

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 436 006**

51 Int. Cl.:

C12M 1/00 (2006.01)

A01G 33/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.01.2009 E 09702866 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.08.2013 EP 2242834**

54 Título: **Fotobiorreactor**

30 Prioridad:

18.01.2008 DE 102008004932

18.01.2008 DE 102008004933

04.07.2008 WO PCT/IB2008/001770

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

26.12.2013

73 Titular/es:

AVESTON GRIFFORD LTD. (100.0%)

Craigmuir Chambers P.O. Box 71

Road Town, Tortola, VG

72 Inventor/es:

MEISER, ANDREAS y

VERHEIN, MIGUEL

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 436 006 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

Fotobiorreactor

Campo técnico

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para hacer funcionar un fotobiorreactor cerrado para el cultivo de microorganismos fototrópicos y a un fotobiorreactor cerrado para el cultivo de microorganismos fototrópicos.

Técnica anterior

10 Se sabe que hoy en día los microorganismos fototrópicos se encuentran en muchas aplicaciones comerciales. De este modo, se producen algas para fabricar β -caroteno, astaxantina, etc., o se vende la biomasa completa de algas como suplemento nutricional. Hoy en día, la producción de biomasa de algas se enfrenta a dos dificultades principales. En primer lugar, una gran parte de la producción actual es el resultado de sistemas abiertos (por ej., los denominados estanques abiertos). Estos sistemas abiertos son sensibles a las contaminaciones por otras cepas de algas o por plagas, por lo tanto, en estos sistemas sólo pueden crecer algas con requerimientos de crecimiento muy específicos. De este modo, por ejemplo, se cultiva el alga *Dunaliella* para la producción de β -caroteno bajo condiciones muy salinas, que no son adecuadas para la mayoría de otros organismos. En segundo lugar, los costos de producción de la biomasa de algas son algo altos (>USD 2.000 por tonelada métrica), de modo que una producción comercial para muchas aplicaciones, en especial en el sector de energía o en el sector del transporte, no es rentable. En particular, a menudo los costos de producción se incrementan aún más si se usan sistemas cerrados en lugar de sistemas abiertos para evitar contaminaciones. Además de los estanques abiertos, actualmente se usan un gran número de varios tipos de fotobiorreactores. Los reactores de tubo, que pueden consistir en uno o más tubos horizontales, o en los que un tubo se enrolla helicoidalmente alrededor de un cilindro o cono (bioserpentín) están entre los más conocidos. Además, con frecuencia se usan reactores de panel plano, dichos reactores proveen una capa líquida vertical para el cultivo de algas.

25 Los principales retos en la producción de productos químicos y energía a partir de algas son el riesgo de contaminación y el alto costo de la fabricación de la biomasa de algas. Igualmente, los principales retos en la producción de productos químicos finos, suplementos nutricionales, vitaminas, ácidos grasos omega-3, antioxidantes (por ejemplo, carotenoides), sustancias farmacéuticamente activas o biomasa seca para suplemento nutricional a partir de algas, son, por tanto, el riesgo de contaminación y el alto costo para la fabricación de la biomasa. Los mismos retos son aplicables en el cultivo de algas para biocombustibles, alimentos para animales, aminoácidos, producción de metano, etc.

30 El documento US 3.955.317 divulga un procedimiento de crecimiento de células vegetales en estructuras de plástico transparentes tubulares.

35 El documento WO 2005/121309 divulga un dispositivo para la producción de algas, en el que se coloca un fluido que comprende algas en recipientes de crecimiento, a los que se les suministra un gas que contiene CO₂, circulando el gas por los recipientes por medio de un aparato acondicionador de gas. En un modo de realización, los recipientes están fabricados de una lámina de plástico doble formando una bolsa de lámina. En un modo de realización que es adecuado para la producción de microalgas en el mar, se coloca una bolsa de lámina soldada entre sí para que flote horizontalmente en la superficie del agua.

