

# CONTROL AUTOMÁTICO DE CONCENTRACIÓN DE GASES EN UN BIORREACTOR PARA EL CULTIVO DE MICROALGAS

Ing. Alejandro Camacho Morales<sup>1</sup>

**Resumen**—La generación de biocombustibles a partir de microalgas ha demostrado ser factor de numerosos beneficios para el medio ambiente; el propósito de la presente investigación es contribuir al conocimiento de esta área de estudio a través del diseño y construcción de un fotobiorreactor tipo panel para el cultivo intensivo de microalgas en las instalaciones de la Universidad Politécnica del Centro. Por lo que se llevó a cabo un proceso de investigación cuantitativa con diseño experimental, que tuvo como fundamento la realización de pruebas físicas de circulación y medición del pH en el medio acuoso, con el objetivo de optimizar los sistemas que proporcionan un ambiente idóneo para mejorar la producción de microalgas.

**Palabras clave**—Biorreactor, fotobiorreactor, microalgas, biomasa, biocombustibles

## Introducción

El exceso de uso de energías no renovables para las actividades humanas ha provocado un cambio climático que tiene grandes repercusiones en la vida en la tierra; las consecuencias más importantes de este abuso energético son el incremento del nivel del mar, la acidificación de los océanos, desaparición de ecosistemas y biodiversidad, desertificación, etcétera. Algunos de los peligros directos hacia la humanidad son la precarización de los recursos naturales, la destrucción de la cadena de alimentación y diversos problemas de salud a nivel global (Good, y otros 2010).

Por esto, existe un gran interés por el desarrollo de sistemas que permiten la obtención de energía de manera sostenible; esto es, utilizando recursos que sean racionalizados y administrados de manera que generaciones futuras no vean comprometido su propio desarrollo.

Entre todas las tecnologías de generación de energía sostenible, los microorganismos como las microalgas son una buena alternativa porque se pueden utilizar para múltiples propósitos; entre las principales aplicaciones de las microalgas están los sectores de alimentación humano y de animales, elaboración de químicos y, por supuesto, combustibles de origen biológico.

Estos combustibles de origen biológico tienen ventajas frente a otros tipos de fuentes de energía. Por ejemplo, el crecimiento de las microalgas requiere el uso de CO<sub>2</sub> (gas al cual se debe en gran medida el cambio climático del planeta) y luz ultravioleta proveniente de la radiación solar. Ambas fuentes de energía se pueden considerar sostenibles por su gran presencia en el planeta (y en el caso del CO<sub>2</sub>, el ambiente se beneficia todos aquellos sistemas que permitan disminuir su cantidad) (García Vicente 2010).

Aunque ya existen desarrollos de sistemas de producción de energía mediante microalgas, se han identificado problemas en la eficiencia de su obtención que van más allá del campo de la microbiología, por lo cual se requieren equipos multidisciplinarios para poder resolverlos (Becker 1994).

Este desarrollo permitirá incrementar la viabilidad de proyectos futuros de esta índole, lo cual, combinado con el creciente aumento de costos de las energías convencionales y el interés del sector energético en sistemas amigables con el ambiente convertirá a la obtención de energía mediante microalgas en un método de importancia industrial y de gran relevancia económica.

La División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco ha realizado un desarrollo tecnológico de un biorreactor de fase continua para la producción intensiva de microalgas. Entre los diversos tipos de sistemas de producción de microalgas, se desarrolló uno cerrado en serpentín con capacidad de 50 m<sup>3</sup>, que representa 10,000 l. Cuenta con un sistema de filtrado de agua marina que permite la producción de microalgas marinas y de agua dulce en un ambiente controlado (Narváez 2016).

