Knothe (2006), lo que favorece este aumento son los aceites que tienen una gran composición de ácidos insaturados [15].

✓ *Compatibilidad y seguridad*

El biodiésel, además de provenir de una fuente renovable, puede ser almacenado en los mismos lugares donde se almacena el diesel de petróleo sin necesitar cambios de infraestructura. Es un combustible más seguro y fácil de manipular debido a su alto punto de ignición (aproximadamente 150°C) comparado con el del diesel que es aproximadamente de 60°C [21].

✓ *Lubricidad*

El contenido de oxígeno del biodiésel mejora el proceso de combustión y disminuye su potencial de oxidación. La eficiencia de combustión es más alta que el diésel debido al aumento de homogeneidad de la mezcla oxígeno con el combustible durante la combustión. El biodiésel contiene un 11% de oxígeno en peso y no contiene azufre. Por esta razón el uso de biodiésel puede extender la vida útil de los motores porque posee mejores cualidades lubricantes que el combustible de diésel de petróleo, mientras el consumo, encendido, rendimiento, y el par del motor varían muy poco respecto a sus valores normales [16].

✓ *Biodegradabilidad y toxicidad*

El biodiésel es no tóxico y se degrada 4 veces más rápido que el diésel de petróleo. Su contenido de oxígeno mejora el proceso de degradación. Los estudios de biodegradabilidad de varios tipos de biodiésel en ambientes acuáticos reportaron una fácil degradabilidad para todos ellos. Después de 28 días todos los biodiésel fueron biodegradados en un 77%-89%, mientras que el combustible diésel sólo lo hizo en un 18% [40].

La mezcla de biodiésel con diésel o con gasolina incrementa la biodegradabilidad del combustible, debido a efectos sinérgicos de cometabolismo. Así, el tiempo necesario para alcanzar un 50% de biodegradación se reduce de 28 a 22 días en el caso del B5 (mezcla de 5% de biodiésel y 95% de diésel) y de 28 a 16 días en el caso del B20 [41].

DESVENTAJAS

Los problemas técnicos del biodiésel se relacionan con su alta viscosidad, menor poder calorífico, comportamiento deficiente a bajas temperaturas, ligero aumento en las emisiones de NO_x, coquización del inyector, desgaste en el motor y mayor dilución en el lubricante del motor. Además, su mayor problema es el alto costo y la disponibilidad de la materia prima [17]. Algunos sectores han hecho cuestionamientos sociales y responsabilizan a este biocombustible del aumento en el precio de los alimentos y la deforestación de zonas selváticas.

✓ *Mayor viscosidad*

Debido a que el biodiésel tiene una viscosidad mayor que el diésel pueden existir problemas de pérdidas de flujo a través de los filtros e inyectores. Si el spray es alterado por el flujo de combustible se puede generar una coquización del inyector o dilución del lubricante [40].

✓ *Desempeño mecánico*

La potencia del motor disminuye porque el poder calorífico inferior (PCI) del biodiésel es menor. El calor de combustión se reduce en aproximadamente 12% debido a la presencia de oxígeno dentro de la molécula, esto disminuye el par y la

potencia en cerca de 10%, principalmente por la reducción en el calor de combustión. De igual manera esta disminución repercute en un mayor consumo de combustible para lograr el mismo desempeño utilizando combustible diésel [16].

✓ *Emisiones de NO_x*

El biodiésel puede aumentar o disminuir los óxidos de nitrógeno (NO_x) dependiendo de la materia prima del biodiésel. Se encontró que a mayor grado de insaturación de las materias primas para biodiésel (por ejemplo, colza y soja) se producían mayores emisiones de NO_x [14].

✓ *Comportamiento a bajas temperaturas*

El biodiésel presenta problemas para funcionar a bajas temperaturas. Generalmente, los Puntos de Congelación (PC), Puntos de Nube (PN), así como el Punto de Obstrucción por Filtros Fríos (POFF) son desde ligeramente superiores a muy superiores dependiendo del origen del éster (soja, girasol o palma). Los glicéridos saturados producen cristalizaciones a temperaturas relativamente bajas y aumentan el PN y el POFF. Por ejemplo el biodiésel producido a partir de aceite de palma tiene un POFF de +11°C y un PN de +13°C [17]. Estos valores impiden su utilización en temporadas invernales pero no en verano o en países tropicales [18].

✓ *Dilución del lubricante*

El aceite de motor (lubricante) puede degradarse mucho más rápido si el combustible utilizado es biodiésel en vez de diésel. El biodiésel tiende a disolverse más fácilmente en el lubricante que el diésel. La dilución que se produce por el biodiésel en el aceite hace que la viscosidad disminuya en las primeras etapas (dilución del combustible). En etapas posteriores aumenta con el tiempo (oxidación del lubricante) debido a la formación de depósitos y lacas, causadas por la tendencia del biodiésel a la oxidación y polimerización del lubricante, debido a la presencia de dobles enlaces en su estructura [15]. Por estas razones se recomienda utilizar un lubricante que tenga una capacidad dispersante superior a la utilizada con el diésel, de lo contrario se recomiendan cambiar el aceite lubricante en períodos más cortos que utilizando un diésel normal.

✓ *Problemas de corrosión*

Pueden aparecer algunos problemas debido a la corrosión y a las partículas de desgaste en el tanque, que hay que tener en cuenta no sólo en lo que afecta al motor, sino también respecto a la instalación, especialmente cuando se utiliza biodiésel puro (B100). Algunos materiales se deterioran con el biodiésel: pinturas, plásticos, gomas, etc. Es por eso que las juntas de nitrilo en contacto con el biodiésel se disuelven, por lo que se deben sustituir por las de vitón, teflón u otros materiales que sean más resistentes. De igual manera si se utiliza B100 se recomienda que las pinturas del depósito de combustible y demás partes en contacto con el combustible se sustituyan por otras acrílicas [42].

✓ *Estabilidad a la oxidación*

Si el biodiésel proviene de un aceite con alta concentración de ácido linoléico (C18:3) o en general ácidos insaturados (soja, colza o girasol), presentará problemas de estabilidad a la oxidación debido a que posee dobles enlaces y oxígeno en su molécula. Esto es importante a la hora de almacenar durante mucho tiempo el biodiésel. La utilización de recipientes que contengan cobre, cinc, plomo o alguna combinación de estos tres, afecta de manera muy negativa a la estabilidad, ya que forma gran cantidad de sedimentos, depósitos en los inyectores y colmatación en los filtros. Por tal motivo se recomienda usar materiales de zinc o acero preferiblemente [17].

✓ *Precio*

El biodiésel es una alternativa tecnológica factible al diésel, pero actualmente el costo es 1.5-3 veces más elevado que el diésel en países desarrollados. La competitividad del biodiésel depende de las políticas que hagan los gobiernos, tales como subsidios y exención de impuestos, porque sin estas ayudas no es factible económicamente [29, 43, 44].

III. FUENTES DE MATERIA PRIMA

Las materias primas para la elaboración de biodiésel son principalmente las semillas oleaginosas y sus aceites derivados, por lo que se puede decir que la producción de biodiésel proviene mayoritariamente de los aceites extraídos de estas semillas (especialmente girasol, soja, colza y palma). Sin embargo, cualquier materia que contenga triglicéridos puede utilizarse para la producción de biodiésel (aceites de fritura usados, grasa de pescado y pollo, sebo de vaca, etc.).

A continuación se detallan las principales materias primas para la elaboración del biodiésel.

A. *Aceites Vegetales Tradicionales, 1ª Generación*

Los biocombustibles de primera generación son aquellos que son obtenidos a partir de cultivos energéticos tradicionales, y de segunda generación a los obtenidos a partir de especies vegetales que no entran en competencia directa con el mercado alimentario, o residuos vegetales o animales.

Los productos utilizados para la producción de biodiésel denominados de primera generación, son obtenidos principalmente a partir de semillas oleaginosas mundialmente conocidas, como la colza y el girasol (Europa), la soja (Estados Unidos) y el coco (Filipinas); y los aceites de frutos oleaginosos como la palma (Malasia e Indonesia), además del cacahuete, oliva, mostaza, entre otros [47], [48]. Los aceites vegetales son la principal materia prima para la producción de biodiésel, razón por la cual el uso de cultivos de alto contenido oleaginoso ha sido estudiado exhaustivamente [45], [46].

El mercado creciente de producción de biodiésel a partir de aceites vegetales comestibles, requería 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 biodiésel a partir de palma y soja, ha ocasionado problemas ambientales inherentes a la deforestación de regiones tropicales [49]. Además de los aceites vegetales convencionales, existen otras especies más adaptadas a las condiciones del país donde se desarrollan y podrían estar mejor posicionadas en el ámbito de los cultivos energéticos. La búsqueda de nuevas materias primas que no compitan con el mercado de la alimentación es un tópico que despierta gran interés. Pero además, una oleaginosa alternativa ideal para la producción de biodiésel debe caracterizarse por una gran adaptabilidad climática a la región donde se cultiva (lluvias o sequías, tipo de suelo, latitud, etc.), disponibilidad regional, alto contenido de aceite, bajo contenido de ácidos grasos libres, compatibilidad con la estructura existente en el campo, bajas necesidades agrícolas (fertilizantes, agua, pesticidas), crecimiento definido por temporada, maduración uniforme de su cosecha, mercado potencial para los subproductos y la habilidad de crecer en tierras no deseables para la agricultura y/o fuera de temporada de los cultivos tradicionales [12]. En consecuencia, se ha planteado el uso de aceites no comestibles procedentes de cultivos energéticos marginales tales como *Jatropha curcas* (piñón), *Calophyllum inophyllum* (tamanu), *Pongamia pinnata* (haya de la India, karanja), *Madhuca indica*, *Swida wilsoniana*, *Ricinus communis* (higuerilla) y *Vernica fordii* (tung). Estos cultivos marginales no requieren de terrenos fértiles, ya que proliferan en suelos áridos, pobres en nutrientes, con altos niveles de radiación y baja precipitaciones [51], [52].

B. *Materias Primas Alternativas, 2ª Generación*

Además de oleaginosas existen otros tipos de materias primas de las cuales se puede obtener biodiésel. El elevado costo de la materia prima, que contribuye del 50 al 90% del precio de producción de biodiésel, ha obstaculizado la comercialización del biocombustible, motivo por el cual se ha propuesto el uso de aceites de desecho y de grasas animales.

ACEITES DE FRITURA USADOS

El aceite residual de cocina es uno de los grandes responsables de la contaminación del agua. Los aceites comestibles provenientes de materias primas como girasol, soja, oliva, maíz o palma, forman en la superficie del agua una película difícil de eliminar que afecta su capacidad de intercambio de oxígeno y altera el ecosistema. Las grasas animales y los aceites de cocina usados son conocidos como “grasas amarillas” si el nivel de ácidos grasos libres es menor al 15% p/p, y “grasas oscuras o marrones” si el contenido de

ácidos grasos libres (AGL) es superior al 15% p/p [53]. La necesidad de refinado de algunos aceites vegetales no los hace económicamente factibles para la producción de biodiésel, debido al alto costo de la materia prima y de producción [54], [55]. El costo del aceite refinado representa de 75 a 85% del precio total del biodiésel [43].

Los aceites residuales de cocina usados son principalmente obtenidos de la industria de restaurantes o reciclados en sitios especiales. Puede no tener ningún costo o un 60% menos que los aceites refinados dependiendo de la fuente y la disponibilidad [56]. Los aceites usados presentan un gran nivel de reutilización, y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustible [16]. Sin embargo, estos aceites tienen propiedades tanto del aceite crudo como del refinado. El calor y el agua aceleran la hidrólisis de los triglicéridos y aumenta el contenido de ácidos grasos libres en el aceite. El material insaponificable, la viscosidad y la densidad aumentan considerablemente debido a la formación de dímeros y polímeros, pero el índice de yodo y la masa molecular disminuyen [57].

Por estas razones, la utilización de aceites usados presenta dificultades logísticas y técnicas, no sólo por su recogida, sino también por su control y trazabilidad debido a su carácter de residuo. Otros problemas encontrados al utilizar aceites reciclados para producir biodiésel tienen que ver con los altos contenidos de material insaponificable, cantidad de agua y el alto contenido de ácidos grasos libres, por lo cual requiere de varios procesos para acondicionar el aceite para la transesterificación. También el producto suele presentar una baja estabilidad a la oxidación, por lo que no cumple la norma UNE 14214 y obliga a agregar antioxidantes. Finalmente la calidad del biodiésel producido normalmente no cumple con las especificaciones de pureza requeridas, por lo que debe ser sujeto a una destilación. Todos estos problemas y procesos adicionales elevan los costos de producción [58]. A pesar de estos problemas los aceites reciclados son considerados como una de las alternativas con mejores perspectivas en la producción de biodiésel, ya que es la materia prima más barata, y con su utilización se evitarían los costes de tratamiento como residuo [17], [56], [59].

España es un gran consumidor de aceites vegetales, principalmente de oliva y girasol. Estos aceites presentan un bajo nivel de reutilización, por lo que no sufren grandes alteraciones y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustible. Los datos de consumo en España se sitúan en torno al millón de toneladas, lo que implica una producción de aceites usados en torno a las 750000 toneladas al año. La estructura de este consumo se caracteriza por un peso muy elevado del sector hogar, alrededor del 70% del total, y el resto corresponde al sector hostelero e industrial [42]. En España la Ley 10/98 de Residuos establece la prohibición de verter aceites usados, lo cual es un incentivo más para su utilización en la fabricación de biodiésel.

GRASAS ANIMALES

Esta materia prima incluye los subproductos (sebos) de una gran variedad de animales domésticos tales como vacas, aves, cerdos y peces. Las grasas animales son caracterizadas por contener un gran porcentaje de ácidos grasos saturados en comparación con los aceites vegetales. Esto afecta a las propiedades del biodiésel y su comportamiento a bajas temperaturas, lo que representa un problema para operar en invierno. Por otro lado presentan un gran poder calorífico y un alto número de cetano. Las grasas animales normalmente son consideradas como productos de desecho, por esta razón normalmente son mucho más baratas que las otras materias primas de primera generación, lo cual las hace atractivas para la producción del biodiésel. Debido a su alto grado de ácidos grasos libres estas grasas requieren una transesterificación en dos etapas, en la cual primero se hace un pretratamiento con una catálisis ácida (H_2SO_4), seguida por una catálisis convencional con una base fuerte (NaOH o KOH). Dependiendo de su origen, el biodiésel puede presentar problemas de estabilidad a la oxidación y requiere la adición de antioxidantes [12].

En el 2007, la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales, ya sean comestibles y no comestibles, vírgenes y usados, y grasas animales (12 Mtons) correspondió sólo al 0,3% del consumo global de petróleo (3952,8 Mtons), quedando de manifiesto la incapacidad de estas fuentes alternativas para desplazar la demanda actual y futura de combustible [50], [60]. Asimismo, la producción de biodiésel a partir de plantas oleaginosas, comestibles y no comestibles, está limitado por varios inconvenientes tales como la dependencia de las condiciones climáticas, los largos períodos de producción (meses o años) y el rendimiento lipídico restringido (menor al 5% del peso seco total), entre otros. No obstante, los principales problemas son la extensa superficie de cultivo requerida y el enorme volumen de agua necesario para el riego [47], [50], [62], [70]. La sustentabilidad de la industria del biodiésel requiere de materias primas alternativas que permitan operar continuamente y superar las limitaciones señaladas [52], siendo una alternativa en auge es la obtención de aceites a partir de cultivos de microalgas.

MATERIAS PRIMAS ALTERNATIVAS, 2ª GENERACIÓN

El biodiésel producido a partir de microalgas parece tener el suficiente potencial para llegar a sustituir tanto a los derivados del petróleo como a los biocombustibles de primera generación. La sostenibilidad de estos procesos puede ser evaluada mediante la realización de un análisis del ciclo de vida. Además, esta metodología permite encontrar las etapas susceptibles de ser mejoradas desde el punto de vista energético.

Las microalgas presentan un rendimiento solar superior al de los cultivos de los que se derivan los biocombustibles de primera generación, tienen un elevado contenido de lípidos, necesitan agua de menor calidad (salada o salobre), pueden

instalarse en terrenos de uso marginal, e incluso, como algunos investigadores han demostrado, su cultivo puede ser acoplado a fuentes industriales de CO₂, reduciendo así las emisiones contaminantes. Además, una vez extraído el aceite, el resto de la biomasa, rica en proteínas e hidratos de carbono, podría utilizarse como *compost*, fertilizante o en productos alimenticios. Por fermentación podría obtenerse bioetanol a partir de los hidratos de carbono. La carrera mundial de desarrollos tecnológicos para la obtención de biodiésel a partir de aceite de microalgas está centrada en el logro del aceite a un costo competitivo [61], [62]. Algunos autores, G. Dragone et al. [79], sitúan a las microalgas como la tercera generación de biocombustibles.

IV. MICROALGAS COMO MATERIA PRIMA ALTERNATIVA

A. Características generales de las microalgas

Las microalgas son un conjunto heterogéneo de microorganismos fotosintéticos unicelulares procariontes (cianobacterias) y eucariotas (algas verdes y diatomeas), que se localizan 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. Se les considera responsables de la producción del 50% del oxígeno y de la fijación del 50% del carbono en el planeta. Cuentan con una gran biodiversidad, tal que se han podido identificar alrededor de 40000 especies, aunque se estima que existen más de 100000, y donde en muchas de ellas se desconoce, con frecuencia, su composición bioquímica y metabolismo. Las microalgas se clasifican de acuerdo a varios parámetros tales

como pigmentación, ciclo de vida, morfología y estructura celular (Tabla III). Las especies más estudiadas para aplicaciones biotecnológicas corresponden a las algas verdes y a las diatomeas [64], [65].

Desde la antigüedad las microalgas se han usado como alimento humano, pero no es sin embargo hasta hace relativamente poco tiempo cuando han atraído la atención para la investigación, debido a su potencial biotecnológico. El interés por las microalgas surgió en Alemania en los años cincuenta y sesenta, al ser consideradas como una fuente abundante de proteínas de bajo costo para la nutrición humana. Interés que después se extendió a países de todos los continentes. El atractivo de las microalgas posteriormente fue encauzado hacia otras aplicaciones, tales como la acuicultura (cultivo de especies acuáticas vegetales y animales en medios naturales y artificiales), el tratamiento de aguas residuales, la obtención de sustancias químicas finas, la producción de farmacéuticos y los procesos de bioconversión energética. La producción de bioenergía a partir de microalgas fue contemplada desde los años cincuenta, sin embargo a partir de la crisis energética de 1975, el potencial económico de esta tecnología fue reconocido por varios países como EEUU, Japón y Australia [65], [66].

Destaca el proyecto realizado por el Departamento de Energía de los EEUU (DOE, Department of Energy) con más de 25 millones de dólares, y el 'programa de especies acuáticas' del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL, National Renewable Energy Lab) con una duración de 18 años (1978-1996), los cuales supusieron importantes aportaciones en las áreas de aislamiento, caracterización, fisiología, bioquímica e ingeniería genética de especies de microalgas que sumadas a los avances en el análisis económico y escalamiento de cultivos en sistemas eficientes,

TABLA III

CLASIFICACIÓN DE LAS MICROALGAS, DE ACUERDO A PARÁMETROS TALES COMO PIGMENTACIÓN, CICLO DE VIDA, ESTRUCTURA CELULAR, ETC. [63].

Clase	Características
<i>Chlorophyta</i> (algas verdes)	División formada por una gran cantidad de especies, en particular por las que proliferan en ambientes de agua dulce. Pueden existir ya sea como células individuales o colonias. Su principal reserva de carbono es el almidón. Sin embargo pueden almacenar lípidos bajo determinadas condiciones. En esta división destacan las clases <i>Prasinophyceae</i> , <i>Haematococcus</i> , <i>Chlorella</i> y <i>Dunaliella</i> .
<i>Bacillariophyta</i> (diatomeas)	Las diatomeas predominan en aguas oceánicas, no obstante también se les puede encontrar en aguas dulces y residuales. Se caracterizan por contener silicio en sus paredes celulares. Almacenan carbono de maneras diversas, ya sea como aceites o como <i>crisolaminarina</i> (polímero glucídico).
<i>Heterokontophyta</i> (algas doradas)	División constituida por una gran diversidad de clases dentro de las cuales destaca la <i>Crysoophyceae</i> (algas doradas), similares a las diatomeas en términos de composición bioquímica y contenido de pigmentos. Las algas doradas se distinguen por los complejos pigmentos que las conforman, los cuales les proporcionan tonalidades amarillas, cafés o naranjas. Las especies de este grupo son principalmente de agua dulce. Sus reservas de carbono son los lípidos y los carbohidratos. Asimismo, otras clases relevantes de esta división son: <i>Phaeophyceae</i> (algas cafés), <i>Xantophyceae</i> (algas verde-amarillas), <i>Eustigmatophyceae</i> , entre otras.
<i>Cyanophyceae</i> (cianobacterias)	Las cianobacterias son microorganismos procariontes cuya estructura y organización son similares a las de las bacterias. Las cianobacterias desempeñan un papel relevante en la fijación del nitrógeno atmosférico.
Otras divisiones	<i>Rhodophyta</i> (algas rojas), <i>Dinophyta</i> (dinoflagelados).

constituyen las bases actuales para el desarrollo de biocombustibles a partir de microalgas. Asimismo, destaca el programa subvencionado por el gobierno japonés (1990-2000), el cual estuvo dirigido al estudio de la fijación de CO₂ y a la optimización del crecimiento de microalgas. Estos proyectos fueron suspendidos, en parte, ante la falta de competitividad del biocombustible ante los precios del combustible procedente del petróleo. No obstante, debido a la condición actual de agotamiento de los combustibles fósiles, incremento de los precios del petróleo y al calentamiento global, como consecuencia de la acumulación de gases de invernadero, el panorama para la producción de bioenergía a partir de microalgas es alentador [64], [65], [66], [67], [72].

B. Características relevantes de los cultivos de microalgas para la producción de biodiésel

Actualmente se está llevando a cabo el uso de lípidos procedentes de microalgas para la producción de biodiésel, ya que es una alternativa que asegura satisfacer o reemplazar la demanda global de petrodiesel. Es una tecnología que resulta prometedora dadas las ventajas que ofrece en contraste con las plantas oleaginosas, tales como: mayor eficiencia fotosintética; eficacia superior en la asimilación de nutrientes; y períodos cortos de producción sostenida durante todo el año, a causa de los breves tiempos de duplicación de las microalgas. Asimismo, en contraste con los cultivos tradicionales, requieren de menores cantidades de agua y son flexibles ante el tipo y la calidad de ésta, por lo que prosperan convenientemente tanto en aguas marinas, como dulces, salobres y residuales. Por otro lado, los cultivos de microalgas son independientes de la estacionalidad, inherente a los cultivos agrícolas, y de la fertilidad del suelo, condición que posibilita prescindir del uso de herbicidas y pesticidas, y además, permite emplear territorios marginales e inclusive zonas no aptas para la agricultura, ganadería, industria y turismo. Un aspecto importante para el cultivo de microalgas es que el contenido oleaginoso y el perfil de composición lipídica de las microalgas pueden ser controlados en función de las condiciones de cultivo, principalmente mediante la limitación de nutrientes. Además, esta tecnología puede ser acoplada al reciclaje del CO₂ liberado en las emisiones industriales, especialmente por plantas térmica. Una ventaja adicional estriba en la posibilidad de obtener subproductos (proteínas, carbohidratos, biopolímeros, pigmentos, biogás, etc.) a partir de la biomasa residual, una vez que los lípidos han sido extraídos. Inclusive, resulta factible el empleo de algunos de estos residuos en la alimentación humana o animal y en la producción de fertilizantes o de otros biocombustibles. Finalmente, la ventaja competitiva más importante del biodiésel de microalgas, consiste en los rendimientos lipídicos por unidad de área considerablemente superiores a los obtenidos con plantas oleaginosas [47], [48], [49], [50], [64], [65], [67], [70], [72].

