



**Biofijación de CO₂ Mediante el Cultivo de Algas.
Diseño de un Prototipo de Fotobiorreactor para el
Cultivo de "Spirulina Platensis"**

Autor: Andrea Gaitero Álvarez

Institución: Universidad de Oviedo

Otros autores: Eunice Villicaña Ortíz (Universidad de Oviedo); Jose Pablo Paredes Sánchez (Universidad de Oviedo); Jorge Xiberta Bernat (Universidad de Oviedo).

Resumen

Uno de los principales problemas derivados del consumo energético a los que se enfrenta la sociedad actual es el de su grado de influencia en el efecto invernadero y en el cambio climático. El CO₂ de origen antropogénico se produce mayoritariamente en la combustión de los recursos energéticos de origen fósil.

De acuerdo con la *Agencia Internacional de la Energía*, las emisiones de CO₂ aumentarán el 130 % de aquí a 2050. Por ello, actualmente se demanda la captura del CO₂ de los grandes focos de emisión con el fin de reducir las emisiones sin prescindir del empleo de los combustibles fósiles.

El propósito de este trabajo ha sido el de contribuir de algún modo al conocimiento, desarrollo y difusión de la tecnología de microalgas mediante el diseño de un nuevo tipo de fotobiorreactor que permita su cultivo a gran escala. El diseño propuesto pretende subsanar o, al menos, reducir las dificultades o inconvenientes que se han ido presentando a lo largo de los años con la utilización de los sistemas de cultivo convencionales. Algunos de estos problemas han sido la aparición del *fouling*, los altos costos energéticos y la reducción de la productividad mediante el empleo de equipos a escala industrial. Las principales ventajas que presenta este modelo de fotobiorreactor es su carácter modular, flexibilidad de adaptación a distintos tamaños y condiciones de cultivo, construcción sencilla y fácil mantenimiento. Con él se han pretendido establecer las bases para el diseño de futuros fotobiorreactores, ya que como todo prototipo, el diseño propuesto es susceptible de ser mejorado.

Palabras claves: biocombustibles, impacto ambiental, modularidad.

Contenido:

1. Introducción	3
2. Biotecnología de las algas	4
2.1. Factores que optimizan el cultivo	5
2.2. Técnicas de cultivo de algas: sistemas abiertos y sistemas cerrados	8
2.3. Post-procesamiento de la biomasa algal	13
2.4. Spirulina Platensis (Arthrospira Platensis)	14
3. Diseño de un nuevo fotobiorreactor para el cultivo de Spirulina Platensis	15
3.1. Cálculo del caudal de CO₂	15
3.2. Cálculo del diámetro de burbuja	16
3.3. Cálculo de la velocidad de ascenso de la burbuja	18
3.4. Cálculo de la altura del tanque	18
3.5. Descripción del fotobiorreactor	19
4. Conclusiones	22
5. Bibliografía	24

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente el apoyo incondicional de la Dra. Dña. María Jesús Blanco Acebal. Sin duda, sus aportes, comentarios y observaciones hicieron que este trabajo se convertirá en una meta sencilla de alcanzar.

1. Introducción

Uno de los principales problemas derivados del consumo energético a los que se enfrenta la sociedad actual, es su grado de influencia en el efecto invernadero y en el cambio climático. Este hecho se está viendo acentuado en las últimas décadas debido al aumento de las emisiones a la atmósfera de gases procedentes de la actividad humana.

El gas de origen antropogénico, como resultado del proceso energético, que mayor influencia ejerce sobre el calentamiento global es el CO₂. En el último siglo, la concentración atmosférica de este gas ha sufrido un considerable aumento, especialmente en sus últimas décadas. Además, según la Agencia Internacional de la Energía, las emisiones de CO₂ aumentarán el 130% de aquí a 2050.

Dados los avances tecnológicos actuales, las reservas potenciales, y el aumento de la explotación de nuevas reservas no convencionales (por ejemplo, para gas natural), es muy probable que los combustibles fósiles sigan estando disponibles a bajo coste en el futuro. Para compensar este hecho, en la actualidad se pretende disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera mediante la captura, almacenamiento, secuestro y posterior valorización de este gas. En este campo, el método biológico de captura de CO₂ se presenta como una buena alternativa a los actuales métodos físicos y químicos. Además

de esto, el uso de las algas para la producción de aceites para combustibles cumple con otra función de gran interés; desarrollar una energía de origen vegetal con cultivos que no interfieren con la alimentación. De este modo, se contribuye a combatir dos de los grandes retos a los que se enfrenta la sociedad actual.

Actualmente el cultivo sostenible de algas es un sector con gran potencial pero todavía en las fases de investigación y desarrollo previas a la comercial. El cultivo de microalgas es un estudio muy complejo que depende de un gran número de factores que se pueden clasificar en dos grandes bloques: el biológico y el tecnológico.

2. Biotecnología de las algas

Las algas son organismos fotosintéticos que constituyen un grupo muy diverso y que han colonizado una amplia variedad de sistemas acuáticos y terrestres, debido sobre todo a su alta diversidad metabólica.

A pesar de ser un grupo de organismos vivos bastante desconocido, las algas ofrecen un gran número de posibilidades en cuanto a su uso:

- Alimentación animal y humana: Las algas microscópicas también se han usado en alimentación animal abundantemente. En particular, la alimentación de rotíferos, moluscos y crustáceos en acuicultura marina se realiza a base de microalgas pertenecientes a distintos grupos taxonómicos. Otro destino de las microalgas ha sido la alimentación de ganado porcino.
- Uso como fertilizantes: Las algas planctónicas no han sido excesivamente utilizadas en este sentido, pero resultan un fertilizante barato de simple aplicación, ya que concentran en su interior nitrógeno y fósforo y pueden administrarse a los cultivos mediante riego.
- Producción de sustancias de interés químico-farmacéutico: Estas sustancias pueden obtenerse mediante cultivos masivos de algas en condiciones controladas.
- Depuración de aguas: En las aguas residuales de origen orgánico, bien sean urbanas, agrícolas o ganaderas, las sustancias nutritivas de carbono, nitrógeno y fósforo son muy abundantes, bien en forma orgánica o ya mineralizadas por las bacterias y convertidas en inorgánicas.
- Producción de sustancias de interés energético: Se ha demostrado que la biomasa de las microalgas puede proporcionar diversos productos ricos en energía como son el bioetanol, el biodiesel y el hidrógeno.

La *biotecnología* consiste en hacer que los organismos trabajen en nuestro beneficio mediante un conjunto de técnicas que, combinadas con el conocimiento de la biología de los seres vivos, orienta la vida de éstos hacia procesos de interés económico-social para la humanidad. La biotecnología de las algas se ha enfocado principalmente hacia las algas microscópicas y consta principalmente de dos fases: producción controlada de la biomasa algal y aprovechamiento de dicha biomasa.

Los cultivos de inóculo son pequeños cultivos de algas que se transfieren a un medio de cultivo fresco para que actúen como elemento inicial de crecimiento. Cuando el pequeño cultivo alcanza el final de la fase exponencial, se pasa a trabajar -en condiciones

semicontroladas- con mayores volúmenes que se obtienen diluyendo el inóculo con medio de cultivo.