Su uso principal es para el estudio de acuicultura, ya que una de las líneas de investigación es la elaboración de alimentos y crianza de peces. Sin embargo, uno de los problemas detectados es que la eficiencia se ve afectada por la absorción de CO<sub>2</sub> por parte de las microalgas y la necesidad de la eliminación del producto de la fotosíntesis a la atmósfera, ya que no hay un control adecuado de la presencia de ambos gases en los múltiples componentes del biorreactor. Este factor es muy importante ya que la capacidad de producción de biomasa depende altamente de que

<sup>1</sup> Alejandro Camacho Morales es ingeniero mecatrónico de la Universidad Nacional Autónoma de México, es Profesor de Asignatura en la Universidad Politécnica del Centro, Tabasco. [alejandro\\_camacho@outlook.com](mailto:alejandro_camacho@outlook.com)

los nutrientes proporcionados al medio acuoso donde se cultivan sean los correctos en las diversas etapas o fases de crecimiento de las microalgas.

El sistema que se plantea en el presente documento busca solucionar este problema mediante la implementación de un sistema de control automático de inyección y extracción de gases dentro del biorreactor para la producción intensiva de microalgas.

### Acerca de las microalgas

Las microalgas son organismos micro celulares fotosintéticos que viven en las capas superficiales de los mares, océanos y cuerpos dulces de agua y viajan junto la corriente. También se les encuentra en la parte inferior de las costas, donde la luz del sol alcanza el suelo oceánico. Las microalgas son la fuente primaria de alimentación de más del 90% de animales marinos (Trujillo y Thurman 2011).

Una microalga cumple, de forma microscópica, la definición general de *alga*, organismos con clorofila, pero carecen de las partes esenciales de una planta, como raíces, hojas o tallo. La característica básica de estos organismos es su crecimiento mediante fotosíntesis (Cleveland y Morris 2009); en un sentido, son plantas sin tallo que crecen en el agua.

#### Especies y tipos de microalgas

Las microalgas se clasifican por el pigmento que tienen y por el tipo de organismo que representan; por ejemplo, las microalgas eucariotas son aquellas que se componen de una sola célula. En éstas se encuentran las cianobacterias (*cyanophyta* y *prochlorophyta*). Las microalgas procariotas (multicelulares) son más variadas e incluyen las algas rojas (*rhodophyceae*), algas verdes (*chlorophyta*), algas doradas (*crhysophyta*) y algas cafés (*phaeophyta*) (Richmond 2004).

Existen múltiples especies de microalgas, sin embargo, no todas ellas son aptas para la producción intensiva para el uso humano. En la tabla 1 se muestran las principales especies que se han probado para producir biomasa a mediana y larga escala.

<i>Chlorophyceae</i>	<i>Neochloris oleoabundans, scenedesmus dimorphus, Botryococcus braunii, Dunaliella tertiolecta, Nannochloris sp. Chlorella protothecoides, Ankistrodesmus braunii</i>
<i>Euglenophyceae</i>	<i>Euglena gracilis</i>
<i>Prasinophyceae</i>	<i>Tetraselmis spp.</i>
<i>Haptophyceae</i>	<i>Chrysothila carterae, Isochrysis galbana</i>
<i>Eustigmatophyceae</i>	<i>Nannochloropsis spp.</i>
<i>Bacillariophyceae</i>	<i>Cyclotella cryptica, Chaetoceros sp., Skeletonema sp.</i>
Cianobacterias	<i>Arthrospira (Spirulina) platensis</i>

Tabla 1 Especies de microalgas que se han probado para producción de biomasa (Reza Moheimani, y otros 2015).

Las dos especies más destacadas en la producción de microalgas son *Spirulina* y *Chlorella* (Becker 1994). Las principales razones por las que las especies anteriores son más aptas para la producción intensiva de microalgas son la alta resistencia a los ambientes controlados y selectivos; por ejemplo, alta salinidad, pH, nutrientes y HCO<sub>3</sub>.

#### Factores para el crecimiento de las microalgas

Como todo ser vivo, las microalgas pueden crecer, lo cual se define como el incremento de la sustancia viva; en el caso de organismos unicelulares se mide en cantidad de células, mientras que en organismos multicelulares se refiere a la masa de las células (Richmond 2004).

El crecimiento de la microalga depende de varios factores: la salinidad del agua, la temperatura, la cantidad y tipo de luz que incide en la microalga y los gases y nutrientes del medio.