C. Potencial del biodiésel a partir de microalgas

El potencial de las microalgas para la producción de biodiésel ha sido sobrestimado, en muchos casos, por empresas diversas que aseguran productividades iguales o superiores al máximo teórico posible [67], [68]. La determinación de la productividad máxima teórica se fundamenta en la eficiencia fotosintética, la cual se define como la fracción de la energía luminosa absorbida que es fijada como energía química en la biomasa durante el crecimiento fotoautotrófico. La fijación fotosintética de un mol de CO₂ en biomasa de microalgas en sistemas con amonio como fuente de nitrógeno, se considera que requiere de la absorción de 14 fotones, aunque de acuerdo a las estimaciones de autores diversos, esta magnitud puede variar de 6 a 16. La incorporación de un mol de carbono resulta así en la producción de 21,25g de peso seco con un contenido energético (entalpía de combustión) de 547,8 kJ [68]. Cabe destacar que la totalidad de la radiación solar no es aprovechada en la fotosíntesis de microalgas, sólo es útil el espectro comprendido entre los 400 y 700 nm de longitud de onda denominado “radiación fotosintéticamente activa” (PAR por sus siglas en inglés), región que solo representa el 42.3% del total. La energía promedio de los fotones comprendidos en este rango es de 218 kJ. El aprovechamiento parcial de la radiación fotosintéticamente activa es atribuido a fenómenos diversos, principalmente a la disipación de energía en los aparatos fotosintéticos en manera de calor o fluorescencia con la intención de evitar el daño de éstos por radiación excesiva (fotoinhibición) [49], [68].

La cantidad anual que se podría producir de biodiésel depende de muchos factores, entre ellos la radiación solar promedio anual de la cual dependerá la productividad de biomasa seca, el contenido en triglicéridos, la eficiencia de transesterificación (experimentos realizados la sitúa en el 96% [45]) y la densidad del biodiésel final [73]; no obstante, el valor final de producción obtenido se podría mejorar a través de avances en la selección de especies, las estrategias y sistemas de cultivo, los procedimientos de cosecha y extracción de aceites, aunados a la optimización del metabolismo de los microorganismos mediante recursos moleculares y el uso de estrategias de modelado y control que permitan mantener unas condiciones de las variables del proceso lo más estables y cercanas posibles a los valores óptimos de crecimiento [67], [68]. Los datos que se muestran en la Tabla IV indican la superioridad del potencial de producción de biodiésel a partir de cultivos de microalgas en contraste con el uso de aceites vegetales (comestibles y no comestibles) como materia prima para la obtención de biodiésel en México.

D. Contenido lipídico de las microalgas

Las microalgas con elevadas productividades lipídicas son

TABLA IV
COMPARACIÓN DE DISTINTAS FUENTES DE MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL [50], [62], [69].

Materia prima	Productividad de Biodiésel (L·Ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Superficie equivalente requerida (Ha×10 ⁶) ³	Porcentaje equivalente de la superficie fértil requerida	Porcentaje equivalente de la superficie total (no necesariamente fértil) requerida
Palma	5950	3,972	16,14	--
Jatropha	1892	12,490	50,75	6,43
Colza	1190	19,859	80,69	--
Girasol	952	24,823	100,90	--
Soja	446	52,986	215,30	--
Microalgas ¹	12000	1,969	8,00	1,01
Microalgas ²	20000	1,181	4,80	0,61

¹Rendimiento de la productividad del biodiésel a partir de microalgas según P. M. Schenk et al. [50].

²Rendimiento de la productividad del biodiésel a partir de microalgas a partir de tecnología actual disponible según R. Wijffels. [68].

³Para responder a la necesidad de 100% de las necesidades de combustible en México.

deseables para la elaboración de biodiésel, razón por la cual la cantidad de lípidos contenidos en la biomasa y la velocidad de crecimiento, sumados a la eficiencia metabólica y a la robustez del microorganismo, son parámetros relevantes para su selección [70], [71].

La determinación del contenido en lípidos de las microalgas resulta complicada a causa de su variación ante condiciones distintas de cultivo; el crecimiento en ambientes desfavorables, como condiciones anoxias, con bajas condiciones de nutrientes como el fósforo o el nitrógeno, con temperaturas o niveles de incidencia de luz extremos, o bajo situaciones de estrés, frecuentemente conlleva al incremento de la fracción lipídica (como mecanismo de supervivencia, las células aumentan considerablemente el almacenaje de lípidos ya que no se detiene la fijación de dióxido de carbono), aunque en detrimento de la productividad lipídica del cultivo. Los lípidos comprendidos en las microalgas por lo general constituyen del 20 al 50% de su peso seco, pero sin embargo se han reportado valores en un rango del 1 al 75%, como se señala en la Tabla V. Las especies que producen más de un 30% de materias grasas se denominan "oleaginosas" [65].

Los grupos taxonómicos a los cuales pertenecen las microalgas oleaginosas son diversos. En los ejemplares eucariontes, el contenido lipídico es considerado como propio de la especie y no del género, de manera tal que este parámetro varía notablemente entre las especies individuales de cada grupo taxonómico [64], [74]. No obstante, de acuerdo con Q. Hu et al. [64], es posible afirmar que microalgas oleaginosas eucariontes de grupos diversos (*clorofitas*, *diatomeas*, *crisofitas*, *haptofitas*, *eustigmatofitas*, *dinofitas*, *xantofitas* y *rodofitas*) presentan, bajo condiciones normales de cultivo, una fracción en lípidos promedio del 25,1%, magnitud que es superior (45%) en situaciones de estrés. Cabe destacar que la ubicuidad de las algas verdes (*clorofitas*) en hábitats diversos, además de la facilidad para su aislamiento y desarrollo en

TABLA V
CONTENIDO EN ACEITE DE LAS MICROALGAS (% EN BASE A PESO SECO).
[72].

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

¹H. Xu et al. [66].

²M. Takagi et al. [130].

condiciones de laboratorio, ha favorecido la identificación de numerosas especies oleaginosas en este grupo, condición que no necesariamente es distintiva del mismo. Las cianobacterias por su parte presentan bajos contenidos lipídicos promedio (9,8%; [64]), sin embargo su aplicación en la producción de biodiésel ha sido sugerida por B. E. Rittmann [75] a causa de la producción de lípidos paralela al crecimiento y la sencillez para la manipulación genética que ofrecen, en contraste con las

especies eucariontes. Químicamente los lípidos son sustancias de origen biológico que, siendo escasamente solubles en agua, pueden ser extraídas con solventes orgánicos de baja polaridad.

Las estructuras de estas biomoléculas comprenden largas cadenas hidrocarbonadas, unidades de isopreno y grupos funcionales diversos (oxigenados principalmente). En las microalgas los principales componentes de la fracción lipídica son triglicéridos, ácidos grasos libres, ceras, esteroides, hidrocarburos, glicolípidos (predominantes en membranas cloroplásticas), fosfolípidos (abundantes en plasmalema y diversos sistemas endomembranosos) y pigmentos (carotenoides, clorofilas, ficobilinas, etc.), aunque compuestos inusuales tales como ácidos grasos halogenados e hidroxilados, alquenonas de cadena larga, entre otros, también ocurren [64], [65], [76], [77]. No todos los lípidos que contienen las microalgas son satisfactorios para la producción de biodiésel, sin embargo los apropiados para ello (ácidos grasos, libres y unidos covalentemente al glicerol y sus derivados) son producidos con frecuencia y constituyen la mayor fracción de los lípidos totales, usualmente del 20% al 40% [70], [77]. Un perfil de ácidos grasos de cadena larga con un bajo grado de insaturación es deseable para la elaboración de biocombustible de calidad [78].

E. Síntesis de lípidos

La composición de ácidos grasos de las microalgas comúnmente incluye moléculas lineales de 12 a 22 átomos de carbono en número par, saturadas e insaturadas, donde la posición y el número de enlaces dobles (1 a 6) es variable, siendo por lo general *cis* la configuración de éstos. Los ácidos grasos de 16C a 18C son los más frecuentes, no obstante moléculas de cadena media (10C, 12C, 14C) o demasiado larga (> 20C) predominan en algunas especies. Por lo general, en las microalgas dulceacuícolas prevalecen los ácidos grasos saturados y mono-insaturados, observándose en menor proporción compuestos poli-insaturados (PUFAs, Polyunsaturated Fatty Acids). Estos últimos, ocasionalmente constituyen la mayor fracción de ácidos grasos en especies marinas. La variación del perfil de ácidos grasos entre grupos algales diversos es considerable, variabilidad que igualmente se exhibe bajo distintas condiciones de cultivo [64], [77].

En la Fig. 6 se presenta un esquema que describe en términos generales la biosíntesis de lípidos de microalgas. El metabolismo lipídico de las algas es similar al de plantas superiores, particularmente en la biosíntesis de ácidos grasos y triglicéridos, como consecuencia de las homologías de secuencia y la similitud de características bioquímicas observadas entre ciertos genes y enzimas, de origen vegetal y algal, involucrados en la producción de lípidos. En términos generales, en el sistema fotosintético a partir de la energía

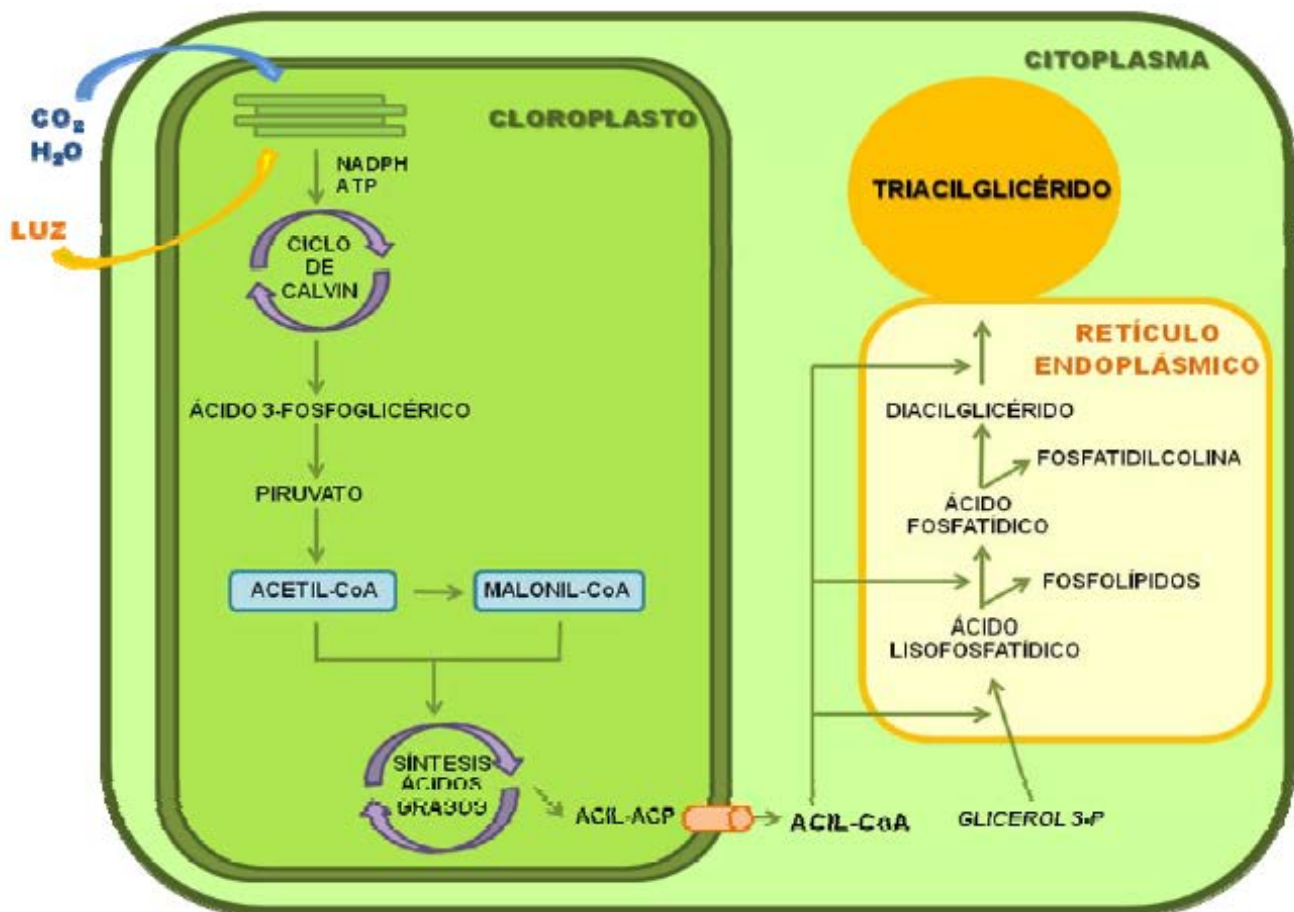


Fig. 6. Biosíntesis de los lípidos de microalgas [11].

proporcionada por los fotones presentes en el flujo luminoso, se lleva a cabo la oxidación catalítica del agua con la consecuente formación de protones, electrones y O_2 , los cuales a su vez posibilitan la obtención de los productos fotosintéticos: ATP y NADPH. Estos productos fotosintéticos son el sustrato del Ciclo de Calvin en el cual el CO_2 es fijado en moléculas de 3 átomos de Carbono (3 C), las cuales a su vez son asimiladas como carbohidratos, lípidos y proteínas. En el cloroplasto ocurre la síntesis de novo de ácidos grasos (grupos acilo: ACIL-ACP), cuyo paso inicial consiste en la carboxilación de acetil-CoA dependiente de ATP para su conversión en malonil-CoA. Esta reacción es catalizada por la acetil-CoA carboxilasa y es considerada el paso limitante del proceso, ya que compromete el flujo de acetil-CoA hacia la biosíntesis de lípidos, donde las unidades de acetil-CoA probablemente derivan del piruvato proveniente de la glucólisis. La reacción anterior es seguida por ciclos de adición descarboxilativa de malonil-CoA a unidades acilo y β -reducción, catalizados por el sistema ácido graso sintetasa, hasta producir moléculas de 16C y 18C saturadas. Los ácidos palmítico (16:0) y oleico (18:1 ω 9) son los precursores de las moléculas poli-insaturadas, a su vez producidas mediante mecanismos de desaturación aerobia y elongación. El mecanismo de transporte de ácidos grasos al exterior del citoplasma se desconoce. Por su parte, se sugiere que la biosíntesis de triglicéridos sucede en el citosol y en el retículo endoplásmico esencialmente a través de la catálisis por acil-transferasas del traslado secuencial de ácidos grasos a las posiciones 1, 2 y 3 del glicerol-3-fosfato, donde antes de la última transferencia, se requiere de la defosforilación del ácido fosfatídico previamente formado, y donde algunos intermediarios son desviados hacia la síntesis de lípidos de membrana [65], [80].

F. Condiciones ambientales que afectan a la acumulación de lípidos

Cada especie y subespecie de microalga presenta sus características propias respecto a condiciones óptimas de crecimiento, así como productividades máximas alcanzadas en diferentes configuraciones de sistema de cultivo. Los factores influyentes son sin embargo comunes y se comentan a continuación. La producción de lípidos al igual que su composición en las microalgas son afectados por diversas condiciones físicas y químicas de cultivo, tales como la fase de crecimiento (Fig. 7), la disponibilidad y la clase de nutrientes, la salinidad, el tipo, períodos e intensidad de luz, la temperatura, el pH, e incluso, la asociación con otros microorganismos.

NUTRIENTES

La aclimatación de las microalgas a la restricción de nutrientes se caracteriza por la manifestación de respuestas

específicas para el elemento limitado (inducción de sistemas de transporte de alta afinidad y de la síntesis de enzimas hidrolíticas para la liberación intra- o extracelular del nutriente), además de respuestas generales tales como cambios morfológicos, cese de la división celular, alteraciones en la permeabilidad de las membranas, acumulación de lípidos y/o polisacáridos, reducción de la actividad fotosintética y modificación de procesos metabólicos. La limitación de nitrógeno es considerada como la estrategia más eficiente para incrementar el contenido de lípidos neutros en las microalgas, en particular el de triglicéridos conformados por ácidos grasos con un elevado grado de saturación. Respuestas similares son inducidas por la deficiencia de fósforo, azufre y silicio, siendo el efecto de este último específico para las diatomeas. Asimismo, la disponibilidad de hierro (+3) influye en el contenido oleaginoso, aunque el mecanismo se desconoce. Sin embargo, el comportamiento de las microalgas ante la restricción de nutrientes es considerablemente variable y por tanto, no es posible establecer una tendencia generalizada entre las especies de microalgas [49], [64], [65], [66], [72], [74], [77]. La acumulación de lípidos en especies oleaginosas, a pesar de la atenuación de la división celular, es consecuencia de la asimilación continua de carbono y su orientación hacia la síntesis activa de ácidos grasos. Los lípidos bajo tales circunstancias, funcionan como una reserva de carbono y energía, además de proteger al organismo contra el estrés foto-oxidativo [48], [64], [71].

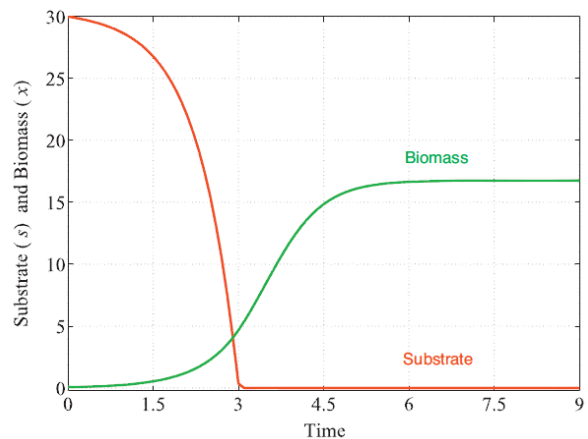


Fig. 7. Curva típica de crecimiento de microalgas: la biomasa continúa creciendo unos días después del agotamiento de nutrientes [81].

TEMPERATURA

La temperatura, por su parte, afecta notablemente el perfil lipídico de las microalgas, de manera tal que a bajas temperaturas incrementa el grado de insaturación. Un aumento de temperatura por encima del máximo tolerable por el microorganismo puede conllevar una pérdida total del cultivo, por lo que es un factor fundamental para un buen desarrollo de los cultivos. También lo es para obtener un contenido óptimo de lípidos. Las especies que se usan comúnmente toleran un rango de temperatura entre 16 y 27°C [70].

LUZ

Las altas intensidades luminosas son otra de las condiciones que favorecen sustancialmente la acumulación de triglicéridos con un elevado perfil de saturación, donde intensidades bajas a su vez promueven la síntesis de lípidos polares altamente insaturados, estructural y funcionalmente asociados con las membranas [64], [85]. Lo más común es usar una gama de intensidades entre 100 y 200 $\mu\text{E s}^{-1} \text{m}^{-2}$, correspondiendo alrededor del 5-10% de la luz diaria (2000 $\mu\text{E s}^{-1} \text{m}^{-2}$). Como fuente de energía lumínica se puede usar tanto luz natural como luz artificial. La primera opción presenta la ventaja de un ahorro energético, pero con el inconveniente de la imposibilidad de ser controlada dificultando un control del proceso. Respecto a la luz artificial, existen fuentes las cuales emiten luz muy similar a la natural sobre la que se puede establecer un control, asumiendo el coste energético correspondiente. Normalmente, lo más común es utilizar en las primeras etapas de crecimiento luz artificial, hasta que se obtiene una concentración de biomasa considerable, y después operar con luz natural.

SALINIDAD Y pH

El pH y la salinidad son otros factores que modifican la síntesis de lípidos de diversas microalgas, sin embargo el tipo y cantidad de lípidos producidos también dependen de la especie y de la magnitud del cambio de estas variables [65], [77]. El pH óptimo en un cultivo de microalgas está alrededor de 7,2-7,7 y por lo general es letal para el cultivo cuando disminuye por debajo de 3-4, en cambio pueden soportar mejor los incrementos del mismo hasta un cierto límite. El pH del medio de cultivo modifica la solubilidad de nutrientes, CO_2 o minerales. El pH varía a lo largo del proceso, siendo algunos métodos de regulación: tampones, o el propio CO_2 , ya que al reaccionar con el agua forma carbonatos que disminuyen el valor del pH. En cuanto a la salinidad, es un factor importante ya que la mayoría de las microalgas usadas a nivel industrial son de origen marino, por lo que usar concentraciones salinas adecuadas es sumamente importante. En algunos casos se pueden dar fenómenos de ósmosis, aprovechándose en algunas situaciones para almacenar en el interior de las células sustancias de interés. La manera más fácil para el control de la salinidad es mediante la adición de agua dulce o salada según sea necesario. Se encuentran valores óptimos de salinidad los comprendidos entre 20-40 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

AGITACIÓN

La agitación es necesaria para evitar la sedimentación de las algas y asegurar que toda la población está expuesta a iguales condiciones de luz y nutrientes. Es importante evitar la estratificación térmica y mejorar el intercambio de gases entre el medio de cultivo y el aire. Sin embargo, altas velocidades y la turbulencia pueden dañar las microalgas debido a esfuerzos de corte y cizallamiento.

V. PRODUCCIÓN DE LA BIOMASA DE MICROALGAS

La producción de biodiésel a partir de microalgas es un proceso formado, en términos generales, por las etapas elementales de producción de biomasa rica en lípidos, recuperación o cosecha de la biomasa, extracción de lípidos y transesterificación [50], [62]. Esta sección se centrará en las tres primeras etapas.

A. Métodos de cultivo

Una vez que se lleva a cabo la selección del tipo de microalga idónea para obtener el producto de interés, se hace necesario el desarrollo de una amplia gama de procesos biológicos que hagan viable su comercialización. Por lo tanto, el diseño y optimización de biorreactores adecuados para cultivar estos microorganismos es un paso importante en la estrategia que apunta a transformar los hallazgos científicos en un producto comercializable.

Desde un punto de vista comercial, un sistema de cultivo de microalgas debe tener las siguientes características, tantas como sea posible: elevada productividad/área; alta productividad volumétrica; economicidad (tanto en términos de costes de inversión y mantenimiento); facilidad de control de los parámetros del cultivo (temperatura, pH, O_2 , turbulencia), y fiabilidad [82]. Los diferentes diseños en los sistemas de cultivo intentan lograr estas características de manera distinta. Actualmente existen sistemas de cultivo de microalgas destinados a la obtención de productos de alto valor agregado (pigmentos carotenoides, ácidos grasos esenciales - $\omega 3$ y $\omega 6$ -, compuestos isotópicos, farmacéuticos - anticancerígenos y antibióticos -, vitaminas C y E, etc.), no obstante ante la escasa flexibilidad económica del mercado de los biocombustibles, la optimización de tales sistemas de producción mediante adecuadas estrategias de modelado y control resulta necesaria [50], [65], [68].