Las algas no sólo necesitan energía luminosa para crecer sino también elementos nutritivos, fundamentalmente en forma inorgánica. Existen numerosos tipos de medios químicos para el cultivo de algas, pero muchos de ellos tienen el inconveniente de resultar muy caros cuando se usan para la producción masiva. Entre los medios químicos más utilizados están el *Medio Zarrouk* y el *Medio SSM*.

En un cultivo de algas tipo *batch*, el crecimiento se presenta con cinco fases o etapas de desarrollo:

- **Fase de ajuste:** es la etapa de adaptación que sufren las algas a las nuevas condiciones del cultivo. Esta fase es corta y no hay incremento neto de la población.
- **Fase exponencial:** aquí las células se duplican sucesivamente en intervalos iguales de tiempo.
- **Fase de retardo o declinación:** en esta etapa el tiempo requerido para duplicar la población aumenta, reduciéndose la tasa de crecimiento. Los nutrientes están disminuidos en el medio, y hay una reducción de la actividad fotosintética.
- **Fase estacionaria:** esta fase es corta y no hay un incremento neto de la población. La tasa de crecimiento se compensa con la de mortalidad celular.
- **Fase de muerte:** aquí la tasa de mortalidad supera a la tasa de multiplicación celular.
-

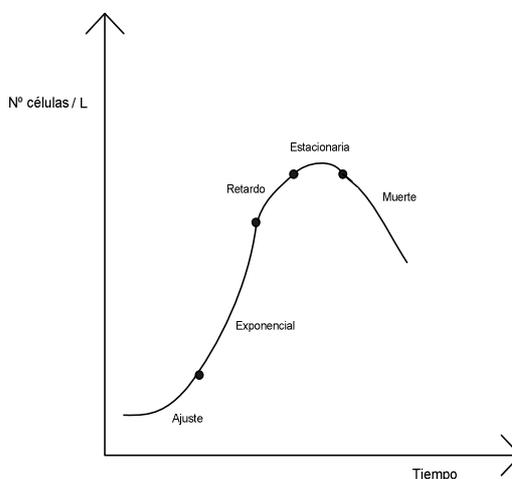


Figura 1: Fases del desarrollo de un cultivo de microalgas.

2.1. Factores que optimizan el cultivo

Los aportes necesarios para el cultivo de microalgas, al igual que para el cultivo de cualquier especie vegetal, son principalmente dos: radiación y nutrientes. Pero para poder controlar el crecimiento de las microalgas deben tenerse en cuenta otras variables

como son el pH del agua, su salinidad, su contenido en oxígeno, su turbidez y su temperatura. Los nutrientes necesarios para el crecimiento de las algas se dividen en: macronutrientes o nutrientes principales y micronutrientes o nutrientes secundarios. Los macronutrientes son el carbono, el nitrógeno, el azufre y el fósforo. Los micronutrientes más usados son vitaminas, ciertos metales, y la EDTA, entre otros.

a) Radiación.

Independizar los efectos que provocan la temperatura y la luz sobre el crecimiento masivo de las algas es una tarea complicada. Se sabe que en invierno los cultivos al aire libre crecen menos, pero se ignora si se debe a la menor iluminación, a la inferior temperatura o a un efecto de ambas. Según algunos estudios realizados, la mayor parte de la limitación se debe a la temperatura más que a la radiación.

Aunque, el valor de radiación por encima del cual los organismos ven saturado su crecimiento depende de cada especie y de su estado fisiológico, en promedio puede situarse en torno a los $100 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. En la zona del espectro electromagnético cercano al ultravioleta, se presenta la influencia fotoinhibidora de la radiación. Es poco probable que dicho fenómeno se produzca en cultivos masivos de algas planctónicas bien agitados, pues la turbulencia generada por la agitación provoca que todas las algas pasen bastantes períodos en la oscuridad o en zonas de luz escasa y así la fotoinhibición no se produzca.

Se define como *Tasa de Fotosíntesis Celular F* a la capacidad de captación de fotones, la cual depende de la energía luminosa que reciben las células. A bajos niveles de intensidad luminosa, la rapidez de la fotosíntesis aumenta con la intensidad de luz, pero niveles de energía incidente superiores a un cierto valor (E_k) inducen sólo pequeños cambios en F . Por otro lado, la eficiencia (F/E) con la que la luz incidente es utilizada, es decir la fracción de energía luminosa incidente convertida a energía química, disminuye rápidamente al aumentar el flujo de fotones y tiende a valores mínimos cuando la energía incidente alcanza niveles superiores a E_k .

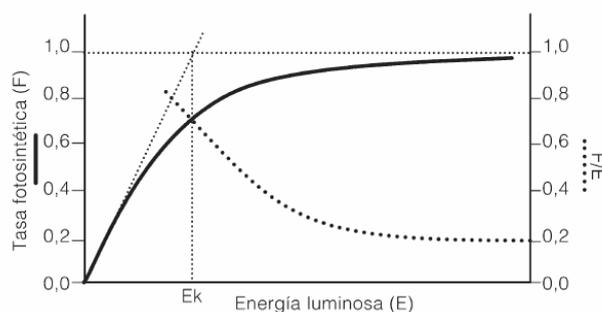


Figura 2: Efecto de la Energía luminosa (E) en la tasa fotosintética (F) y en la eficiencia fotosintética (F/E). E_k es la constante de saturación.

La *fotoinhibición* puede no presentarse en cultivos de alta densidad celular a pesar de ser expuestos a altas intensidades de luz debido a que cuanto mayor es la densidad, menor es la proporción de luz que recibe cada célula. Debido a que el medio de cultivo está en constante movimiento, las células sólo son expuestas por breves instantes a la luz. Los parámetros que pueden considerarse como básicos para describir la disponibilidad de

energía bajo una iluminación intermitente son dos; la relación de los períodos luz/oscuridad (L/O) y la frecuencia de los ciclos L/O. además, el autosombreado entre las células sólo permite a la luz penetrar una corta distancia dentro del cultivo. Actualmente no es recomendable utilizar rutas luminosas de más de 10 cm en ningún tipo de biorreactor.

b) Tiempo de retención.

Cuando los nutrientes acaban agotándose, se hace necesaria la renovación periódica del medio. El tiempo transcurrido entre cada suministro de medio nuevo es el *tiempo de retención* si el sistema se halla en equilibrio dinámico. Las densidades elevadas extinguen con mucha facilidad la luz que recibe el cultivo y hacen que este aspecto resulte limitante de la producción masiva. Se debe, pues, regular la densidad celular en el cultivo a fin de controlar el autosombreado, y ello puede conseguirse jugando con el tiempo de retención.

c) Turbulencia.

Resulta preciso añadir alguna clase de agitación artificial que, produciendo turbulencia, impida la sedimentación. La turbulencia además favorece la producción puesto que las algas no se encuentran en todo momento en la superficie y así, evitan la fotoinhibición, aprovechándose del efecto optimizador de la radiación intermitente.

d) Oxígeno disuelto y pH

El oxígeno producido por las algas durante la fotosíntesis puede llegar a alcanzar una concentración tan elevada que inhiba su crecimiento y la producción del cultivo disminuya. Este riesgo se reduce si se agita el cultivo, con lo cual se favorece el paso del oxígeno a la atmósfera. Hay otro efecto desfavorable para los cultivos de algas planctónicas, en el cual intervienen la luz y el oxígeno: la *fotooxidación*.