40 El documento US 4.868.123 divulga un aparato para la producción de microorganismos por fotosíntesis. El aparato comprende un biorreactor para que se coloque sobre una expansión de agua, que tiene un primer grupo de tubos flexibles, que son transparentes a la luz y en los que circula el medio de cultivo, y un segundo grupo de tubos inflables, colocados y mantenidos por debajo del primer grupo por medio de elementos interpolados desprendibles en forma de Y, que están espaciados a intervalos regulares. Según este documento, cuando la temperatura del medio de cultivo excede una temperatura de referencia superior, se sumerge el fotobiorreactor por medio del desinflamiento de los tubos del segundo grupo. Por el contrario, cuando la temperatura del medio está por debajo de una temperatura de referencia mínima, los tubos del segundo grupo se inflan con aire comprimido. También se puede garantizar la inmersión del fotobiorreactor introduciendo un líquido relativamente pesado en los tubos del segundo grupo, mientras que se puede garantizar la flotación inyectando un fluido ligero que no sea aire.

Debido a que el cultivo a gran escala de microorganismos es bastante costoso, existe una demanda de obtención de disposiciones de biorreactores más simples y económicas.

50 Sumario de la invención

Hoy en día, el cultivo de microorganismos fototrópicos se caracteriza por el alto costo de la producción de biomasa. El nuevo fotobiorreactor también podrá reducir significativamente los costos de producción de la biomasa. Adicionalmente, mediante el diseño de un proceso cerrado se puede reducir fuertemente el riesgo de contaminación en comparación con sistemas abiertos.

55 Con el fin de evitar la contaminación, se usará un fotobiorreactor cerrado, que se puede producir, por ejemplo, a

partir de un plástico, tal como polietileno. Se logra una fuerte reducción en costos ya que el fotobiorreactor nada en o sobre un cuerpo de agua, por ejemplo, un estanque artificial. Por este principio de construcción, se evitan los costos de nivelar el fotobiorreactor exactamente en horizontal. A medida que la presión hidrostática interior del fotobiorreactor sea compensada parcialmente por el agua circundante, se puede reducir la fuerza de las paredes del fotobiorreactor o se puede usar un material menos estable. El agua que rodea el fotobiorreactor puede suministrar o retirar calor, lo que hace redundante una termostatación adicional. Al usar un material flexible para el fotobiorreactor, así como la posibilidad de cambiar la posición del fotobiorreactor en el cuerpo de agua circundante y la posibilidad de cambiar el espesor de capa del líquido de cultivo, se pueden adaptar las condiciones de funcionamiento del fotobiorreactor de acuerdo con factores ambientales, tales como radiación solar o temperatura, lo que debería aumentar la productividad dando lugar a una reducción adicional en los costos. Por la posibilidad de hacer funcionar el fotobiorreactor en superficies de agua, se dispone de un área muy grande para realizar dicho sistema de fotobiorreactor, considerando que más del 70% de nuestro planeta está cubierto de agua.

El fotobiorreactor descrito puede servir para la producción de biomasa a partir de organismos fototrópicos, que se pueden usar para la fabricación de cualquier tipo de biocombustibles, alimento animal, proteínas, aminoácidos, para la nutrición humana básica, así como para la producción de biomasa a partir de organismos fototrópicos, lo que se usa para la fabricación de productos químicos finos, suplementos nutricionales, vitaminas, ácidos grasos omega-3, antioxidantes (por ej., carotenoides), ingredientes de sustancias farmacéuticamente activas, o biomasa seca para su uso como suplemento nutricional.

Por ello, un objetivo de la presente invención es facilitar la regulación de la temperatura del contenido, tal como el medio de cultivo y los microorganismos cultivados en él, de un fotobiorreactor cerrado. Un objetivo relacionado de la invención es utilizar, parcial o totalmente, la capacidad de refrigeración del agua que rodea un fotobiorreactor cerrado con el fin de regular la temperatura de su contenido.

Otro objetivo de la presente invención es permitir el control de la posición vertical de un fotobiorreactor cerrado rodeado, parcial o totalmente, por agua. En particular, es un objetivo de la invención permitir dicho control de posición sin necesidad de otro medio regulador de la flotación diferente del contenido, por ej., el medio de cultivo, del fotobiorreactor en sí y el agua circundante.

