

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 018 758**

51 Int. Cl.:

C12M 1/04 (2006.01)

C12M 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **01.07.2016 PCT/IB2016/053966**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.01.2017 WO17002084**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.07.2016 E 16817361 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.01.2025 EP 3317393**

54 Título: **Procedimiento de producción de microalgas y equipo**

30 Prioridad:

01.07.2015 GB 201511545

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.05.2025

73 Titular/es:

**NELSON MANDELA UNIVERSITY (100.00%)
Room 1207, 12th Floor, Main Building, Nelson
Mandela Metropolitan University Summerstrand
Campus (South), University Way, Summerstrand
6031 Port Elizabeth, ZA**

72 Inventor/es:

**ZEELIE, BERNARD y
BARNARD, JOHAN PIETER**

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 3 018 758 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de producción de microalgas y equipo

5 **Campo de la invención**

Esta invención se refiere a un procedimiento y a un equipo para el cultivo de microalgas que pueden usarse para muchos fines diferentes.

10 **Antecedentes de la invención**

Los sistemas de cultivo de microalgas más del estado de la técnica se clasifican en general en dos grandes categorías, en concreto, sistemas cerrados (tecnología de fotobiorreactores) y sistemas abiertos (tecnología de estanques abiertos o canales de conducción).

15 Los fotobiorreactores son sistemas de cultivo en los que la luz pasa a través de las paredes transparentes del reactor, fabricadas con material resistente a los rayos UV, para llegar a las células de microalgas que se cultivan dentro del reactor.

20 Los estanques abiertos o canales de conducción, por otro lado, son sistemas abiertos en los que la luz solar incide en la superficie de un medio de cultivo líquido que típicamente circula por un canal sin fin conocido como canalización. Ambos tipos de sistemas de cultivo tienen sus ventajas y sus inconvenientes.

25 Los sistemas abiertos son sencillos y relativamente baratos de construir; requieren una mano de obra mínima para su funcionamiento y mantenimiento; pero son más susceptibles a la contaminación microbiana y a otras fuentes que los fotobiorreactores de sistema cerrado. Los estanques abiertos también experimentan en mayor medida la pérdida de agua por evaporación. Una de las principales deficiencias de una canalización tradicional es su escasa relación superficie a volumen, que tiene un impacto directo en la capacidad del sistema para capturar fotones de forma eficaz. Una segunda deficiencia principal de los sistemas abiertos es que tienen muy poca capacidad de absorción de CO₂ debido a su naturaleza generalmente poco profunda (altura media de crecimiento líquido).

30 Los fotobiorreactores, por otro lado, tienen un riesgo sustancialmente menor de contaminación; minimizan las pérdidas de agua; y proporcionan un mayor control de las variables que afectan al crecimiento de las microalgas, tales como la mejora de las relaciones superficie a volumen y la absorción de CO₂. Sin embargo, esto se produce a expensas de un capital, mantenimiento y costes de explotación elevados. Los diseños de fotobiorreactores tubulares necesitan normalmente un compresor o soplador de aire y una bomba centrífuga para la circulación del cultivo y el intercambio de gases. La eficiencia energética en términos de productividad de la biomasa por consumo energético es siempre de vital importancia.

40 Los sistemas híbridos combinan características de los estanques abiertos y los fotobiorreactores. Se han descrito dos tipos principales de sistemas híbridos. Uno se encuentra en forma de estanque abierto cubierto que reduce la posibilidad de contaminación, pérdidas por evaporación y desorción y pérdida de CO₂. El otro tipo es un diseño tubular parcialmente lleno ensanchado y aumentado para aproximarse a un estanque abierto, teniendo este diseño como principal objetivo reducir los costes.

45 Los sistemas híbridos de estos tipos generales han sido evaluados para su cultivo comercial. El documento EP2712917 divulga un fotobiorreactor de tipo estanque de canalización con pozos de carbonación.

50 La exposición anterior de los antecedentes de la invención sólo pretende facilitar la comprensión de la presente invención. Debe tenerse en cuenta que la exposición no supone un reconocimiento o admisión de que cualquiera de los materiales a los que se hace referencia formaba parte del conocimiento general común en la técnica en la fecha de prioridad de la solicitud.

55 **Sumario de la invención**

De acuerdo con esta invención se proporciona un equipo de cultivo de microalgas para el cultivo de microalgas, teniendo el equipo de cultivo un componente de canalización con una canalización que define un canal sin fin para la circulación de medio de crecimiento líquido en el mismo por medio de una disposición de inducción de flujo para inducir un flujo de medio de crecimiento líquido dentro del canal sin fin de la canalización, estando el equipo de cultivo caracterizado por que tiene un segundo componente integrado que comprende múltiples columnas de fotobiorreactores verticales espaciadas entre sí a lo largo de la longitud de la canalización y que están soportadas en una condición vertical de tal manera que sus extremos inferiores descargan, durante el uso, el medio de crecimiento líquido en el medio de crecimiento líquido en la canalización, una instalación de fomento de la circulación para hacer que el medio de crecimiento líquido circule del componente de canalización a través de las columnas de fotobiorreactores para ser descargado de nuevo en la canalización; y una o más entradas de gas para proporcionar burbujas de gas, durante el uso, pasando hacia arriba en cada una de las columnas de fotobiorreactores.

Otras características de la invención prevén que el equipo esté configurado de tal manera que, durante el uso, una superficie expuesta del medio de crecimiento a la luz directa o a la luz solar en las columnas de fotobiorreactores esté entre el 50 y el 200 % de la de una superficie expuesta del medio de crecimiento en la canalización solo sin las columnas de fotobiorreactores y, preferentemente, del 50 al 120 %; que las columnas de fotobiorreactores integradas contengan entre el 5 y el 30 % del volumen total del medio de crecimiento líquido en el equipo de cultivo con canalización modificada; que el canal sin fin tenga una forma generalmente ovalada en una vista en planta; que los extremos inferiores de las columnas de fotobiorreactores estén dispuestos para sumergirse en medio de crecimiento líquido en la canalización, durante su uso; que la disposición de inducción de flujo sea una o más ruedas de paletas horizontales giratorias por una fuente de energía como un motor eléctrico o, como alternativa, que uno o más chorros de agua se dirijan en la dirección general en la que debe inducirse el flujo dentro del canal de canalización, o ambas cosas; que la instalación de circulación sea una o más bombas de bajo cizallamiento para extraer el medio de crecimiento líquido del componente de canalización y transferirlo directamente a las regiones superiores de las columnas de fotobiorreactores o, como alternativa, mediante una tubería de colector que interconecte los extremos superiores de las columnas de fotobiorreactores a fin de distribuir el medio de crecimiento líquido a los extremos superiores de múltiples columnas de fotobiorreactores; como alternativa, que una bomba de bajo cizallamiento bombee el medio de crecimiento líquido a las columnas de fotobiorreactores desde la parte inferior para hacer que fluya hacia arriba y rebose de nuevo en la canalización por medio de un tubo de rebose separado convenientemente concéntrico con la columna de fotobiorreactores; y que un depósito de separación de gas elevado se asocie a los extremos superiores de las columnas de fotobiorreactores para descargar gases enriquecidos en oxígeno de las columnas de fotobiorreactores y para que funcione como una zona de desempañado a fin de inhibir la pérdida de líquido de las columnas de fotobiorreactores verticales.