El pH es otro aspecto delicado del cultivo masivo porque la ingestión del carbono inorgánico por las algas aumenta el pH del medio y desplaza el equilibrio hacia los carbonatos, con lo cual pueden encontrarse limitadas en su crecimiento por el carbono.

e) Carbono

Las principales fuentes de carbono inorgánico para el cultivo masivo de algas son el dióxido de carbono libre y el bicarbonato. Cuando se trata de optimizar la producción, parece más aconsejable añadir CO₂. Generalmente, en el cultivo masivo de microalgas en medio sintético se aporta dióxido de carbono mezclado con aire. Las proporciones del nutriente varían según los distintos autores, pero suelen situarse entre el 0.3 y el 5% en volumen. El método más comúnmente empleado consiste en inyectar CO₂ mezclado con aire en tuberías que desembocan en tubos perforados ubicados en el fondo de estanques de cultivo, sin embargo parece que, dependiendo de la perforación de dichos tubos,

pueden presentarse problemas porque las burbujas pequeñas inducen la flotación de las algas y la reducción, por tanto, de la producción; mientras que las grandes con un 1% de CO₂ en aire producen narcosis en las células.

f) Nitrógeno y fósforo

Si el medio de cultivo es sintético, la fuente de nitrógeno más usada suele ser el nitrato. Para el cultivo masivo de microalgas es preferible la urea CO(NH₂)₂. Si se desea tener un óptimo del pH para el crecimiento, parece más aconsejable la urea, la cual es inocua.

En cuanto al fósforo, en los medios sintéticos la forma más usada es el ortofosfato. La radiación de nutrientes considerada óptima para el crecimiento de las algas planctónicas es la de 16:1 (N:P en átomos).

2.2. Técnicas de cultivo de algas: sistemas abiertos y sistemas cerrados

Los sistemas de cultivo se dividen en abiertos y sistemas cerrados. Los sistemas abiertos son aquellos que se caracterizan por no estar protegidos de los factores ambientales y por lo tanto están expuestos a la contaminación y a factores tales como la lluvia, el polvo, las aves y los insectos. Dentro de los sistemas abiertos, podemos distinguir los siguientes tipos: lagos y estanques naturales, balsas o piscinas, raceways, y sistemas inclinados. En cambio, los sistemas cerrados protegen al cultivo de la contaminación y su objetivo es el de mejorar las condiciones ambientales, entre ellas, la temperatura.

El cultivo en *lagos y estanques naturales* es el sistema más sencillo ya que no supone ningún tipo de coste, pero no permite el control de las condiciones ambientales y por ello, la capacidad de producción es limitada.

El sistema de cultivo en balsas o piscinas es también uno de los sistemas más sencillos de cultivo de microalgas. Están formados por tanques de geometría y dimensiones adecuadas y no requieren ningún tipo de suministro de energía. Una mejora que se puede realizar en estos sistemas de cultivo es el empleo de agitadores del agua. El problema del cultivo en balsas es que ofrece bajos rendimientos y presenta problemas de evaporación. Además, no son sistemas aptos para la estimulación del crecimiento con CO₂. Un tipo de balsas muy utilizado es el denominado raceway. Son sistemas de cultivo de microalgas constituidos por tanques con forma de pista ovalada que pueden ser construidos directamente sobre el suelo con cualquier material que sea lo suficientemente resistente. Poseen sistemas de agitación mecánica como paletas rotatorias o hélices.



Figura 3: Raceways del Centro para la Biotecnología de las Algas en San Diego.

Otro grupo de sistemas abiertos es el formado por los sistemas inclinados, los cuales constan de una superficie inclinada en la que se bombea el cultivo desde la parte baja a la parte alta. De esta forma se consiguen flujos altamente turbulentos lo que permite mantener elevadas concentraciones celulares y una alta relación superficie/volumen. El problema de este sistema es que origina altas tasas de evaporación y pérdida de CO₂ que escapa a la atmósfera. Además, el bombeo continuo del cultivo supone un elevado consumo de energía y produce daños en la estructura celular del alga.

El mayor inconveniente de todos estos sistemas de cultivo es su dependencia de las condiciones ambientales. Por ello, el desarrollo de nuevos sistemas de cultivo se basó en la construcción de reactores cerrados en los cuales fuera posible mantener unas condiciones de cultivo regulares durante todo el año y todas las horas del día.

Se entiende por fotobiorreactor a todos aquellos sistemas en los que existe una separación física, normalmente transparente, entre el cultivo y el medio que lo rodea, permitiendo un mejor control de las condiciones de cultivo. Los fotobiorreactores ofrecen ciertas ventajas adicionales, entre las que podemos destacar las siguientes:

- Evitan, o al menos minimizan, la contaminación por otras algas y otros elementos.
- Eliminan los problemas de evaporación.
- Permiten trabajar con mayores concentraciones celulares.
- Presentan una amplia área de iluminación.
- Permiten un mejor control de las condiciones del cultivo.

Algunos de los problemas que plantea el uso de fotobiorreactores y que es necesario tener en cuenta a la hora de su diseño son los siguientes:

- La presencia de oxígeno disuelto que es necesario extraer.
- La formación en el medio de cultivo de gradientes de pH y temperatura.
- El crecimiento de las células en las paredes y el problema del fouling.
- El elevado coste de puesta en escala.

Atendiendo a la forma y geometría de los fotobiorreactores (FB), podemos dividirlos en cuatro grandes grupos: FBR cilíndricos verticales, FBR con lazo externo, FBR de paneles planos y FBR de bolsa.

Los *FBR cilíndricos verticales* son un sistema de cultivo semicerrado, ya que por la parte superior están abiertos a la atmósfera. Constan de un tubo vertical en el que la agitación y homogeneización del cultivo se consigue mediante el burbujeo de aire desde la base del reactor. Por su posición vertical absorben menos radiación que los dispuestos horizontalmente, pero tiene la ventaja de que no se acumula oxígeno disuelto ya que éste pasa a formar parte del aire. Presenta dos desventajas: su relativa baja relación superficie/volumen y su dificultad para manejar un gran volumen de cultivo.



Figura 4: FBR cilíndricos verticales del Centro para la Biotecnología de las Algas de San Diego.

Los *FBR de paneles planos* están formados por dos láminas de plástico rígido o flexible entre las que se agita el cultivo mediante sistemas mecánicos o neumáticos. Pueden ser horizontales, verticales o inclinados. Presentan una gran área de iluminación superficial por lo que con ellos se consiguen altas eficiencias fotosintéticas. Han sido muy utilizados en los laboratorios ya que permiten calcular fácilmente algunos parámetros como la cantidad de irradiación recibida por el cultivo. Los reactores son fáciles de construir y mantener. En cambio, el gran área superficial presenta problemas de puesta en escala, incluyendo dificultades en el control de la temperatura de cultivo y de la velocidad de difusión del CO₂, así como la tendencia de las algas a adherirse a las paredes. Apenas se usan a escala industrial debido al elevado precio de los materiales transparentes con los que se construyen.



