



Uso de microalgas inmovilizadas en biofilm para tratamiento de aguas residuales

Autor: Jesús Fernández

Institución: Universidad Politécnica de Madrid

Otros autores: Maribel Martín (Universidad Politécnica de Madrid); Fernando Mosquera (Universidad Politécnica de Madrid); M.D. Curt (Universidad Politécnica de Madrid)

Resumen

Los sistemas desarrollados para el cultivo de las microalgas pueden clasificarse en dos grandes grupos, en función de la forma de desarrollo de las poblaciones algales: cultivos en suspensión y cultivos inmovilizados. A su vez, ambos sistemas de cultivo pueden ser abiertos o cerrados, según que las microalgas y el medio de cultivo estén en contacto directo con el aire atmosférico o no.

Los cultivos de microalgas inmovilizadas en una superficie que actúa de soporte, forman un 'biofilm' continuo sobre dicha superficie formando un ecosistema específico de agregación denominado 'biofilm', normalmente constituido por varias especies, incluyendo bacterias, aunque puede haber alguna predominante.

Las principales ventajas que tienen los fotobiorreactores de biofilm sobre los de células suspendidas son: a) Facilidad para la cosecha, b) Mayor concentración por unidad de volumen de medio, c) reducción o ausencia de células en el efluente, d) reducción en la necesidad de energía y e) mayor eficiencia en el empleo de la radiación recibida por unidad de superficie de suelo.

El uso de fotobiorreactores abiertos de microalgas inmovilizadas es relativamente reciente, dirigiéndose los desarrollos en dos direcciones: una que considera el soporte del biofilm fijo, siendo el medio acuoso el que se mueve sobre él y otra que considera el soporte del biofilm móvil en un medio acuático estático o de lento movimiento. Al primero de los tipos pertenece el fotobiorreactor laminar desarrollado por el Grupo de Agroenergética de la UPM (GA-UPM) (patente ES 2 347 515 B2), especialmente concebido para la captación del CO₂ procedente de emisiones y para la producción de biomasa algal.

Otro desarrollo del GA-UPM perteneciente al segundo tipo ha sido un fotobiorreactor de biodisco de eje flotante, que elimina los inconvenientes de los contactores de biodisco tradicionales, ya que no necesita cojinetes de apoyo ni eje rígido y al estar dotado de un propulsor hidrobárico consume muy poca energía, sin limitación técnica en cuanto a la longitud total del eje. (Modelo de Utilidad ES 1 099 707 U). Este fotobiorreactor está especialmente diseñado para la eliminación de nutrientes (N y P) de los efluentes del secundario de las EDAR y también puede utilizarse como un contactor tradicional de biodiscos para eliminación de la materia orgánica de las aguas residuales con indudables ventajas de reducción de costes de instalación y funcionamiento.

Palabras clave: Fotobiorreactores, microalgas, biofilm, depuración aguas residuales

Resumen

Los sistemas desarrollados para el cultivo de las microalgas pueden clasificarse en dos grandes grupos, en función de la forma de desarrollo de las poblaciones algales: cultivos en suspensión y cultivos inmovilizados. A su vez, ambos sistemas de cultivo pueden ser abiertos o cerrados, según que las microalgas y el medio de cultivo estén en contacto directo con el aire atmosférico o no.

Los cultivos de microalgas inmovilizadas en una superficie que actúa de soporte, forman un "biofilm" continuo sobre dicha superficie formando un ecosistema específico de agregación denominado "biofilm", normalmente constituido por varias especies, incluyendo bacterias, aunque puede haber alguna predominante.

Las principales ventajas que tienen los fotobiorreactores de biofilm sobre los de células suspendidas son: a) Facilidad para la cosecha, b) Mayor concentración por unidad de volumen de medio, c) reducción o ausencia de células en el efluente, d) reducción en la necesidad de energía y e) mayor eficiencia en el empleo de la radiación recibida por unidad de superficie de suelo.

El uso de fotobiorreactores abiertos de microalgas inmovilizadas es relativamente reciente, dirigiéndose los desarrollos en dos direcciones: una que considera el soporte del biofilm fijo, siendo el medio acuoso el que se mueve sobre él y otra que considera el soporte del biofilm móvil en un medio acuático estático o de lento movimiento. Al primero de los tipos pertenece el fotobiorreactor laminar desarrollado por el Grupo de Agroenergética de la UPM (GA-UPM) (patente ES 2 347 515 B2), especialmente concebido para la captación del CO₂ procedente de emisiones y para la producción de biomasa algal.

Otro desarrollo del GA-UPM perteneciente al segundo tipo ha sido un fotobiorreactor de biodisco de eje flotante, que elimina los inconvenientes de los contactores de biodisco tradicionales, ya que no necesita cojinetes de apoyo ni eje rígido y al estar dotado de un propulsor hidrobárico consume muy poca energía, sin limitación técnica en cuanto a la longitud total del eje. (Modelo de Utilidad ES 1 099 707 U). Este fotobiorreactor está especialmente diseñado para la eliminación de nutrientes (N y P) de los efluentes del secundario de las EDAR y también puede utilizarse como un contactor tradicional de biodiscos para eliminación de la materia orgánica de las aguas residuales con indudables ventajas de reducción de costes de instalación y funcionamiento.