Otras características más de la invención prevén que se proporcione una entrada para aire enriquecido en CO₂ que se inyectará en cada columna de fotobiorreactores individual a fin de permitir el control del CO₂ disponible en el interior de todo el cuerpo del medio de crecimiento aumentando o disminuyendo el caudal de líquido a través de las columnas de fotobiorreactores o aumentando o disminuyendo la concentración de CO₂ en el aire, o ambas cosas; que la propia canalización no tenga entradas para gas directamente a la canalización; que una cantidad suficiente de aire se mezcle con CO₂ presente en los gases introducidos en el medio de crecimiento líquido para provocar una turbulencia en el interior de las columnas de fotobiorreactores; que se proporcione un monitor de pH para controlar el pH del medio de crecimiento con límites estrechos mediante el ajuste del contenido de CO₂ del aire usado para inyectar las columnas de fotobiorreactores verticales o mediante el ajuste de la velocidad de flujo del medio de crecimiento a través de las columnas de fotobiorreactores verticales; y que las columnas de fotobiorreactores tengan una o más tuberías de salida dispuestas generalmente en posición horizontal para devolver el medio de crecimiento líquido a la canalización por debajo de la superficie de líquido del medio de crecimiento en la canalización y que, opcionalmente, pueden estar inclinados en una dirección diferente de la dirección general del flujo en la canalización y, más concretamente, pueden estar dirigidos hacia arriba o hacia abajo con respecto a la dirección general del flujo en la canalización o inclinados en un ángulo lateral con respecto a la dirección general del flujo o ambas cosas, con el fin de crear una acción de mezcla deseada de algas y de medio de crecimiento líquido en la canalización.

Ha de entenderse que, como regla general, mientras que los extremos inferiores de las columnas de fotobiorreactores se extenderán generalmente en el medio de crecimiento líquido de la canalización, no es esencial que se emplee esta disposición y las columnas de fotobiorreactores podrían disponerse de forma que quedaran algo desplazadas de la canalización, sin dejar de suministrar medio de crecimiento líquido al medio de crecimiento líquido de la canalización.

Cabe señalar que la expresión columna de fotobiorreactores, como se usa en esta memoria descriptiva, significa una columna tubular dentro de la cual puede tener lugar el movimiento del medio de crecimiento líquido.

Con el fin de que lo anterior y otras características de la invención pueda ser mejor comprendida, se presenta a continuación una realización de la misma y una descripción ampliada de la invención con referencia a los dibujos adjuntos.

Breve descripción de los dibujos

En los dibujos:

Figura 1 es un alzado esquemático de una realización del prototipo de acuerdo con la invención;

Figura 2 es una vista en planta de la misma;

Figura 3 ilustra esquemáticamente en alzado un patrón de flujo dentro de una columna de fotobiorreactores vertical;

Figura 4 ilustra esquemáticamente en alzado un patrón de flujo alternativo dentro de una columna de fotobiorreactores vertical;

Figura 5 ilustra esquemáticamente en alzado una columna de fotobiorreactores independiente que usa el patrón de

flujo alternativo ilustrado en la Figura 4;

Figura 6 ilustra esquemáticamente en alzado una columna de fotobiorreactores independiente alternativa que usa el patrón de flujo alternativo ilustrado en la Figura 4;

Figura 7 es una vista en planta esquemática de una serie de canalizaciones situadas dentro de un área geográfica específica;

Figura 8 es una comparación gráfica entre el rendimiento de una canalización modificada de acuerdo con la invención y una canalización normal;

Figura 9 es una comparación gráfica entre el rendimiento de una canalización modificada de acuerdo con la invención y un conjunto de columnas de fotobiorreactores verticales convencionales; y,

Figura 10 es un gráfico que ilustra la eficacia del equipo de cultivo con canalización modificada para transferir CO₂ eficazmente de la fase gaseosa a la fase líquida y compara la variación del pH del equipo de cultivo con canalización normal con la variación del pH del equipo de cultivo con canalización modificada.

Descripción detallada con referencia a los dibujos

En la realización del prototipo de equipo de cultivo de microalgas ilustrado en las Figuras 1 y 2 de los dibujos, el equipo de cultivo de microalgas para el cultivo de microalgas incluye una canalización (1) que define un canal sin fin para la circulación del medio de crecimiento líquido en el mismo, como se muestra en la Figura 2. Múltiples columnas de fotobiorreactores generalmente verticales (2) están espaciadas entre sí a lo largo y ancho de la canalización y se sostienen en posición vertical con sus extremos inferiores sumergidos, durante el uso, en el medio de crecimiento líquido contenido en la canalización de tal manera que el medio de crecimiento pueda descargarse de las columnas de fotobiorreactores directamente en la canalización y por debajo de la superficie del medio de crecimiento líquido contenido en la canalización. Las columnas de fotobiorreactores pueden fijarse en el fondo de la canalización; haciendo que se apoyen en el fondo de la canalización soportados por su propio peso; o pueden soportarse de cualquier forma adecuada, por ejemplo, mediante un bastidor de soporte al que pueden fijarse o del que pueden suspenderse.

La parte inferior de una columna de fotobiorreactores vertical puede estar hecha de cualquier material adecuado y duradero, tal como policloruro de vinilo no plastificado y puede adoptar cualquier forma adecuada que permita desarrollar patrones de flujo de líquido satisfactorios, como se contempla en la presente invención.

La parte superior de la columna de fotobiorreactores puede estar hecha de cualquier material transparente capaz de dejar pasar la luz visible al medio de crecimiento contenido en la columna de fotobiorreactores. Los ejemplos de materiales adecuados incluyen policloruro de vinilo plastificado transparente, policarbonato, poli(metacrilato de metilo) como el que se vende con el nombre comercial Perspex™, etc. Es preferible que el material transparente sea lo más fino posible a fin de reducir el coste de construcción y permitir el paso de la máxima cantidad de luz al medio de crecimiento. En cuanto al cloruro de polivinilo plastificado, se prefieren espesores de pared de 0,5 a 1 mm, mientras que para el policarbonato, el espesor de pared puede variar entre un mínimo de 0,3 a 0,75 mm, manteniendo al mismo tiempo una integridad estructural suficiente para soportar una columna de agua que puede variar de 1,0 a 1,6 m de altura y hasta 0,30 m y, más generalmente, aproximadamente 0,25 m de diámetro.