Figura 5: FBR de paneles planos del Instituto de Tecnología de Karlsruhe.

Los *FBR con lazo externo* son uno de los sistemas de cultivo en masa de algas más popular. El cultivo se recircula entre un lazo externo que actúa como receptor solar y un sistema de burbujeo mediante sistemas mecánicos o neumáticos. El lazo externo está formado por tubos de material transparente dispuestos en serie o en paralelo. El cultivo se recircula al lazo externo con la ayuda de una bomba desde un tanque separado en el que se encuentra el sistema de burbujeo. El diámetro de los tubos suele ser pequeño y limitado (como máximo de 0.2 metros) para permitir la penetración de luz al centro del tubo, donde el coeficiente de luz y la velocidad de crecimiento lineal del cultivo disminuyen con el incremento del diámetro. Los tubos se pueden disponer tanto en horizontal como en vertical o inclinados. Según la disposición de los tubos se pueden diseñar multitud de reactores tubulares distintos. Entre ellos están los *FBR en serpentina*, *en manifold* y *helicoidales*. Las principales desventajas que presenta son la dificultad para controlar la temperatura y la acumulación del oxígeno fotosintético que, cuando alcanza ciertos niveles de concentración, puede llegar a ser tóxico para el cultivo. Pueden presentar problemas de fotoinhibición. Los FBR orientados verticalmente ofrecen una buena alternativa a los horizontales, ya que evitan las altas irradiaciones en primavera y verano y a mediodía a lo largo del año. De esta forma reducen el problema de la fotoinhibición.



Figura 6: FBR con lazo externo del Instituto de Investigación y Desarrollo de Australia del Sur.

Por último, existe un cuarto tipo, los *fotobiorreactores de bolsa*, que se caracteriza por no presentar una estructura rígida. En ellos, las algas están contenidas en grandes bolsas de plástico transparente. Este sistema destaca por su simplicidad, bajo coste y facilidad para sustituir las bolsas viejas por otras nuevas. Pero también presenta numerosos problemas cuando se trabaja con grandes volúmenes de cultivo, ya que es más difícil mantener homogéneas las condiciones del cultivo.



Figura 7: FBR de bolsa en las instalaciones de Valcent Product en Texas.

El fotobiorreactor más adecuado a los requisitos establecidos en este trabajo es el de tipo cilíndrico vertical. El reactor con lazo externo ha sido descartado debido al gran coste que supone el bombeo del cultivo y a la dificultad de diseñar una bomba que no deteriore la estructura celular del alga. Por su parte, el reactor de paneles planos plantea problemas a la hora de su construcción a gran escala ya que cuanto más grandes sean los paneles, mayor espesor necesitan y mayor será su coste. El fotobiorreactor de bolsas tampoco es una opción adecuada para la biofijación de CO₂ puesto que la ausencia de una estructura rígida dificulta la homogeneización del cultivo. Además, las bolsas que contienen el cultivo se deterioran con facilidad, lo que requiere un mantenimiento continuo de la instalación. Por todo ello y tras un análisis AMFE exhaustivo, para el diseño se partirá del modelo cilíndrico vertical, profundizando en sus deficiencias con el objetivo de implantar algunas modificaciones que permitan su construcción a gran escala y la obtención de un mejor rendimiento de proceso.

➤ Fenómeno del Fouling

Este término hace referencia al crecimiento celular sobre las paredes del reactor, lo que origina una capa de suciedad que impide la penetración de la luz en el medio de cultivo y causa, por tanto, la disminución en el rendimiento de estos sistemas. Numerosos estudios señalan que el efecto del fouling depende enormemente de los exopolisacáridos (EPS) excretados por los organismos fotosintéticos más que de la propia biomasa. La formación de aglomerados celulares que se origina a consecuencia del agotamiento de nutrientes en los últimos estadios del proceso, también es una causa importante de la reducción del rendimiento del reactor. Esta aglomeración de células reduce la capacidad de absorción de CO₂ debido a la menor penetración de la luz en el cultivo y constituye una resistencia adicional a la transferencia de masa.

La reducción de la producción de fouling y de la aglomeración celular se puede conseguir mediante la inyección de gas en el caldo de cultivo. De esta forma, las corrientes de pequeñas burbujas que se generan, originan una ligera agitación que impide a las microalgas depositarse sobre las paredes del reactor.

2.3. Post-procesamiento de la biomasa algal

La elección de la técnica de cosecha depende de las características de las microalgas, especialmente de su tamaño, densidad de cultivo y valor de los productos de destino. En general, la recolección de microalgas es un proceso que se divide en dos fases:

- *Recolección masiva*, destinada a la separación de la biomasa del caldo de cultivo. En esta fase, el contenido total de sólidos puede alcanzar el 2-7% mediante procesos de floculación, flotación o sedimentación por gravedad.
- *Espesamiento*, cuyo objetivo es concentrar aún más la mezcla. Esta fase supone un consumo energético mucho mayor.

Las diversas técnicas de cosechado que se barajan para la extracción de biomasa algal, son las que se detallan a continuación:

- **Centrifugación:** Numerosos ensayos de laboratorio han venido demostrando que la centrifugación es uno de los métodos más interesantes para la cosecha de microalgas. Sin embargo, este sistema presenta algunas dificultades para su implantación como tecnología de recolección a gran escala, ya que la exposición de las células a la alta gravitación y a las fuerzas de corte puede dañar la estructura celular. Además, consume enormes cantidades de tiempo y energía, lo que implica un elevado coste del proceso.
- **Floculación:** La floculación parece ser otro método viable para su empleo en la recolección de microalgas. Este método requiere bajos costes, pero no puede ser utilizado en todos los casos, ya que dependiendo de cómo vaya a ser procesada la biomasa posteriormente, la adición de floculantes puede causar problemas. La floculación suele utilizarse como paso preparatorio a otros métodos de cosecha como filtración o sedimentación por gravedad.
- **Proceso electrolítico:** La floculación electrolítica se basa en el movimiento de las algas al ánodo con el fin de neutralizar las cargas y después formar agregados. La eficiencia de la eliminación de algas mediante floculación electrolítica está en torno al 80-95%.
- **Sedimentación por gravedad:** Este método sólo es adecuado para microalgas grandes con tamaños superiores a las 70 micras, como es el caso de *Spirulina*. La densidad y el radio de las células, así como la velocidad de sedimentación, influyen en las características de los sólidos en suspensión.
- **Filtración:** Los filtros que operan bajo presión o al vacío son capaces de recuperar microalgas de gran longitud. El principal inconveniente de este sistema es la disminución del flujo de permeación con el tiempo debido a la aparición de fouling sobre la membrana. El fouling obstruye los poros, por lo que es necesario reemplazar la membrana de forma periódica.
- **Flotación:** Los métodos de flotación pueden ser operativamente caros dado que implican energía (compresión de aire), pero se trata de un proceso más efectivo que la sedimentación por gravedad. Se pueden capturar partículas con diámetros por debajo de los 500µm. Cuando una burbuja colisiona con una partícula, ésta se adhiere a la burbuja y es arrastrada hacia la superficie.
- **Ondas de ultrasonido:** El empleo de ondas de ultrasonidos es un método relativamente nuevo en el cual las células de las algas experimentan ondas de ultrasonidos de baja energía y se mueven hacia los nódulos de baja presión de las

ondas, causando la aglomeración de las células. Esta técnica no genera fouling, no causa cortes en las células y está libre de fallos mecánicos porque no implica movimientos de partes y ofrece la posibilidad de operar en continuo.