Introducción sobre sistemas de cultivo de microalgas

Las microalgas forman parte de los sistemas naturales de depuración y también son esenciales en algunos sistemas artificiales, como los lagunajes. En la actualidad, el principal interés que tienen en depuración de aguas residuales es para la eliminación de los elementos eutrofizantes (N y P principalmente) antes de su vertido a cauce.

Las microalgas son seres autótrofos que utilizan la energía de la radiación solar para producir su biomasa tomando los elementos minerales necesarios del medio acuoso en el que viven. La biomasa algal cosechada, que puede tener múltiples usos, contiene los elementos minerales absorbidos del agua por las microalgas, por lo que sirve para rebajar la concentración de los elementos eutrofizantes del medio, especialmente de nitrógeno y fósforo.

Los sistemas desarrollados hasta ahora para el cultivo de las microalgas pueden clasificarse en tres grandes grupos, en función de la posición relativa de las microalgas en el sistema: a) cultivos de células libres suspendidas en el medio de cultivo, b) cultivos

de células inmovilizados en una matriz de naturaleza polimérica (tipo alginato o carraginato) y c) inmovilizadas en una superficie soporte, formando un “biofilm” constituido por agregación de especies de microalgas y bacterias principalmente.

Otro tipo de clasificación de estos sistemas, se puede realizar en función de que el medio de cultivo con las microalgas esté en contacto directo con el aire o aislado de éste mediante una cubierta transparente. Según este criterio se distinguen los sistemas abiertos de los cerrados. Ambos tipos de clasificación son compatibles, existiendo sistemas abiertos y cerrados tanto de células libres como de células inmovilizadas, con diferentes variantes en cada uno de ellos.

En los cultivos abiertos, las microalgas y el medio de cultivo reciben la radiación solar directamente, mientras que en los sistemas cerrados, las microalgas y el medio de cultivo están confinados en recipientes cuyas paredes transparentes dejan pasar las radiaciones del espectro visible, pero los aíslan del aire atmosférico.

Los cultivos de microalgas en suspensión, que es la forma de cultivo desarrollada hasta ahora con más profusión, considera las microalgas suspendidas en el medio de cultivo y comprende tanto los sistemas abiertos, (como ocurre en los race-ways, balsas o lagunas) como los sistemas cerrados que incluyen los fotobiorreactores (PBR) en sus múltiples formas, cuyas paredes transparentes a la radiación visible, aíslan los cultivos del contacto directo con el aire atmosférico.

Los cultivos de microalgas inmovilizadas en una matriz polimérica del tipo alginato o carraginato están sumergidos en el medio de cultivo, y aunque están en fase de desarrollo, su aplicación a gran escala presenta dificultades para lograr la viabilidad económica.

Los cultivos de microalgas inmovilizadas en una superficie que actúa de soporte, forman un “biofilm” continuo sobre dicha superficie normalmente constituido por varias especies, aunque puede haber una predominante o incluso ser monoespecífico. Si el medio es rico en nutrientes minerales y pobre en materia orgánica, predominan las microalgas. Los cultivos inmovilizados a su vez pueden estar sumergidos en el medio de cultivo o en contacto con la atmósfera bañados únicamente por una fina lámina de agua que los mantiene húmedos permanentemente.

En los sistemas que contemplan las células suspendidas en el medio de cultivo la concentración máxima que se puede obtener en condiciones normales está alrededor de 1 g de materia seca por litro de medio de cultivo, mientras que en los sistemas de células inmovilizadas dicha concentración puede ser más de 100 veces superior, con el consiguiente ahorro de energía en la cosecha y concentración de la biomasa cosechada.

Los sistemas abiertos son apropiados para la producción de microalgas a gran escala, y siempre en cultivos poliespecíficos, mientras que los sistemas cerrados son más propios para laboratorio o plantas piloto, pudiéndose obtener cultivos monoespecíficos en éstos últimos, pero el coste de la instalación y de la producción por unidad de biomasa producida es muy superior al que se logra en las instalaciones abiertas.

En relación a su viabilidad económica, los sistemas más prometedores para el desarrollo de microalgas a gran escala, tanto para la depuración de aguas residuales como para la producción de biomasa algal pluriespecífica, son los sistemas de biofilm abiertos, en los que las microalgas se adhieren a un soporte bañado por un medio acuoso y expuesto directamente a la luz.

Las principales ventajas que tienen los fotobiorreactores de biofilm sobre los de células suspendidas son: a) Facilidad para la cosecha, b) Mayor concentración por unidad de volumen de medio, c) reducción o ausencia de células en el efluente, d) reducción en la necesidad de energía y e) mayor eficiencia en el empleo de la radiación recibida por unidad de superficie de suelo.