SISTEMAS ABIERTOS

Los sistemas de cultivo abiertos se han estudiado ampliamente en los últimos años [83], [84] pero estos sistemas de cultivo de microalgas se han utilizado desde 1950. Son los sistemas empleados con mayor frecuencia en la producción de biomasa de microalgas, además de ser los sistemas comerciales de gran tamaño más utilizados actualmente; que a pesar de sus formas y tamaños diversos, destacan por asemejar el entorno natural de las microalgas. Los cultivos abiertos (Fig. 8) comprenden i) sistemas naturales (lagos, lagunas, estanques) y artificiales, ii) de superficie inclinada y iii) estanques tipo circuito ("*raceway ponds*"), siendo estos últimos son los de uso más extendido. Las producciones y productividades biomásicas factibles en estos últimos sistemas son bajas, próximas a 1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ y a 10-25 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,



Fig. 8. Cultivo de microalgas en estanques [131].

respectivamente. Las ventajas inherentes a los cultivos abiertos radican en su sencillez y su bajo costo de inversión en contraste con los sistemas cerrados, a causa de la diversidad de materiales útiles para su construcción (concreto, tierra, plástico, etc.) y la facilidad que ofrecen para su operación y mantenimiento, y por presentar una capacidad de producción mayor. Además, pueden utilizar la luz solar, y los nutrientes se pueden proporcionar a través del escurrimiento de agua de las zonas terrestres cercanas o canalizando aguas procedentes de aguas residuales/plantas de tratamiento de aguas [85], por lo que es el método más barato de la gran producción de biomasa algal. Aunque estos sistemas son los más utilizados a nivel industrial, al aire libre, los sistemas todavía presentan desafíos técnicos significativos. En general, los estanques son susceptibles a las condiciones climáticas, no permitiendo el control de la temperatura del agua, la evaporación y la iluminación, que hacen que estos sistemas dependan de las condiciones climáticas imperantes de la región (rango de temperatura diaria y anual, tasa de precipitación anual, número de días de sol, y grado de la cobertura de nubes). También presentan transferencia limitada de CO_2 al cultivo por su baja concentración en el aire (0.035% v/v), su difusión hacia la atmósfera, y por el control limitado de las condiciones de cultivo [47], [50], [68], [70], [75]. Por otra parte, la contaminación por los depredadores y otros heterótrofos de rápido crecimiento (excepto en cultivos de especies extremófilas), han restringido la producción comercial de algas en los sistemas de cultivo abiertos. Por consiguiente, este tipo de cultivo se limita estrictamente a especies de algas que pueden ser cultivadas en dichos sistemas. Como resultado, sólo *Dunaliella* (adaptable a salinidad muy alta), *Spirulina* (adaptable a alta alcalinidad) y *Chlorella* (adaptable a medios ricos en nutrientes) se han cultivado con éxito en los sistemas comerciales de estanque abierto [85]. Otros inconvenientes son el requerimiento de superficies extensas, amplios períodos de producción (de 6 a 8 semanas), producciones reducidas de biomasa y penetración limitada de la luz.

El tipo de sistemas abiertos de estanques naturales y artificiales sólo son viables cuando se dan una serie de condiciones. Se requieren de condiciones climáticas favorables y de nutrientes, y también que el agua presente características

selectivas (por ejemplo, la alta salinidad, pH alto) para garantizar la existencia de un monocultivo. El sistema inclinado (sistema de cascada) es el único sistema abierto que alcanza altas densidades celulares sostenibles (hasta 10 g L^{-1}). Este sistema es muy adecuado para las algas tales como *Chlorella* y *Scenedesmus*, que pueden tolerar bombeo en secuencias repetidas [86]. En estos sistemas inclinados la turbulencia se genera por la gravedad, la suspensión de cultivo fluye desde la parte superior a la parte inferior de una superficie con pendiente, por lo tanto se alcanza un flujo altamente turbulento y permite la adopción de capas de cultivo muy finas ($<2 \text{ cm}$), lo que facilita una mayor concentración celular y una relación más alta superficie/volumen (s/v) en comparación con los estanques circulares. Los estanques tipo *Raceway* son el sistema artificial más utilizado. Se trata de un circuito cerrado, con canales de recirculación en forma ovalada, generalmente entre 0,2 y 0,5 m de profundidad, con mezcla y la circulación necesaria para estabilizar el crecimiento de algas y la productividad (Tabla VI). En un ciclo de producción continua, el caldo de cultivo y los nutrientes son introducidos en oposición a donde se sitúan las paletas y circulan a través del bucle hacia el punto de extracción de la cosecha. La rueda de paletas opera en continuo para evitar la sedimentación.

SISTEMAS CERRADOS

Los sistemas cerrados, fotobiorreactores (PBR), en contraste con los abiertos, se caracterizan por ofrecer numerosas ventajas tales como pérdidas mínimas de CO_2 , riesgo reducido de contaminación, control y reproducibilidad de las condiciones de cultivo, ahorro de agua y nutrientes, menores requerimientos de superficie, flexibilidad de diseño, cortos períodos de producción (de 2 a 4 semanas) y productividades considerablemente superiores a los sistemas abiertos (de 5 a 13 veces) [87]. Estos sistemas reciben la luz del sol directamente a través de las paredes del recipiente transparente o por medio de fibras de luz o tubos que se canalizan desde los colectores de luz solar. Con el propósito de coleccionar la mayor cuantía de energía solar por unidad de superficie posible, presentan configuraciones diversas, i) tubulares (vertical, horizontal, helicoidal, conformación α), ii) de paneles planos y iii) columnas de burbujeo, (Ver Tabla VI) [83]. Los reactores tubulares y de panel plano son los de uso más frecuente; habitualmente están formados por dos unidades, una de recolección de luz y otra de transferencia de gases. La consideración de factores tales como la luz, la razón CO_2/O_2 , la temperatura, los nutrientes, la salinidad, el pH, entre otros, resulta trascendental para el diseño de sistemas cerrados. Las altas productividades inherentes a estos sistemas precisan de una penetración y distribución óptima de la luz, condición que a su vez requiere de materiales de construcción transparentes y de relaciones superficie/volumen elevadas. Sin embargo, la intensidad de la luz incidente debe ser moderada, de lo contrario se presentan fenómenos de fotoinhibición y

foto-blanqueo. Asimismo, la relación CO_2/O_2 debe ser tal que la proporción de O_2 sea mínima y por consiguiente, sean impedidos procesos de foto-respiración y daño foto-oxidativo. Actualmente, la principal desventaja de los sistemas cerrados consiste en sus elevados costos, atribuidos en mayor medida a la energía invertida en la agitación mecánica de los cultivos con la finalidad de evitar la sedimentación y favorecer la transferencia de gases [50] [62], [68], [70], [75], [87].

1) Fotobiorreactores tubulares

Los fotobiorreactores tubulares (Fig. 9) pueden ser horizontal/serpentin [88], casi horizontal [89], vertical [90], inclinado [91] y de forma cónica [92]. Las microalgas se hacen circular a través de los tubos con el uso de una bomba, o preferiblemente con tecnología *airlift*. En general, estos sistemas son relativamente baratos (en comparación con el resto de sistemas cerrados), tienen un área de iluminación de gran superficie y productividades de biomasa bastante buenas. Las desventajas incluyen la formación de incrustaciones, un cierto grado de crecimiento en la pared, el oxígeno y el CO_2 disueltos a lo largo de los tubos, y los gradientes de pH que conducen a una frecuente re-carbonatación de los cultivos, que en consecuencia aumenta el coste de producción de algas (Tabla VI).



Fig. 9. Fotobiorreactores tubulares [132].

2) Fotobiorreactores planos, "flat plate"

Uno de los tipos de sistemas cerrados que han sido investigados con especial atención son los fotobiorreactores planos, debido a la gran área de superficie expuesta a la iluminación y la alta densidad ($> 80 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) de las células [93]. En estos fotobiorreactores, una capa delgada muy densa de cultivo se mezcla a través de un panel plano transparente, que permite la absorción de radiación en los primeros milímetros de espesor. Son adecuadas para cultivos en masa de microalgas, debido a la baja acumulación de oxígeno disueltos y la alta eficiencia fotosintética alcanzada en comparación con los diseños tubulares [93]. Por lo general, los paneles son iluminados principalmente por un lado por la luz solar directa, y tienen la ventaja adicional de que pueden colocarse en

posición vertical o inclinada en un ángulo óptimo de cara al sol que permite una mayor eficiencia en términos de energía absorbida de la luz solar incidente (Fig. 10). Entre las limitaciones se incluyen la dificultad de controlar la temperatura de cultivo, cierto grado de crecimiento en la pared, el escalado requiere muchos compartimentos y materiales de apoyo, y presenta la posibilidad de estrés hidrodinámico para algunas cepas de algas [94] (Tabla VI).

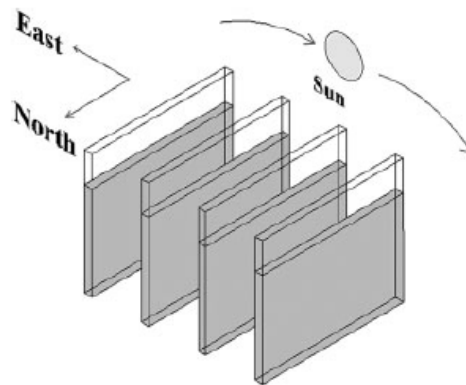


Fig. 10. Esquema de orientación solar de un sistema de fotobiorreactores planos para el cultivo al aire libre [98].

3) Fotobiorreactores de columna

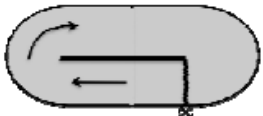

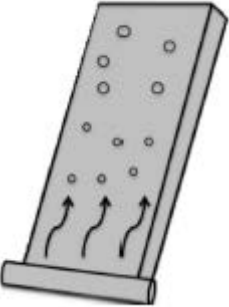

Los fotobiorreactores de columna a veces son de tipo tanque agitado [95], pero más a menudo columnas de burbujas [96] o *airlifts* [97]. Las columnas se colocan verticalmente, se airean desde el fondo, y se iluminan a través de las paredes transparentes, o internamente. Biorreactores de tipo columna ofrecen la mezcla más eficiente, las mayores tasas volumétricas de transferencia de gas, y las mejores condiciones de crecimiento controlables. Son de bajo costo, compactos y fáciles de operar. Su rendimiento (es decir, concentración final de biomasa y tasa de crecimiento específico) se compara favorablemente con los valores reportados para los fotobiorreactores tubulares típicos. Las columnas de burbujeo verticales y cilindros *airlift* pueden alcanzar un aumento sustancial incrementando el movimiento radial del fluido que es necesario para la mejora en los ciclos de luz-oscuridad. Estos diseños de reactores tienen una baja superficie/volumen. En consecuencia, los cultivos sufren menos de la fotoinhibición y de la foto-oxidación [94].

FOTOBIORREACTORES VS SISTEMAS ABIERTOS

La Tabla VI muestra una comparación entre los distintos tipos de fotobiorreactores (tubular, plano y columna) y los sistemas *raceway* para varias condiciones de cultivo y parámetros de crecimiento.

La selección de un sistema de producción adecuado, claramente depende de la finalidad de la instalación de producción, la cepa de microalgas y producto de interés. En conclusión, los fotobiorreactores y los estanques abiertos no deben ser vistos como tecnologías competidoras.

TABLA VI
VENTAJAS Y LIMITACIONES DE VARIOS SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS [79].

Sistema de cultivo	Ventajas	Inconvenientes
Sistemas abiertos (<i>Raceway</i>) 	Económicos Facilidad de limpieza Fácil mantenimiento Utilización de terreno no cultivable Consumo de energía mínimo	Mínimo control de las condiciones de cultivo Inadecuada agitación, luz y CO ₂ utilizados Dificultad de crecimiento de algas para largos períodos Baja productividad Limitado a unas cuantas cepas Facilidad de contaminación de los cultivos
Fotobiorreactores tubulares 	Relativamente barato Gran área de iluminación Adecuado para cultivos al aire libre Buenas productividades de biomasa	Gradientes de pH, O ₂ disuelto y CO ₂ a lo largo del tubo Incrustaciones Algún grado de crecimiento en las paredes Requerimientos de grandes espacios de terreno Fotoinhibición
Fotobiorreactores planos 	Relativamente barato Facilidad de limpieza Gran área de iluminación Adecuado para cultivos al aire libre Buenas productividades de biomasa Bajo consumo de energía Buen paso de luz Facilidad para atemperar Baja acumulación de oxígeno	Dificultad en el escalado Dificultad en el control de la temperatura Algún grado de crecimiento en las paredes Estrés hidrodinámico para algunas cepas de algas Baja eficiencia fotosintética
Fotobiorreactores de columna 	Bajo consumo de energía Facilidad para atemperar Alta transferencia de masa Buen mezclado Mejores exposiciones a ciclos de luz-oscuridad Bajo esfuerzos de corte Fotoinhibición reducida Foto-oxidación reducida Alta eficiencia fotosintética	Pequeña área de iluminación Uso de materiales sofisticados de construcción Caros en comparación con estanques abiertos Baja escalabilidad Disminución del área de iluminación con el escalado

SISTEMAS HÍBRIDOS

Los sistemas híbridos han sido propuestos como una alternativa económica para la producción de biodiésel a gran escala. En términos generales, tales sistemas consisten en una etapa inicial de producción de biomasa en fotobiorreactores cerrados, en la cual los microorganismos son mantenidos en

crecimiento continuo bajo condiciones de suficiencia de nutrientes, etapa que es seguida por una fase de acumulación de producto (lípidos) en estanques abiertos, inducida mediante la deficiencia de nutrientes [50].

B. Métodos de recolección

Una vez que la biomasa de microalgas ha sido producida en alguno de los sistemas descritos, se da inicio a la etapa de cosecha o recolección, cuyo propósito es el de remover el agua y concentrar las células microalgales para su posterior procesamiento. Esta etapa influye notablemente en los costos de producción del biodiésel, por lo que la selección de una técnica de recolección eficiente y de bajo costo es trascendental.

Teniendo en cuenta la concentración de biomasa relativamente baja que se obtiene en los sistemas de cultivo de microalgas, debido al límite de penetración de la luz (típicamente en el intervalo de $1-5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), y el pequeño tamaño de las células de microalgas (en el intervalo de $2-20 \mu\text{m}$ de diámetro), los costes y el consumo de energía para la cosecha de la biomasa son una preocupación importante que debe abordarse adecuadamente [99]. En este sentido, la recolección de cultivos de microalgas se ha considerado como un importante cuello de botella para el procesamiento a escala industrial de microalgas para la producción de biocombustibles. El costo de la recuperación de la biomasa del caldo puede suponer hasta el 20-30% del coste total de la producción de la biomasa [100]. La centrifugación, sedimentación, filtración y floculación, ya sea individualmente o combinados, son los procedimientos de cosecha más comunes, cuya aplicación depende de las propiedades de la especie de microalga cultivada (morfologías particulares, presencia de vacuolas gaseosas, etc.), ya que algunas presentan características que facilitan su recolección [49], [50].

Generalmente, la recolección de microalgas es un proceso que se lleva a cabo en dos etapas, que implica: i) Recolección masiva: etapa destinada a la separación de la biomasa de la suspensión. Los factores de concentración para esta operación son generalmente 100-800 veces para llegar a 2 a 7% de materia sólida total. Esto dependerá de la concentración inicial de biomasa y de las tecnologías empleadas, incluidas floculación, flotación o sedimentación por gravedad. ii) Espesamiento: el objetivo es concentrar la suspensión a través de técnicas tales como la centrifugación o filtración.

FILTRACIÓN

La filtración es el método de cosecha que ha demostrado ser el más competitivo en comparación con otros métodos de recolección. Hay distintos tipos de filtración: i) microfiltración, ii) ultrafiltración, iii) filtración a vacío, iv) filtración de flujo tangencial, etc. La filtración resulta conveniente para especies de microalgas de tipo filamentosas o capaces de formar colonias; cabe mencionar que esta operación a gran escala presenta inconvenientes tales como la obstrucción de los filtros, formación de tortas de filtración compresibles y altos costos de mantenimiento, y requisitos previos de concentración [50].

CENTRIFUGACIÓN Y SEDIMENTACIÓN

La centrifugación implica la aplicación de fuerzas centrífugas para separar la biomasa de microalgas del medio. Una vez separada, las microalgas pueden separarse por drenaje del medio de cultivo. La aplicación de la sedimentación o de la centrifugación podría ser factible en microalgas con diámetros mayores a los $5 \mu\text{m}$ y paredes celulares relativamente gruesas. A pesar del frecuente empleo de la sedimentación en la acuicultura, su principal desventaja es la larga duración de esta operación. Por su parte, la centrifugación sólo resulta conveniente para productos de alto valor agregado, ya que implica altos costos y demanda un elevado consumo de energía. Además, las altas fuerzas de gravedad y de corte durante el proceso de centrifugación pueden dañar la estructura celular [50].

FLOTACIÓN

Algunas cepas tienden a flotar naturalmente en la superficie del medio de cultivo como en el caso de un aumento en el contenido de lípidos. A pesar de mencionar la flotación como método de posible método de cosecha, son muy pocas las pruebas de su viabilidad técnica o económica [93].

FLOCULACIÓN

La floculación es otro procedimiento común de cosecha, el cual consiste en la aglomeración y posterior sedimentación o flotación de la biomasa de microalgas. Puede ser inducida de diversos modos. La floculación mediante la adición de sales inorgánicas (alúmina, cloruro férrico, óxido de calcio) no es recomendada por su alto costo y por contaminar la biomasa, de manera tal que ésta no puede ser utilizada posteriormente como alimento. El uso de polímeros orgánicos catiónicos como floculantes no presenta estos inconvenientes, sin embargo su efectividad puede ser disminuida en aguas salobres como consecuencia de la elevada fuerza iónica que las caracteriza. Por su parte, la biofloculación es un procedimiento alternativo de cosecha que consiste en el uso de especies de microalgas que naturalmente floculan o cuya aglomeración puede ser inducida mediante la aplicación de condiciones de estrés tales como cambios de pH, temperaturas extremas y restricción de nutrientes. No obstante, la modificación de las condiciones de cultivo puede alterar la composición bioquímica de la microalga y por tanto el rendimiento lipídico. Finalmente, se ha propuesto la floculación microbiana o co-biofloculación, procedimiento en el cual se adicionan microorganismos autofloculantes (tales como levaduras) al cultivo microalgal, de manera tal que se promueve la aglomeración conjunta de éstos con la biomasa que se desea cosechar [50].

C. Extracción de lípidos de microalgas

A partir de la biomasa cosechada se extraen los aceites, pero antes hay que llevar a cabo un secado de la biomasa. El secado al sol es probablemente el método más barato empleado para el tratamiento de la biomasa de microalgas. Sin embargo, este método requiere largos tiempos y grandes superficies de secado, y corre el riesgo de la pérdida de algunos productos biorreactivos [99]. Tecnologías de secado más eficientes pero más costosas, incluyen i) secado en tambor, ii) secado por pulverización, iii) secado en lecho fluidizado, iv) secado por congelación y v) tecnología de deshidratación de ventana refractante [93].

Existen numerosos métodos para la extracción de lípidos de las microalgas, los más comunes son: i) prensado, ii) extracción líquido-líquido (extracción con disolventes), iii) extracción con fluidos supercríticos (SFE) y iv) técnicas de ultrasonido [101].

MÉTODOS MECÁNICOS

El prensado para obtener el aceite es un método mecánico que utiliza alta presión para apretar y romper las células. Para que este proceso sea efectivo, primero las algas necesitan de secado. Aunque este método puede recuperar el 75% de aceite y no requiere ninguna habilidad especial, es menos eficaz debido al tiempo de extracción relativamente largo [101].

Otro método prometedor para ser utilizado en la extracción de microalgas es la aplicación de ultrasonidos. En este método se exponen las microalgas a una onda de ultrasonidos de alta intensidad, que crea pequeñas burbujas de cavitación alrededor de las células. El colapso entre las burbujas produce la emisión de ondas de choque, rompiendo la pared celular y liberando los compuestos deseados al medio. Aunque la extracción de aceite usando ultrasonido ya está en amplio uso a escala de laboratorio, no está disponible la información suficiente sobre la viabilidad o el coste de una operación a escala comercial. Este enfoque parece tener un gran potencial, pero se necesita más investigación [101].

MÉTODOS QUÍMICOS

La extracción con disolvente ha demostrado tener éxito en la extracción de los lípidos de microalgas. En este enfoque, los disolventes orgánicos, tales como benceno, ciclo-hexano, hexano, acetona, cloroformo se añaden a la pasta de algas. El disolvente destruye la pared celular de las microalgas, y extrae el aceite debido a su mayor solubilidad en disolventes orgánicos que el agua. El extracto de disolvente se puede someter a proceso de destilación para separar el aceite del disolvente, y este último puede ser recuperado para uso posterior. El disolvente más eficiente en la extracción es el hexano, en base a su mayor capacidad de extracción y de bajo coste [101]. Sin embargo, algunos inconvenientes de esta técnica de extracción son los costos y la energía adicionales

necesarios para la recuperación del solvente, además de la contaminación de la biomasa microalgal libre de lípidos, restringiendo así las posibilidades para el posterior aprovechamiento de este co-producto. En esta década, se han propuesto variantes para la lixiviación con solventes orgánicos, tales como la extracción in situ a partir de células vivas de microalgas o el acoplamiento de la etapa de extracción lipídica con la de transesterificación. No obstante, tanto su aplicación a gran escala, como su factibilidad económica, deben ser evaluadas [50].

La extracción supercrítica hace uso de altas presiones y temperaturas para la rotura de las células. Este método de extracción ha demostrado ser extremadamente eficiente en cuanto al tiempo y se emplea comúnmente [101].

VI. ESTRATEGIAS ACTUALES DE MODELADO Y CONTROL DE FOTOBIOREACTORES

Tal y como se ha indicado anteriormente, las microalgas deben cultivarse en los biorreactores en condiciones totalmente controladas, de manera que su tasa de crecimiento sea alta permitiendo obtener gran productividad [87]. En el caso de producción de biodiésel a partir de microalgas, los reactores más utilizados son los fotobiorreactores abiertos tipo *raceway*. Sin embargo, debido a la dificultad de controlar las condiciones de cultivo en éstos, los estudios que se han realizado sobre el modelado y control de biorreactores se centran en el uso de fotobiorreactores, principalmente, tubulares [103], [104], [108], [112] o planos [105], [114], y en algún caso columna de burbujeo [113]. Ya que los sistemas cerrados permiten obtener microalgas de mayor calidad y se caracterizan por la regulación y el control de prácticamente casi todos los parámetros biotecnológicos [87], así como de presentar beneficios fundamentales: riesgo de contaminación reducida, pérdidas de CO₂ mínimas, condiciones de cultivo reproducibles, control de temperatura y diseño flexible; ventajas y características que los sistemas abiertos no pueden ofrecer [95]. Presentándose como los diseños más escalables.