- **Técnicas de electroforesis:** La electroforesis es una técnica para la separación de moléculas según la distinta movilidad de éstas en un campo eléctrico. La separación puede realizarse sobre la superficie hidratada de un soporte sólido, a través de una matriz porosa o bien en disolución.

2.4. Spirulina Platensis (Arthrospira Platensis)

La selección de las cepas a cultivar está dictada por la alta productividad, pronta cosecha y la obtención de coproductos deseables. Además de su contenido en lípidos, también se tiene en cuenta su habilidad para ser cultivada en masa, su resistencia en condiciones extremas, la velocidad de crecimiento relativa (frente a contaminantes potenciales) y la competitividad en cultivos de gran densidad.

Spirulina sp. es una cianobacteria filamentosa, autótrofa y que deriva su nombre de la naturaleza helicoidal o en espiral de sus filamentos. La Spirulina es capaz de realizar la fotosíntesis oxigénica y de fijar el nitrógeno del medio. Esta cianobacteria crece en condiciones alcalinas con un pH que oscila entre 8.5 y 10.5, y a una temperatura promedio de 25 a 35°C. La adición de CO₂ es propuesta para la regulación del pH, ya que este parámetro aumenta si la fuente de carbono es insuficiente. Lo que se logra con la adición de este gas es acelerar la asimilación de carbono. Alrededor del pH 10.5 se inicia la retención en el medio líquido del CO₂. En general la concentración de este gas es importante, ya que disminuye la alcalinidad y amortigua el pH. Se aconseja que la concentración de CO₂ en los cultivos de Spirulina varíe entre 0.05-5%, y que este material, gaseoso, se suministre a cultivos de laboratorio, por burbujeo y mezclado con aire. La intensidad lumínica a escala de laboratorio, puede variar entre 2000 y 5000 luxes, dependiendo de la densidad de los cultivos.

El medio químico debe ser rico en carbonatos, nitratos y sales. Actualmente la mayoría de las investigaciones de laboratorio propuestas tienen como inicio la utilización del medio Zarrouk clásico para el crecimiento y desarrollo de Spirulina sp. En cambio, para la etapa industrial de la producción es preferible el medio de cultivo SSM. Ocho factores influyen en la productividad del cultivo de Spirulina: luminosidad, temperatura, tamaño de inóculo, velocidad de agitación, sólidos disueltos, pH, calidad de agua, y presencia de macro y micronutrientes.

La máxima tasa de crecimiento (μ) de un cultivo de Spirulina es de 0,42 días⁻¹, es decir, se forman 0.42 gramos de células nuevas a partir de un gramo inicial de células durante un período de día. La producción de biomasa también se puede expresar de otro modo como 0,22 g/L·día⁻¹.

En los análisis que se han hecho sobre la composición bioquímica de Arthrospira, se ha determinado que contiene proteínas (≈50%), carbohidratos (≈10%) y lípidos (≈5%), además de vitaminas, minerales, carbohidratos, ácidos nucleicos y pigmentos. El valor de

Spirulina radica precisamente en la gran variedad de macronutrientes y micronutrientes que contiene, por lo que uno de sus principales usos es como suplemento alimenticio y para diversas aplicaciones terapéuticas. Otra posible aplicación de esta alga que se está investigando actualmente es la producción de biocombustibles, debido a su gran contenido en lípidos. Algunos estudios recientes han demostrado que la cianobacteria *Spirulina Platensis* es capaz de producir un 9.2% de lípidos y un 7.5% de biodiesel.

3. Diseño de un nuevo fotobiorreactor para el cultivo de *Spirulina Platensis*

Después del estudio exhaustivo de los factores que intervienen en el crecimiento de las algas, y tras el análisis de las ventajas e inconvenientes que presentan los sistemas de cultivo actuales, a continuación se muestran los pasos seguidos para el diseño de un nuevo prototipo de fotobiorreactor. El modelo propuesto trata de subsanar algunos de los problemas que presentan los sistemas convencionales mejorando así su rendimiento y productividad. Además, tiene como propósito sentar las bases para el diseño de fotobiorreactores que puedan ser empleados a escala industrial y garantizando su viabilidad económica.

Puesto que la *Spirulina Platensis* es una de las especies de microalgas de mayor interés industrial, el diseño de este reactor se enfocará a la producción de dicha alga, y será necesario tener en cuenta sus características especiales. Para comenzar el diseño se fijará un objetivo de producción anual de *300 ton/año* (valor de referencia tomado de la producción anual media de las principales compañías productoras de *Spirulina Platensis*).

3.1. Cálculo del caudal de CO₂

Para calcular el caudal de CO₂ es necesario fijar unos valores de las densidades iniciales y finales del cultivo a partir del análisis de los resultados publicados en investigaciones anteriores. De esta forma es posible determinar el *tiempo de residencia*, es decir, el tiempo que tiene que pasar el cultivo en el interior del fotobiorreactor para alcanzar la densidad establecida y proceder a la extracción de la biomasa.

Valores fijados para el cálculo	
Producción Objetivo (toneladas/año)	300,00
Productividad del Cultivo (g/L·día)	0,22
Densidad Inicial (g/L)	0,10
Densidad de Extracción (g/L)	11,00
Datos calculados	
Tiempo de Residencia (días)	49,55
Productividad Objetivo (kg/día)	821,92
Volumen Total (L)	3.735.990,04
Volumen de Proceso Diario (L)	74.719,80

Tabla 1: Datos para el cálculo del caudal de CO₂.

A partir de la fórmula típica molecular de la biomasa algal, CO_{0,48}H_{1,83}N_{0,11}P_{0,01}, se puede calcular el consumo de CO₂ del cultivo multiplicando la producción de biomasa por 1,88 (0.22·1.88=0.413 g/L·día⁻¹). Suponiendo que el suministro de CO₂ se realiza de modo continuo durante los 50 días que permanece el cultivo en el reactor, se obtiene que el caudal de CO₂ que ha de inyectarse es aproximadamente 1.28 kg/h.

En posteriores cálculos, se empleará un caudal de inyección de CO₂ ligeramente sobredimensionado, 1.50 kg/h. De esta forma se pretende garantizar que el cultivo recibe todo el carbono que necesita para su crecimiento, ya que puede haber moléculas de CO₂ que se escapan a la atmósfera sin llegar ser consumidas por las algas.

3.2. Cálculo del diámetro de burbuja

El siguiente paso consiste en asegurar un burbujeo homogéneo y eficaz en el reactor. Para garantizar la transferencia del dióxido de carbono a las algas, es necesario que el sistema de burbujeo produzca burbujas de un tamaño adecuado, ya que burbujas muy pequeñas inducen la flotación de las algas, mientras que burbujas demasiado grandes causan la muerte de las mismas.