El uso de fotobiorreactores abiertos de células inmovilizadas es relativamente reciente, dirigiéndose los desarrollos en dos direcciones: una que considera el soporte del biofilm fijo, siendo el medio acuoso el que se mueve sobre él y otra que considera el soporte del biofilm móvil en un medio acuático estático o de lento movimiento.

Sistemas de “biofilm” de soporte fijo

Entre los sistemas con el soporte del biofilm fijo ha habido desarrollos con los paneles verticales expuestos al aire y sobre los que se hace caer una cortina continua del medio de cultivo, como es el caso del “Fotobiorreactor laminar para producción de microalgas” (Fernández, 2010), que constituye una patente registrada con el número de referencia ES 2 347 515 B2, de fecha de prioridad 03.05.2010, desarrollado por el Grupo de Agroenergética de la UPM (GA-UPM) y en el que se utilizan paneles verticales huecos, cubiertos por ambas caras por paños de geotextil sobre los que se adhiere la población algal para formar el biofilm o el fotobiorreactor de dos capas descrito por Naumann et al. (2012), en el que se utilizan fotobiorreactores con paneles verticales formados por varias capas superpuestas, una interior de fibra de vidrio para distribuir el medio y otras exteriores de papel de impresión para que se desarrolle el cultivo de microalgas adherido.

También ha habido algún desarrollo con el soporte del biofilm fijo en posición horizontal o ligeramente inclinado como el publicado por Ozkan et al. (2012), en el que se describe un fotobiorreactor de laboratorio con panel de hormigón ligeramente inclinado (0,2 % de pendiente) para que fluya el medio por encima de su superficie y facilite la formación del biofilm. A este mismo tipo de sistemas pertenecen los denominados reactores ATS (Algal Turf Scrubber) o sistemas depuradores formados con algas en crecimiento cespitoso sobre un soporte horizontal, que suele ser una malla y sobre la que fluye una corriente de agua, cuya primera patente de este tipo fue presentada por Adey, W.H y McLean, Va. (Adey, 1982).

Sistemas de “biofilm” de soporte móvil

Entre los sistemas con el soporte del biofilm móvil cabe citar el sistema propuesto por Johnson (2009) que, en esencia, consta de un panel de laboratorio de iluminación cenital que bascula alrededor de un eje central, con lo que cada lado del panel es sometido alternativamente a inundación por el medio de cultivo y retirada de éste.

Un sistema original de soporte de biofilm móvil es el descrito en la Memoria de la Tesis de Master de Christenson (2011), dirigida por R. C. Sims en la Universidad del Estado de Utah (USA), que consiste en un fotobiorreactor que utiliza una cuerda continua de algodón de 6,4 mm de diámetro que se mueve sumergida en un medio de cultivo y se enrolla y desenrolla en dos cilindros que rotan en el mismo sentido. Las algas se adhieren a la cuerda formando un biofilm y la cosecha se realiza por el escurrido mecánico de la cuerda.

Dentro de los sistemas con soporte de biofilm móvil, está el "Fotobiorreactor de soporte flotante" (Fernández, 2013) desarrollado también por el GA-UPM, registrado como Modelo de Utilidad con el número de referencia ES 1 099 707 U, de fecha de prioridad 20.12.2013. Este sistema utiliza el principio de los contactores biológicos (biodiscos) pero eliminando los inconvenientes que tienen, ya que no necesita tener un eje rígido ni cojinetes de apoyo, requiere mucha menos energía para su rotación y no tiene limitación en cuanto a la longitud alcanzable (en el caso de los biodiscos la longitud máxima la determinaba la resistencia a la flexión o rotura del eje).

A continuación se describen los dos sistemas de biofilm desarrollados por el Grupo de Agroenergética de la UPM.

Fotobiorreactor laminar para la producción de microalgas desarrollado por la UPM (Patente ES 2 347 515 B2, de fecha de prioridad 03.05.2010)

Este **fotobiorreactor** para producción de microalgas está **especialmente indicado para absorber gases de emisión de alto contenido en CO₂**. Está basado en la recirculación continua de un medio líquido que contiene las microalgas a través de una o varias láminas superpuestas de tejido, facilitando la absorción de CO₂ y la iluminación de las microalgas. Se trata de un fotobiorreactor **modular** constituido por una serie de módulos conectados en paralelo, estando formado cada uno de ellos por un panel dispuesto en posición vertical sobre una estructura específica.

El cuerpo de cada módulo del fotobiorreactor está constituido por un panel, que comprende un bastidor o marco sobre el que se colocan por ambos lados una o varias láminas de tejido. En el interior del bastidor se coloca una tubería porosa que se conecta al exterior por medio de una válvula y que está sujeta a un soporte de plástico fijo al marco del bastidor. El bastidor, de un cierto espesor, está cerrado por los lados delantero y posterior con lámina de malla. Las mallas a ambos lados dejan una cámara de aire delimitada por las caras internas del marco del bastidor y las propias mallas.