El diámetro de la columna de fotobiorreactores se elige preferentemente de modo que al menos duplique la superficie disponible del medio de crecimiento para la captura de fotones, mientras que, al mismo tiempo, se calcula que la capacidad de retención total de todas las columnas de fotobiorreactores se sitúa entre el 20 y el 30 % del medio de crecimiento del sistema de cultivo integrado total.

Las columnas de fotobiorreactores de menor diámetro son más eficaces desde el punto de vista de la captura de fotones debido a la penetración de la luz en el medio de crecimiento, pero tienen una capacidad de retención del medio de crecimiento significativamente menor en comparación con las columnas de fotobiorreactores de mayor diámetro. Es preferible que el diámetro de las columnas de fotobiorreactores se aproxime mucho a la profundidad total del medio de crecimiento en la parte de la canalización del sistema de crecimiento, que típicamente varía de 150 mm a 300 mm. Por esta razón, se prefieren diámetros de columna de fotobiorreactores de 100 a 300 mm y, más preferentemente, de 120 a 250 mm.

En la disposición ilustrada en las Figuras 1 y 3, se proporciona una bomba de bajo cizallamiento (3) para extraer el medio de crecimiento líquido de la canalización y transferirlo de una región superior de las columnas de fotobiorreactor a una tubería de colector (4) que interconecta los extremos superiores de las columnas de fotobiorreactores, de modo que el medio de crecimiento líquido se distribuye a los extremos superiores de todas las columnas de fotobiorreactores. El tamaño de la tubería de colectora (4) y de las columnas de suministro a la parte superior de cada columna de fotobiorreactores puede dimensionarse de forma que se garantice caudales iguales o casi iguales en cada columna de fotobiorreactores individual.

De este modo, el medio de crecimiento líquido circula desde el canal a través de la tubería de colector hasta los extremos superiores de las columnas de fotobiorreactores y fluye hacia abajo por las columnas de fotobiorreactores para descargarse de nuevo en la canalización por su extremo inferior, por debajo de la superficie de líquido de la canalización. Una restricción en forma de tubería de salida de pequeño diámetro (5) en la parte inferior de cada columna de fotobiorreactores controla el flujo de salida del medio de crecimiento líquido hacia la canalización. Equilibrando cuidadosamente la velocidad de entrada y salida en las columnas de fotobiorreactores verticales, se puede controlar la altura del líquido del medio de crecimiento en las columnas de fotobiorreactores verticales. Es preferible que la altura del líquido sea lo más alta posible para maximizar la superficie del medio de crecimiento expuesta a la luz. Las tuberías de salida de pequeño diámetro están dispuestas generalmente en horizontal, pero pueden estar algo inclinadas hacia arriba o hacia abajo con respecto a la dirección general del flujo y/o inclinadas en un ángulo lateral con respecto a la dirección general del flujo, al menos hasta cierto punto, con el fin de crear una acción de mezcla deseada de algas y de medio de crecimiento líquido en la canalización.

Una disposición de entrada de gas (14) proporciona burbujas de gas en forma de aire enriquecido con CO₂ que pasan hacia arriba en cada una de las columnas de fotobiorreactores durante el uso con el fin de poner a disposición un suministro de CO₂ para el crecimiento de las microalgas y también para proporcionar una agitación para potenciar el crecimiento de las microalgas. El aire enriquecido con CO₂ se inyecta en cada tubo de fotobiorreactores individual y no directamente en la canalización a fin de controlar el CO₂ disponible en todo el sistema de crecimiento que comprende el estanque de canalización y las columnas de fotobiorreactores verticales, bien aumentando el caudal de líquido a través de la columna de fotobiorreactores, bien aumentando la concentración de CO₂ en el aire, o ambas cosas.

En un sistema de crecimiento cuidadosamente equilibrado, el CO₂ estará disponible para las microalgas en crecimiento a través del equilibrio químico:



A medida que desciende el nivel de CO₂, se libera más NaOH y el pH del medio de crecimiento aumenta. Garantizar unas condiciones de crecimiento que no estén limitadas por el carbono debido a la escasez de CO₂ disponible, el equilibrio anterior debe mantenerse continuamente en equilibrio para que la tasa de suministro de CO₂ mediante la inyección de aire enriquecido con CO₂ a través de las columnas de fotobiorreactores verticales coincida con la tasa a la que las microalgas consumen CO₂ durante la fotosíntesis.

Esto puede lograrse muy convenientemente supervisando el pH del medio de crecimiento líquido mediante un monitor de pH (9), de modo que el pH del medio de crecimiento en todo el sistema de crecimiento se mantenga entre límites muy estrechos. Para la mayoría de las especies de microalgas, el intervalo óptimo de pH se sitúa aproximadamente en la región de 7,5 a 8,5 y, en un sistema de crecimiento cuidadosamente equilibrado, la variación del pH no debería superar las 0,5 unidades de pH mediante el suministro y la absorción eficaces de CO₂, como se ha indicado anteriormente.

Para los expertos en la materia debería ser obvio que durante los periodos de baja actividad fotosintética, la tasa de asimilación de CO₂ por las microalgas será baja y el suministro de CO₂ puede reducirse bien reduciendo la concentración de CO₂ en el aire de inyección, bien reduciendo la tasa de recirculación del medio de crecimiento. Durante los periodos sin actividad fotosintética, la recirculación puede detenerse por completo y reducirse la concentración de CO₂ en el aire de inyección, poniendo fin al suministro de CO₂ al aire de inyección.

Durante los periodos de alta actividad fotosintética, el suministro de CO₂ debe aumentarse como se contempla más arriba para mantener los niveles de pH del medio de crecimiento dentro de los estrechos límites especificados.

Con el fin de mantener el equilibrio del pH de todo un sistema de crecimiento mediante la manipulación del suministro de CO₂, se pueden alcanzar tasas de crecimiento máximas evitando las condiciones de crecimiento limitadas por el carbono. La consecución de este objetivo concreto requiere que se suministre suficiente CO₂ en una amplia variedad de condiciones ambientales y, por consiguiente, un amplio intervalo de tasas de crecimiento. En particular, el suministro de CO₂ debería poder cumplir estos objetivos incluso en las condiciones más exigentes de CO₂, es decir, cuando las tasas de crecimiento son muy altas. Tales condiciones prevalecen cuando la temperatura ambiental se encuentra en el rango óptimo para el crecimiento de las microalgas, hay altos niveles de luz solar, hay niveles suficientes de macro- y micronutrientes en el medio de crecimiento líquido y la concentración de microalgas dentro del medio de crecimiento es alta. Para alcanzar tasas suficientes de sustitución de CO₂ en tales condiciones es importante que dentro del sistema de crecimiento haya suficientes elementos de columna verticales donde se pueda suministrar CO₂. Es preferible que el número y tamaño de dichas columnas verticales sea suficiente para contener entre el 5 y el 30 % de la cantidad total de medio de crecimiento contenido en todo el sistema de crecimiento.