Para determinar el tamaño de las burbujas, se analizarán las fuerzas que actúan en el momento de formación de una burbuja en un orificio a partir de las fórmulas descritas en el *VDI-Wärmeatlas (VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen)*. En cada uno de los orificios por los que el gas accede al cultivo, en el instante en el que se está formando una nueva burbuja, se encuentran actuando las siguientes fuerzas:

- Fuerza de impulso, F_A
- Fuerza viscosa, F_η
- Fuerza de inercia, F_T

- Fuerza de tensión superficial, F_σ

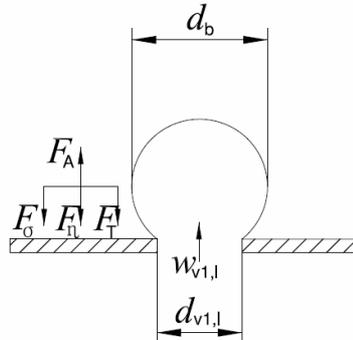


Figura 8: Equilibrio entre las fuerzas que actúan en la formación de una burbuja de gas.

$$(\rho_w - \rho_g) \cdot \frac{\pi}{6} \cdot g \cdot d_B^3 - 15 \cdot \eta_w \cdot V_o \cdot d_B^{-1} - 1,3 \cdot \rho_w \cdot V_o^2 \cdot d_B^{-2} - \pi \cdot d_o \cdot \sigma_w = 0$$

Cálculo del diámetro de las burbujas		
Caudal de inyección de CO ₂	Q _{CO₂} (kg/h)	1,50
Concentración de CO ₂ en el gas (CO ₂ +aire)	%vol	15,00
Diámetro de orificio	d _o (m)	0,002
Densidad del agua a 30°C	ρ_w (kg/m ³)	995,60
Viscosidad dinámica del agua a 30°C	η_w (kg/m·s)	$7,98 \cdot 10^{-4}$
Tensión superficial del agua a 30°C	σ_w (N/m)	0,0712
Densidad del CO ₂ a 30°C	ρ_{CO_2} (kg/m ³)	1,80
Densidad del aire	ρ_{aire} (kg/m ³)	1,20
Diámetro de burbuja	dB (m)	$7,28 \cdot 10^{-3}$

Tabla 2: Datos para calcular el diámetro de burbuja.

Puesto que el caudal de CO₂ a suministrar es muy bajo, si se inyecta CO₂ puro en el fotobiorreactor, la cantidad de burbujas que se producirían no sería muy elevada y, por tanto, apenas producirían agitación alguna en el medio de cultivo. Por ello, es más adecuado introducir el CO₂ que precisan las algas mezclado con aire en la proporción 15% CO₂ - 85% aire (porcentaje en volumen). Esta concentración de CO₂ en aire es utilizada a menudo en el cultivo de algas, tal y como aparece reflejado en la literatura.

El valor del diámetro de la burbuja dependerá del caudal volumétrico de gas que atraviesa el orificio. Para un valor del caudal másico de gas en un orificio igual a $V_o = 10^{-5}$ kg/s, se necesitarían 200 orificios para suministrar el caudal total de CO₂ requerido.

Iterando la ecuación del equilibrio entre fuerzas, se obtiene un diámetro de burbuja de 7mm.

3.3. Cálculo de la velocidad de ascenso de la burbuja

Mientras que la velocidad del gas en el orificio depende del caudal, la velocidad de ascenso de la burbuja varía en función de su diámetro y de las densidades del gas y del líquido. Para calcular la velocidad de la burbuja, se pueden aplicar las correlaciones que vienen recogidas en el *Capítulo 13* del *VDI-Wärmeatlas*. Para ello, es necesario determinar el *Número de Arquímedes (Ar)* y el *Número característico del Líquido (KF)*.

Según los valores obtenidos en los índices anteriores, la velocidad de la burbuja se calcula mediante correlaciones distintas. Se diferencian cinco regímenes distintos de comportamiento de una burbuja según las condiciones que tienen lugar en el fotobiorreactor y con los datos calculados de *Ar* y *KF*. Se obtiene que el valor de la velocidad con la que asciende la burbuja (w_B), es de **0.04m/s**.

3.4. Cálculo de la altura del tanque

El objetivo de instalar un sistema de burbujeo, además de proporcionar agitación al cultivo, es el de poner en contacto íntimo las moléculas de CO_2 con las algas. Por ello, se calcula el tiempo mínimo necesario que ha de viajar la burbuja a través del medio líquido para que se produzca la transferencia total del carbono del gas a las algas. Para ello se calcula la cantidad de CO_2 que contiene una burbuja teniendo en cuenta que el gas de inyección contiene 15% CO_2 - 85%aire (%vol).

El volumen de cultivo estará contenido en un tanque que tendrá forma cilíndrica y el diámetro de su base no superará los 2,5 metros. La razón de limitar la base a este tamaño es muy sencilla; tamaños mayores precisarían de un transporte especial para su traslado desde la fábrica al lugar de destino, lo que aumentaría considerablemente el coste de transporte.

A partir del porcentaje de burbuja que se consume por litro y por segundo, se puede determinar la altura mínima necesaria que ha de tener el medio de cultivo para asegurar que el CO_2 de la burbuja se consuma por completo.

Estos cálculos han sido realizados para distintos tamaños de tanques y un volumen de cultivo diario procesado de aproximadamente 75.000L. A continuación, se recogen los resultados obtenidos en cada uno de los casos:

Nº de tanques	N	1	2	5
Volumen de cultivo por tanque	V(L)	74719,80	37359,90	14943,96
Altura de cultivo en tanque	H(m)	15,222	7,611	3,044
Nº agujeros por tanque	n	200	100	40
Nº agujeros por área	agujero/m ²	40,74	20,37	8,15
Porcentaje de burbuja consumido en un litro	%	8,65	4,32	1,73
Tiempo de contacto total entre burbuja y cultivo	t _{total} (seg)	368,37	184,19	73,67
Altura necesaria para consumir el 100% de la burbuja	H _{mín} (m)	0,47	0,47	0,47
Margen de seguridad	M(m)	14,75	7,14	2,57

Tabla 3: Resultados que demuestran que el tiempo de contacto entre el gas y el cultivo garantiza la transferencia total del carbono a las algas.

3.5. Descripción del Fotobiorreactor

Es importante destacar que el diseño propuesto puede ser dimensionado para distintas capacidades, desde pequeños cultivos a cultivos masivos a gran escala. El fotobiorreactor diseñado tiene una capacidad de 15.000L y está iluminado artificialmente. Consta de una envolvente externa que contiene al cultivo y sirve de soporte a los diferentes subsistemas que se encuentran agrupados en una estructura común denominada rotor, la cual gira en el interior de la envolvente. Dicha estructura al girar realiza las funciones de subsistema de agitación, permitiendo el homogeneizado del cultivo. A modo de paletas, se sitúan unos tubos de un material que permite el paso de la luz, pues en su interior se alojan los medios de iluminación encargados de proporcionar al cultivo la radiación necesaria. Los tubos presentan una disposición y número adecuados formando un entramado que ilumina la totalidad del volumen del cultivo. En la base del rotor, se sitúa el subsistema de inyección de CO₂.