Otro objetivo más de la presente invención es proveer un fotobiorreactor que dé automáticamente una distribución homogénea del espesor del líquido de cultivo cuando el fotobiorreactor está flotando en un cuerpo de agua.

Debido a que el fotobiorreactor de la presente invención, o partes del mismo, se puede fabricar preferentemente de un material flexible, la forma del reactor puede verse influenciada por faltas de homogeneidad e impactos internos y externos. Por ello, con el fin de conservar la forma y función óptima del fotobiorreactor, puede ser importante el control de dichos impactos y faltas de homogeneidad. Por lo tanto, es un objetivo de la presente descripción proveer medios para el control adicional de la posición y/o la forma del fotobiorreactor flexible.

Otro objetivo de la presente invención es simplificar la construcción, y reducir el costo, de un fotobiorreactor cerrado y su equipo periférico.

Otros objetivos o ventajas de la invención serán evidentes para un experto en la técnica luego de leer la siguiente descripción.

Tal como se utiliza en el presente documento, el término fotobiorreactor se refiere, en general, al compartimiento del fotobiorreactor que está adaptado para comprender el líquido de cultivo de algas, y en el que se produce la fotosíntesis, incluido cualquier compartimiento o tubo, subcompartimiento o medio mecánico adicional para controlar la posición y/o la forma del fotobiorreactor, pero el término también se puede referir a un sistema de fotobiorreactor en un sentido más amplio, que comprende dicho compartimiento de algas, incluido cualquier compartimiento o tubo, subcompartimiento o medio mecánico adicional para controlar la posición y/o la forma del fotobiorreactor, así como equipo periférico, tal como, por ejemplo, bombas, mangueras, depósitos y otro equipo requerido para hacer funcionar el reactor.

En un primer aspecto de la invención, se provee un procedimiento para hacer funcionar un fotobiorreactor cerrado para el cultivo de microorganismos fototrópicos; comprendiendo el fotobiorreactor un líquido de cultivo y estando rodeado el fotobiorreactor parcial o totalmente por agua de un cuerpo de agua, en el que se provee una diferencia de densidad entre el líquido de cultivo y el agua circundante de modo que se controle la posición del fotobiorreactor en el cuerpo de agua.

El principio principal sobre el que se basa la presente invención es la capacidad para controlar la posición vertical de un fotobiorreactor flexible y liviano en un cuerpo de agua circundante mediante el control de la densidad del fotobiorreactor frente a la densidad del agua circundante, por ejemplo, mediante la provisión de diferentes concentraciones de salinidad dentro y fuera del reactor. Se ha demostrado que un reactor que contenga agua dulce o salobre (baja densidad) flota fácilmente en un cuerpo de agua que consiste en agua salada (alta densidad). Además, se ha encontrado que un fotobiorreactor según la presente invención se autoestabiliza, lo que significa que asume una posición horizontal perfecta independientemente de la posición en que se colocó al comienzo del experimento, y que el espesor de la capa de líquido de cultivo dentro del reactor se vuelve muy homogéneo,

nuevamente, independiente del punto de inicio. Por tanto, en un caso en el que el fotobiorreactor contenga agua dulce y el cuerpo de agua circundante comprenda agua salada, usando diferentes salinidades en el propio reactor y en el cuerpo de agua circundante, y de este modo densidades diferentes en los dos cuerpos de agua, en el cuerpo de agua salada circundante se formará un lente estable de agua dulce confinada por las paredes transparentes flexibles del fotobiorreactor.

El concepto inventivo de usar la diferencia de densidad para estabilizar el reactor y obtener un espesor homogéneo de la capa del líquido de cultivo permite la provisión de un sistema de fotobiorreactor muy simple y sumamente económico. En primer lugar, el agua dulce en el sistema formará la estructura óptima (horizontal) en sí, lo que quiere decir que para el reactor se puede usar un material delgado y de bajo costo. En segundo lugar, el reactor se moverá automáticamente a una posición, que sea óptima para el crecimiento de las algas, minimizando de este modo la necesidad de equipo mecánico o dispositivos de control del procedimiento para disponer el reactor en la posición preferente. En tercer lugar, el espesor homogéneo de la capa del líquido de cultivo, así como la posibilidad de optimizar el espesor de la capa del líquido de cultivo variando la cantidad de líquido de cultivo en el fotobiorreactor permite una alta densidad de la biomasa en el líquido de cultivo, lo que quiere decir que el fotobiorreactor según la presente invención puede contener más biomasa y por lo tanto, tener una mayor eficiencia de energía.