El diseño de fotobiorreactores cerrados debe ser cuidadosamente optimizado para cada especie de microalga individual, según sus características fisiológicas y de crecimiento. Pero en general, en cualquier diseño, será necesario prestar una especial atención a dos factores ambientales dominantes como lo son la luz solar y la temperatura. También parámetros de diseño, tales como el régimen de luz, de calor y transferencia de masa deben ser ajustados con precisión para un funcionamiento correcto [114]. En la perspectiva del cultivo de microalgas a gran escala, nuevas técnicas, tanto de biotecnología como del campo de control, deben ser implementadas para asegurar la robustez, la durabilidad y la optimización de estos nuevos procesos. Las microalgas tienen unas especificaciones que difieren en comparación con los microorganismos más

utilizados actualmente en biotecnología, tales como bacterias o levaduras. La principal diferencia se refiere a la conversión de la energía solar en energía química, ya que cada célula debe tener acceso a la luz con el fin de mantener su crecimiento. El aumento de la concentración de biomasa conduce a una mayor absorción de luz. Por lo tanto, la cantidad de biomasa máxima alcanzable está limitada por un límite de concentración de ésta, para que todos los fotones que inciden puedan ser absorbidos. Sin embargo, establecer este límite no es sencillo debido a que las células intentan adaptar sus pigmentos a la luz incidente para optimizar su aprovechamiento, y por lo tanto la atenuación de luz (que se deduce de la concentración de pigmento) es dependiente de la luz. Por otra parte, en condiciones de inanición de nitrógeno (que se aplica para estimular la síntesis de lípidos), la composición de pigmento y la concentración disminuyen, lo que conduce a la reducción de la atenuación de luz reducida. Cuando el cultivo de microalgas se lleva a cabo al aire libre, estos organismos crecen en condiciones inestables, ya que permanentemente se exponen a variaciones luz (y de temperatura) [81]. El principal desafío es diseñar un fotobiorreactor que sea capaz de utilizar la luz intensa y mantenga las concentraciones apropiadas de gas (CO_2 y O_2) en una escala comercial [70], [102], [105].

Los procesos basados en microalgas, por lo tanto, implican nuevos desafíos para el modelado y control. Además de las características clásicas no lineales y complejas, que caracterizan a la mayoría de los procedimientos biotecnológicos, el comportamiento no estacionario permanente junto con una fuerte realimentación desde el nivel de la población a nivel de la célula a través de la atenuación de luz, hace que el control de estos procesos no sea nada fácil. La optimización de procesos tan complejos podría llegar a ser mucho más eficiente si se lograsen desarrollar modelos precisos.

A continuación se hace una revisión de estudios y desarrollos de modelos que se han llevado a cabo para distintos fotobiorreactores. Estos modelos se corresponden con el crecimiento en los cultivos de suspensiones de células fotosintéticas, los cuales se usan para predecir la tasa de biomasa (producción) y el consumo de nutrientes en función del tiempo de cultivo para un conjunto dado de variables de entrada del proceso, entre las que se incluyen: las dimensiones del reactor, el tiempo de residencia, parámetros intrínsecos de crecimiento del cultivo, parámetros de iluminación y transferencia de masa de CO_2 , entre otros. Por otro lado, se considerarán factores como la capacidad de transferencia de calor en el cultivo para controlar la temperatura. Asimismo, se describirán modelos y procedimientos para el control del pH y las pérdidas de CO_2 . En resumen, el objetivo es conseguir un modelo que permita mejorar la producción de biomasa mediante el control de las variables clave: CO_2 y O_2 disueltos, pH y temperatura.

Prácticamente, los fotobiorreactores actuales son controlados mediante controladores clásicos on-off

(encendido-apagado), debido principalmente a la simplicidad de este esquema de control, a la inexistencia de modelos dinámicos y a la falta de válvulas proporcionales idóneas para el suministro del gas inyectado en flujos de valores bajos. A continuación se describirán algunas estrategias de control avanzadas para estos fotobiorreactores que están siendo desarrolladas en la actualidad, así como la comparación de una serie de resultados obtenidos de aplicar distintas estrategias.

A. *Dinámica del sistema y modelos*

El modelado matemático de un fotobiorreactor requiere conocer la relación entre el metabolismo de los microorganismos, la transferencia de luz dentro del cultivo y la dinámica de fluidos del reactor. Para ello se trata de combinar el modelo de transferencia de CO_2 , el modelo de transferencia de la luz y las ecuaciones de balance de masa. Para simplificar, se supone que todas las reacciones tienen lugar en fase líquida, y que el biorreactor es homogéneo. Por tanto, el desarrollo del modelo se puede dividir en tres subsistemas principales que interactúan entre sí, esto es la luz incidente en el reactor, la suspensión en el medio de las células de microalgas y el medio en sí mismo, tal y como proponen M.R. Buehner et al. [105] en el experimento desarrollado Solix Biofuels (Fort Collins, Colorado). La cantidad de luz incidente que las microalgas pueden utilizar es una función de la posición del sol y la cantidad de mezcla. A medida que las microalgas crecen, interactúan con el medio de cultivo con el fin de eliminar los nutrientes y el carbono disuelto, mientras se produce también la liberación del oxígeno disuelto. Una mezcla gaseosa formada por aire y CO_2 se burbujea a través de los medios de cultivo para mantener el nivel apropiado de carbono disuelto y para eliminar el oxígeno disuelto producido a través de la transferencia de masa. Puesto que la cantidad de nutrientes y gases disueltos en los medios afectará a la tasa de crecimiento, estos parámetros necesitarán ser realimentados de nuevo desde el modelo del medio de cultivo (química del medio acuoso) hasta el modelo de las microalgas (fotosíntesis). En la Fig. 11 se muestra el esquema del modelo propuesto por M.R. Buehner et al. [105] para un fotobiorreactor, el cual contiene los tres subsistemas principales: subsistema de la incidencia de luz (rojo), subsistema de la fotosíntesis (verde), y subsistema de la química del medio acuoso (azul). Todas las entradas del modelo, excepto la luz del sol, pueden ser impuestas. Esto hace el problema de control interesante, ya que la luz solar es la entrada principal que impulsa la fotosíntesis, sin embargo, entra en el sistema como una entrada exógena. Por lo tanto, el objetivo de control es ajustar los otros parámetros para maximizar la utilización de la luz solar [105].

SUBSISTEMA DE LUZ INCIDENTE: INFLUENCIA EN EL CRECIMIENTO DE LAS MICROALGAS

Alrededor del 45% de todo el espectro de la luz es una

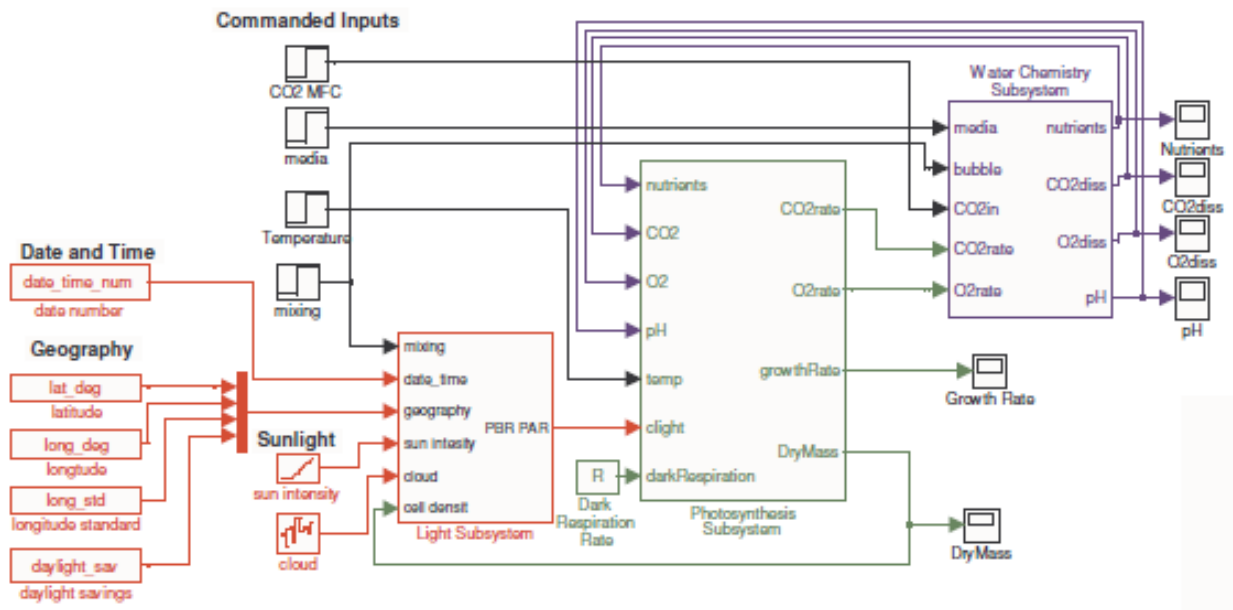


Fig. 11. Modelo global propuesto para un fotobiorreactor, en el que se distinguen los tres subsistemas [105].

radiación fotosintéticamente activa, que es la cantidad de luz (en el rango de 400 nm a 700 nm) disponible para la fotosíntesis en la Tierra. En el modelo propuesto por M.R. Buehner et al. [105], el subsistema correspondiente a la luz incidente determina la cantidad de PAR que le llega a las microalgas, la cual es una función del número de fotones de PAR que entran en el fotobiorreactor, el mezclado, y la geometría del fotobiorreactor. Se puede expresar como:

$$I_{PAR} = f(PAR_{fotobiorreactor}, \text{mezclado}, \text{geometría}) \quad (1)$$

La cantidad de PAR que entra en el fotobiorreactor es una función tanto de la luz directa y como de la luz difusa que inciden en él. Para obtener una simplificación del modelo presentado, tanto el mezclado (es decir, la tasa de flujo de gas) como la geometría se pueden considerar constantes. Por lo tanto, el modelo simplificado de la ecuación (1) resulta:

$$I_{PAR} = \eta_{PAR} PAR_{fotobiorreactor} \quad (2)$$

Donde la cantidad de PAR que entre en el fotobiorreactor se puede medir con un sensor PAR, resultando entonces:

$PAR_{fotobiorreactor} = PAR_{sensor}$, y donde el parámetro η_{PAR} es la eficiencia del fotobiorreactor para una mezcla y geometría dadas. La variable PAR_{sensor} es el número de fotones PAR medidos por el sensor PAR. Sin embargo, como hay más información disponible acerca de los efectos de la mezcla y de la geometría, se podrá incorporar en el cálculo del término I_{PAR} de una manera más precisa [81], [112], [114], [115].

En concreto, O. Bernard. [81], hace un estudio y desarrolla modelos para el crecimiento en los que incluye el efecto de la

radiación, que como se verá en el siguiente subapartado tienen especial importancia para que se den los ciclos de fotosíntesis (crecimiento) y respiración en el medio de cultivo. Se incluyen modelos de fotoaclimatación, modelización de la dinámica de los pigmentos, modelos para la tasa de absorción del nitrógeno (en casos en los que éste puede limitar el crecimiento) inorgánico y respiración, todos ellos modelos que se ocupan de la limitación de la luz.

SUBSISTEMA DE LA FOTOSÍNTESIS: MODELO DEL CRECIMIENTO DE LAS MICROALGAS

En este subsistema se engloban los modelos de la dinámica de crecimiento de las microalgas, ya que utilizan los fotones de la luz solar, CO_2 y nutrientes para producir O_2 y más microalgas. La velocidad a la que crecen las microalgas depende de su capacidad de utilizar la luz incidente y de la disponibilidad de nutrientes. Suponiendo que haya una amplia cantidad de nutrientes disponibles, el crecimiento de las microalgas es principalmente función de la luz de entrada. Cuando hay ausencia de luz, las microalgas respiran (es decir, utilizan O_2 y el carbono almacenado como fuente de energía se libera en forma de CO_2). Como resultado de la respiración tiene lugar una pérdida de biomasa. En presencia de luz, las microalgas asimilan carbono del CO_2 disuelto y liberan O_2 , ya que consumen el carbono almacenado. Cuando el medio de cultivo es escaso, hay un exceso de número de fotones aprovechables para la fotosíntesis que no se están utilizando. Bajo esta condición, las microalgas crecerán de manera exponencial, ya que la masa de algas producida no estará limitada por los fotones disponibles. En algún momento, la densidad de algas será lo suficientemente grande para que toda la luz incidente sea utilizada. A densidades superiores a esto, la tasa de crecimiento de microalgas será lineal. Dado que la

densidad continúa aumentando, sólo una fracción pequeña de la suspensión de microalgas será capaz de recibir la cantidad de luz necesaria para la fotosíntesis y la respiración será la actividad metabólica dominante. Mientras esto sucede, el crecimiento total de microalgas en el fotobiorreactor cesará y eventualmente comenzará a decaer. En función de este comportamiento, la mayoría de los modelos desarrollados establecen el crecimiento como una función de la luz mediante la cinética del modelo de Monod. Éste describe que el crecimiento de las microalgas pasa por tres fases de crecimiento: exponencial, lineal y descomposición [81]; ajustándose a las distintas etapas descritas anteriormente. En cualquier caso se trata de un modelo empírico, el cual funciona bien para algunas situaciones. Análisis químicos han puesto de manifiesto que la biomasa de microalgas se compone del 40% de carbono en peso seco [104]. Un mol de CO₂ tiene una masa de 44 gramos y 12 de esos gramos corresponden al carbono, lo que implica que alrededor de 1,5 Kg de dióxido de carbono se requieren para producir 1,0 Kg de biomasa, lo cual se obtiene de la expresión siguiente:

$$\frac{44\text{KgCO}_2 / \text{Kmol}}{12\text{KgC} / \text{Kmol}} \cdot \frac{0,4\text{KgC}}{\text{Kg biomasa}} \approx 1,5 \frac{\text{KgCO}_2}{\text{Kg biomasa}} \quad (3)$$

El punto principal de todas las consideraciones relativas al CO₂ es que, por un lado, el contenido de CO₂ no debe llegar a la concentración superior que produce la inhibición, y por otra parte, nunca debe caer por debajo de la concentración mínima que limita el crecimiento [104], [106]; estos valores máximo y mínimo varían de una especie a otra. En principio, la limitación de CO₂ se pueden solucionar fácilmente mediante el suministro en exceso, pero el uso de dióxido de carbono representa un gasto importante operativo en el cultivo de microalgas, de ahí que la pérdida de CO₂ tenga que ser minimizada [106]. En la práctica, se garantiza simultáneamente la suficiencia de fuente de carbono y la minimización de pérdidas con múltiples puntos de inyección de gas a lo largo de la longitud del tubo. En el caso de los fotobiorreactores tubulares, esto presenta un inconveniente importante debido a su elevado costo y la necesidad de realizar estudios para el diseño y espaciado de los puntos de inyección (dependiente de varios factores: velocidad de flujo del líquido, tasa de fotosíntesis, coeficiente de transferencia de masa gas-líquido, y tasa de inyección de dióxido de carbono). El dióxido de carbono suministrado para este fin (y para controlar el pH del cultivo, como se verá en el siguiente subapartado) es de aproximadamente un 30% de los costos de producción [106]. Esto se debe a que las pérdidas de carbono son superiores al 75%, y a que podrían reducirse a menos de un 30% mediante el diseño y el funcionamiento de fotobiorreactor que describe F. Camacho et al. [107]. Sin embargo, para reducir aún más dicho porcentaje sería necesario diseñar estrategias de control avanzadas que tengan en cuenta los fenómenos de transferencia de masa y el mezclado que se producen en el sistema [108]. Todas estas características referentes al medio y a las distintas etapas en el crecimiento en función de la disponibilidad de luz,

se puede recoger en el modelo mediante una densidad de biomasa de saturación en el término de crecimiento. Cuando la densidad sube por encima del valor de densidad crítica, el crecimiento resultante de la fotosíntesis se convierte en lineal mientras que la pérdida de densidad debida a la respiración sigue siendo exponencial. Estos efectos se pueden expresar según una ecuación diferencial no lineal [105]:

$$\dot{m}_{algas} = P\bar{m}_{algas} - Rm_{algas} \quad (4)$$

donde

$$\begin{aligned} \bar{m}_{algas} &= \min(m_{algas}, m_{densidad}) \\ m_{densidad} &= f(m_{algas}, \text{mezclado}, \text{geometria}) \end{aligned} \quad (5)$$

La variable de estado m_{algas} es la cantidad de microalgas dentro del fotobiorreactor y su derivada, \dot{m}_{algas} , es la tasa de crecimiento de microalgas dentro del fotobiorreactor. El parámetro de productividad P es la tasa de crecimiento específica para una intensidad de luz dada, y está relacionado con la ecuación (2). La constante R es la tasa de pérdida de biomasa debido a la respiración en la oscuridad. Las microalgas también respiran mientras se encuentran en exposición a la luz solar, por lo que sigue siendo adecuado incluir el término respiración durante períodos de crecimiento. Por último, el parámetro $m_{densidad}$ es la densidad crítica por encima de la cual el crecimiento se convierte en lineal.

Una expresión para la evolución del número de células de microalgas, según G. Becerra-Ceils et al. [113], podría ser:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{F_{in}}{V} X_{in} + \mu X - \frac{F_{out}}{V} X_{out} \quad (6)$$

donde μ , X , F , y V son la tasa de crecimiento específico, la concentración de biomasa por unidad de volumen de cultivo, velocidad media de flujo y el volumen de la fase líquida en el fotobiorreactor, respectivamente. Los subíndices *in* y *out* se utilizan para asignar la entrada y la salida de las cantidades, respectivamente. De manera que se podrían aplicar las consideraciones dadas por la ecuación (4) en (6), incluyéndose así el término de una densidad de biomasa de saturación, y en la que también se tendría en cuenta la respiración. Según G. Becerra-Ceils et al. [113], la tasa de crecimiento específico μ es influenciada, predominantemente, por la intensidad de la luz por célula (determinada por una variable que se denota como E) y la concentración total de carbono inorgánico (denotado como TIC , por sus siglas en inglés de Total Inorganic Concentration). Por lo tanto, la expresión resultante sería:

$$\mu = \mu_{max} \left(\frac{E}{E_{opt}} \right) \exp \left(1 - \frac{E}{E_{opt}} \right) \left(\frac{TIC}{TIC_{opt}} \right) \exp \left(1 - \frac{TIC}{TIC_{opt}} \right) \quad (7)$$

donde μ_{max} , E_{opt} , y TIC_{opt} son, respectivamente, la velocidad

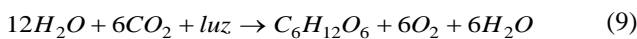
de crecimiento específica máxima, la intensidad de la luz disponible por célula y la concentración total de carbono inorgánico para la que $\mu = \mu_{max}$ (ver [113] para una explicación más detallada del modelo propuesto y el cálculo de estos parámetros para el control predictivo no lineal de un proceso continuo de cultivo de microalgas en un fotobiorreactor).

Sin embargo, para O. Bernard, el incluir un mecanismo de fotoaclimatación es la característica clave para los modelos propuestos en los que se introducen la densidad de clorofila (denotada por Chl) como una variable del modelo (además del carbono y nitrógeno). El mecanismo de fotoaclimatación (Θ) permite adaptar la síntesis de pigmento a la intensidad de la luz. La Fig. 12 representa los datos durante la respuesta de la fotosíntesis para dos cultivos de microalgas fotoaclimatadas a dos intensidades de luz diferentes. La gráfica superior es la normalización para el carbono y la inferior para la clorofila. Cabe destacar, para éste último caso, que la pendiente inicial de curva es independiente de la fotoaclimatación a la luz, de modo que la relación inicial para fotoaclimatación es $\Theta = Chl/X$, donde X es la cantidad de biomasa. También es de destacar en la Fig. 12 el proceso de inhibición que tiene lugar a alta irradiación. Una manera de modelar el efecto de la luz en el modelo de la fotosíntesis es incluir los efectos que producen en el término de la tasa de crecimiento, siendo el modelo cinético que representa las curvas de la Fig. 12, el siguiente [81]:

$$\mu(I) = \mu \left(\frac{I}{I + K_{sI} + I^2 / K_{iI}} \right) \quad (8)$$

donde K_{iI} es un coeficiente de inhibición, y K_{sI} es la constante de saturación media de captación de sustrato, calculada como $K_{sI} = K_{sI}^* / \Theta$, para así tener en cuenta los mecanismos de fotoaclimatación en la ecuación (8). Además propone un modelo de la concentración de clorofila, en el que tienen en cuenta el nitrógeno, ya que lo considera como nutriente limitante (una limitación de éste induce la síntesis de lípidos). De esta manera la tasa de crecimiento incluiría los modelos para la fotoaclimatación, pigmentos y tasa de nitrógeno, teniendo en cuenta en todos ellos la limitación de la luz [81].