#### Luz y el proceso de fotosíntesis

La fotosíntesis representa una serie de reacciones metabólicas que ocurren en algunos organismos autotróficos, en los que compuestos orgánicos son sintetizados mediante la reducción de dióxido de carbono usando energía en forma de luz absorbida por la clorofila de las plantas. La fotosíntesis se puede reducir de manera empírica a la ecuación mostrada en la figura 1.

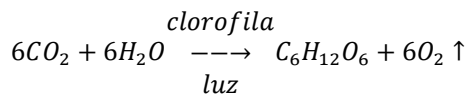


Figura 1 Ecuación empírica de la fotosíntesis.

Las bacterias fotosintéticas no pueden utilizar agua para obtener hidrógeno, por lo que se debe agregar un medio orgánico o nutrientes para dar una fuente de hidrógeno para que ocurra la reacción (Allaby 2013).

*Nutrientes y atmósfera*

Una microalga, como cualquier ser viviente, requiere una cantidad suficiente de diversos nutrientes para crecer de forma adecuada. Al igual que para los seres humanos existen valores recomendados de consumo de diferentes tipos de nutrientes, cada microalga, dependiendo su especie y medio natural donde vive tiene una cantidad de nutrientes recomendada para hacer más eficiente su crecimiento.

Existen diferentes fórmulas para componer la atmósfera con los nutrientes suficientes para hacer crecer las microalgas. La fórmula más utilizada y en la que se basan los demás medios es la propuesta por M. M. Allen en 1968, también conocida como BG11. Éste compuesto se utiliza para algas verdes o azules de agua dulce, como *Chlorella*. La composición de la fórmula se describe en la tabla 2.

Compuesto	Concentración
NaNO <sub>3</sub>	1500 mg/l
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> 3H <sub>2</sub> O	40 mg/l
CaCl <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O	36 mg/l
Ácido cítrico	6 mg/l
Citrato de amonio férrico	6 mg/l
EDTA	1 mg/l
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	20 mg/l
Microelementos:	1 ml/l
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.9 g/l
MnCl <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O	1.8 g/l
ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	0.22 g/l
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	0.39 g/l
CuSO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O	0.08 g/l
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	0.05 g/l

Tabla 2 Composición del medio BG11 para algas verdes y azules (Reddy, y otros 2007).

Para las cianobacterias *Spirulina*, normalmente se usa el compuesto Allen Modificado, propuesto por M. B. Allen y Stainer en 1968. Contiene principalmente los elementos mostrados en la tabla 3.

Compuesto	Concentración
NaNO <sub>3</sub>	1500 mg/l
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> 3H <sub>2</sub> O	40 mg/l
MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	75 mg/l
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	20 mg/l
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O	20 mg/l
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> 9H <sub>2</sub> O	60 mg/l
EDTA	1 mg/l
Ácido Cítrico	6 mg/l
FeCl <sub>3</sub>	2 mg/l
Microelementos:	1 ml/l
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.9 g/l
MnCl <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O	1.8 g/l
ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	0.22 g/l
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	0.39 g/l
CuSO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O	0.08 g/l
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	0.05 g/l

Tabla 3 Composición del medio de Allen-Stainer para cianobacterias (Andersen 2005).

## Tecnología de los biorreactores

Desde mitades del siglo XX, se buscó desarrollar sistemas que permitieran producir microalgas de forma intensiva y a larga escala. En 1953, se publicó el primer artículo donde se trató el tema de generar microalgas en una planta industrial. Estos primeros biorreactores se elaboraron en lugares abiertos, y se conocen como biorreactores abiertos.

Los biorreactores abiertos consisten normalmente en un gran depósito acuoso en el cual crecen las microalgas de forma natural, usando la luz solar y CO<sub>2</sub> del ambiente, y en algunos casos, regulando la temperatura del depósito. Este método se utiliza para producir microalgas a gran escala, aunque su eficiencia es limitada.