El conjunto se coloca en posición vertical sobre una estructura soporte, que lleva en su parte inferior, y a una cierta altura del suelo un canal de una anchura ligeramente superior a la del bastidor y sobre el que reposa la parte baja del panel. Los laterales del panel se fijan sobre los laterales de la estructura.

Por la parte superior del bastidor y en toda su longitud se vierte por medio de una tubería perforada o acanalada el medio de cultivo líquido que contiene las microalgas, el cual desciende por las láminas laterales formando una película continua. El líquido que desciende es recogido en un canal colector que vierte el medio con las microalgas sobre

un sistema de depósito, del que una bomba lo puede impulsar nuevamente a través de un conducto, dotado de una válvula de regulación del flujo y de un indicador de caudal, a la tubería de la parte superior del bastidor.

En la parte externa del bastidor existe un conducto con una válvula que conecta con la tubería perforada o porosa del interior del panel, por la que se pueden inyectar los gases de escape enriquecidos en CO₂ y NO_x. A través de un conducto general que traiga el gas procedente del foco emisor, se puede ir repartiendo a cada panel de forma individual a través de sus válvulas respectivas. La transferencia del CO₂ al medio de cultivo de las microalgas se produce por difusión desde el interior de la cámara hasta las paredes de ésta, por las que discurre el medio de cultivo en flujo descendente. La parte externa de las láminas laterales está en contacto directo con el aire atmosférico.

En la **Figura 1** se representa el esquema de la sección transversal de un panel del PBRL en funcionamiento.

La exposición directa de las láminas de tejido al aire ambiente favorece la evaporación continua del agua del medio que baña dichas láminas y produce la concentración de las microalgas en el medio, lo que consigue un ahorro energético a la hora de separar las microalgas de la fase líquida. Si no se desea que el agua del medio se evapore, se puede colocar un film de plástico transparente de polietileno, por ejemplo, adherido a la parte externa de las láminas del fotobiorreactor con continuidad por la parte superior de la tubería perforada situada por encima del bastidor, para evitar además la contaminación de cultivos monoespecíficos, actuando entonces el fotobiorreactor aislado del aire del exterior. Estos fotobiorreactores también se pueden instalar dentro de un invernadero.

El fotobiorreactor descrito (PBRL) puede utilizarse para producir biomasa de algas, y permite también concentrar la biomasa de las microalgas y facilitar su cosecha y presenta las siguientes **ventajas**:

- a) Es aplicable a gran escala y con bajo coste,
- b) Consigue una alta eficiencia en la iluminación de las algas,
- c) Permite el fácil intercambio de CO₂ desde los gases de emisión al cultivo,
- d) Ofrece la posibilidad de realizar la sedimentación de las microalgas del medio líquido sin afectar a las que están embebidas en las láminas de geotextil, que siguen multiplicándose,
- e) Posibilita recolectar las microalgas desecadas incluidas en una lámina de tejido,
- f) Permite la concentración del cultivo de algas, y
- g) Evita el calentamiento **del cultivo** al tratarse de un dispositivo con refrigeración natural continua que elimina el calor latente del agua evaporada de la capa más externa, y por estar confinado el CO₂ en el interior de la cámara donde apenas llega radiación infrarroja.

Cada unidad básica del PBRL está compuesta por un número determinado de paneles que vierten a un canal común del que se bombea el medio de cultivo a dicha unidad y a su vez un PBRL global puede estar compuesto por uno o numerosas unidades básicas. El conjunto de los medios con las microalgas de cada unidad puede ser transferido a un depósito común del que se pueden separar las microalgas y recircular a las distintas unidades la parte sobrante. Los gases enriquecidos en CO₂ y NO_x pueden llegar al PBRL

global en un conducto único y distribuirse a las diferentes unidades a través de una red adecuada de distribución que pueden agruparse en paralelo (**Figura 2**).