Por otro lado, en el crecimiento de las microalgas, además del consumo de CO_2 , se libera O_2 . Una ecuación simplificada para la fotosíntesis es:



Esta ecuación establece que por cada gramo de CO_2 consumido, se produce un gramo de O_2 . Si bien esto es cierto, no es la causa de todo el O_2 que se produce. Esto resulta del hecho de que las moléculas de O_2 provienen de la división del agua, que proporcionan la energía para todos los procesos metabólicos dentro de la microalga. Por lo tanto, no hay una correspondencia uno-a-uno de moléculas de O_2 producidos a moléculas de CO_2 fijados. El exceso de energía que no se

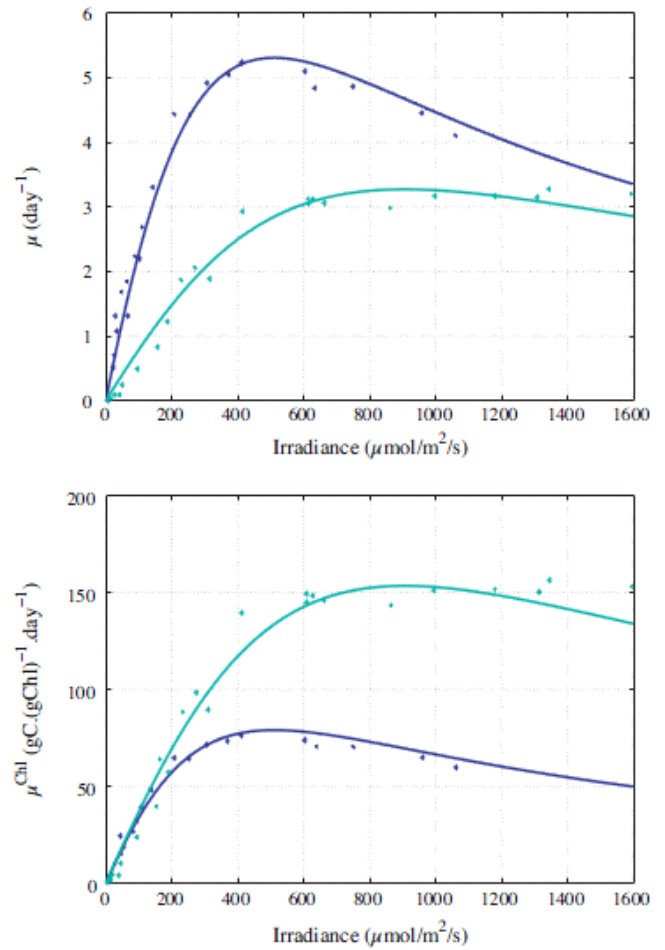


Fig. 12. Modelo y datos de la respuesta fotosintética de la diatomea *Skeletonema costatum* fotoadaptada a una radiación baja ($I_L = 50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, línea y puntos azul oscuro) y a una radiación alta ($I_H = 1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, línea y puntos azul celeste) [81].

utiliza para fijar el CO_2 se utiliza para otros procesos metabólicos como la fijación de nutrientes desde el medio y la reparación celular. En la literatura, se encuentra que se toma 8 fotones de la luz para producir una molécula de O_2 , mientras que toma 8-12 fotones de luz para asimilar una molécula de CO_2 [116]. Suponiendo que 10 fotones de luz son necesarios para fijar una molécula de CO_2 , la cantidad de O_2 producido será:

$$\frac{32 \text{Kg } O_2 / \text{Kmol}}{44 \text{Kg } CO_2 / \text{Kmol}} \cdot \frac{8 \text{mol } O_2}{10 \text{mol } CO_2} \cdot \frac{1,5 \text{Kg } CO_2}{\text{Kg biomasa}} \approx 0,873 \frac{\text{Kg } O_2}{\text{Kg biomasa}} \quad (10)$$

Basándose en estas suposiciones, la tasa de consumo de CO_2 y la tasa de producción de O_2 se pueden expresar en términos de la tasa de crecimiento, según la ecuación (4), términos que se usarán para los modelos de transferencia de gases en el subsistema de la química del medio de cultivo:

$$\dot{m}_{CO_2} (\text{masa} / \text{tiempo}) = 1,5 \dot{m}_{\text{algas}} \quad (11)$$

$$\dot{m}_{O_2} (\text{masa} / \text{tiempo}) = 0,873 \dot{m}_{\text{algas}} \quad (12)$$

Otro factor que se debe controlar con el fin de asegurar un óptimo proceso metabólico y de crecimiento es la temperatura. Como ya se ha explicado, la importancia de controlar y mantener la temperatura dentro del fotobiorreactor a unos niveles definidos, radica en que a temperaturas muy elevadas o muy bajas, se presenta una inhibición de crecimiento en las microalgas. Lo que afectaría directamente la eficiencia del proceso de cultivo y la vida de las algas. La dinámica computacional de fluidos (CFD), es una poderosa herramienta dedicada al estudio de flujos. Esta herramienta usa técnicas numéricas para resolver problemas que involucran la dinámica de los fluidos. Por medio de CFD se pueden representar situaciones o sistemas de manera virtual, aplicarle condiciones físicas o químicas a dicho sistema, del cual se puede obtener una predicción del fenómeno físico que acontece en un sistema o sus alrededores, y resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes (conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido, las cuales se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido) en cada una de las celdas del dominio computacional. CFD es considerada como una herramienta eficaz para complementar las limitaciones de los experimentos de campo y de laboratorio a un costo muy bajo [117]. La aplicación de CFD para el diseño de fotobiorreactores es cada vez más popular a medida que las computadoras se vuelven más capaces y asequibles, lo que permite tiempos más rápidos de cálculo y la capacidad de resolver incluso las geometrías más complicadas. Para predecir la temperatura se usa un modelo de transferencia de calor en el que se incluyen la transferencia de calor por conducción, convección, y (si es necesario) la mezcla por turbulencia y viscosidad. La transferencia de calor en un fluido está gobernada por la ecuación del Transporte de Energía [117]:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho h_{tot})}{dt}}_{\text{Transitorio}} - \frac{\partial p}{\partial t} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho U h_{tot})}_{\text{Convección}} = \underbrace{\nabla \cdot (\lambda \nabla T)}_{\text{Conducción}} + \underbrace{\nabla \cdot (U \cdot \tau)}_{\text{Viscosidad}} + \underbrace{S_E}_{\text{Fuente}} \quad (13)$$

donde ρ es la densidad del medio, h_{tot} es el coeficiente de convección, p es la presión, U es el término de velocidad, λ es la conductividad térmica, T es la temperatura, τ es el esfuerzo cortante y S_E corresponde a otras fuentes de calor.

Los modelos disponibles son el modelo isotérmico, el de energía térmica y el de energía total. El primer modelo requiere que se introduzca una temperatura uniforme para el fluido en términos de temperatura absoluta. Puede ser usado para el propósito de evaluar las propiedades del fluido que dependen de la temperatura. Para fluidos en general, una temperatura constante se puede utilizar como base para una serie de simulaciones isotérmicas utilizando propiedades del fluido dependientes de la temperatura. También se puede utilizar esta opción para crear un archivo de los resultados iniciales de un modelo más complejo. El siguiente, el modelo

de energía térmica modela el transporte de entalpía (cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno) a través del fluido. Se diferencia del modelo de energía total en que los efectos del flujo de la energía cinética media no están incluidos. En consecuencia, reproduce los mismos resultados que el modelo de energía total cuando los efectos de la energía cinética se desvanecen, y por lo tanto, es adecuada para los flujos de baja velocidad donde los efectos cinéticos son insignificantes, con calores específicos constantes. Por último, el modelo de energía total modela el transporte de entalpía y se incluyen los efectos de energía cinética. Se debe utilizar cuando los efectos de energía cinética son significativos.

En el caso que sea necesario introducir la turbulencia, sus modelos se utilizan para predecir los efectos de la turbulencia en el flujo de fluidos. Uno de los modelos de turbulencia más importantes es el modelo k-Épsilon, usado por J.A. Piedrahita et al. [118], pues se ha implementado en la mayoría de los códigos CFD de propósito general y es considerado como el modelo estándar de la industria. Ha demostrado ser estable y robusto numéricamente y tiene un régimen bien establecido de la capacidad de predicción. El modelo ofrece un buen compromiso en términos de precisión y robustez.

Es muy importante en el diseño y desarrollo del sistema de control de temperatura del medio cultivo tener en cuenta factores como la temperatura y radiación solar a lo largo del año de la región donde se va a ubicar el cultivo. Es conveniente trabajar con las temperaturas máximas y mínimas registradas, ya que el sistema debe soportar y cumplir el objetivo bajo condiciones críticas. En cuanto a la radiación solar, en algunas situaciones puede ser importante el efecto de la transferencia de calor por radiación. Se pueden dar dos situaciones, una de ellas es que el medio es transparente a la radiación. En este caso, la radiación sólo afecta por el calentamiento o enfriamiento de la superficie, sin transferencia de energía al medio. En esta situación se debe utilizar el modelo de Monte Carlo. El otro caso es que se trate de un medio ópticamente denso, y la radiación interactúa con el medio en el interior así como en las superficies. La energía radiante puede ser esparcida, o también puede ser absorbida y re-emitada en todas las direcciones con una escala de pequeña longitud en comparación con el tamaño del dominio. Esta situación se conoce como el "límite de difusión", ya que la intensidad de radiación es independiente de la dirección. En este límite, los modelos Rosseland y P1 son una alternativa atractiva debido a su simplicidad. El modelo P1 ofrece una precisión razonable sin mucho esfuerzo computacional [118].

SUBSISTEMA DE LA QUÍMICA DEL MEDIO.

Los modelos del subsistema de la química del medio incluyen tanto a los gases disueltos y nutrientes disponibles para las microalgas en el medio. Los gases disueltos son una función tanto de los gases que se introducen en los biorreactores y los gases internos que son consumidos y

generados por las microalgas. El propósito principal de burbujeo es regular las concentraciones de O_2 y el CO_2 disueltos a través de la transferencia de masa. En general, las tasas de transferencia de gas puede ser modelado localmente como un sistema dinámico de primer orden. Debido a la naturaleza distribuida del sistema, el modelo requeriría muchos sistemas de primer orden en cascada, que es común con los modelos de proceso. Este fenómeno puede ser esencialmente capturado mediante el uso de un modelo de primer orden más tiempo muerto [105]. Cuando el medio en el PBR está en equilibrio con el aire, hay alrededor de 7mg/mL de O_2 disuelto en el medio, que se mantiene a través de burbujeo cuando no hay crecimiento. Durante los períodos de alto crecimiento, el O_2 disuelto (DO) se acumulará en el sistema y eventualmente será purgado por la noche. Esto es descrito por el modelo dinámico siguiente:

$$\dot{m}_{DO}(t) = \frac{w_{burb}}{\tau_{DO}} (m_{DO,gas}(t - \tau_{d,gas}) - m_{DO}(t)) + \dot{m}_{O_2}(t) \quad (14)$$

Aquí, w_{burb} es la tasa de flujo de gas que se burbujea hacia el PBR, τ_{DO} es el tiempo muerto para la transferencia de masa de DO entre el medio y las burbujas de aireación, $m_{DO,gas}$ es el nivel de DO que el medio equilibrará, m_{DO} es el nivel de DO que hay en el sistema y \dot{m}_{O_2} es la tasa de oxígeno producido mediante la fotosíntesis. Cuando el burbujeo está desactivado (es decir, $w_{burb} = 0$), entonces el DO se acumulará en el sistema a la velocidad que es producido por la fotosíntesis. Una vez que el burbujeo se vuelve a encender, los niveles de DO se equilibrarán de nuevo a $m_{DO,gas}$ con un tiempo de retardo de τ_{DO}/w_{burb} . La corriente de entrada de gas es aire más una corriente de gas de CO_2 , donde la cantidad adicionada de CO_2 varía. Esta variación puede cambiar el equilibrio de $m_{DO,gas}$. Hay un retraso desde que se produce el cambio de concentración de CO_2 y cuando la mezcla de gas nueva llega al, que es capturado por el retraso $\tau_{d,gas}$.

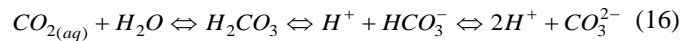
Un método análogo se puede utilizar para modelar el carbono inorgánico disuelto (DIC), que se da en la ecuación:

$$\dot{m}_{DIC}(t) = \frac{w_{burb}}{\tau_{DIC}} (m_{DIC,gas}(t - \tau_{d,gas}) - m_{DIC}(t)) + \dot{m}_{CO_2}(t) \quad (15)$$

Aquí, $m_{DIC,gas}$ es la concentración de CO_2 requerida para un pH específico y m_{DIC} es la concentración de CO_2 en el sistema. Como el CO_2 se retira del medio a través de la fotosíntesis (es decir, \dot{m}_{CO_2}), el valor de $m_{DIC,gas}$ se incrementará para ayudar a reemplazar el CO_2 consumidos. Por lo tanto, este valor es siempre cambiante durante el crecimiento activo para mantener un pH constante. Debido a la naturaleza distribuida del sistema, hay un reatrd de $\tau_{d,gas}$ entre el momento en el que cambia la concentración de CO_2 y cuando el CO_2 llega al medio.

Como el CO_2 se disuelve en el medio, se descompone en diferentes especies, en CO_2 acuoso ($CO_{2(aq)}$), ácido carbónico

(H_2CO_3), bicarbonato (HCO_3^-), y carbonato (CO_3^{2-}). La combinación de todas estas especies representa el DIC total. La cantidad de $CO_{2(aq)}$ es una función de la temperatura y la presión, que se rige por la ley de Henry. Basándose en la cantidad de DIC y la ley de Henry, el equilibrio químico que se alcanza es el siguiente [107]:



La cantidad de cada una de las especies de ácido carbónico, bicarbonato, y especies de carbonato determina el pH. Cuando el pH aumenta el equilibrio se desplaza hacia la izquierda, y hacia la derecha a medida que disminuye el pH. A medida que las microalgas crecen, el $CO_{2(aq)}$ se retira del medio, lo que provoca que el equilibrio se desplace hacia la izquierda y el pH experimente una subida. Algunas cepas de microalgas también utilizarán bicarbonato como fuente de carbono. Las microalgas aún requieren CO_2 , el cual llega por la división del bicarbonato en $H^+ + HCO_3^- \Leftrightarrow CO_2 + OH^-$. La liberación de iones OH^- también hace que el pH aumente. No está claro qué método de asimilación de carbono domina el aumento del pH. Éste sería el primer paso en el proceso de modelado del pH, la caracterización del sistema y el comportamiento que experimenta el pH dentro de los reactores. Ha quedado de manifiesto que el pH de un cultivo de microalgas se ve influenciado por dos fenómenos. Por un lado el aporte del CO_2 como nutriente provoca la formación de ácido carbónico y éste un descenso del pH en el cultivo. Por otro lado, las microalgas realizan la fotosíntesis en presencia de radiación solar consumiendo el CO_2 y generando O_2 , lo que provoca una subida paulatina del pH. Para mantener el crecimiento máximo y por lo tanto maximizar el rendimiento de los cultivos se requiere que ciertas variables del entorno sean mantenidas en los valores óptimos. Entre ellas, el pH es una de las variables críticas, la cual tiene que ser regulada adecuadamente. Esto se lleva a cabo por la interacción con el sistema amortiguador de bicarbonato a través de la inyección de una corriente de CO_2 puro. De manera que la inyección de CO_2 como acción reguladora tiene dos objetivos: en primer lugar, se produce una acidificación del medio de cultivo recuperando la capacidad del tampón y llevando el pH al punto óptimo de equilibrio para la microalga, y en segundo lugar proporciona una fuente de carbono inorgánico indispensable para el crecimiento. La adición de CO_2 , puede tardar de 2 a 3 segundos para que el carbono se disuelva completamente y sólo una fracción de la entrada de CO_2 se disuelve antes de salir de la rejilla de ventilación.

Los modelos existentes que relacionan la dinámica del pH con la inyección de CO_2 en fotobiorreactores son en estado estacionario, basados en balances de masa diferenciales, tal y como se describen en [107]. Estos modelos permiten la determinación de la influencia de las condiciones de cultivo sobre el comportamiento del sistema, especialmente los requerimientos de carbono, la concentración de oxígeno disuelto y la variación de pH, pero no se pueden utilizar para

propósitos de compensación dinámicos. El comportamiento del pH en el medio puede ser capturado por la dinámica de primer orden en la ecuación (17). El modelo de pH se linealiza alrededor de un pH de referencia, 7,3 según M.R. Buehner et al. [105] o 7,7 según M. Berenguel et al. [104].

$$p\dot{H}(t) = \frac{1}{\tau_{pH}} (K_{pH} m_{DIC}(t) - pH(t)) \quad (17)$$

Aquí, τ_{pH} es el tiempo de retraso asociado con el DIC en las especies apropiadas y K_{pH} es el factor de conversión de DIC a unidades de pH.

El CO_2 no es el único factor que afecta el pH. Autores han encontrado que el pH también se ve afectado por la precipitación de carbonato de calcio en el medio y la asimilación de nitrógeno, el exceso de afluencia de cationes, exceso de aniones, y la asimilación orgánica y la excreción por la microalga [119]. Sin embargo, la entrada de CO_2 es la variable principal controlable y medible que tiene el efecto más significativo sobre el pH. Esta característica crea algunos problemas relacionados con el control independiente de CO_2 y pH, que es un tema de investigación en curso [105].

Para M. Berenguel et al. [104], en el caso concreto de fotobiorreactores tubulares, el problema es controlar el pH del cultivo usando como variable de manipulación la apertura de una válvula discontinua de inyección de CO_2 , y tomando como variable de entrada el pH a la salida del lazo externo del fotobiorreactor. Desde un punto de vista teórico, el control del pH es un problema no lineal que puede ser linealizado bajo ciertas circunstancias [109]. Este proceso de neutralización ácido-base podría ser modelado por un modelo lineal si el intervalo de pH se encuentra alrededor del punto de referencia (Fig. 13).

En [104] se propone un modelo en el que se relaciona el pH con la inyección de CO_2 y la radiación solar a través de dos funciones de transferencia de tercer orden con retardo y otra de primer orden [104]:

$$VpH = \underbrace{\frac{FT1_1}{K_1}}_{FT1} \cdot \underbrace{\frac{FT1_2}{K_{1_2} \omega_n^2}}_{FT1} \cdot e^{-tr_1 \cdot s} \cdot VCO_2 + \underbrace{\frac{K_2}{(1 + \tau_2 \cdot s)}}_{FT2} VI \quad (18)$$

donde VpH es el pH del cultivo, VCO_2 es el porcentaje de apertura de la válvula de CO_2 e VI es el valor de la radiación global. La primera función de transferencia, que relaciona el pH con el CO_2 inyectado (FT1) se divide a su vez en otras dos funciones de transferencia. Por un lado FT1_1 que es de primer orden y que representa la dinámica principal del sistema, y por otro lado FT1_2 que es de segundo orden y representa la pequeña dinámica oscilatoria que se observa sobre la dinámica principal debido a la recirculación que se produce en los fotobiorreactores tubulares. Como el sistema tiene retardo, también se debe añadir éste a la función ($e^{-tr_1 \cdot s}$).

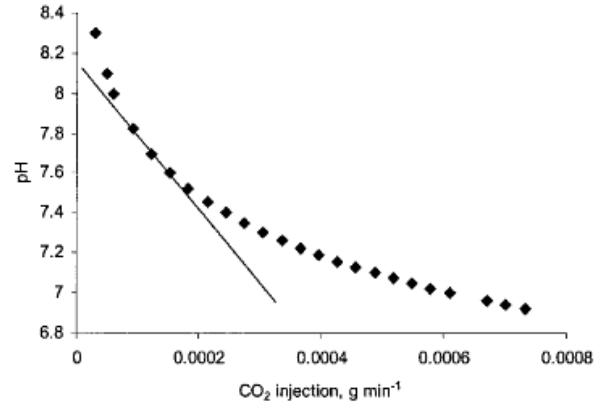


Fig. 13. Dependencia del pH con la inyección de CO_2 . La línea recta representa la regresión lineal de los datos alrededor del valor de set-point 7.7 [108].

La función de transferencia FT2 relaciona el efecto de la radiación solar en el pH y también se trata de una función de transferencia de primer orden, pero en este caso sin retardo, ya que este es despreciable. Las funciones de transferencia de primer orden tienen como parámetros la ganancia (K) y la constante de tiempo (τ). La función retardo tiene como parámetro tr que es el tiempo de retardo. En las funciones de transferencia de segundo orden, los parámetros son la ganancia (KI_2), la frecuencia natural no amortiguada (ω_n) y el coeficiente de amortiguamiento (δ).

El objetivo final del modelado del sistema mediante esta metodología, es la obtención de los valores de cada uno de estos parámetros. Para ello, se realizan ensayos en la planta que permiten observar los efectos tanto de la inyección de CO_2 como de la radiación solar, de manera que estos datos permitan correlacionar los resultados experimentales obtenidos en la planta con el modelo teórico en (18). Estos parámetros del modelo pueden ser obtenidos mediante la simple observación de las respuestas temporales en la ejecución de los experimentos, mientras que otros se podrían calibrar utilizando el método de mínimos cuadrados. En la Fig. 14 se observa como las inyecciones de CO_2 producen un descenso en el

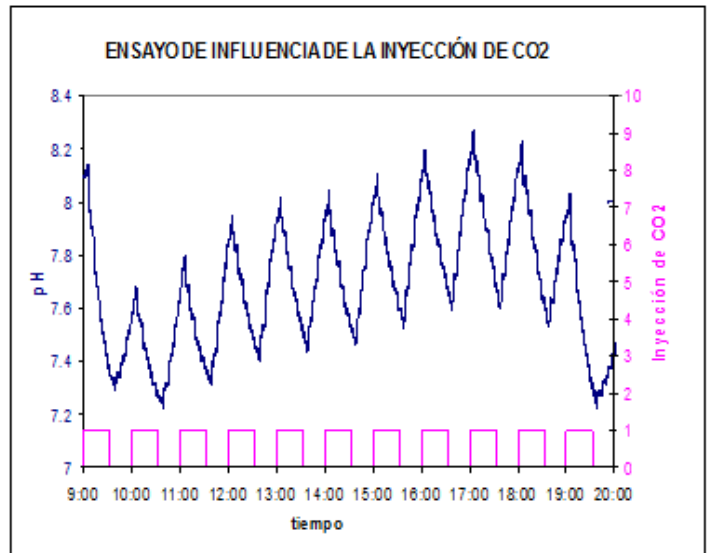


Fig. 14. Efecto de la inyección de CO_2 sobre el pH en un cultivo de microalgas [103].

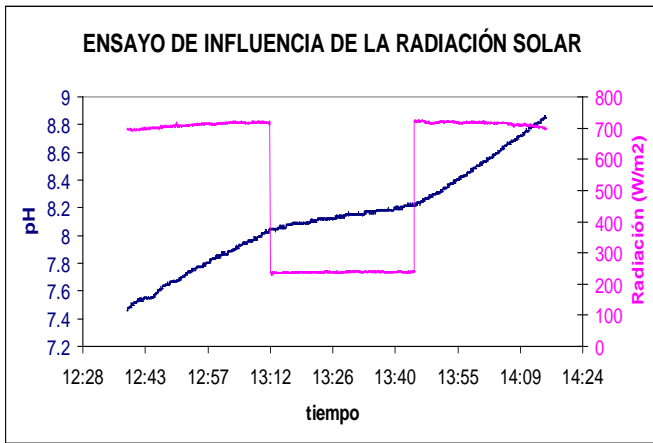


Fig. 15. Efecto de la radiación sobre el pH de un cultivo de microalgas [103].

valor de pH debido a la formación de ácido carbónico y su consiguiente acidificación del medio. También se observa como durante los tiempos de no inyección se produce un aumento del pH, producido por acción fotosintética y consumo de carbono inorgánico disuelto anteriormente [103]. En la Fig. 15 se representa el efecto de la radiación sobre el pH de un cultivo de microalgas. Se observa como un descenso brusco en los valores de radiación solar provoca un descenso en el ritmo de crecimiento del pH. En este ensayo no se inyecta CO_2 por lo que la tendencia natural del pH del cultivo será aumentar hasta un valor de equilibrio. La fotosíntesis sólo se realiza en presencia de radiación solar, por lo que durante la noche el pH se mantiene constante o sube ligeramente. En la Fig. 15 se aprecia claramente cómo a valores bajos de radiación el pH del cultivo aumenta muy lentamente [103]. Por tanto, durante el funcionamiento diurno, se tiene que inyectar una alta cantidad de CO_2 para adaptarse a la requerida por el cultivo y para evitar el aumento de pH rápido que se rige por la tasa de fotosíntesis (con saturación y niveles de inhibición) determinado por la radiación solar (Fig. 15). La incorporación del efecto de la radiación solar en el modelo, FT2, mejora los resultados, como se muestra en la Fig. 16 (b), donde el desplazamiento se ha disminuido en un medio en comparación con la respuesta del modelo FT1 (Fig. 16 (a)). Los errores de modelado restantes pueden ser compensados por la retroalimentación [104]. La comparación entre los resultados obtenidos probando con diferentes entradas on-off e inyección continua de CO_2 diurna, influencia de la radiación, y las concentraciones teóricas de los componentes tampón muestran una relación estrecha, lo que justifica esta opción de modelado simplificado [104].

I. Fernández et al. [134] presentan la dinámica de un modelo para el cultivo de microalgas en fotobiorreactores tubulares basándose en balances de masa y fenómenos de transporte, relaciones termodinámicas y ecuaciones que simulan los fenómenos biológicos que tienen lugar dentro del medio de cultivo, con lo cual se basan en principios fundamentales en vez de en ecuaciones empíricas. Por tanto,

desarrollan un modelo en el que incluyen los tres subsistemas que se han descrito en este apartado. En primer lugar, relacionan la tasa de fotosíntesis con la disponibilidad de la luz mediante el parámetro de irradiancia media, I_{av} .

$$I_{av} = \frac{I_o \cdot \alpha}{K_a \cdot C_b \cdot d_t} (1 - \exp(-K_a \cdot C_b \cdot d_t)) \quad (19)$$

Donde d_t es el diámetro de la trayectoria de la luz o tubo, C_b la concentración de biomasa, K_a el coeficiente de extinción de la biomasa coeficiente, I_o la radiación solar sobre una superficie horizontal libre de obstáculos y α el factor de distribución, que representa la fracción de la radiación solar disponible en el área particular del reactor. Y la tasa de fotosíntesis por unidad de biomasa, P_{O_2} , se expresa como una función hiperbólica de la irradiancia media, según la expresión (20).