La eficiencia en un biorreactor abierto ha sido un tema recurrente en el desarrollo de estos sistemas, y para lograr ese objetivo se crearon diversas soluciones que permiten incrementar la eficiencia de la producción; esto es, producir más usando menos recursos. Una forma de solucionar parcialmente este problema es homogeneizando la mezcla en el depósito, de tal forma que el ambiente sea similar en todo el fluido. Esto se logra agitando mecánicamente la mezcla de forma constante. Aun así, existe el problema de la cantidad de luz, la cual no se puede mezclar, dejando zonas con poca cantidad luminosa que impiden el correcto crecimiento de las microalgas. Este problema se agudiza conforme se eleva el tamaño del sistema.

Las complicaciones de los biorreactores abiertos para generar de manera intensiva microalgas hizo que las investigaciones se concentraran en desarrollar nuevas clases de biorreactor que permitieran lo siguiente: crecer microalgas de forma acelerada (en menos tiempo) y mejorar la eficiencia de generación de microalgas. Con ello, se creó el biorreactor cerrado: de producción intensiva, estos biorreactores suministran de manera específica un ambiente ideal para que la microalga crezca de manera acelerada y con mayor eficiencia.

### *Biorreactores de ciclo cerrado*

Un biorreactor cerrado, también llamado fotobiorreactor, consiste en cerrar del ambiente el proceso de producción de microalgas, y manipular las condiciones ambientales del medio para mejorar la producción de las plantas. Esto incluye dos tipos de biorreactor, los de panel y los tubulares.

Un fotobiorreactor de panel consiste en dos depósitos contenedores de un medio acuoso, que se transfiere de uno a otro por medio de un conducto reducido que se bombea entre tanques. El tanque principal es donde se da el proceso de crecimiento de la microalga, mientras que en el segundo tanque sirve de reservorio de acumulación y extracción del producto generado. Este fue el primer tipo de fotobiorreactor que se inventó, y logró incrementar la cantidad de microalgas generadas en comparación de los biorreactores a cielo abierto.

El principal problema de los fotobiorreactores de panel es la trayectoria de la luz sobre el tanque principal, donde puede suceder que en zonas cercanas a los bordes se obtenga una mayor cantidad luminosa respecto a áreas centrales del tanque, de tal manera que la eficiencia de la generación se ve disminuida dependiendo el lugar donde se encuentre la microalga. Una solución que se creó para reducir este problema fue eliminar el tanque principal y extendiendo el conducto de recirculación del fluido, llevando la reacción fotosintética a este nuevo elemento. Entonces, el nuevo conducto es mucho más extenso y se le agrega luz artificial para que toda la microalga reciba cantidades equitativas de iluminación y por tanto crezca de manera uniforme. A este tipo de fotobiorreactores se le llama tubular.

Un biorreactor tubular consiste en un depósito contenedor de un medio acuoso, que se bombea a baja presión a un conducto extenso con un recorrido no lineal donde se produce la fotosíntesis y el crecimiento del alga; el depósito contenedor recibe el nombre de tanque oscuro, debido a que la luz artificial no incide en este elemento del sistema. Si es necesario, se añaden sistemas de agitación similares a los biorreactores abiertos. Esta agitación también permite eliminar oxígeno del medio acuoso, que afecta la producción de microalgas. En el conducto tubular se produce la fotosíntesis, lo cual hace crecer el alga como se explicó en la sección anterior.

Los fotobiorreactores tubulares se diseñaron para maximizar la producción de microalgas, aunque aún existen dificultades técnicas que evitan su implementación de forma extensiva en industrias. Los desarrollos actuales en el campo de los biorreactores de producción de microalgas cerrados incluyen la reducción del recorrido de la luz, resolver la turbulencia en el fluido de trabajo, reducir la concentración de oxígeno, controlar la temperatura del tanque oscuro, evitar la adhesión de microalgas en las paredes de los tubos de fluorescencia, y disminuir el gradiente de pH en la trayectoria del fluido de trabajo, generado por pérdida de CO<sub>2</sub> y generación de O<sub>2</sub> (Committee on the Sustainable Development of Algal Biofuels 2012).