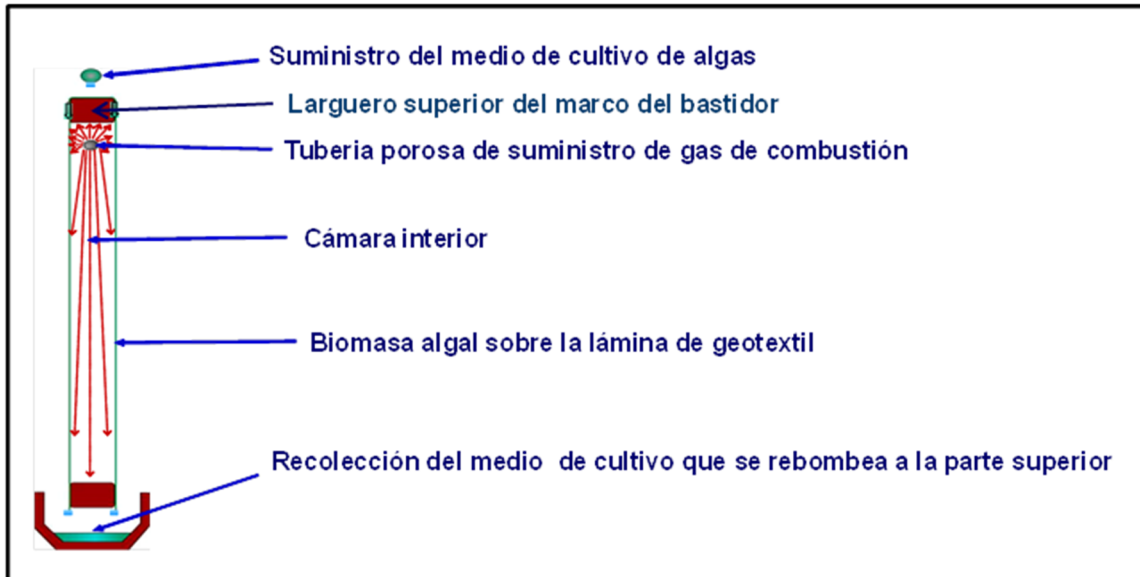


Figura 1.- Sección transversal de un panel del fotobiorreactor laminar (PBRL) mostrando sus características básicas de diseño y funcionamiento.

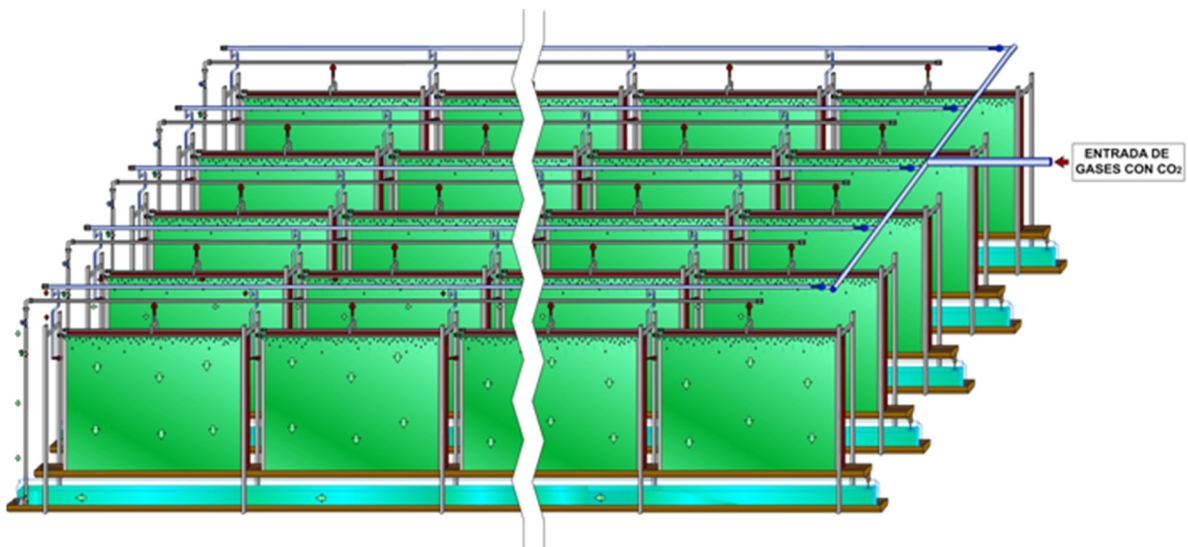


Figura 2.- Conjunto de unidades del sistema PBRL dispuestas en paralelo, con conducto general de suministro de gases enriquecidos en CO₂ o procedentes de emisiones.

El funcionamiento del PBRL fue testado inicialmente en los laboratorios del Grupo de Agroenergética de la UPM mediante fotobiorreactores de laboratorio realizado con paneles individuales cuadrados de 0,5 x 0,5 m (**Figura 3**), en los que se pudieron determinar los parámetros de operación y su efectividad en la producción de biomasa

algal y absorción de nutrientes minerales.

Posteriormente se comprobaron las condiciones de funcionamiento del PBRL en una instalación piloto experimental de 15 paneles de dimensiones comerciales (1,8 m (largo) x 1,5 m (alto)) agrupados en 3 unidades compuestas por 5 paneles cada una (**Figura 4**), toda ella bajo cubierta de policarbonato con apertura cenital. Esta instalación, que está funcionando ininterrumpidamente desde su instalación en enero de 2011, utiliza como fuente de CO₂ el aire atmosférico y los gases de emisión procedentes de la combustión de gasolina de un grupo motor generador de electricidad. Los gases de emisión se almacenan inicialmente en un balón de 9 m³ de volumen y se van suministrando al interior de los paneles por medio de bombas controladas por un equipo de medición del CO₂ que regula las inyecciones para que la concentración final de CO₂ en el interior de la cámara no supere las 10.000 vpm (1% en volumen). El medio de cultivo se fabrica de forma sintética a partir de abonos minerales, procurando que la concentración de nitrógeno (principalmente nitratos) se mantenga entre 100 y 50 ppm. El agua que se pierde por evaporación se repone automáticamente mediante una válvula reguladora de la inyección de agua al sistema, controlada por una sonda de nivel. La cosecha se realiza semanalmente mediante el rascado de la biomasa algal crecida sobre las superficies externas de los paneles. La cosecha puede realizarse de forma manual, aunque también se ha desarrollado un robot que la realiza de forma automática.