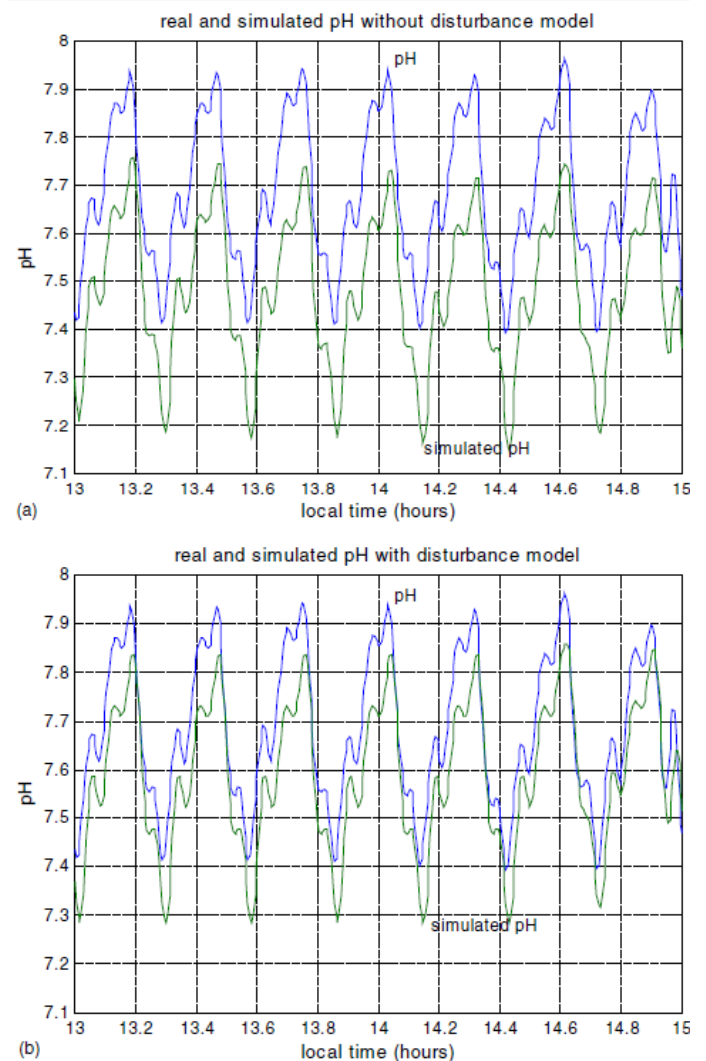


Fig. 16. Comparación entre el comportamiento real del pH y la estimación lineal: (a) sin efecto de la radiación solar, (b) con efecto de la radiación solar [104].

$$P_{O_2} = \frac{P_{O_2, \max} \cdot I_{av}^n}{I_k^n + I_{av}^n} \left(\frac{K_{IO_2}}{K_{IO_2} + [O_2]} \right) - r \cdot P_{O_2, \max} \quad (20)$$

Aquí, $P_{O_2, \max}$ es la tasa de fotosíntesis máxima bajo las condiciones de cultivo, I_k es una constante de irradiancia que representa la irradiancia media que se requiere para lograr la mitad de la tasa de fotosíntesis máxima y n es el exponente de forma. K_{IO_2} es la constante de inhibición para el oxígeno, $[O_2]$ es la concentración de oxígeno disuelto en el cultivo y r es la tasa de respiración, de modo que se incluyen la influencia de la concentración de oxígeno disuelto y las pérdidas producidas por la respiración.

Por otro lado, aplican balances de masa a la fase líquida. Los cambios en la concentración de oxígeno vienen dados por:

$$\begin{aligned} & Q_l [O_2]_{inlet} + P_{O_2} (1 - \varepsilon) dV C_b \\ &= Q_l [O_2]_{outlet} + K_{I, a_1, O_2} ([O_2^*] - [O_2])_{ml} (1 - \varepsilon) dV + dV (1 - \varepsilon) \frac{d[O_2]}{dt} \end{aligned} \quad (21)$$

donde Q_l es la tasa de flujo volumétrico de líquido, P_{O_2} es la tasa de producción de oxígeno por unidad de masa de biomasa, ε es la retención del gas, y K_{I, a_1, O_2} es el coeficiente volumétrico de transferencia de masa gas-líquido para el oxígeno, todos ellos en cada volumen diferencial del reactor, dV . $[O_2]$ es la concentración de oxígeno en la fase líquida (a la entrada, *inlet*, y a la salida, *outlet*) y $[O_2^*]$ es la concentración en equilibrio con la fase gaseosa. En cuanto a la concentración de biomasa, ésta se calcula mediante:

$$Q_l C_{b, inlet} + P_{O_2} (1 - \varepsilon) dV C_b Y_{p/x} = Q_l C_{b, outlet} dV (1 - \varepsilon) \frac{dC_b}{dt} \quad (22)$$

donde $C_{b, inlet}$ y $C_{b, outlet}$ es la concentración de biomasa definida a la entrada y a la salida del diferencial de volumen, y $Y_{p/x}$ es el coeficiente de rendimiento de biomasa producida por unidad de masa de oxígeno. Para calcular la concentración de carbono inorgánico proponen:

$$\begin{aligned} & Q_l [C_T]_{inlet} + P_{CO_2} (1 - \varepsilon) dV C_b \\ &= Q_l [C_T]_{outlet} + K_{I, a_1, CO_2} ([CO_2^*] - [CO_2])_{ml} (1 - \varepsilon) dV + dV (1 - \varepsilon) \frac{d[C_T]}{dt} \end{aligned} \quad (23)$$

donde P_{CO_2} es la tasa de consumo de dióxido de y K_{I, a_1, CO_2} es el coeficiente de transferencia de masa de CO_2 en el diferencial de volumen considerado. La concentración total de carbono inorgánico $[C_T]$ se define en la entrada y salida de cada volumen (*inlet* y *outlet*, respectivamente), que es dependiente de la concentración de dióxido de carbono en la fase líquida, $[CO_2]$, y el valor de equilibrio en la fase gaseosa

$[CO_2^*]$. En este caso, es necesario tener en cuenta si hay inyecciones de CO_2 . Si hay inyecciones, existe transferencia de masa entre la fase gaseosa y la fase líquida, pero si no hay inyecciones, la transferencia de masa entre las fases será cero. Para tener en cuenta las variaciones de pH, basándose en el equilibrio dado por la ecuación (16), realizan una serie de cálculos de las constantes de equilibrio (ver desarrollo en [134]).

Por ultimo, es necesario definir los balances para la fase gaseosa. Para el oxígeno, el balance de masa es:

$$\begin{aligned} & F_{N_2} Y_{O_2, inlet} = F_{N_2} Y_{O_2, outlet} \\ & + K_{I, a_1, O_2} ([O_2^*] - [O_2])_{ml} (1 - \varepsilon) dV + \frac{F_{N_2} dV}{Q_l} \frac{dY_{O_2}}{dt} \end{aligned} \quad (24)$$

donde F_{N_2} es el flujo molar de nitrógeno en la fase de gaseosa (se considera constante porque su solubilidad se aproxima a cero), mientras que Y_{O_2} es la relación molar de oxígeno a nitrógeno en la fase gas definido a la entrada y la salida del diferencial de volumen (*inlet* y *outlet*, respectivamente). Para el dióxido de carbono, establecen un balance de masa análogo, donde Y_{CO_2} es la relación molar de dióxido de carbono a nitrógeno en la fase de gaseosa definido en la entrada (*inlet*) y en la salida (*outlet*) del diferencial de volumen.

$$\begin{aligned} & F_{N_2} Y_{CO_2, inlet} = F_{N_2} Y_{CO_2, outlet} \\ & + K_{I, a_1, CO_2} ([CO_2^*] - [CO_2])_{ml} (1 - \varepsilon) dV + \frac{F_{N_2} dV}{Q_l} \frac{dY_{CO_2}}{dt} \end{aligned} \quad (25)$$

El modelo fue calibrado y validado con datos de un fotobiorreactor tubular a escala piloto, pero se puede extender a otros diseños. Se puede utilizar para determinar, a partir de medidas experimentales, los valores de los parámetros característicos. El modelo también permite una simulación del comportamiento dinámico del sistema en respuesta a la radiación solar, lo que lo convierte en una herramienta útil para el diseño y optimización de la operación de fotobiorreactores. Además, el modelo permite la identificación de gradientes locales de pH, de oxígeno disuelto y de dióxido de carbono disuelto; que pueden dañar el crecimiento de microalgas. Además, el modelo desarrollado puede asignar las diferentes escalas de tiempo de los fenómenos característicos dentro de cultivos de microalgas en fotobiorreactores tubulares, lo que significa que es una herramienta valiosa en el desarrollo de estrategias de control avanzadas para cultivos de microalgas.

B. Estrategias de control

En este apartado se describirán las distintas estrategias de control desarrolladas hasta el momento para modelos de fotobiorreactores. En concreto se analizarán las estrategias de

control que se han llevado a cabo para modelos de pH del medio y de crecimiento de las microalgas, entre las que se incluyen en el modelo anterior propuesto, además de describir la técnica de control on-off sobre la que se han basado para realizar los ensayos que se han presentado anteriormente. Por otro lado se hará referencia a las opciones disponibles para la optimización de la productividad con el fin de obtener biodiésel.

En la actualidad existe una falta de modelos dinámicos para este tipo de sistemas, lo que justifica que el control on-off sea la estrategia más comúnmente usada en fotobiorreactores, en la que salida sólo cambia si el pH varía del punto de referencia en el margen impuesto. La idea esencial es que cuando la variable controlada cae por debajo del valor deseado, entonces la salida del regulador está apagada. De manera similar, cuando la variable controlada se eleva por encima del valor deseado, entonces la salida del regulador está encendida. Como ya es bien conocido, la técnica de control on-off produce continuas oscilaciones con respecto al valor de referencia resultando en demasiados cambios en la señal de control y por lo tanto en el estado del actuador. Este problema se debe a que la técnica de control on-off no tiene en cuenta la dinámica del sistema y los efectos de las perturbaciones en el diseño del sistema de control. La estrategia on-off, a pesar de hacer frente al problema de control del pH, presenta, además de los comentados, otra serie de inconvenientes: no tiene en cuenta la distribución de los tiempos de residencia del sistema, ni la naturaleza "local" de inyección de CO₂ cuando la mezcla no es perfecta, lo que conduce a grandes pérdidas de CO₂ y a variaciones de pH en torno al punto de ajuste deseado. Por lo tanto, es necesario presentar una estrategia de control para hacer frente a estos problemas, que combine un control PI para fines de realimentación y un compensador feed-forward (FF) para reducir la influencia de la radiación solar. Con este esquema de control, los cambios en la señal de control se reducen considerablemente y, por tanto las pérdidas en la inyección de CO₂ se reducirán también [103], [105].

M.R. Buehner et al. [105], basándose en el modelo de crecimiento global, dado por los tres subsistemas descritos en el apartado anterior y por las ecuaciones (2), (4), (11), (12), (14), (15) y (17), proponen una estructura general de control que utiliza FF y realimentación. Una de las aplicaciones del modelo es determinar la cantidad de CO₂ que es requerida por las microalgas y suministrarla a través de un control FF CO₂. La tasa de consumo de CO₂ está directamente relacionada con la tasa de crecimiento, esto se da en la ecuación (11). Esta tasa de consumo de CO₂ puede ser utilizada como una tasa de flujo de entrada FF de CO₂ al PBR. En la práctica, hay una tasa nominal de flujo de CO₂ que se requiere para mantener el pH, que se denomina $\dot{m}_{CO_2(media)}$. La entrada general del controlador FF estará dada por [105]:

$$u_{CO_2}^{FF} = \dot{m}_{CO_2(crecim)} + \dot{m}_{CO_2(media)} \quad (26)$$

Como en la mayoría de control FF, se usa una realimentación para corregir las diferencias del modelo y para rechazar perturbaciones del sistema. Para este fotobiorreactor, M.R. Buehner et al. [105], utilizan un controlador PI para la corrección de la desviación entre el pH deseado y el que se mide. El diagrama de bloques del sistema de control se muestra en la Fig. 17.

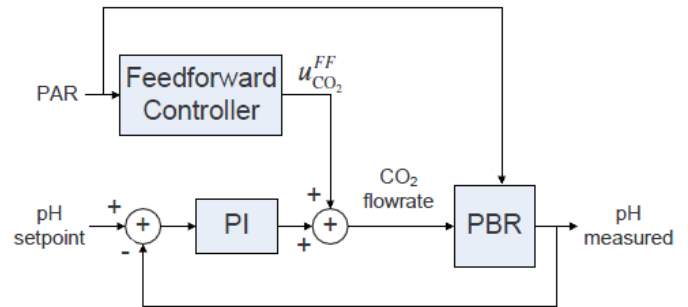


Fig. 17. Regulación de pH usando un control PI+FF+Realimentación [105].

I.Fernández et al. [103] proponen la misma estrategia para el modelo propuesto en la ecuación (18). El controlador PI se diseñará de acuerdo con ese modelo y utilizando el método λ para obtener un valor de la constante de tiempo en bucle cerrado deseada. El feed-forward se calcula de una manera clásica en relación a la dinámica dominante de la planta respecto de la perturbación, según la ecuación (18), donde $FF(s) = \frac{-FT2(s)}{FT1_1(s)}$. Utiliza también un esquema *antiwindup* para solucionar problemas de saturación. Otro aspecto a tener en cuenta en el proceso de diseño es que se trabajan con válvulas on-off. Por lo tanto, la señal de control continua del PI + término FF debe ser traducida a una señal discontinua para ser utilizada por la válvula [103].

Por otra parte, también se han desarrollado estrategias de control predictivo [81], [104], [108], [113]. El control predictivo tiene como objetivo resolver, de forma efectiva, problemas de control y automatización de procesos industriales que se caractericen por presentar un comportamiento dinámico complicado, multivariable, y/o inestable. La estrategia de control en que se basa este tipo de control, utiliza el modelo matemático del proceso a controlar para predecir el comportamiento futuro de dicho sistema, y en base a este comportamiento futuro puede predecir la señal de control futura. El control predictivo integra disciplinas como el control óptimo, control estocástico, control de procesos con retardo de tiempo, control multivariable, control con restricciones. El tipo de control predictivo que se trata, es el Control Predictivo Basado en Modelo (CPBM), conocido también como Model Based Predictive Control (MBPC) o simplemente Model Predictive Control (MPC). El control predictivo basado en modelo se puede definir como una estrategia de control que se basa en la utilización de forma

explícita de un modelo matemático interno del proceso a controlar (modelo de predicción), el cual se utiliza para predecir la evolución de las variables a controlar a lo largo de un horizonte temporal de predicción especificado por el operador, de este modo se pueden calcular las variables manipuladas futuras (señal de control futura) para lograr que en dicho horizonte, las variables controladas converjan en sus respectivos valores de referencia. El MPC se enmarca dentro de los controladores óptimos, es decir, aquellos en los que las actuaciones responden a la optimización de un criterio. El criterio a optimizar, o función de coste, está relacionado con el comportamiento futuro del sistema, que se predice gracias a un modelo dinámico del mismo, denominado modelo de predicción. El intervalo de tiempo futuro que se considera en la optimización se denomina horizonte de predicción. Dado que el comportamiento futuro del sistema depende de las actuaciones que se aplican a lo largo del horizonte de predicción, son éstas las variables de decisión respecto a las que se optimiza el sistema. La aplicación de estas actuaciones sobre el sistema conduce a un control en bucle abierto. La posible discrepancia entre el comportamiento predictivo y el comportamiento real del sistema crean la necesidad de imponer cierta robustez al sistema incorporando realimentación del mismo. Esta realimentación se consigue gracias a la técnica del horizonte deslizante que consiste en aplicar las actuaciones obtenidas durante un período de tiempo, tras el cual se muestrea el estado del sistema y se resuelve un nuevo problema de optimización. De esta manera, el horizonte de predicción se va deslizando a lo largo del tiempo [120]. Esta estrategia de control presenta varias características interesantes [110]: (1) se puede utilizar para controlar una amplia variedad de procesos, desde aquellos con dinámica relativamente simples a otras más complejas, incluyendo sistemas con largos retrasos, con fase no mínima, o inestables, (2) intrínsecamente tienen una compensación por tiempos muertos, (3) introducen control anticipativo de una manera natural para compensar las perturbaciones medibles, (4) permiten la extensión conceptualmente simple de tratamiento de las restricciones, que pueden ser incluidos de manera sistemática durante el proceso de diseño, etc.

Respecto al problema de control que se aborda en los biorreactores, hay algunas razones que justifican el uso de un esquema de control predictivo en el caso de una señal de control on-off: en primer lugar, el problema no es sólo el rechazo de perturbaciones en el lazo de control, sino también se relaciona con los costes asociados a las acciones de control (inyección de CO_2). En este sentido, el uso de una función de coste como la utilizada en los algoritmos predictivos ayuda a las acciones de control que deben tenerse en cuenta. Aunque el tiempo de retardo es menor que la constante de tiempo dominante del sistema, apenas influye en las pérdidas de CO_2 debido a la naturaleza "local" de inyección de CO_2 y el consumo. Por otra parte, a pesar de que muchas de las estrategias de control pueden hacer frente al problema de rechazo de perturbaciones (PI+FF como se ha indicado antes),

los enfoques de control predictivo ofrecen una forma natural para tratar con control feed-forward. Un problema similar, en el que la principal fuente de perturbaciones es la radiación solar es el control de plantas solares, y en la que hay muchas experiencias usando control predictivo [111]. Las restricciones del sistema se pueden tener en cuenta en el proceso de diseño y optimización. Además, la obtención de modelos se justifica cuando se utilizan sistemas de control predictivo, ya que el modelo es el núcleo de estas técnicas de control.

La Fig. 18 muestra la estrategia básica del método de control predictivo, en la que se tiene en cuenta la naturaleza discreta de la señal de control en el caso de control on-off. Las predicciones a lo largo del horizonte de predicción utilizando valores de entrada posibles en el horizonte de control se utilizan para evaluar la función objetivo siguiente, (20):

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [u(t+j-1)]^2$$

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max}; \quad u \in \{u_{\min}, u_{\max}\} = \{0, 1\}; \quad (20)$$

$$\Delta u \in \{\Delta u_{\min}, \Delta u_{\max}\} = \{0, 1\}; \{0, 1\}; \{\text{off}, \text{on}\}$$

Esos valores de entrada futuros (y predicciones asociadas) que minimizan la función de coste se seleccionan y sólo $u(t)$ es implementado en el momento de muestreo actual. Por lo general, el segundo término de la función de costos incluye los incrementos de control en lugar de los valores de control para incluir la acción integral. En este caso, se han usado los valores de las acciones de control (ponderada por el k esfuerzo de control de factor de ponderación) ya que están relacionados con los costes asociados a la inyección y es necesario sin acción integral debido a las características del sistema, el cual naturalmente tiende a aumentar el pH superando el punto de ajuste y nunca alcanzaría el estado estacionario.

Por otro lado, con el fin de producir biocombustibles (biodiésel, objeto de interés en este trabajo) y para mitigar el consumo de CO_2 , es de importancia maximizar la productividad, usando MPC. Hasta ahora, los estudios teóricos para optimizar la productividad de la biomasa (es decir, una tasa de fijación de CO_2) para luz fluctuante siguen siendo extraños. En [121], A. Akhmetzhanov et al. optimizan la productividad en una base diaria, mientras que, en [122] se consideran las fluctuaciones de alta frecuencia resultantes del transporte de algas mediante gradiente de luz. Este objetivo se hace muy difícil por dos aspectos que han sido, hasta ahora, descuidados. En primer lugar, la fotoaclimatación microalgal a una intensidad de luz fluctuante debe comprenderse mejor y tenerse en cuenta con el fin de optimizar el proceso. En segundo lugar, la periodicidad de la luz induce una complejidad matemática adicional: la optimización de los sistemas dinámicos no lineales de dimensión superior a dos es un problema difícil, especialmente si no es autónomo. Además, la luz genera sincronización periódica de la población, lo que hace la respuesta del sistema más compleja. Un desafío clave para los próximos años claramente consistirá

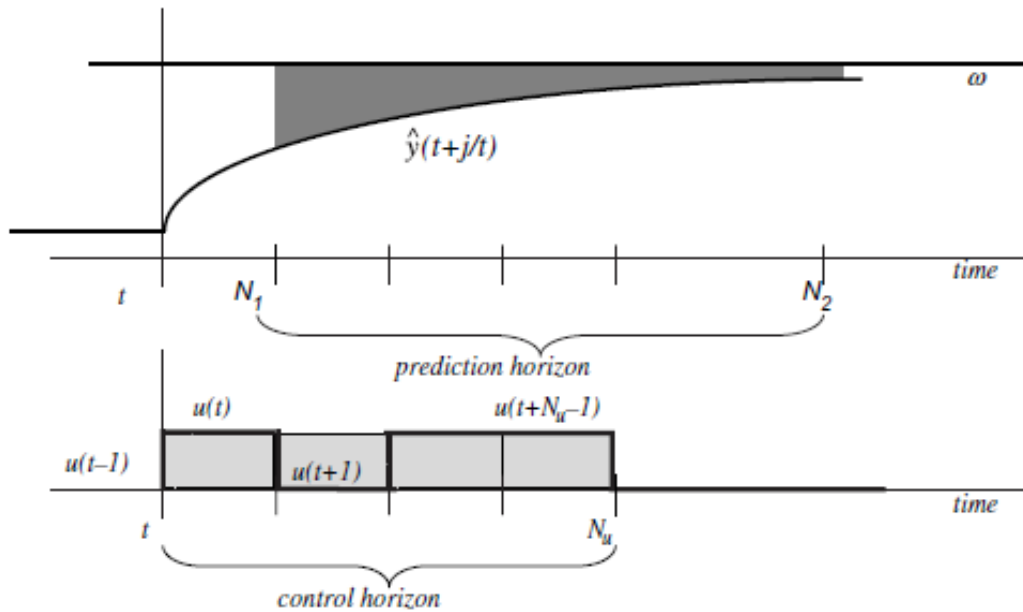


Fig. 18. Estrategia control predictivo on-off [104].

en una mejor comprensión y modelización de los efectos de la variación de luz sobre la sincronización de la población. La siguiente etapa consiste en la optimización de la producción de biocombustibles a la luz periódica. Por tanto, es un reto difícil desde un punto de vista matemático.

C. Resultados obtenidos en experimentos en fotobiorreactores

En este apartado se trata de recopilar datos y resultados de experimentos obtenidos de aplicar las distintas estrategias de control anteriormente mencionadas.