Debido a que las pequeñas diferencias de densidad en el agua dentro y fuera del fotobiorreactor provocadas por una diferencia en la salinidad y/o la temperatura son las únicas fuerzas impulsoras para mover el reactor, es preferente tener un material delgado y flexible en las paredes del fotobiorreactor. Las paredes delgadas y flexibles optimizarán la capacidad del fotobiorreactor para autoestabilizarse. Un ejemplo de un material adecuado para su uso en las paredes del fotobiorreactor es polietileno o material equivalente con un espesor de aproximadamente 0,1 mm.

Mediante la provisión de dicha diferencia de densidad entre el líquido de cultivo y el agua circundante de modo que se controle la posición del fotobiorreactor en el cuerpo de agua, se crea de este modo un cambio en la flotabilidad del fotobiorreactor con respecto al agua circundante, siendo este cambio en la flotabilidad la fuerza impulsora de un cambio de posición vertical del reactor. Así, la diferencia de densidad provista tiene en cuenta el peso y la flotabilidad del propio fotobiorreactor. Por lo tanto, la presente invención representa una solución sencilla y económica con el fin de controlar la posición del fotobiorreactor en agua circundante. Igualmente, la refrigeración del contenido del fotobiorreactor se puede lograr eficazmente y a un bajo costo bajando el fotobiorreactor en el agua circundante.

Además, el diseño de proceso cerrado del sistema reduce considerablemente el riesgo de contaminación. El hecho de que el fotobiorreactor esté rodeado (parcialmente) por agua reduce los costos de producción por varios efectos: al tener el fotobiorreactor flotando o suspendido en agua, no se requieren obras costosas de construcción para nivelar el terreno. El fotobiorreactor flota o se suspende como un sistema cerrado en el cuerpo de agua circundante, por lo tanto se puede preparar de manera muy sencilla y económica un estanque que represente el cuerpo de agua circundante. En extremo, como cuerpo de agua externo se pueden usar incluso ríos, lagos, mar o fosas de arcilla natural rellenas de agua. El cuerpo de agua circundante puede proveer o retirar calor de manera óptima, por lo tanto no se requiere asumir costos para más termorregulación. Puesto que la presión hidrostática interna del fotobiorreactor es compensada parcialmente por el agua circundante, se puede reducir el espesor de las paredes del fotobiorreactor o se puede usar un material menos estable, lo que contribuye a una reducción adicional en costos.

Por la construcción flexible del fotobiorreactor, es decir, la posibilidad para cambiar la posición del reactor en el cuerpo de agua circundante y la posibilidad de cambiar el espesor del líquido de cultivo en el fotobiorreactor, los parámetros de proceso del fotobiorreactor pueden adaptarse de acuerdo con condiciones ambientales, tales como la intensidad de la radiación solar y la temperatura, lo que dará lugar a un aumento en la productividad y reducirá los costos aún más. El espesor del líquido de cultivo influye en la trayectoria de luz de la luz del sol necesaria para el crecimiento de los organismos fototrópicos.

Puesto que el fotobiorreactor se puede hacer funcionar en superficies de agua, está disponible un área muy grande para la realización de este tipo de sistema de fotobiorreactor, debido a que nuestro planeta está cubierto por más de 70% de agua.