El sistema se ha desarrollado también en una planta piloto de mayor escala (100 paneles) en la localidad de Valdecañas (Palencia), donde se estudió el efecto de la orientación de las caras de los paneles y la separación de éstos sobre la producción de biomasa algal (**Figura 5**). El estudio se realizó en el marco de un proyecto INNPACTO (ICT-120000-2010.012), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España, en el que participaron las empresas Essentium Energía S.L. y Assignia Infraestructuras S.A., además de la Universidad Politécnica de Madrid. Durante la experimentación se pudo comprobar la viabilidad del sistema en funcionamiento continuo de larga duración (más de un año seguido), se determinó la mejor orientación de las filas de paneles (N-S) y la separación óptima de las filas (alrededor de 1 m). También se obtuvieron datos de productividad, que variaron sensiblemente en función de la irradiación recibida siendo en el mes de julio en el que se alcanzaron los valores de máxima productividad, estimándose la producción media anual de biomasa cosechada, con un 10 % de materia seca, en una cantidad del orden de las 220 t/ha.

Otra instalación experimental se ha realizado en la localidad de Polán (Toledo) en la planta de tratamiento de purines de la empresa Valpuren (participada de Sener). Esta instalación se realizó para estudiar el comportamiento del sistema con los gases procedentes de los motores de combustión del biogás y los efluentes procedentes del secado de los lodos de digestión de los purines. También se estudió la viabilidad del sistema al aire libre y bajo cubierta de invernadero. La planta constaba de 10 filas, cada una de ellas con 10 paneles, en total, 100 paneles. De las 10 filas, 5 de ellas (50 paneles) estaban bajo cubierta de polietileno y el resto (otras 5 filas) al aire libre (**Figura 6**).

Durante los 6 meses que estuvo funcionando la planta, se comprobó la viabilidad del sistema tanto bajo cubierta, como al aire libre aunque no se pudieron obtener datos fiables de productividad, debido a la falta de estabilidad en las condiciones de operación de la planta de purines. No obstante, se obtuvo un gran número de muestras de la

biomasa algal para su análisis en relación a su utilización potencial como pienso. La composición media de la biomasa algal seca, tenía un contenido en proteína del orden del 40 %; un 17 % de grasa bruta, un 10 % de fibra bruta, un 1 % de fósforo y 2,5 % de lisina.



Figura 3. *Visión de conjunto de la batería de los 6 PBR experimentales en los laboratorios del Grupo de Agroenergética de la UPM*

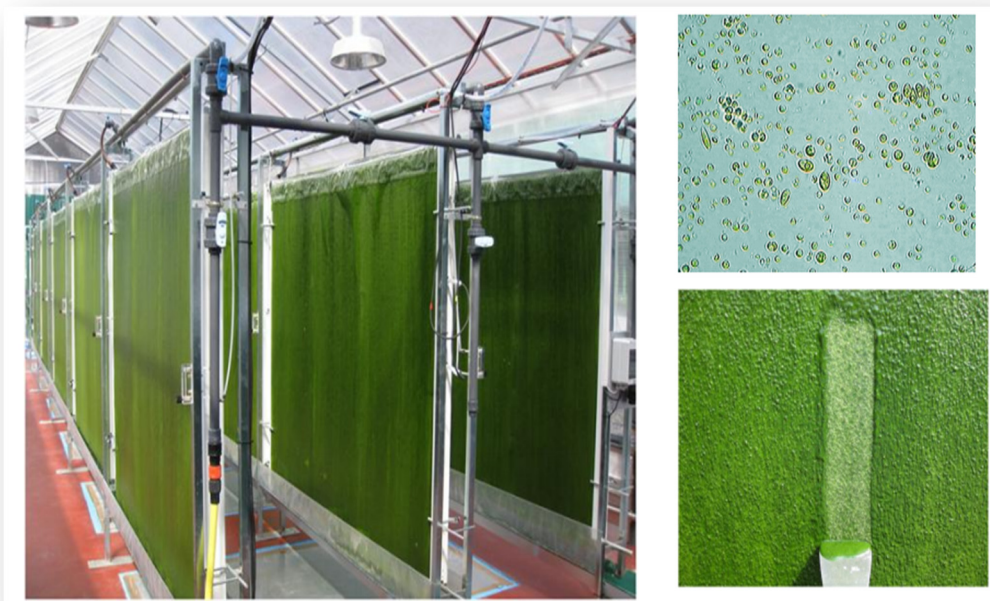


Figura 4. Planta piloto experimental del fotobiorreactor laminar de biofilm, desarrollado por el GA-UPM instalada en enero de 2011 en sus laboratorios, que ha funcionado ininterrumpidamente hasta la actualidad (octubre de 2014). En la parte derecha de la figura se pueden observar microalgas presentes en el medio de cultivo y un momento de la cosecha experimental del biofilm.