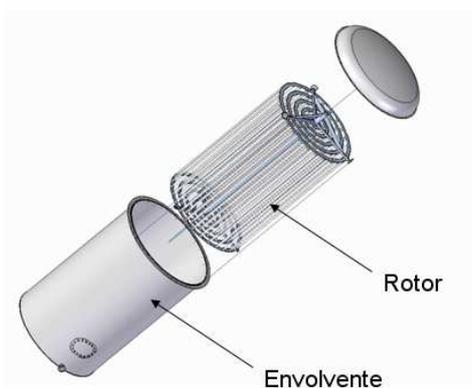


Figura 9: Despiece del Fotobiorreactor propuesto.

- **Envolvente externa**

Para la fabricación de la envolvente se ha elegido una arquitectura tipo API por su sencillez y economía, y dado que la presión interna es prácticamente igual a la presión atmosférica, se aplicará la *Norma API 650 - Welded Tanks for Oil Storage* como norma de cálculo. Esta arquitectura permite un escalado a medida del cliente final, desde muy pequeños volúmenes hasta capacidades de unos 50.000 m³.

- **Rotor**

El rotor es la estructura que aloja a los diferentes subsistemas para el soporte vital del cultivo y que gira alrededor del eje de la envolvente. Consta de una estructura tipo jaula de ardilla que se apoya mediante ruedas sobre el anillo perimetral de la envolvente externa, cuya geometría garantiza además su autocentrado. Posee una estructura central que une a las dos estructuras soporte situadas en sus extremos. Entre dichas estructuras se sitúan los elementos del subsistema de iluminación, que no solamente proporcionan la radiación requerida por el cultivo, sino que actúan a modo de paletas realizando las funciones de agitador para la homogeneización del cultivo. El sistema de inyección de CO₂ también se encuentra unido a la parte inferior del rotor.

- **Sistema de inyección de CO₂**

El relativamente bajo caudal de inyección, obligaría a separar severamente los inyectores en caso de adoptar una distribución uniforme de los mismos a lo largo de la sección en planta del tanque (tal y como viene reflejado en la relación *agujeros/m²*). La solución que se propone permite reducir drásticamente la distancia entre inyectores y con ello barrer la práctica totalidad del área de cultivo. Para ello los inyectores se disponen en una serie de brazos giratorios, situados en la parte inferior del rotor que, a modo de radios, parten del centro del cilindro hacia la periferia, creando una serie de cortinas verticales de burbujas, tantas como brazos, que barren todo el volumen del cultivo a medida que el rotor gira en el interior de la envolvente.

Suponiendo un diseño formado por tres brazos que giran solidariamente con el rotor y para un tanque de 15.000L de capacidad, habría 14 agujeros por brazo, lo que equivale a un agujero cada 9 cm.

- **Sistema de iluminación**

Situados en el rotor, concretamente entre las estructuras de los extremos, se sitúan los tubos en cuyo interior se alojan las fuentes de iluminación. Estos tubos permeables a la luz, pueden construirse con materiales poliméricos tratados con radiación UV para resistir la exposición a la luz de manera extensa y repetida. Aunque “a priori” cualquiera de los polímeros sería apto para esta aplicación, algunos estudios revelan que ningún plástico

óptico comercial garantiza una alta transmisión de la luz en el rango ultravioleta, resultando el vidrio de cuarzo la mejor opción disponible para esta aplicación. El vidrio común también sería una opción a tener en cuenta en virtud de su mayor disponibilidad y menor coste.

La disposición de los puntos de luz se ha desarrollado teniendo en cuenta que la penetración máxima de la luz en el medio de cultivo es de 10 cm. Por ello, los tubos de iluminación se distribuyen uniformemente, tanto en dirección radial como en dirección circunferencial, en varias coronas circulares concéntricas. El disponer de las fuentes de luz en un sistema rotativo móvil, trae consigo que en cada punto se va a producir un máximo y un mínimo de iluminación, con independencia del propio movimiento del cultivo, creando un efecto de iluminación pulsante, que según algunos estudios, puede incrementar el rendimiento del cultivo. Este efecto se puede amplificar o atenuar, con la velocidad de giro, distancia entre puntos de iluminación y con los propios valores nominales de iluminación. La elección del tipo de iluminación dependerá del espectro de emisión requerido por el cultivo. Para evitar el incremento de temperatura del cultivo debido a la iluminación, además de evitar espectros de emisión con altos valores en la zona del infrarrojo, se deben evitar fuentes de iluminación “calientes”.

▪ Sistema antifouling

Los tubos realizan la función mixta de paletas y fuentes radiantes. Como fuentes radiantes interesa que estén libres de todo depósito que dificulte la transmisión de la luz al cultivo. El propio movimiento del rotor crea una turbulencia alrededor del tubo que contribuye a reducir la deposición sobre su superficie de costras u otros residuos generados por el cultivo. Si el problema persistiera, se ha desarrollado una pantalla de limpieza que, cuando recorre toda la longitud de los tubos, los limpia gracias a unas juntas con labios de goma que rodean a cada tubo.



Figura 10: Imagen de la pantalla intermedia de limpieza y detalle de una de sus juntas de labios.

❖ Presupuesto del fotobiorreactor

En este apartado se presenta el presupuesto del prototipo diseñado pero ha de tenerse en cuenta que, para la evaluación económico-financiera del proceso, además del desembolso inicial en el fotobiorreactor, también habría que tener en cuenta el coste de los equipos de la etapa de post-proceso, los flujos de material y el consumo energético.

Para el cálculo del coste del fotobiorreactor se ha dividido el mismo en seis subsistemas distintos: tanque, rotor, inyección, limpieza, agitación e iluminación. Se ha determinado el coste de cada uno de los elementos que lo componen y se han establecido algunas partidas alzadas para accesorios, tornillería, pequeño material, etc. Por último se ha tenido en cuenta el coste de la mano de obra, tanto para la fabricación de cada subsistema como para el montaje, ensamblaje y pruebas finales del fotobiorreactor.

Conjunto	Coste (€)
TANQUE	8.386,82
ROTOR	1.205,00
SISTEMA DE INYECCIÓN	356,80
SISTEMA DE LIMPIEZA	2.429,50
SISTEMA DE AGITACIÓN	2.200,00
SISTEMA DE ILUMINACIÓN	8.596,33
ENSAMBLAJE Y VERIFICACIÓN	400,00
VARIOS (Imprevistos, pequeño material, etc.)	3.536,17
Coste Total:	27.110,62

Tabla 4: Resumen del presupuesto del Fotobiorreactor.

4. Conclusiones

El fotobiorreactor propuesto en este trabajo presenta un gran interés para su aplicación a nivel industrial por su capacidad para albergar grandes cantidades de cultivo. Se trata de un diseño fácilmente escalable que permite altas productividades, la optimización de la energía luminosa, la reducción del fenómeno fouling y la disminución de los costes energéticos. Este sistema de cultivo, además, se caracteriza por su sencillo diseño que permite un fácil mantenimiento y control del proceso.