Una o más ruedas de paletas horizontales (16) se sumergen en el medio nutriente líquido en la canalización de tal manera que al girar por una fuente de energía adecuada, como un motor eléctrico (17), se crea un flujo de medio de crecimiento líquido dentro del canal sin fin de la canalización a lo largo de su longitud. La velocidad de flujo lineal del

medio de crecimiento a lo largo del canal sin fin ha sido objeto de numerosos estudios y debe ser suficiente para minimizar la sedimentación de las microalgas del medio de crecimiento. Las velocidades de flujo lineal de entre 20 y 30 cm/segundo suelen considerarse suficientes.

- 5 Un depósito de separación de gas elevado (15) puede estar asociado a los extremos superiores de las columnas de fotobiorreactores y al tubo de colector para descargar los gases enriquecidos en oxígeno del fotobiorreactor y actuar como desnebulizador para limitar la pérdida de agua de las columnas de fotobiorreactores inyectadas de manera continua.
- 10 Una de las principales deficiencias de una canalización tradicional es su escasa relación superficie a volumen, que tiene un impacto directo en la capacidad del sistema para capturar fotones de forma eficaz. En un ejemplo típico del sistema descrito de acuerdo con esta invención, se han añadido columnas de fotobiorreactores verticales con una altura de líquido de 1,4 m por encima de la superficie del medio de crecimiento líquido en la canalización de 250 mm de profundidad a intervalos de 1 m a lo largo de la longitud de la canalización. Así, para un sistema con unas
- 15 dimensiones de aproximadamente 14 metros de longitud de canalización; una anchura de 1 metro; y 13 columnas de fotobiorreactores verticales, la relación superficie a volumen de la canalización sin columnas verticales sería de 4 (volumen = 3,786 m³; área = 15,143 m²). Sin embargo, con las columnas de fotobiorreactores añadidas, la relación aumenta a 6,3 (volumen = 4,68 m³; área = 29,50 m²). Esto representa un aumento de aproximadamente el 95 % de la superficie disponible, lo que prácticamente duplica la superficie efectiva del sistema de canalización. El medio de
- 20 crecimiento contenido en los trece elementos de fotobiorreactores de columnas verticales representa aproximadamente el 19 % de la capacidad total de retención de medio de crecimiento del sistema de crecimiento.

Aparte de una pobre relación superficie a volumen, las canalizaciones tradicionales también experimentan tasas de transferencia de masa gas-líquido deficientes. Esto se debe principalmente a la escasa profundidad de estos sistemas de cultivo, en los que la profundidad del líquido típicamente varía entre aproximadamente 0,25 y 0,35 m. Al aumentar eficazmente la altura del sistema de canalización mediante las columnas de fotobiorreactores verticales, la eficacia de la transferencia de masa gas-líquido del sistema puede mejorarse significativamente introduciendo los gases en las columnas de fotobiorreactores en lugar de en la propia canalización.

- 30 Como alternativa al uso de un tubo de colector elevado para alimentar con medio nutritivo líquido la columna de fotobiorreactores, el medio nutritivo líquido puede alimentarse desde la parte inferior de cada tubo de fotobiorreactores vertical y, en tal caso, se proporciona un rebosadero en la parte superior de la columna de fotobiorreactores vertical hacia un tubo de drenaje por gravedad central (8) para controlar la altura del líquido en la columna de fotobiorreactores, como se muestra en la Figura 4.

35 Las columnas de fotobiorreactores pueden, como se ilustra en las Figuras 5 y 6, constar de dos partes, en concreto, una parte inferior (11) que puede tener una placa de base (12) para que la columna de fotobiorreactores llena sea autoportante y una parte tubular superior (13) soportada por la parte inferior. En dicho caso, la parte inferior de cada columna de fotobiorreactores vertical puede estar hecha de cualquier material adecuado y duradero, tal como policloruro de vinilo rígido no plastificado y puede adoptar cualquier forma adecuada que permita patrones de flujo de

40 líquido, como se contempla en la presente invención. En la disposición ilustrada en la Figura 5, el fondo de la parte inferior puede fijarse directamente a la placa de base. En el caso ilustrado en la Figura 6, la parte inferior puede tener una entrada cónica dirigida hacia arriba para el medio nutriente líquido suministrado por la bomba de bajo cizallamiento (7).

45 Una disposición de entrada de gas (14) proporciona burbujas de gas en forma de aire enriquecido con CO₂ que pasan hacia arriba en cada una de las columnas de fotobiorreactores durante el uso con el fin de poner a disposición un suministro de CO₂ para el crecimiento de las microalgas y también para proporcionar una agitación para potenciar el crecimiento de las microalgas. El aire enriquecido con CO₂ se inyecta en cada columna de fotobiorreactores individual y no directamente en la canalización a fin de controlar el CO₂ disponible en todo el sistema de crecimiento que comprende la canalización y las columnas de fotobiorreactores verticales, bien aumentando el caudal de líquido a través de las columnas de fotobiorreactores, bien aumentando la concentración de CO₂ en el aire, o ambas cosas.

50 Debido a la mezcla turbulenta en el interior de la columna de fotobiorreactores vertical en cada caso, se espera que la diferencia en la eficiencia de transferencia de masa entre los patrones de flujo en contracorriente y de flujo en co-corriente sea prácticamente insignificante.

El diseño de canalización modificada reduce drásticamente el número de columnas de fotobiorreactores verticales requeridas por área unitaria en comparación con un sistema de crecimiento que comprende únicamente una columna de fotobiorreactores vertical. Como ejemplo, para un sistema de crecimiento con una capacidad total de medio de crecimiento de aproximadamente 2000 m³, un sistema tubular requeriría aproximadamente 27.000 columnas verticales (cada columna contendría aproximadamente 76 l), pero para una canalización modificada con la misma capacidad de medio de crecimiento de 26 canalizaciones únicas con una capacidad de aproximadamente 80 m³ por canalización, el número de columnas necesarias se reduce a sólo 5500. Esto no sólo representa un importante ahorro en costes de capital, sino también en los costes de explotación. La Figura 7 ilustra una disposición de múltiples canalizaciones

65 ovoides que pueden disponerse en una superficie de terreno.

Al probar el sistema descrito anteriormente, se inyectó aire enriquecido con CO₂ a razón de 1,5 l de aire por kilogramo de medio de crecimiento/h en la columna de fotobiorreactores vertical de un sistema de fotobiorreactor tubular y a la misma tasa en la columna de fotobiorreactores vertical de la canalización modificada. Dado que el volumen de aire necesario para el sistema de cultivo con canalización modificada viene determinado por el volumen de medio de crecimiento contenido únicamente en la columna de fotobiorreactores vertical y no por todo el volumen del sistema de crecimiento, la reducción comparativa del volumen de la mezcla de aire necesaria es de aproximadamente el 80 %, lo que supone un importante ahorro de energía. Aunque la canalización modificada requiere el bombeo del medio de crecimiento a través de la columna de fotobiorreactores vertical, el bombeo de agua es significativamente más eficiente desde el punto de vista energético que el soplado de aire y el bombeo sólo es necesario durante los periodos fotosintéticos activos, mientras que el aire requiere una inyección las 24 horas del día con fines de agitación. En la Figura 7 se ilustra gráficamente la comparación del rendimiento de crecimiento de estos dos sistemas de cultivo (tubular frente a canalización modificada) durante un periodo de prueba de 140 horas y se observa que la comparación es muy favorable si se tiene en cuenta el ahorro en costes de capital y de funcionamiento.