Figura 5. Vista de la planta experimental de producción de microalgas mediante el sistema PBRL en Valdecañas (Palencia). Se observan diversas filas de 10 paneles cada una con diversas separaciones entre ellas al objeto de estudiar la influencia de este parámetro sobre la producción de microalgas.



Figura 6. Planta piloto para el estudio de la producción de microalgas por el sistema PBRL en las instalaciones de Valpuren del término de Polán (Toledo) que utiliza como fuente de CO₂ los gases de escape de los motores que queman el biogás producido en la planta y como medio de cultivo el efluente procede del secado de los lodos que se obtienen en la digestión anaerobia de los purines. A la izquierda se presenta una vista de la parte de la instalación protegida con cubierta plástica de polietileno (5 líneas de 10 paneles cada una) y a la derecha la parte de instalación al aire libre (otras 5 líneas de 10 paneles cada una).

Fotobiorreactor de soporte flotante desarrollado por la UPM

(Modelo de Utilidad registrado con el número de referencia ES 1 099 707 U, fecha de prioridad 20. 12. 2013).

Se trata de un fotobiorreactor rotatorio de biodiscos flotantes utilizable para la depuración de aguas residuales y producción de biomasa algal. Este sistema está formado por diversos elementos, estando el cuerpo principal formado por un conjunto de discos que giran arrastrados por un eje central paralelo a la superficie del agua. Entre cada 2 discos existen unos elementos separadores, que a la vez actúan como flotadores. El conjunto gira en posición perpendicular a la superficie de un medio acuoso sin necesidad de cojinetes ni soportes mecánicos, sustentado por el empuje del agua, según el Principio de Arquímedes.

A medida que el sistema funciona en el medio acuoso contaminado con materia orgánica y/o elementos eutrofizantes, se van desarrollando sobre ambas caras de cada disco un conjunto de microorganismos, que llegan a formar una película continua que constituye el denominado "biofilm".

El elemento propulsor del conjunto está formado por una rueda hidráulica que gira alrededor de su eje debido al peso del agua que reciben los cangilones, proporcionando al eje de la rueda un par motor proporcional al peso del agua y a la proyección horizontal del radio de giro del centro de gravedad de cada cangilón con el agua (propulsión hidrobárica).

El eje de giro de la rueda, que actúa como eje motor, se conecta al eje de arrastre de los biodiscos ya sea directamente o a través de una junta cardan y transmite a éste su

movimiento de giro. Para lograr que ambos ejes estén en el mismo plano vertical, se colocan elementos centradores del eje de arrastre.

Los biodiscos que forman el cuerpo del fotobiorreactor están fabricados en material plástico rígido y están recubiertos por ambas caras por una lámina que facilita la formación del biofilm. Los microorganismos que forman el biofilm pueden ser autótrofos (algas), heterótrofos (hongos y bacterias) o una mezcla de ambos grupos.

Por el otro extremo del eje motor que no ha sido utilizado para mover el eje de arrastre, a través de un embrague, se puede transmitir el movimiento a un tornillo sinfín situado en el fondo del lecho acuático que tiene forma de tolva longitudinal. Este tornillo sinfín sirve para arrastrar la biomasa que se deposita en el fondo de la tolva, hasta una arqueta en la que una bomba sumergida la recoge y la envía junto con el agua del medio a un tamiz en el que se separa del medio acuoso.

El sistema puede llevar incorporado una tubería porosa que recorra toda la parte inferior del lecho acuoso y por la que se pueda hacer borbotear aire atmosférico para oxigenar el medio de cultivo, cuando se desee eliminar materia orgánica disuelta, o aire enriquecido en CO₂ para favorecer el desarrollo de las microalgas.

El conjunto de los discos y el medio de cultivo puede tener una cubierta abatible que aisle los biodiscos de la atmósfera exterior y que sea transparente a la luz cuando se quiera producir biomasa algal. La finalidad de esta cubierta puede ser para protección térmica y/o para confinar la atmósfera con los gases emitidos por la tubería porosa.

El sistema descrito puede ser utilizado para la depuración de aguas residuales con carga orgánica alta y media, para depuración de vertidos eutrofizantes ricos en nitrógeno y fósforo y para producción de biomasa algal.

Cuando el sistema se utilice para eliminar carga orgánica de las aguas residuales, los principales microorganismos que van a actuar van a ser de tipo heterótrofo, por lo que no necesitan recibir radiación luminosa y por lo tanto, la separación entre los discos debe ser la mínima posible para aumentar el número de discos por unidad lineal de eje, debiendo estar comprendida entre 2 y 3 cm para facilitar simultáneamente el desprendimiento natural de los biofilmes que se formen en cada cara, sin que lleguen a contactar los biofilmes de dos caras opuestas de discos consecutivos.