Para las estrategias on-off, PI, y PI+FF, I. Fernández et al. [103] llevaron a cabo una serie de experimentos reales (previamente el sistema se evaluó correctamente en simulación) en el fotobiorreactor para el control del pH, cuyos resultados se muestran en la Fig. 19. Como es de esperar, los peores resultados se obtuvieron con el control on-off, observándose una oscilación continua alrededor de la referencia [103]. El esquema de control usando PI+FF presenta los mejores resultados. En la Tabla VII se representan los resultados cuantitativos basados en el tiempo de inyección de CO_2 , Error absoluto de integración (IAE) y el costo asociado basado en el CO_2 previsto.

TABLA VII
DATOS NUMÉRICOS PARA RESULTADOS REALES [103].

	On-Off	PI	PI+FF
Tiempo inyección CO_2	24044	23948	22398
IAE	2498,2	960,04	595,8
Cost (/día)	0,79	0,78	0,73

De los datos de la Tabla VII, se observa como el control PI y PI+FF mejoran considerablemente los resultados obtenidos por el controlador on-off. Sin embargo, las reducciones notables se obtienen cuando se usa PI+FF, donde el uso de FF ayuda a mejorar el rendimiento del sistema reduciendo el efecto de la radiación con un ligero aumento en el número de inyecciones.

Como ya se ha indicado, uno de los principales objetivos es la reducción de las pérdidas de CO_2 . I. Fernández et al. [103] realizaron un análisis exhaustivo utilizando los resultados obtenidos de 5 experimentos reales diferentes, mostrándose en la Tabla VIII el análisis numérico de acuerdo con el CO_2 inyectado, CO_2 perdido y consumido por las microalgas y las pérdidas con respecto a al volumen de entrada y de salida de CO_2 , para control on-off, PI y PI+FF [103].

TABLA VIII
ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE CO_2 [103].

	On-Off	PI	PI+FF
Inyección CO_2 (gr)	4.060	3.440	2.804
Pérdidas CO_2 (gr)	2.022	1.162	723
Consumo CO_2 (gr)	2.039	2.278	2.081
Pérdidas respecto entrada (%)	49,8	33,8	25,8
Pérdidas respecto salida (%)	99,2	51,0	34,7

Con los datos resultantes, pudieron llegar a la conclusión de que el uso del término feed-forward ayuda considerablemente a la reducción de las pérdidas de CO_2 .

Por su parte, J.L. García et al. [108] obtienen resultados para las pérdidas de CO_2 para la estrategia de control predictivo. El algoritmo de control MPC con acción FF ayuda a reducir las pérdidas de CO_2 durante los períodos diurnos (con luz) de 19,8% utilizando control on-off clásico a 5,5%, es decir, una reducción del 75% [108]. Por lo que usar el MCP como técnica de control mejora el comportamiento del sistema, tanto desde el punto de vista de la regulación del pH como de las pérdidas de CO_2 , con lo que se mejorará el crecimiento de las microalgas.

VII. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL DE MICROALGAS

En la Fig. 20 se muestra un esquema general del proceso de producción de biodiésel a partir de microalgas, formado por las etapas elementales que se indican en él. El agua, los nutrientes, el CO_2 y la luz, son proporcionados a los sistemas de cultivo para la producción de biomasa de microalgas rica en lípidos. El CO_2 suministrado puede provenir del aire ambiente, o bien, los sistemas de cultivo pueden ser acoplados a flujos ricos en este gas procedente de emisiones industriales, tales como las de las plantas generadoras de energía eléctrica, con lo que se contribuiría a solucionar problemas de las tasas de emisión y conservación del medioambiente. La biomasa producida es separada del agua y los nutrientes residuales son recirculados hacia la etapa inicial de producción de biomasa. Los aceites son extraídos a partir de la pasta de microalgas,

siendo después transformados en biodiésel y glicerol, mediante la reacción de transesterificación (alcalina, ácida o enzimática). En este esquema se pueden incluir etapas adicionales que posibiliten acoplar la producción de biodiésel al aprovechamiento de los co-productos, es decir, del glicerol y de la biomasa microalgal libre de lípidos, ya sea directamente como insumos industriales, en la alimentación humana, animal y/o acuícola, o indirectamente a través de su transformación en productos alternos tales como biogás o bioetanol, entre otros [12].

VIII. ECONOMÍA DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE MICROALGAS

La factibilidad de la producción de biodiésel de microalgas depende de su competitividad con los combustibles fósiles, de manera que los costos de producción resultan decisivos. Según Y. Chisti [70], de la comparación de fotobiorreactores con otras técnicas de producción de biodiésel de microalgas, se deduce que el costo que conlleva el producir la biomasa es el factor relevante en el proceso total de obtención del biocombustible. La estimación de viabilidad de esta tecnología determina el máximo costo de producción de biomasa microalgal con un contenido oleaginoso específico, que posibilitaría su competencia con los precios actuales del petróleo. El cálculo se fundamenta en la definición de la cantidad de biomasa que, a partir del biodiésel y biogás

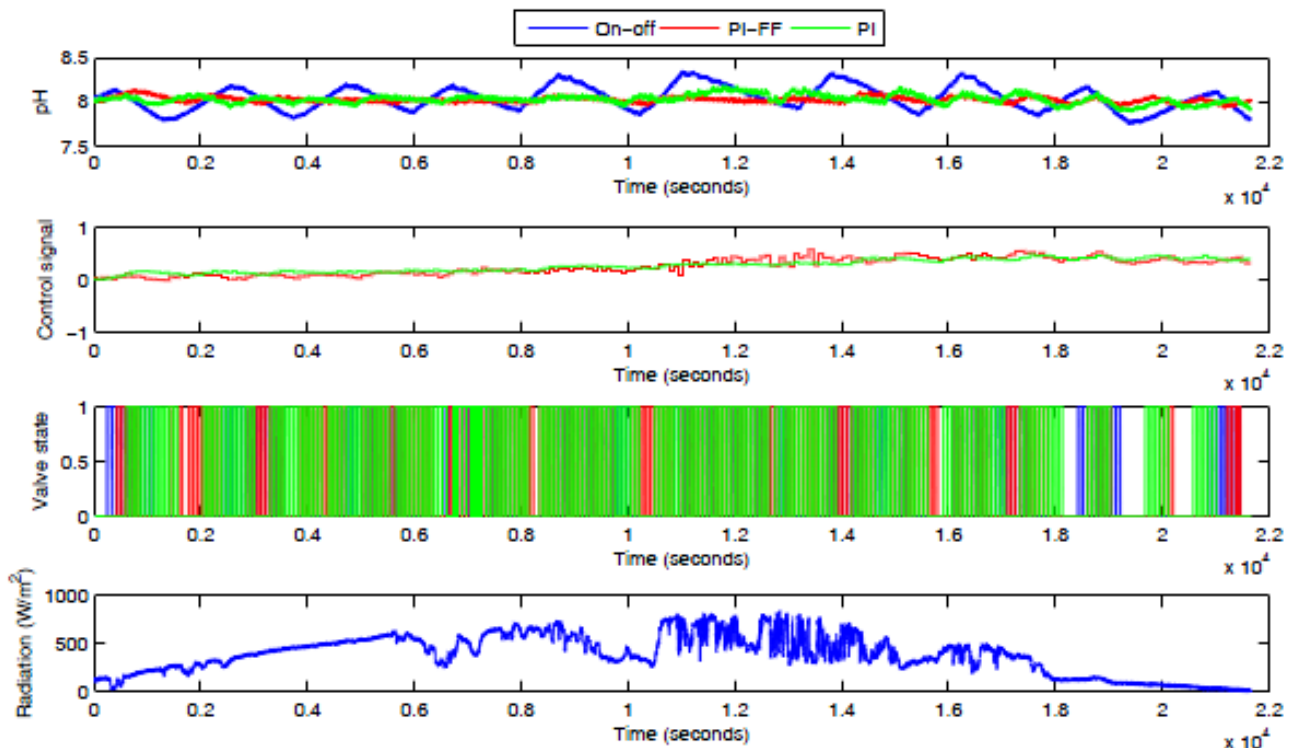


Fig. 19. Estrategias control para pH [104].

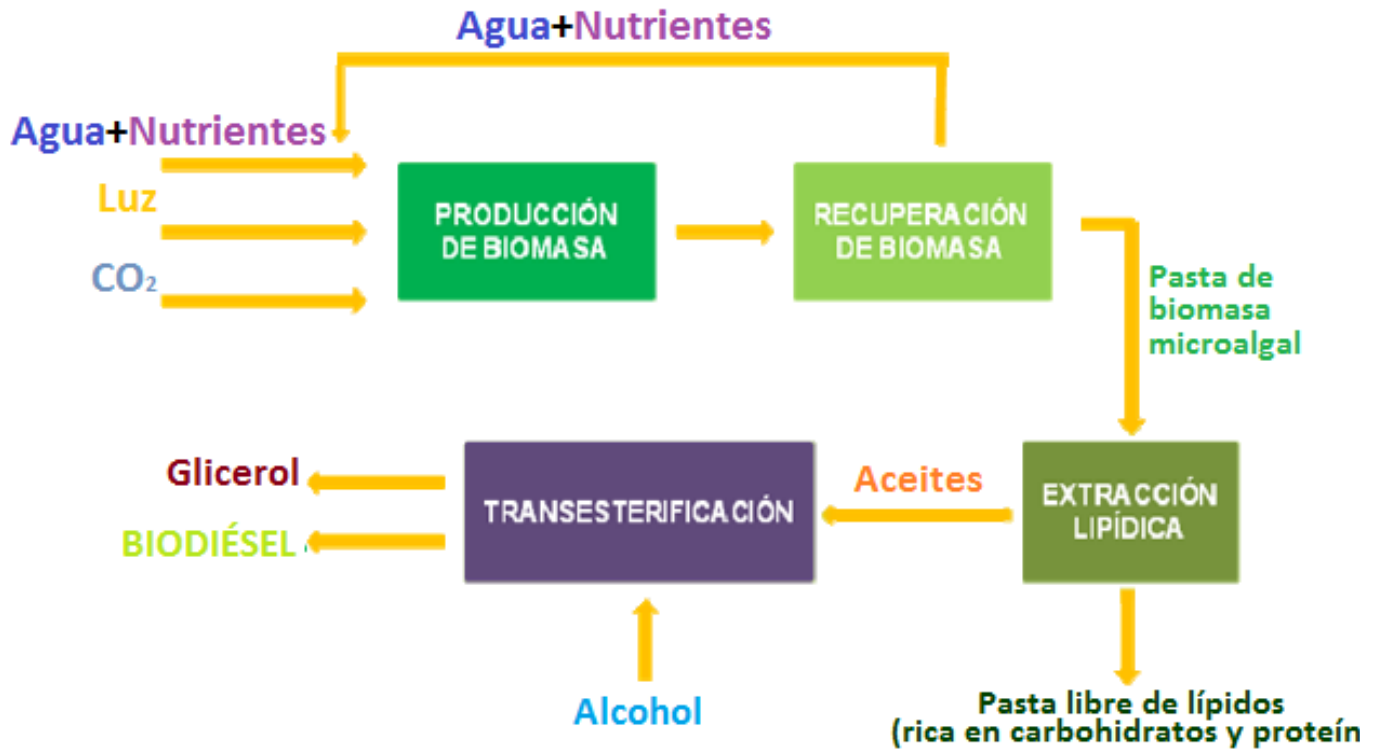


Fig. 20. Esquema general para la producción de biodiésel [12].

derivados de la misma, proporciona una cantidad de energía equivalente a la de un barril de crudo (159 L).

Acorde con la OPEC [123], en el 2008 el costo promedio del barril de petróleo fue de US\$ 94,45. Para poder competir con este precio, el gasto en la obtención de biomasa microalgal, suponiendo un contenido en lípidos del 55% ($\frac{\text{gLípidos}}{\text{gBiomasa}}$) debe ser inferior a los US\$ 323 Ton/Biomasa [62]. Datos más actuales de compañías productoras de biomasa microalgal arrojan cifras de costos de producción de US\$ 370 Ton/Biomasa o inferiores, por tanto la tecnología actual podría ser económicamente viable [50]. Sin embargo, las fluctuaciones en el precio del crudo deben ser consideradas ya que las disminuciones o subidas, conllevará a la reducción o aumento, respectivamente, de los costos de producción de biomasa de microalgas estimados.

Los aceites de microalgas se presentan como potenciales sustitutos para reemplazar el combustible procedente de petróleo, por tanto el objetivo estratégico es reducir el costo de producción para que sea competitivo con el diésel. Para ello se deberá plantear una estrategia productiva basada en la optimización de las microalgas a través de la ingeniería genética, avances en ingeniería de fotobiorreactores y control, y en la biorefinería [70]. Una biorefinería microalgal puede simultáneamente producir biodiésel, forraje, fertilizantes, biogás y energía eléctrica. La extracción de otros productos de alto valor relacionados con la industria farmacéutica, cosmética y alimenticia, podría ser factible, dependiendo de las especies de microalgas usadas (A. Sánchez et al. [124]). De

manera que el costo de producción de la biomasa propiamente dicha se vea compensada con la obtención de subproductos que generarían beneficios.

IX. CONCLUSIÓN Y FUTUROS TRABAJOS

El agotamiento de los recursos y el incremento en el precio de los combustibles fósiles hacen de los recursos renovables una alternativa interesante. En el caso de la producción de biodiésel, se emplean especies vegetales como materias primas; sin embargo, las microalgas han demostrado sus potencialidades y varias ventajas en relación a los vegetales superiores. Por sus características particulares de crecimiento, brindan la oportunidad de utilizar terrenos y cualquier tipo de agua que hoy en día son inadecuados para realizar los cultivos alimenticios convencionales. La tecnología microalgal presenta limitaciones diversas, siendo las más destacadas la dificultad para mantener monocultivos con altos rendimientos de biomasa, la selección de cepas de microalgas oleaginosas, la escasez de información relativa al escalamiento de sistemas de producción y el consumo elevado de energía por procesos de bombeo, transferencia de gases, mezclado, recolección y deshidratación de la biomasa. No obstante, los costos de producción de biodiésel microalgal pueden ser aminorados a través de distintas estrategias. Avances en la ingeniería de fotobiorreactores, además del desarrollo de procesos

económicos para la recolección de biomasa y su posterior transesterificación sin el requerimiento previo de procedimientos de deshidratación, son aspectos trascendentales para la reducción de costos. Con tal propósito, también se ha sugerido el acoplamiento de los cultivos de microalgas a los flujos ricos en CO₂ derivados de emisiones industriales y al tratamiento de aguas residuales. Asimismo, se ha propuesto el aislamiento y selección de especies oleaginosas, además de su modificación mediante procedimientos de ingeniería genética y metabólica con propósitos diversos, tales como incrementar la eficiencia fotosintética, mejorar la productividad, aumentar la fracción oleaginosa, reducir los fenómenos de fotoinhibición y daño fotooxidativo, entre otros. Resulta imprescindible la consideración de la posibilidad de una estrategia productiva basada en el concepto de biorefinería, que permita obtener biodiésel, además de subproductos y utilizar la biomasa residual para generar otros, y hasta el uso de la digestión anaerobia para obtener biogás o metano [49], [50], [62], [68], [70]. Desde el punto de vista ambiental, la tecnología basada en el cultivo de microalgas, contribuye a la disminución del calentamiento global, generando un eficiente sistema de depuración de CO₂.

Por todo ello, el desarrollo y avances en el modelado y control de los fotobiorreactores es sumamente importante. Los modelos se deberían desarrollar en base a relaciones teóricas o experimentales, de manera que sean independientes del tamaño real del PBR o cepa de microalgas. Esto permitiría que el mismo modelo se pudiese usar para evaluar el rendimiento de una variedad de PBR de diferentes tamaños, arquitecturas, orientaciones y cepas de microalgas. Cabe señalar que las diferentes cepas de microalgas requieren distintos niveles de mezcla, pH, temperaturas y de nutrientes. Algunas líneas de investigación en curso se centran en desarrollar métodos para determinar los parámetros del modelo a partir de primeros principios y experiencias con PBRs. Como parte del proceso de desarrollo, se necesita de una mayor comprensión de cómo los parámetros se mantienen constantes en las ecuaciones (1) y (5) y en qué medida afectan el crecimiento. La determinación de estos efectos, y usando el modelo para probar varias condiciones de operación y diseños de PRB, es crucial para el éxito comercial [105]. Las microalgas son organismos fotosintéticos que son más difíciles de manejar que las bacterias, levaduras u hongos; lo cual motiva el uso de modelos más complejos que el modelo cinético de Monod. Además deben adaptar sus pigmentos a la intensidad de la luz, lo que hace que el comportamiento de los biorreactores sea difícil de entender y predecir sin modelado. Por último, tales organismos están lejos de cumplir las hipótesis clásicas de crecimiento necesarias para aplicar los resultados clásicos de la ingeniería metabólica. Algunos modelos existentes pueden describir por separado algunos de estos procesos, pero hay un claro incentivo para el desarrollo de nuevos modelos de predicción, especialmente en el marco de la producción de bioenergía a partir de energía solar. Estos modelos admitirían

la supervisión y optimización de los procesos. También ayudarían a cuantificar de manera más real las productividades alcanzables, dependiendo de la especie, el tipo de proceso de cultivo, época del año y el lugar y, por tanto, calibrar las inversiones correspondientes. Por otro lado, contribuiría a mejorar la evaluación de impacto ambiental con una mejor cuantificación del balance de energía entre la energía requerida para mantener las algas en suspensión e inyección de CO₂, y la energía recuperada a través de los biocombustibles [81].

El sistema de control de fotobiorreactores es una tarea difícil debido a la naturaleza no lineal y variable en el tiempo del sistema, la respuesta lenta del proceso y la falta de fiabilidad de los sensores [125]. Hay una falta de estrategias de control relacionadas con el control y los problemas de optimización a gran escala de fotobiorreactores, desde un punto de vista global, ya que se requiere alcanzar un ambiente óptimo. El problema de control y optimización de la producción de biomasa microalgas en fotobiorreactores presenta una estructura jerárquica multiescala [126]. Los objetivos de alto nivel se caracterizan por la lenta dinámica que se pueden encontrar para la alta calidad de la biomasa, productividad, predicción de crecimiento de las microalgas, reducción de costes y mitigación de CO₂. Por otra parte, los objetivos de bajo nivel con variables de dinámicas rápidas (pH, O₂ disuelto, temperatura, presión) se deben alcanzar para cumplir los requisitos de alto nivel. Por tanto, las estrategias jerárquicas [127] se pueden utilizar en el marco de MPC no lineal robusto multiescala para varios propósitos, como la obtención de una respuesta de lazo cerrado correspondiente a la respuesta deseada en presencia de incertidumbre, perturbaciones y eventos incontrolables o para lograr unos objetivos deseados en términos de beneficio económico, impacto ambiental, etc. Actualmente se están desarrollando estrategias de control basado en eventos como soluciones a los problemas de control que se presentan [128], [129]. En los sistemas de control basados en eventos, la adecuada evolución dinámica del sistema es quien decide cuando se ejecuta la siguiente acción de control, mientras que en un sistema de control basado en el tiempo, la progresión autónoma del tiempo es lo que desencadena la ejecución de las acciones de control. Por lo tanto, las estrategias de control basadas en eventos se pueden combinar con métodos robustos MPC no lineales para tratar problemas de control y optimización de la producción de biomasa de microalgas en fotobiorreactores, con el objetivo de alcanzar una producción eficiente de biomasa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto del Plan Nacional DPI2011-27818-C02-01 del Ministerio de Ciencia e Innovación y Fondos FEDER, y en el marco del Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario (ceiA3).

REFERENCIAS

- [1] CDIAC. (2009). *Carbon Dioxide Information Analysis Center: Global Fossil-Fuel Carbon Emissions-Graphics*. <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/glo.html>.
- [2] EIA. (2009). *U.S Energy Information Administration. International Energy Outlook 2009*. <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/index.cfm>.
- [3] CMNUCC. (1994). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>.
- [4] S. Rahmstorf (2009), “Cambio climático debido a los gases de efecto invernadero: ¿cuánto tiempo nos queda?”. En Dossier Diario La Vanguardia (España), Pág. 114.
- [5] Stern. (2006). *Stern Review on the Economics of Climate Change*. http://www.hm-treasury.gov.uk/d/stern_shortsummary_spanish.pdf.
- [6] EIA. (2006). *U.S. Energy Information Administration. Annual Energy Outlook 2006*. [http://www.eia.gov/oiarf/archive/aeo06/pdf/0383\(2006\).pdf](http://www.eia.gov/oiarf/archive/aeo06/pdf/0383(2006).pdf).
- [7] CDIAC. (2009). *Carbon Dioxide Information Analysis Center: Fossil-Fuel CO₂ Emissions*. http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html.
- [8] E.P. Menéndez (1997), “*Las energías renovables*”. Madrid: Los libros de la Catarata, Pág. 237.
- [9] M. Marzo (2006), “*¿Un mundo sin petróleo?*”. Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España.
- [10] C. Monthieu (Junio 2010), “*Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiésel*”. Proyecto Fin de Carrera, Ingeniería en Organización Industrial, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España.
- [11] A. Garaby, R. Vázquez-Duhalt, M. P. Sánchez, L. Serrano, A. Martínez (2009), “*Biodiésel a Partir de Microalgas*”. BioTecnología, 13 (3), Pág. 38-61.
- [12] M.J. Vélez (Septiembre 2011), “*Planta de Producción de Biodiésel a partir de Biomasa Residual de Microorganismos Fotosintéticos*”. Proyecto Fin de Carrera, Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Almería, Almería, España.
- [13] M. Ballesteros (2008), “*Los Biocarburantes*”. http://imagenes.racc.es/pub/ficheros/adjuntos/adjuntos_mercedes_ballesteros_jzq_ed94ed27.pdf.
- [14] P. Castro, J. Coello, L. Castillo (2007), “*Opciones para la producción y uso del biodiésel en el Perú*”. Perú: Soluciones Prácticas –ITDG, Pág. 173.
- [15] G. Knothe, J. Krahl, J. Van Gerpen (2005), “*The Biodiesel Handbook*”. USA: AOCS Press.
- [16] A.K. Agarwal (2007), “*Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines*”. *Progress in Energy and Combustion Science* 33 (3), Pág. 233-271.
- [17] M. Mittelbach, C. Remschmid (2004), “*Biodiesel – The comprehensive handbook*”. 1st ed. Graz: M. Mittelbach.
- [18] P. Benjumea, J. Agudelo, A. Agudelo (2009), “*Effect to altitude and palm oil biodiesel fuelling on the performance and combustion characteristics of a HSDI diesel engine*”. *Fuel* 88 (4), Pág. 725-731.
- [19] NBB. (2009). *National Biodiesel Board*. <http://www.biodiesel.org/resources/definitions/>.
- [20] EPA. (2002). *U.S. Environmental Protection Agency: A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust. United States*. http://www.westfield-bus.org/documents/Biodeisel_EPA_Report.pdf.
- [21] J. Van Gerpen (2005), “*Biodiesel processing and production*”. *Fuel Processing Technology* 86 (10), Pág. 1097-1107.
- [22] J. Ciria, “*Propiedades y características del combustible diésel y biodiésel*”. Wearcheck Ibérica. <http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/combustibles.pdf>.
- [23] F.O. LICHT. *World Ethanol and Biofuel*.
- [24] *Biodiésel 2020: A Global Market Survey*. <http://www.biofuels-news.com/biodiesel2020.php>.
- [25] F.O. LICHT & AGRA CEAS. *World Biodiesel Markets the Outlook to 2020*.
- [26] GLOBALDATA. *Informe Global Biodiesel Market Analysis and Forecast to 2020*.
- [27] EBB. (2009). *European Biodiesel Board Press Release. 2008-2009*. <http://www.ebb-eu.org/EBBpressreleases/EBB%20press%20release%2008%20prod%202009%20cap%20FINAL.pdf>.
- [28] J. Tomei, P. Upham (2009), “*Argentinean soy-based biodiesel: An introduction to production and impacts*”. *Energy Policy* 37 (10), Pág. 3890-3898.
- [29] M. Frondel, J. Peters (2007), “*Biodiesel: A new Oildorado?*”. *Energy Policy* 35 (3), Pág. 1675-1684.
- [30] APPA. (2009). *Asociación de Productores de Energías Renovables*. <http://www.acbiodiesel.net/docs/news/appaAbr09.pdf>.
- [31] I. Renovables (2009). *Biodiesel. Presente y Futuro. Infinita Renovables*. 2009. <http://www.infinitarenovables.es/noticia.php?id=56>.
- [32] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. (2005). *Informe sobre el Marco Regulatorio de los Biocarburantes, con Identificación de Barreras para su Desarrollo en España y Especial Consideración de los Aspectos Asociados a las Actividades de Logística y Distribución*. Exp. DPE n° 544. <http://www.acbiodiesel.net/docs/docCNE.pdf>.