Otra característica de la canalización modificada en comparación con una canalización tradicional es el cambio en el patrón de flujo de líquido alrededor de la canalización. En una canalización tradicional, la mezcla vertical del medio de crecimiento está bastante restringida, especialmente para canalizaciones grandes con grandes distancias entre mezcladores de ruedas de paletas. En la canalización modificada, sin embargo, las columnas verticales situadas en el centro de la corriente de flujo dan lugar a áreas de alta y baja presión del líquido antes y después de la columna. El resultado es un movimiento ascendente del líquido en el lado de alta presión de la columna, mientras que en el lado opuesto se obtiene un movimiento descendente, como se indica en la Figura 4.

Asimismo, dirigiendo los flujos de salida en la parte inferior de las columnas, como se muestra en las Figuras 2 y 3, se puede mejorar tanto el flujo vertical como el flujo lateral a lo largo de los lados de la canalización. Esta mejora de la mezcla vertical en la parte del canal del sistema de cultivo con canalización modificada no sólo mejora la capacidad de captura de fotones de la parte del canal del sistema de cultivo al mover las células de microalgas hacia y desde la superficie del medio de crecimiento, sino que también mejora significativamente la capacidad de carga (definida como la cantidad máxima de biomasa que puede soportar el medio de crecimiento antes de que la biomasa empiece a sedimentarse fuera del medio de crecimiento) en comparación con un sistema de cultivo con canalización tradicional, como muestran los resultados comparativos de la Tabla 1. Las capacidades de carga elevadas son muy deseables, ya que cuanto mayor sea la capacidad de carga, mayor será la productividad del sistema.

El sistema de canalización modificada de la invención es fácil de construir, operar y mantener. Su funcionamiento básico es esencialmente el mismo que el llevado a la práctica para los sistemas de canalización normales y puede funcionar en modos discontinuo, semidiscontinuo o continuo. Una comparación entre la acumulación de biomasa para un sistema de cultivo con canalización tradicional y el sistema de canalización modificada se ilustra gráficamente durante un periodo de prueba de 180 horas en la Figura 6, de la que se desprende que la comparación es muy favorable teniendo en cuenta las condiciones mejoradas.

Tabla 1: Medidas comparativas del rendimiento de crecimiento de tres sistemas de cultivo

	Canalización modificada	Canalización normal	Columna vertical PBR
Tasa de crecimiento específica (d ⁻¹)	0,2511	0,1269	-
	0,2189	-	0,1674
Tasa de acumulación de biomasa (h ⁻¹)	0,0243	0,0068	-
	0,0201*	-	0,0156*
Capacidad de carga (g/l)	1,0163	0,5354	-
	0,5226*	-	0,5354*
*Esta comparación sufrió cortes de electricidad de 4 horas/día durante cuatro de los días experimentales			

Se pueden realizar numerosas variaciones a lo descrito anteriormente sin apartarse del alcance de esta invención, como será bastante obvio para un experto en la materia.

La Figura 10 ilustra la eficacia del equipo de cultivo con canalización modificada para transferir CO₂ eficazmente de la fase gaseosa a la fase líquida en un cultivo de microalgas en crecimiento activo. En la Figura 10 se compara la variación del pH de un equipo de cultivo con canalización normal con la variación del pH de un equipo de cultivo con canalización modificada a lo largo de un día, tomando mediciones periódicas del pH y de la intensidad luminosa. Ambos conjuntos de equipo de cultivo fueron inyectados con la misma mezcla de CO₂-aire, la única diferencia es que la mezcla se inyectó directamente en el fondo de la canalización de la canalización normal, pero para la canalización modificada, la mezcla se inyectó sólo hasta el fondo de cada columna de fotobiorreactores vertical. Los resultados muestran claramente que a medida que aumenta la intensidad de la luz durante el día, el pH de la canalización normal

aumenta mientras que el pH de la canalización modificada se mantiene esencialmente constante.

5 A lo largo de la memoria descriptiva y las reivindicaciones, salvo que el contenido requiera lo contrario, se entenderá que la palabra "comprender" o variaciones tales como "comprende" o "que comprende" implican la inclusión de un número entero o grupo de números enteros pero no la exclusión de cualquier otro número entero o grupo de números enteros indicado.

REIVINDICACIONES

1. Equipo de cultivo de microalgas para el cultivo de microalgas, teniendo el equipo de cultivo un componente de canalización con una canalización (1) que define un canal sin fin para la circulación de medio de crecimiento líquido en el mismo por medio de una disposición de inducción de flujo para inducir un flujo de medio de crecimiento líquido dentro del canal sin fin de la canalización (1), estando el equipo de cultivo **caracterizado por que** tiene un segundo componente integrado que comprende múltiples columnas de fotobiorreactores verticales (2) espaciadas entre sí a lo largo de la longitud de la canalización (1) y que están soportadas en una condición vertical de tal manera que sus extremos inferiores descargan el medio de crecimiento líquido durante el uso en el medio de crecimiento líquido en la canalización (1), una instalación de fomento de la circulación para hacer que el medio de crecimiento líquido circule del componente de canalización a través de las columnas de fotobiorreactores (2) para ser descargado de nuevo en la canalización (1); y una o más entradas de gas (14) para proporcionar burbujas de gas, durante el uso, pasando hacia arriba en cada una de las columnas de fotobiorreactores (2).
2. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el equipo está configurado de tal manera que, durante el uso, una superficie expuesta del medio de crecimiento a la luz directa o a la luz solar en las columnas de fotobiorreactores (2) está comprendida entre el 50 y el 200 % de la de una superficie expuesta del medio de crecimiento en la canalización (1) solo sin las columnas de fotobiorreactores (2).
3. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con la reivindicación 2, en el que la superficie expuesta del medio de crecimiento a la luz directa o a la luz solar está entre el 50 y el 120 % de la superficie expuesta del medio de crecimiento en la canalización (1) solo sin las columnas de fotobiorreactores (2).
4. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las columnas de fotobiorreactores (2) están configuradas para contener, durante el uso, entre el 5 y el 30 % del volumen total del medio de crecimiento líquido en el equipo de cultivo de microalgas.
5. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las columnas de fotobiorreactores (2) tienen un diámetro de 100 mm a 300 mm y una altura de 1,0 a 1,6 m.
6. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la disposición de inducción de flujo se selecciona de una o más ruedas de paletas (16) y una o más bombas de chorro o ambas cosas.
7. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se proporciona una instalación de circulación en la que una bomba de bajo cizallamiento (3) está configurada para extraer medio de crecimiento líquido de la canalización (1) y transferirlo a una tubería de colector (4) que interconecta los extremos superiores de las columnas de fotobiorreactores (2) a fin de distribuir el medio de crecimiento líquido a los extremos superiores de múltiples columnas de fotobiorreactores (2).
8. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que una bomba de bajo cizallamiento (7) está dispuesta para extraer medio de crecimiento líquido, durante el uso, de la canalización (1) del equipo de cultivo y bombearlo a las columnas de fotobiorreactores (2) desde la parte inferior y se proporciona un tubo de rebose en el interior de cada columna vertical individual (2) para permitir que el medio de crecimiento líquido rebose y fluya de nuevo a la canalización (1) en la parte inferior de la columna vertical (2) hacia una posición por debajo de la superficie del medio de crecimiento líquido en el componente de canalización.
9. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que un depósito de separación de gas elevado (15) está asociado a los extremos superiores de las columnas de fotobiorreactores (2) para descargar los gases enriquecidos en oxígeno del equipo de cultivo y actuar como una zona de desempañado para limitar la pérdida de medio de crecimiento líquido.
10. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se proporciona una entrada (14) para que el aire enriquecido en CO₂ se inyecte en cada columna de fotobiorreactores individual (2) a fin de controlar la disponibilidad de CO₂ aumentando o disminuyendo el caudal de líquido a través de las columnas de fotobiorreactores (2) o aumentando o disminuyendo la concentración de CO₂ en el aire o ambas cosas.
11. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con la reivindicación 10, en el que las entradas (14) para el gas a las columnas de fotobiorreactores (2) son las únicas entradas de gas (14) al equipo, sin que se proporcionen entradas de gas adicionales a la propia canalización (1).
12. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se mezcla una cantidad suficiente aire con CO₂ presente en los gases introducidos en el medio de crecimiento líquido para provocar una turbulencia en el interior de las columnas de fotobiorreactores (2).

13. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se proporciona un monitor de pH (9) para supervisar el pH del medio de crecimiento líquido con el fin de controlar la disponibilidad de CO₂ contenido en el interior del medio de crecimiento variando el contenido de CO₂ del aire utilizado para inyectar las columnas de fotobiorreactores (2).

5 14. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las columnas de fotobiorreactores (2) tienen cada una uno o más tuberías de salida de pequeño diámetro (5) dispuestas en general horizontalmente por debajo del nivel de la superficie del líquido del componente de canalización del sistema de cultivo para devolver el medio de crecimiento líquido de las columnas de fotobiorreactores verticales (2) a la
10 canalización (1).

15. Equipo de cultivo de microalgas de acuerdo con la reivindicación 14, en el que las tuberías de salida (5) están inclinadas hacia arriba o hacia abajo o inclinadas lateralmente con el fin de crear una acción de mezcla de algas y del medio de crecimiento líquido en la canalización (1) durante el uso.

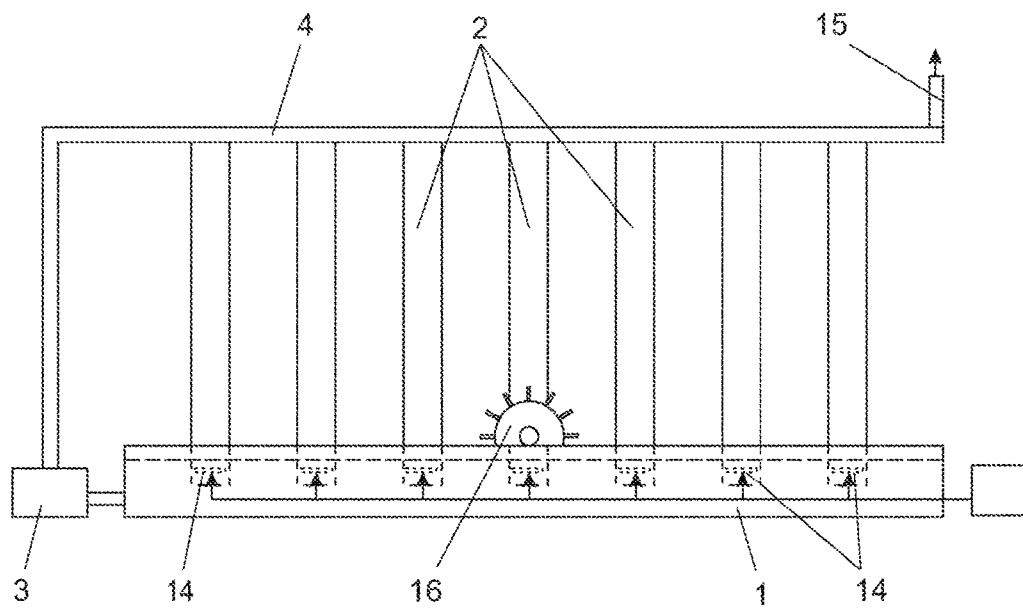


Figura 1

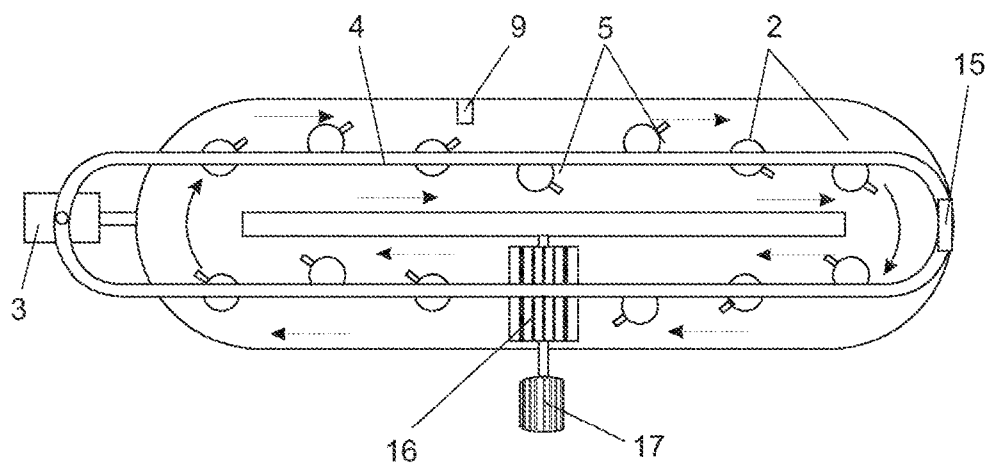


Figura 2

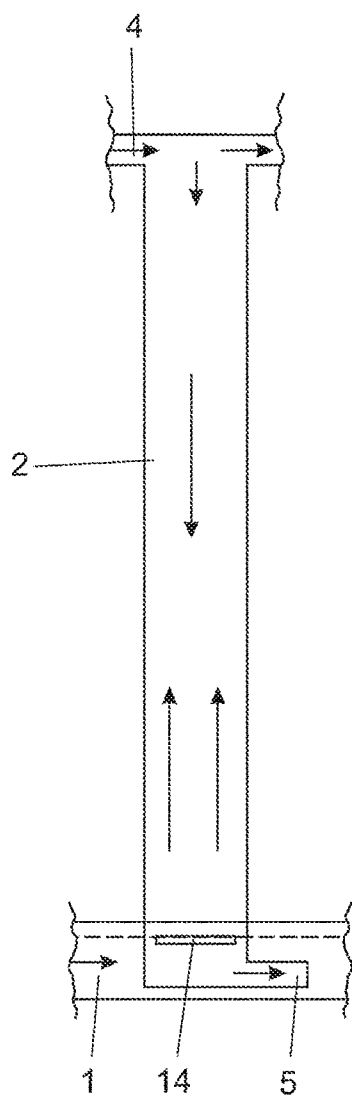


Figura 3

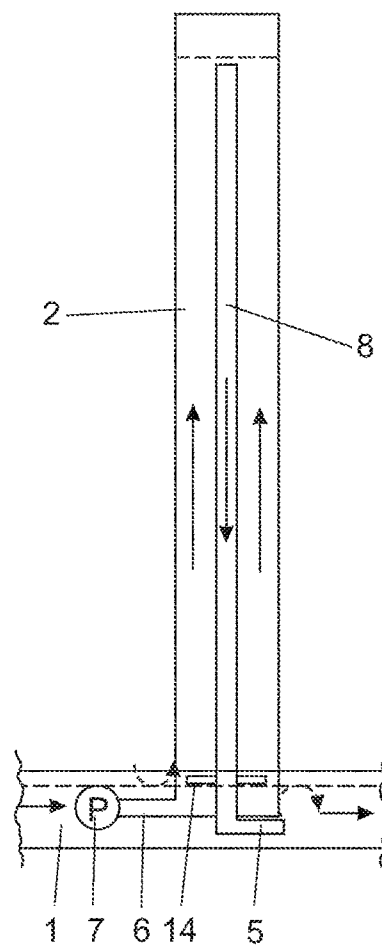


Figura 4

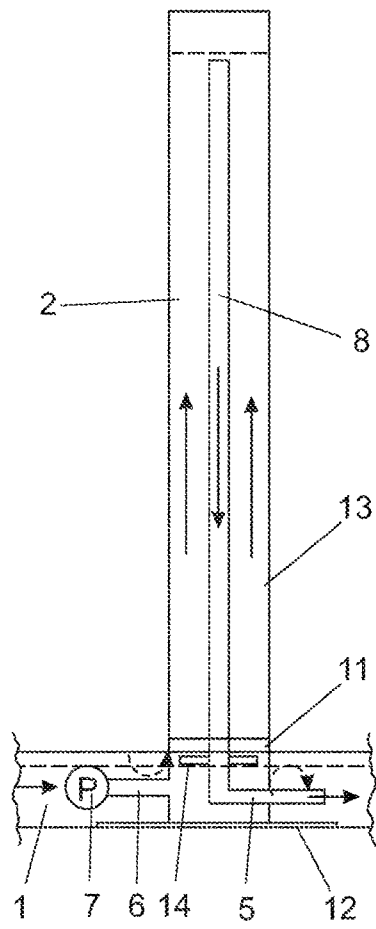


Figura 5

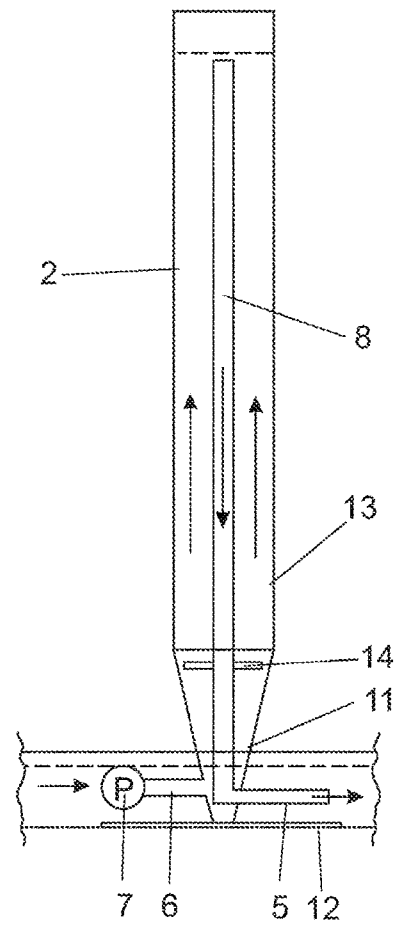


Figura 6

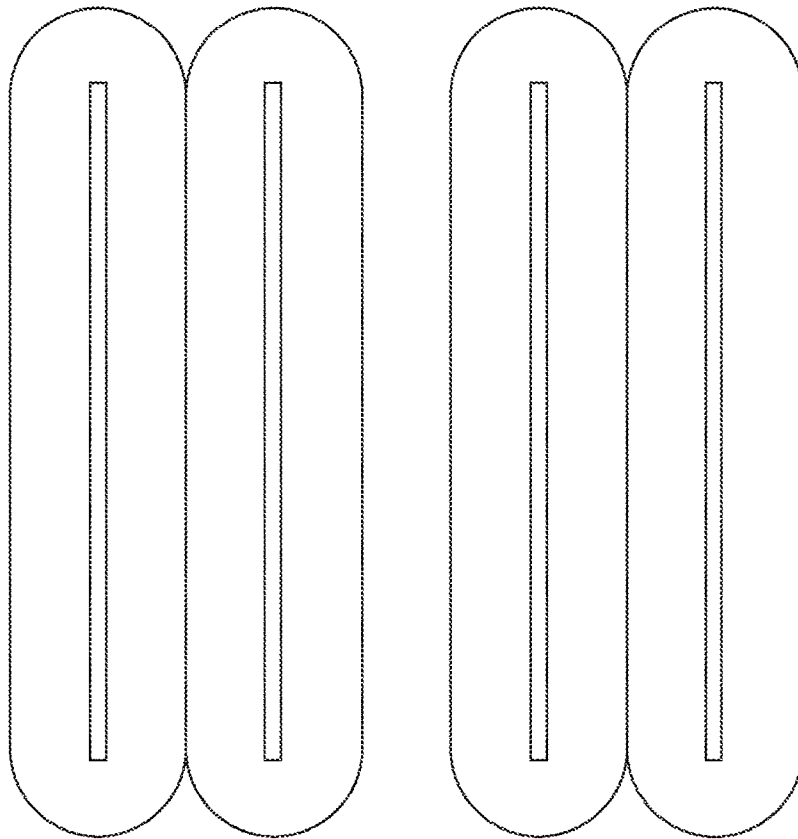


Figura 7

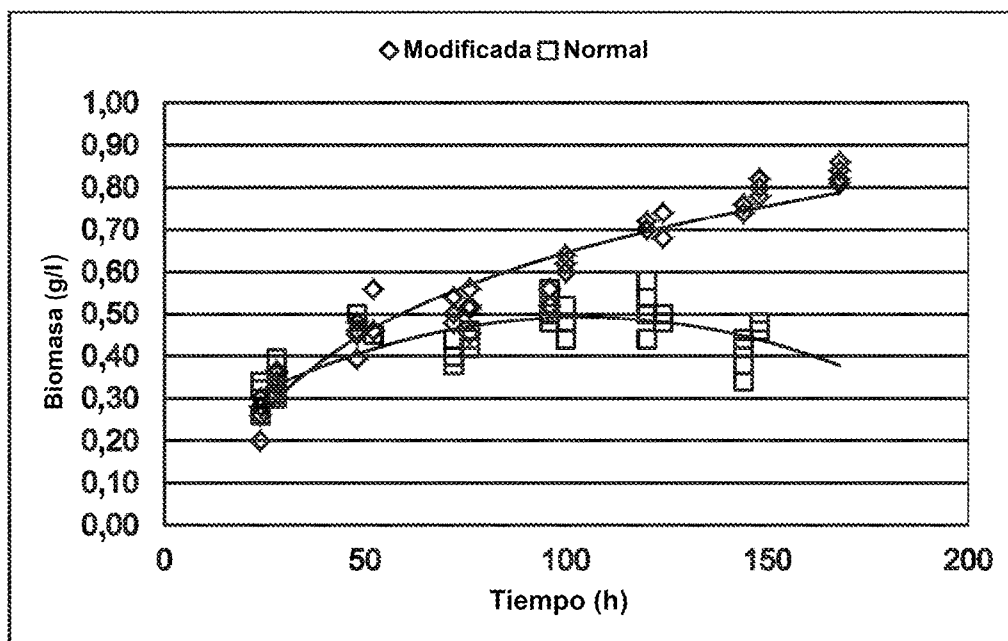


Figura 8

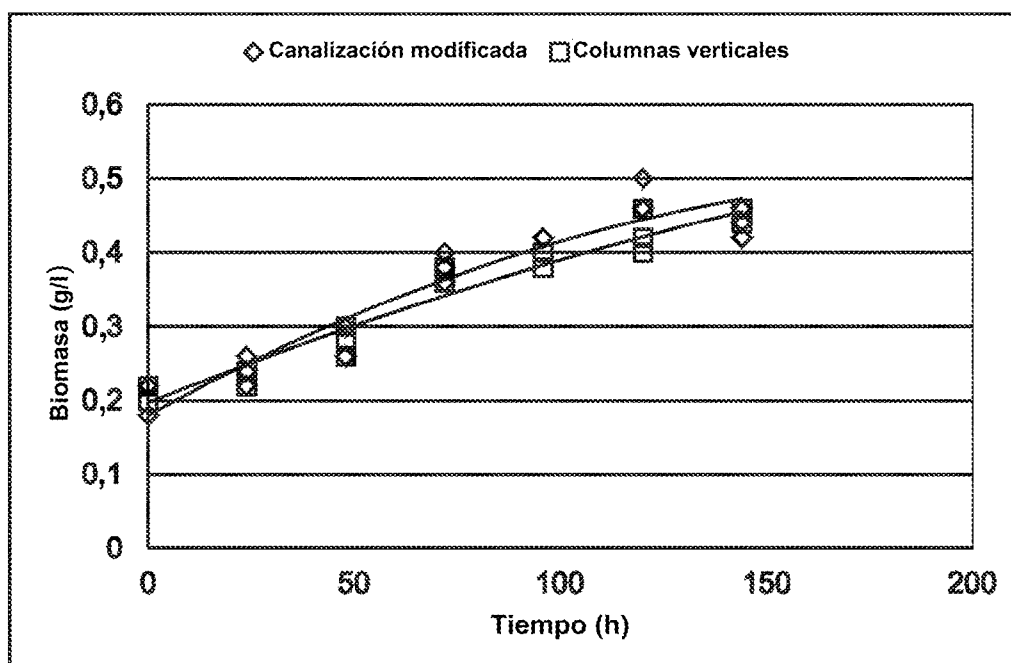


Figura 9

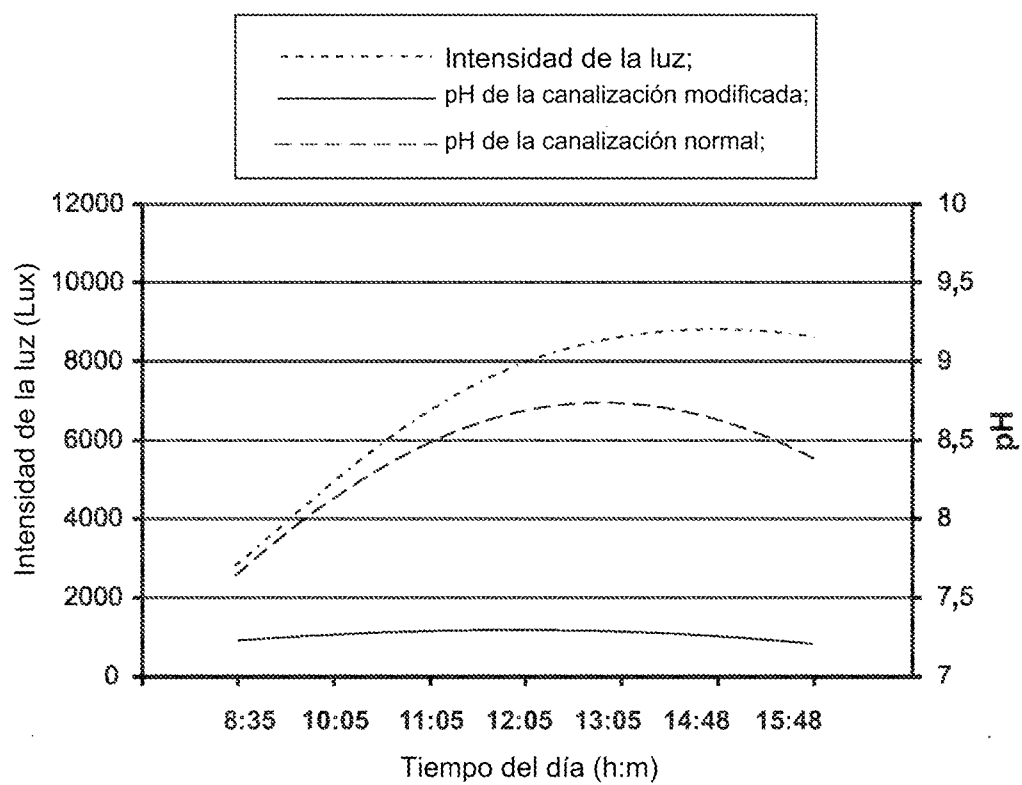


Figura 10