Cuando el sistema se utilice para eliminar nitrógeno y fósforo de efluentes terciarios de estaciones depuradoras que se vierten con baja carga orgánica pero con elementos eutrofizantes, la separación entre los discos debe estar comprendida entre 5 y 12 cm, al objeto que las radiaciones solares puedan penetrar al interior del espacio interdiscal y proyectarse sobre las superficies de los discos, favoreciendo así el desarrollo de una abundante población de microalgas que absorben el nitrógeno, fósforo y otros elementos minerales del agua y por medio del proceso fotosintético forman la parte más abundante de la biomasa que forma el biofilm que se adhiere a las superficies de los discos.

En la **Figura 7** se muestra un fotobiorreactor rotatorio de eje flotante, existente en las instalaciones del Grupo de Agroenergética de la UPM, que funciona como planta piloto.



Figura 7. Fotobiorreactor rotatorio de eje flotante, existente en las instalaciones del Grupo de Agroenergética de la UPM, que funciona como planta piloto. El sistema tiene un total de 64 discos de 1 m de diámetro aproximadamente. Al fondo se aprecia la rueda hidráulica motriz (propulsor hidrobárico).

Capacidad de las microalgas para la depuración de efluentes procedentes del reactor biológico (secundario) de las EDAR.

El tratamiento aerobio de las EDAR (estaciones de depuración de aguas residuales) normalmente conocido como “secundario” o “biológico”, reduce la carga orgánica (DBO y DQO) pero una parte importante de los nutrientes minerales (principalmente nitrógeno y fósforo) se vierten al medio si la planta no dispone de un sistema de depuración terciaria. Las microalgas son capaces de utilizar estos nutrientes minerales para formar su biomasa, siempre que dispongan de radiación luminosa suficiente para realizar la fotosíntesis y de una fuente de CO₂ (normalmente el aire atmosférico o gases de emisión de plantas de combustión). Por este motivo, alimentando un sistema productor de biomasa de microalgas con el efluente de salida del tratamiento secundario de una EDAR se puede lograr la producción de biomasa algal a la vez que se consigue una reducción en el nivel de elementos minerales que se vierten al medio, principalmente N y P. La reducción de estos elementos en el vertido va a depender principalmente de la producción de biomasa algal y del contenido de ésta en N y P, aunque también podría haber procesos de desnitrificación biológica, lo que aumentaría la reducción de este elemento eutrofizante en el vertido.

La producción de microalgas depende mucho de la temperatura y de la radiación solar que reciba el sistema, referido a la superficie del suelo. Moviéndonos en un plano realista se pueden obtener producciones medias del orden de los 10 g de materia seca por día y por m² de superficie de suelo ocupado por el fotobiorreactor. El contenido medio en N y P de la biomasa algal se puede estimar en un 7,5 % y 1,15 % respectivamente referido a

peso seco de la biomasa cosechada, por lo que de cada kg seco de biomasa algal producida se estarán retirando del medio de cultivo 75 g de nitrógeno y 11,5 g de fósforo. Estas cifras corresponden a una situación conservadora dentro de la tecnología existente actualmente. Evidentemente, cuanto mayor sea la producción de microalgas por unidad de superficie, mayor será la reducción de elementos eutrofizantes en el medio. La producción media de 10 g de materia seca $m^{-2} \text{ dia}^{-1}$ supone una producción media anual de 36,5 toneladas de materia seca por hectárea de cultivo, siendo frecuente encontrar en la bibliografía cantidades muy superiores a dicha cifra, por lo que, si dichas cantidades son sostenidas en el tiempo, las condiciones de depuración serán mucho mayores.

Referencias bibliográficas

Adey, W.H. (1982). Algal turf scrubber. United States Patent & Trademark Office # 4333263. 8 Junio, 1982.

Christenson L. (2011). Algal biofilm production and harvesting system for wastewater treatment with biofuels by-products. All Graduate Theses and Dissertations. Paper 994. Utah State University. <http://digitalcommons.usu.edu/etd/994>

Fernández J. (2010). Fotobiorreactor laminar para producción de microalgas. Patente ES 2 347 515 B2, de la Universidad Politécnica de Madrid, de fecha de prioridad 03.05.2010

Fernández J. (2013). Fotobiorreactor de soporte flotante. Modelo de Utilidad ES 1 099 707 U, de la Universidad Politécnica de Madrid, de fecha de prioridad 20.12.2013.

Johnson M.B. (2009). Microalgal biodiesel production through a novel attached cultured system and conversion parameters. Master Science Thesis. Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University. <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-04292009-160208/unrestricted/ETD2.pdf>

Naumann T., Cebi Z., Podola B., Melkonian M. (2012). Growing microalgae as aquaculture feeds on twin-layers: a novel solid-state photobioreactor. *Journal of Applied Phycology* 25(5): 1413-1420.

Ozkan A., Kinney K., Katz L., Berberoglu H. (2012). Reduction of water and energy requirement of algae cultivation using an algae biofilm photobioreactor. *Bioresource Technology* 114: 542-548.