## Metodología

Se implementó un proceso de diseño de tres pasos consistentes en establecer las especificaciones del fotobiorreactor, realizar el diseño conceptual y construir un prototipo de máquina que cumpliera con las especificaciones. Se contempló fabricar un modelo de fotobiorreactor de panel para realizar pruebas de

funcionamiento a baja escala, para posteriormente mejorar el dispositivo con elementos auxiliares como el serpentín y un sistema de monitoreo del medio acuoso para controlar las emisiones de gases dentro del fotobiorreactor.

*Modelo CAD del fotobiorreactor de panel*

En la figura 2 se muestra el modelo CAD del fotobiorreactor que se obtuvo a partir de las investigaciones realizadas de los modelos existentes de fotobiorreactores, el modelo fue hecho en el software SolidWorks 2015.

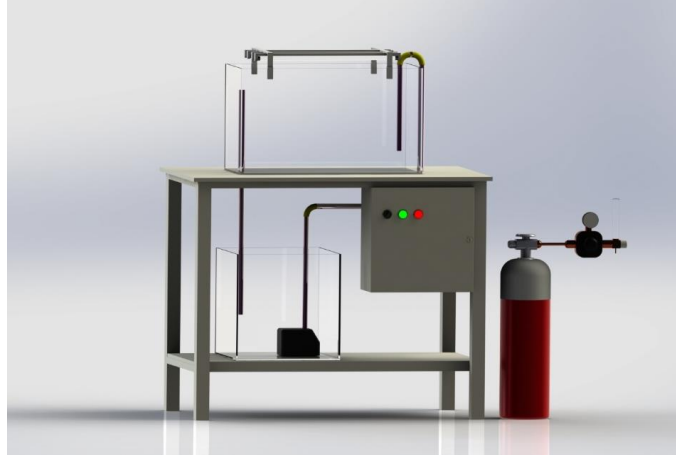


Figura 2 Modelo CAD del fotobiorreactor

*Prototipo del fotobiorreactor de panel*

Después de haber obtenido el modelo CAD se procedió a construir el fotobiorreactor con las especificaciones establecidas en el software. De igual manera, después de haber construido los sistemas mecánicos, hidráulicos y neumáticos se procedió a ensamblar cada una de las partes para así obtener el fotobiorreactor, que se muestra en la figura 3.



Figura 3 Prototipo de fotobiorreactor de panel en la Universidad Politécnica del Centro

La máquina construida utiliza un programa realizado en Java Netbeans para realizar el control de los sistemas luminosos, la bomba de flujo y el sistema de emisión de gases. En conjunto, el sistema hidráulico, neumático, eléctrico, electrónico y la programación realizan la tarea de generar el ambiente ideal para las microalgas. En la figura 4 se muestra el fotobiorreactor durante la prueba de funcionamiento final.

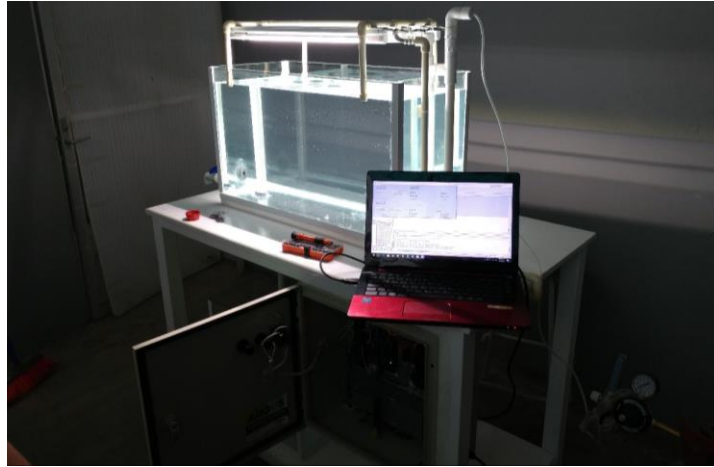


Figura 4 Prueba de funcionamiento del fotobiorreactor de panel en la Universidad Politécnica del Centro