Para conseguir la implantación de esta tecnología, las investigaciones futuras en este campo deberán centrarse fundamentalmente en tres objetivos: estudio y determinación de las mejores especies algales, mejora de la eficiencia fotosintética y el desarrollo de las tecnologías de post-procesamiento.

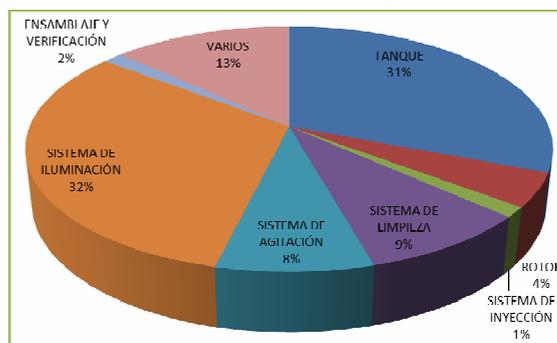
A parte de los beneficios medioambientales que supone la biofijación de CO₂, también existen beneficios de tipo económico ya que la biomasa algal obtenida puede ser utilizada para la producción de sustancias de interés químico-farmacéutico o de interés energético, como en el caso de los biocombustibles. La venta de esta biomasa supone la obtención

de un beneficio económico que, en el caso de la cepa Spirulina, ronda los 25€ por kilogramo de biomasa en polvo. Para una instalación que produjera 300 toneladas anuales de biomasa seca, se obtendría un beneficio por la venta de este producto de siete millones y medio de euros al año.

Además del beneficio por el producto obtenido, las toneladas de dióxido de carbono no arrojadas al aire también constituyen un valor económico adicional. La necesidad de luchar contra los gases de efecto invernadero ha puesto precio al aire limpio. Así, las empresas que por su actividad emiten CO₂ a la atmósfera en exceso, deben pagar unos derechos de emisión de CO₂. Una instalación de 300 toneladas de biomasa algal al año, supondría un consumo anual de 564 toneladas de CO₂. Tomando como valor medio de los últimos dos años un coste del derecho de emisión de 15€ la tonelada, esta instalación supondría un ahorro económico de 8.460€ anuales.

Con estos datos queda demostrado el beneficio económico que conlleva el empleo de las tecnologías de cultivo de microalgas para la mitigación del CO₂. No obstante, es necesario tener en cuenta que para la producción de grandes cantidades de biomasa se necesita un gran número de tanques, una nave industrial, equipos para el post-proceso, personal de mantenimiento, etc., lo que requiere una importante inversión de capital inicial.

La tabla siguiente recoge los costes porcentuales de cada uno de los subsistemas en que hemos dividido el presupuesto. Como se puede observar, los componentes que más influyen en el coste total son el tanque y el sistema de iluminación. La reducción de estos costes es otro de los propósitos a alcanzar en este campo.



Gráfica 1: Porcentajes de cada uno de los subsistemas al coste total del fotobiorreactor propuesto.

Los cálculos económicos anteriormente expuestos se han realizado para un tanque con capacidad para almacenar 15.000L de cultivo, obteniéndose un coste total de fabricación del fotobiorreactor de aproximadamente 27.000 euros. Dicho de otro modo, el ratio económico de este sistema es de 1,8 euros por litro cultivado. A la vista de estos resultados económicos, se puede afirmar que el empleo de fotobiorreactores a gran escala para su empleo a nivel industrial puede llegar a ser una realidad en un futuro no muy lejano.

5. Bibliografía

- [1] Miguel Álvarez Cobelas y Tomás Gallardo, *“Una Revisión sobre la Biotecnología de las Algas”*, Universidad Complutense de Madrid, 1989.
- [2] Ronny Barra y Sonia Guartatanga, *“Diseño de un Fotobiorreactor Industrial para el Cultivo de Spirulina (Arthrospira Platensis)”*, Escuela Politécnica del Litoral (Ecuador), 2000.
- [3] Coral Contreras-Flores, Julián Mario Peña-Castro, Luis Bernardo Flores-Cotera y Rosa Olivia Cañizares-Villanueva, *“Avances en el Diseño Conceptual de Fotobiorreactores para el Cultivo de Microalgas”*, Revista Interciencia, Caracas, 2003.
- [4] Mike Kämmer, *“Berechnung und Konstruktion eines Befeuchters von Kohlenstoffdioxid”*, Proyecto Fin de Carrera, 2010.
- [5] Kanhaiya Kumar, Chitralekha Nag Dasgupta, Bikram Nayak, Peter Lindblad, Debabrata Das, *“Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria”*, Bioresource Technology, 2011.
- [6] Ministerio de Ciencia e Innovación, *“Energía de las algas: presente y futuro”*, BioPlat: Plataforma Tecnológica Española de la Biomasa.
- [7] Liliana Ramírez-Moreno y Roxana Olvera-Ramírez, *“Uso tradicional y actual de Spirulina sp. (arthrospira sp.)”*, Revista Interciencia, Caracas, 2006.
- [8] Ing. Ángel D. González, Dr. Viatcheslav Kafarov, Dr. Alexander Guzmán Monsalve, *“Desarrollo de métodos de extracción de aceite en la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas”*, Colombia, 2009.
- [9] Gloria Ximena Pedraza, *“Cultivo de Spirulina máxima para suplementación proteica”*, Revista Interciencia, Caracas, 2011.
- [10] Abd El-Moneim M. R. Afify, Emad A. Shalaby, Sanoa M. M. Shanab, *“Enhancement of biodiesel production from different species of algae”*, Grasas y Aceites, Vol. 61, 2010.

- [11] Rafael Navarro Cerrillo, “*Biocombustibles*”, Revista Virtual Redesma, Red de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Julio de 2008.
- [12] Alex Rolando Rodríguez Cuesta, Francia Catherine Triana Serrano, “*Evaluación del pH en el cultivo de Spirulina spp. (Arthrospira) bajo condiciones de laboratorio*”, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2006.
- [13] Henry G. Álvarez Arellano, “*Introducción al método ficológico*”, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1994.
- [14] E. Jacob-Lopes, “*Effect of light cycles (night/day) on CO₂ fixation and biomass production by microalgae in photobioreactors*”, Chemical Engineering and Processing, vol. 48, 2009.
- [15] Chun-Yen Chen, Kuei-Ling Yeh, Rifka Aisyah, Duu-Jong Lee, Jo-Shu Chang, “*Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review*”, Bioresource Technology, 2010.
- [16] Shih-Hsin Ho, Chun-Yen Chen, Duu-Jong Lee, Jo-Shu Chang, “*Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems; a review*”, Biotechnology Advances, 2010.
- [17] Alessandra Lodi, Laura Binagui, Danilo De Faveri, Joao Carlos M. Carvalho, Attilio Converti, Marco Del Borghi, “*Fed-batch mixotrophic cultivation of Arthrospira (Spirulina) platensis (Cyanophyceae) with carbon source pulse feeding*”, 2005.
- [18] Robert E. Treybal, “*Operaciones de transferencia de masa*”, Ed. Mc Graw Hill.
- [19] N Rübiger, M Schlüter, “*VDI Wärmeatlas*”, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2006.
- [20] Warren L. Mc Caben, Julian C. Smith, “*Operaciones básicas de Ingeniería química*”, Editorial Reverté.