- [33] S. Castillo, Y. Lozano (Mayo 2009), “*Estudio de Mercado: Viabilidad de los biocombustibles: Biodiésel y Bioetanol*”. Programa de Doctorado de Ciencia e Ingeniería Agrarias, Departamento de Ciencia y Tecnología Agroforestal y Genética, Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria, E.T.S.I. Agrónomos, Campus Universitario Albacete, Universidad de Castilla La Mancha, Albacete, España.
- [34] UNA ESTRATEGIA DE BIOCARBURANTES PARA ESPAÑA (2005-2010). *Adaptación a los objetivos de la Directiva 2003/30/CE*. Junio 2005. http://www.appa.es/descargas/Estrategia_Biocarbur_APP_A.pdf.
- [35] S. Majer, F. Mueller-Langer, V. Zeller, M. Kaltschmitt (2009), “*Implications of biodiesel production and utilization on global climate – A literature review*”. *European Journal of Lipid Science and Technology* 111 (8), Pág. 747-762.
- [36] CIEMAT. (2006). *Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas. Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte*. http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Analisis%20de%20Ciclo.%20biodiesel.pdf.
- [37] S.P. Singh, D. Singh (2010), “*Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review*”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (1), Pág. 200-216.
- [38] D. Kumar, G. Kumar, P. Singh (2010), “*Fast, easy ethanolysis of coconut oil for biodiesel production assisted by ultrasonication*”. *Ultrasonics Sonochemistry* 17 (3), Pág. 555-559.
- [39] M.A.R. do Nascimento, E.E. Silva Lora, G.A. Sierra Ramierz, M.A. Rendón (2006), “*El biodiésel de palma como combustible para microturbinas a gas: una evaluación experimental*”. *Biomassa & Energía* 3 (2), Pág. 73-82.
- [40] A. Demirbas (2007), “*Importance of biodiesel as transportation fuel*”. *Energy Policy* 35 (9), Pág. 4661-4670.
- [41] J.C. Pasqualino, D. Montané, J. Salvadó (2006), “*Synergic effects of biodiesel in the biodegradability of fossil-derived fuels*”. *Biomass & Bioenergy* 30 (10), Pág. 874-879..
- [42] M.A.L. Díaz (2005), “*El biodiesel una alternativa al transporte*”. 1ª Edición ed. España: Ediciones MADU S.A.
- [43] P. Girard, A. Fallo (2006), “*Review of existing and emerging technologies for the production of biofuels in developing countries*”. *Energy for Sustainable Development* 10 (2), Pág. 92-108.
- [44] C.S. Wassell, T.P. Dittmer (2006), “*Are subsidies for biodiesel economically efficient?*”. *Energy Policy* 34 (18), Pág. 3992-4001.
- [45] S. Al-Zuhair (2007), “*Production of biodiesel: possibilities and challenges*”. *Biofuels Bioproducts & Biorefining* 1 (1), Pág. 57-66.
- [46] F. Ma, M.A. Hanna (1999), “*Biodiesel production: a review*”. *Biosource Technology* 70 (1), Pág. 1-15.
- [47] Q. Li, W. Du, D. Liu (2008), “*Perspectives of microbial oils for biodiesel production*”. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 80 (5), Pág. 749-756.
- [48] X. Meng, X. Yang, X. Xu, L. Zhang, Q. Nie, M. Xian (2009), “*Biodiesel production from oleaginous microorganisms*”. *Renewable Energy* 34 (1). Pág. 1-5.
- [49] G.C. Dismukes, D. Carrieri, N. Bennette, G.M. Ananyew, M.C. Posewitz (2008), “*Aquatic phototrophs: efficient alternatives to land-based crops for biofuels*”. *Current Opinion in Biotechnology* 19 (3), Pág. 235-240.
- [50] P.M. Schenk, S.R. Thomas-Hall, E. Stephens, U.C. Marx, J.H. Mussgnug, C. Posten, O. Kruse, B. Hankamer (2008), “*Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production*”. *BioEnergy Research* 1 (1), Pág. 20-43.
- [51] D. Fairless (2007), “*The little shrub that could – maybe*”. *Nature* 449 (7163), Pág. 652-655.
- [52] B. Liu, Z. Zhao (2007), “*Biodiesel production by direct methanolysis of oleaginous microbial biomass*”. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 82 (8), Pág. 775-780.
- [53] M. Canakci, J. Van Gerpen (2001), “*Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids*”. *Transactions of the ASAE* 44 (6), Pág. 1429-1436.
- [54] J.M. Marchetti, V.U. Miguel, A.F. Errazu (2008), “*Techno-economic study of different alternatives for biodiesel production*”. *Fuel Processing Technology* 89 (8), Pág. 740-748.
- [55] M.J. Haas (2005), “*Improving the economics of biodiesel production through the use of low value lipids as feedstocks: vegetable oil soapstock*”. *Fuel Processing Technology* 86 (10), Pág. 1087-1096.
- [56] Z.J. Predojevic (2008), “*The production of biodiesel from waste frying oils: A comparison of different purification steps*”. *Fuel* 87 (17-18), Pág. 3522-3528.
- [57] C.C. Enwremadu, M.M. Mbarawa (2009), “*Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil: a review*”. *Renewable and Sustainable Energy reviews* 13 (9), Pág. 2205-2224.
- [58] M. Canakci, H. Santi (2008), “*Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties*”. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 35 (5), Pág. 431-441.
- [59] G. Bansal, W. Zhou, T. Tan, F. Neo, H. Lo (2009), “*Analysis of trans fatty acids in deep frying oils by three different approaches*”. *Food Chemistry* 116 (2), Pág. 535-541.

- [60] BP. (2008). *Statistical Review of World Energy*. http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/global_bp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/downloads/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_review_2008.pdf.
- [61] D. Song, J. Fu, D. Shi (2008), “*Exploitation of oil-bearing microalgae for biodiesel*”. Chinese Journal of Biotechnology 24 (3), Pág. 341-348.
- [62] Y. Chisti (2008), “*Biodiesel from microalgae beats bioethanol*”. Trends of Biotechnology 26 (3), Pág. 126-131.
- [63] AlgaeBase, www.algaebase.org.
- [64] Q. Hu, M. Sommerfeld, E. Jarvis, M. Ghirardi, M. Posewitz, M. Seibert, A. Darzins (2008), “*Microalgal triacylglycerols as feedstock for biofuel production: perspectives and advances*”. The Plant Journal 54 (4), Pág. 621-639.
- [65] B.O. Arredondo, R. Vázquez-Duhalt (1991), “*Aplicaciones biotecnológicas en el cultivo de microalgas*”. Ciencia y Desarrollo 27 (98), Pág. 99-111.
- [66] M.E. Huntley, D.G. Redalje (2007), “*CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal*”. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 12 (4), Pág. 573-608.
- [67] E. Waltz (2009), “*Biotech’s new gold?*”. Nat. Biotechnology 27, Pág. 15-18.
- [68] R.H. Wijffels (2008), “*Potential of sponges and microalgae for marine biotechnology*”. Trends of Biotechnology 26 (1), Pág. 26-31.
- [69] CIA World Factbook. (2009). <https://www.cia.gov/redirects/ciaredirect.html>.
- [70] Y. Chisti (2007), “*Biodiesel from microalgae*”. Biotechnology Advances 25 (3), Pág. 294-306.
- [71] J.N. Rosenberg, G.A. Oyler, L. Wilkinson, M.J. Betenbaugh (2008), “*A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution*”. Current Opinion in Biotechnology 19 (5), Pág. 430-436.
- [72] J. Sheehan, T. Dunahay, J. Benemann, P. Roessler (1998), “*A look back to the US Department of Energy’s Aquatic Species Program – biodiesel from algae*”. National Renewable Energy Laboratory, Golden CO, Report NREL/TP-580-24190, 328. <http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf>.
- [73] H. Xu, X. Miao, Q. Wu (2006), “*High quality biodiesel production from microalga Chlorella protothecoides by heterotrophic growth in fermenters*”. Journal of Biotechnology 126, Pág. 499-507.
- [74] A. Ben-Amotz, T.G. Tomabene, W.H. Thomas (1985), “*Chemical profile of selected species of microalgae with emphasis on lipids*”. Journal of Phycology 21 (1), Pág. 72-81.
- [75] B.E. Rittman (2008), “*Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms*”. Biotechnology & Bioengineering 100 (2), Pág. 203-212.
- [76] P. Metzger, C. Largeau (2005), “*Botryococcus braunii: a rich source for hydrocarbons and related ether lipids*”. Appl. Microbiol. Biotechnol. 66 (5), Pág. 486-496.
- [77] Z. Cohen (1986), “*Products from microalgae*. In: *Handbook of microalgal mass culture*”. A. Richmond (ed.) CRC Press, Pág. 421-454.
- [78] G. Knothe (2005), “*Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters*”. Fuel Process Technology 86 (10), Pág. 1059-1070.
- [79] G. Dragone, B. Fernandes, A.A. Vicente, J.A. Teixeira (2010), “*Third generation biofuels from microalgae*”. Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology. A. Méndez-Vilas (ed), Pág. 1355-1366.
- [80] C.R. Fischer, D. Klein-Marcuschamer, G. Stephanopoulos (2008), “*Selection and optimization of microbial hosts for biofuels production*”. Metabolic Engineering 10 (6), Pág. 295-304.
- [81] B. Olivier (2011), “*Hurdles and challenges for modeling and control of microalgae for CO₂ mitigation and biofuel production*”. Journal of Process Control 21 (10), Pág. 1378-1389.
- [82] M. Olaiola (2003), “*Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace*”. Biomolecular Engineering 20 (4-6), Pág. 459-466.
- [83] D. Chaumont (1993), “*Biotechnology of algal biomass production: a review of systems for outdoor mass culture*”. Journal of Applied Phycology 5 (6), Pág. 593-604.
- [84] M.A. Borowitzka (1999), “*Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters*”. Journal of Biotechnology 70 (1-3), Pág. 313-321.
- [85] A.S. Carlsson, J.B. van Beilen, R. Möller, D. Clayton (2007), “*Micro-Algae: Utility for Industrial Applications*”. 1^a ed Newbury: CPL Press.
- [86] I. Setlík, V. Sust, I. Málek (1970), “*Dual purpose open circulation units for large scale culture of algae in temperate zones. I. Basic design considerations and scheme of a pilot plant*”. Algological Studies 1, Pág. 111-164.
- [87] O. Pulz (2001), “*Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms*”. Applied Microbiology and Biotechnology 57 (3), Pág. 287-293.
- [88] E. Molina, J.M. Fernández, F.G. Acién, Y. Chisti (2001), “*Tubular photobioreactor design for algal cultures*”. Journal of Biotechnology 92 (2), Pág. 113-131.
- [89] M.R. Tredecí, G.C. Zittelli (1998), “*Efficiency of sunlight utilization: Tubular versus flat photobioreactors*”. Biotechnology and Bioengineering 57 (2), Pág. 187-197.

- [90] S.J. Pirt, Y.K. Lee, M.R. Walach, M.W. Pirt, H.H. M. Balyuzi, M.J. Bazin (1983), "A tubular bioreactor for photosynthetic production of biomass from carbon dioxide: Design and performance". *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 33 (1), Pág. 35-58.
- [91] Y.K. Lee, C.S. Low (1991), "Effect of photobioreactor inclination on the biomass productivity of an outdoor algal culture". *Biotechnology and Bioengineering* 38 (9), Pág. 995-1000.
- [92] Y. Watanabe, H. Saiki (1997), "Development of a photobioreactor incorporating *Chlorella sp.* For removal of CO₂ in stack gas". *Energy Conversion and Management* 38 (Supplement), Pág. S499-S503.
- [93] L. Brennan, P. Owende (2010), "Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2), Pág. 557-577.
- [94] T.M. Mata, A.A. Martins, N.S. Caetano (2010), "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review". *Renewable and Sustainable Energy reviews* 14 (1), Pág. 217-232.
- [95] T. Sobczuk, F. García, E. Molina, Y. Chisiti (2006), "Effects of agitation on the microalgae *Phaeodactylum tricoratum* and *Porphyridium cruentum*". *Bioprocess Biosyst. Eng.* 28 (4), Pág. 243-250.
- [96] G. Chini Zittelli, L. Rodolfi, N. Biondi, M.R. Tredici (2006), "Productivity and photosynthetic efficiency of outdoor cultures of *Tetraselmis suecica* in annular columns". *Aquaculture* 261 (3), Pág. 932-943.
- [97] S. Krichnavaruk, S. Powtongsook, P. Pavasant (2001), "Enhanced productivity of *Chaetoceros calcitrans* in airlift photobioreactors". *Bioresource Technology* 98 (11), Pág. 2123-2130.
- [98] L. Xu, P.J. Weathers, X-R. Xiong, C-Z. Liu (2008), "Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities". *Engineering in Life Sciences* 9 (3), Pág. 178-189.
- [99] Y. Li, M. Horsman, N. Wu, C.Q. Lan, N. Dubois-Calero (2008), "Biofuels from microalgae". *Biotechnology Progress* 24 (4), Pág. 815-820.
- [100] E. Molina, E.H. Belarbi, F.G. Ación, A. Robles, Y. Chisti (2003), "Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics". *Biotechnology Advances* 20 (7-8), Pág. 491-515.
- [101] R. Harun, M. Singh, G.M. Forde, M.K. Danquah (2010), "Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (3), Pág. 1037-1047.
- [102] A. Richmond (2004), "Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology". Blackwell Science Ltd.
- [103] I. Fernández, J. Peña, J.L. Guzmán, M. Berenguel, F.G. Ación (), "Modeling and Control Issues of pH in Tubular Photobioreactors". *Computer Applications in Biotechnology* 11 (1), Pág. 186-191.
- [104] M. Berenguel, F. Rodríguez, F.G. Ación, J.L. García (2004), "Model predictive control of pH in tubular photobioreactors". *Journal of Process Control* 14 (4), Pág. 377-387.
- [105] M.R. Buehner, P.M. Young, B. Willson, D. Rausen, R. Schoonover, G. Babbitt, S. Bunch (Junio 2009), "Microalgae Growth Modeling and Control for a Vertical Flat Panel Photobioreactor". American Control Conference, St. Louis, MO, USA, Pág. 2301-2306.
- [106] J.R. Beneman, D.M. Tillet, J.C. Weissman (1987), "Microalgal biotechnology". *Trends in Biotechnology* 5 (2), Pág. 47-53.
- [107] F. Camacho, F.G. Ación, J.L. Sánchez, F. García, E. Molina (1999), "Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture". *Biotechnology and Bioengineering* 62 (1), Pág. 71-86.
- [108] J.L. García, M. Berenguel, F. Rodríguez, J.M. Fernández, C. Brindley, F.G. Ación (2003), "Minimization of carbon losses in pilot-scale outdoor photobioreactors by model-based predictive control". *Biotechnology and Bioengineering* 84 (5), Pág. 533-543.
- [109] F.G. Shinsky (1996), "Control of pH. In the Control Handbook". CRC-IEEE Press.
- [110] E.F. Camacho, C. Bordons (1999), "Model Predictive Control". Springer-Verlag.
- [111] E. Camacho, M. Berenguel, F.R. Rubio (1997), "Advanced Control of Solar Plants". Springer.
- [112] G.L. Rorrer, R. K. Mullikin (1999), "Modeling and simulation of a tubular recycle photobioreactor for macroalgal cell suspension cultures". *Chemical Engineering Science* 54 (15-16), Pág. 3153-3162.
- [113] G. Becerra-Celis, G. Hafidi, S. Tebbani, D. Dumur, A. Isambert (2008), "Nonlinear Predictive Control for Continuous Microalgae Cultivation Process in a Photobioreactor". 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Hanoi, Vietnam, 17-20 December 2008, Pág. 1373-1378.
- [114] E. Sierra, F.G. Ación, J.M. Fernández, J.L. García, C. González, E. Molina (2008), "Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae". *Chemical Engineering Journal* 138 (1-3), Pág. 136-147.
- [115] F.G. Ación Fernández, F. García Camacho, J.A. Sánchez Pérez, J.M. Fernández Sevilla, E. Molina Grima (1997), "A Model for Light Distribution and Average Solar Irradiance Inside Outdoor Tubular Photobioreactors for the Microalgal Mass Culture". *Biotechnology and Bioengineering* 55 (5), Pág. 701-714.
- [116] H.W. Johnston (1976), "The biological and economic importance of algae. Part 4: the industrial culturing of algae". *Journal of the Biological Society* 22, Pág. 1-105.

- [117] J.P. Bitog, I.B. Lee, K.S. Kim (2011), “*Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactor for microalgae production; A review*”. Computers and Electronics in Agriculture 76 (2), Pág. 131-147.
- [118] J.A. Piedrahita, S. Urbano (2012), “*Diseño del sistema de alimentación y control de temperatura en un fotobiorreactor para la producción de biomasa y ácidos grasos a partir del cultivo de la microalga Chlorella Vulgaris*”. Programa de Ingeniería Mecánica, Departamento de Energética y Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia.
- [119] R.J. Geider, B.A. Osborne (1992), “*Algal Photosynthesis*”. Chapman and Hall.
- [120] H. Mendiburu (Julio 2006), “*Introducción al control predictivo*”. Publicado en RevistaCiencia.com, ISPN: EEVFFKEEEEUPEGFSOXR.
- [121] A. Akhmetzhanov, F. Grogard, P. Masci, O. Bernnard (2010), “*Optimization of a photobioreactor biomass production using natural light*”. 49th CDCC Conference, Atlanta, USA.
- [122] S. Celikovsky, S. Papacek, A. Cervantes-Herrera, J. Ruiz-León (2010), “*Singular perturbation based solution to optimal microalgal growth problem and its infinite time horizon analysis*”. IEEE Transactions on Automatic Control 55 (3), Pág. 767-772.
- [123] OPEC (2008). *Annual Report*. <http://www.opec.org/library/Annual%20Reports/pdf/AR2008.pdf>
- [124] A. Sánchez, M.C. Cerón, F. García, E. Molina, Y. Chisti (2002), “*Growth and biochemical characterization of microalgal biomass produced in bubble column and airlift photobioractors: Studies in fed-batch culture*”. Enzyme and Microbial Technology 31, Pág. 1015-11023.
- [125] K.A. Shimizu (1996), “*A tutorial review on bioprocess systems engineering*”. Computers & Chemical Engineering 20 (6-7), Pág. 915-941.
- [126] Y. Wang, A.F. Lynch (2010), “*Multiple Time Scalings of a Multi-Output Observer Form*”. IEEE Transactions on Automatic Control 55 (4), Pág. 966-970.
- [127] F. Rodríguez, J.L. Guzmán, M. Berenguel, M.R. Arahal (2008), “*Adaptative hierarchical control of greenhouse crop production*”. International Journal of Adaptative Control and Signal Processing 22, Pág 180-197.
- [128] K.J. Åstrom (2007), “*Analysis and Designer of Nonlinear Control Systems. In Event based control*”. A. Astolf, L. Marconi Eds, Springer: Berlín.
- [129] S. Dormido, J. Sánchez, E. Kofman (2008), “*Muestreo, control y comunicación basada en eventos*”. Revista Iberoamericana de Informática y Automática Industrial 5 (1), Pág. 5-26.
- [130] M. Takagi, Y.T. Karseno (2006), “*Effect of salt concentration on intracellular accumulation of lipids and triacylglyceride in marine microalgae Dunaliella cells*”. Journal of Bioscience and Bioengineering 101 (3), Pág. 223-226.
- [131] www.biodisol.com.
- [132] www.aqualgae.com.
- [133] C. Ochoa, J.M. Coronado (2010), “*Ventajas y limitaciones de la obtención de biodiésel a partir de microalgas: Análisis del Ciclo de Vida*”. IMDEA Energía. <http://www.imdea.org/>
- [134] I. Fernández, F.G. Acién, J.M. Fernández, J.L. Guzmán, J.J. Magán, M. Berenguel (2012), “*Dynamic model of microalgal production in tubular photobioreactors*”. Bioresource Technology 126, Pág. 172-181.

La situación actual de desarrollo, avances tecnológicos en los procesos y crecimiento de la sociedad ha incrementado el consumo de combustibles fósiles, a un ritmo que se hace casi insostenible. Además, a este aspecto se suma el actual escalado del precio de petróleo y un intento por reducir las emisiones de CO₂ a nivel mundial. Por tanto, se demandan urgentemente fuentes alternativas de energía, siendo una opción destacada los biocombustibles (biodiésel). En las últimas décadas han aumentado considerablemente las investigaciones relacionadas con la producción de combustibles a partir de biomasa, postulándose las microalgas como una destacada alternativa a esta situación, debido al elevado contenido de lípidos y perfil idóneo para la obtención de biocombustibles que éstas ofrecen. Producir biodiésel a partir microalgas requiere un sistema de cultivo y recolección a gran escala, con el reto actual de reducir el costo por unidad de área. A gran escala, las microalgas necesitan condiciones cuidadosamente controladas y un ambiente natural óptimo. De ahí la importancia de un buen modelado y control del crecimiento, así como de las condiciones óptimas para tal fin. El objeto de este trabajo es el de proporcionar una visión general sobre el estado actual de esta alternativa bioenergética, mediante el análisis de los fundamentos de la misma.

The current state of development, technological advances in processes and growth of the company has increased the consumption of fossil fuels at a rate that is almost unbearable. In addition we also consider the current oil price escalation and an attempt to reduce CO₂ emissions worldwide. For that urgently demand alternative energy sources, with a prominent option biofuels (biodiesel). In the last few decades has increased research related to the production of fuels from biomass, microalgae postulated as a good alternative to this situation, due to the high lipid content and profile suitable for obtaining biofuels they offer. Producing biodiesel from microalgae culture system requires a large-scale collection, with the challenge of reducing the cost per unit area. A large-scale microalgae need carefully controlled conditions and optimal natural environment. Hence, the importance of a good modeling and control of growth and the optimum conditions for that purpose. The purpose of this paper is to provide an overview of the current status of this alternative bioenergy, by analyzing the basics of it.