### Comentarios Finales

El proyecto realizado culminó con la primera etapa del desarrollo de un fotobiorreactor tipo panel y una prueba general de funcionamiento. Ésta prueba consistió en demostrar la circulación del agua en los dos tanques, verificar que los gases fluyeran de forma diseminada en el tanque principal y que el tablero de control respondiera correctamente a los comandos enviados desde el ordenador de control. En esta primera etapa de este proyecto, se considera que se deben agregar elementos sensoriales que permitan conocer con mayor detalle el ambiente de trabajo de la microalga, ya que las mediciones de pH pueden ser insuficientes para determinar si el medio acuoso es bueno para el desarrollo de estas.

Las pruebas siguientes a la construcción consistirán en utilizar dos tratamientos (agua dulce y agua salada) y probarlos con diferentes tipos de gases de difusión, específicamente aire y CO<sub>2</sub>. Con ello se busca encontrar el tiempo de crecimiento de las células y el tiempo entre cargas de nutriente, para encontrar el ambiente ideal para el crecimiento acelerado de la microalga. Además, se busca llevar a cabo la construcción de un fotobiorreactor de serpentín e implementar un sistema de control de concentración de gases (CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>) para incrementar la producción de microalgas.

### Referencias

- Allaby, Michael. *Dictionary of Geology and Earth Sciences*. Reino Unido: Oxford University Press, 2013.
- Andersen, Robert A. *Algal Culturing Techniques*. Estados Unidos: Elsevier Academic Press, 2005.
- Becker, E. W. *Microalgae: Biotechnology and Microbiology*. Estados Unidos: Cambridge University Press, 1994.
- Cleveland, Cutler J., y Christopher Morris. *Dictionary of Energy (Expanded Edition)*. Países Bajos: Elsevier, 2009.
- Committee on the Sustainable Development of Algal Biofuels. *Sustainable Development of Algal Biofuels in the United States*. Estados Unidos: The National Academies Press, 2012.
- García Vicente, María José. *Captura de CO<sub>2</sub> mediante algas unicelulares*. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2010.
- Good, Peter, y otros. *An updated review of developments in climate science research since the IPCC Fourth Assessment Report*. Committee on Climate Change. Londres, 2010.
- Narváez, Jesús J. «Desarrollo Tecnológico de un biorreactor de fase continua para la producción intensiva de microalgas.» Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. (*Tesis no publicada*). Villahermosa, Tabasco, 2016.
- Reddy, C. A., T. J. Beveridge, J. A. Breznak, G. A. Marzluf, T. M. Schmidt, y L. R. Snyder. *Methods for General and Molecular Microbiology*. Estados Unidos: American Society for Microbiology, 2007.
- Reza Moheimani, Navid, Mark P. McHenry, Parisa Bahri, y Karne de Boer. *Biomass and Biofuels from Microalgae: Advances in Engineering and Biology*. Suiza: Springer, 2015.
- Richmond, Amos. *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Reino Unido: Blackwell Science Ltd., 2004.
- Trujillo, Alan P., y Harold V. Thurman. *Essentials of Oceanography*. Estados Unidos: Prentice Hall, 2011.

### Nota Biográfica

El **Ing. Alejandro Camacho Morales** es profesor de asignatura en la Universidad Politécnica del Centro, en Tabasco, México. Estudió ingeniería mecatrónica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, de donde se graduó por alto rendimiento académico. Se encuentra estudiando la maestría en Manufactura Avanzada en CIATEQ, campus Tabasco. Tiene experiencia profesional en los sectores de telecomunicaciones y petróleo. Ha participado en 4 proyectos de vinculación con la industria, entre los cuales destacan “Desarrollo tecnológico de un sistema digital de enseñanza de la perforación petrolera” y “Diseño de un sistema de rieles y engranajes para movimiento de una cámara cinematográfica”. Cuenta con certificaciones en LabVIEW (CLAD) y VEX Robotics.