Se puede proveer la diferencia de densidad por la provisión de una diferencia de salinidad entre el líquido de cultivo y el agua circundante. Dicha diferencia de salinidad puede proveerse aumentando o reduciendo la salinidad del líquido de cultivo. Dicha diferencia de salinidad también, o alternativamente, puede proveerse aumentando o reduciendo la salinidad del agua circundante, en particular el agua circundante de un cuerpo cerrado de agua. En este contexto, tal como lo entenderá el experto en la técnica, el término "cuerpo cerrado de agua" se refiere a sistemas bien definidos de agua que permiten el control de, por ejemplo, la cantidad o el tipo de agua, tal como agua dulce, salobre o salada, en ellos. Ejemplos de cuerpos cerrados de agua son estanques o albercas naturales o artificiales. Un aumento de salinidad del líquido de cultivo puede proveerse simultáneamente a medida que se provee una reducción de la salinidad del agua circundante. Una reducción de salinidad del líquido de cultivo puede proveerse simultáneamente a medida que se provee un aumento de la salinidad del agua circundante.

Se puede proveer la diferencia de densidad por la provisión de una diferencia de temperatura entre el líquido de cultivo y el agua circundante. Dicha diferencia de temperatura puede proveerse cambiando la temperatura del agua

circundante, en particular el agua circundante de un cuerpo cerrado de agua. Arriba se expresa el significado de "cuerpo cerrado de agua".

5 Se puede proveer la diferencia de densidad por un aumento o reducción de una presión de gas del líquido de cultivo. De este modo, la densidad del líquido de cultivo puede estar influenciada por la presión de gas suministrado al fotobiorreactor para que sea consumido (por ejemplo, dióxido de carbono) por las algas o por la presión de un gas producido (por ejemplo, oxígeno) por las algas.

10 La salinidad, la temperatura, la presión de gas y/u otros parámetros que influyen la densidad del líquido de cultivo y/o el agua circundante pueden modificarse por separado o simultáneamente con el fin de proveer una diferencia de densidad deseable. La densidad del líquido de cultivo y la densidad del agua circundante pueden modificarse por separado o simultáneamente con el fin de proveer una diferencia de densidad deseable.

15 Se puede proveer la diferencia de densidad de modo que se aumente la densidad del líquido de cultivo o de modo que se reduzca la densidad del agua circundante, con lo que se baja la posición del fotobiorreactor en el cuerpo de agua. Se puede proveer la diferencia de densidad de modo que se reduzca la densidad del líquido de cultivo o de modo que se aumente la densidad del agua circundante, con lo que se eleva la posición del fotobiorreactor en el cuerpo de agua. Se puede proveer la diferencia de densidad de modo que se mantenga la posición del fotobiorreactor en el cuerpo de agua. Nuevamente, la densidad del líquido de cultivo y la densidad del agua circundante puede modificarse simultáneamente con el fin de proveer una diferencia de densidad deseable, bien sea para bajar, subir o mantener la posición del fotobiorreactor.

20 El procedimiento arriba descrito de hacer funcionar un fotobiorreactor, es decir, un procedimiento en el que se provee una diferencia de densidad entre el líquido de cultivo y el agua circundante de modo que se controle la posición del fotobiorreactor en el cuerpo de agua, es particularmente adecuado para el control prolongado de la posición. En este contexto, "control prolongado de la posición" se refiere a cambios de posición (subir o bajar el fotobiorreactor) que no es necesario invertir en el curso de varias horas o días desde la iniciación del cambio. Sin embargo, en el procedimiento inventivo, el fotobiorreactor puede estar equipado con uno o más compartimientos o tubos adaptados para un control adicional de la flotabilidad del fotobiorreactor. A continuación se establecen las ventajas de dichos compartimientos o tubos.

25 En el procedimiento inventivo, el fotobiorreactor también puede estar equipado con medios mecánicos adaptados para controlar adicionalmente la posición vertical y/o la forma del fotobiorreactor. A continuación se describen dichos medios mecánicos y ventajas de los mismos.

30 En el procedimiento inventivo, el fotobiorreactor puede tener una forma de panel plano. En comparación con, por ejemplo, fotobiorreactores en forma de tubo, un reactor de panel plano requiere menos material de construcción, requiere menos entrada de energía debido a una menor resistencia de flujo, y tiene menos restricciones en escalabilidad.

35 En el procedimiento inventivo, el fotobiorreactor puede comprender además características adicionales según se describe a continuación, con respecto al segundo aspecto de la invención.

40 En un segundo aspecto de la invención, se provee un fotobiorreactor cerrado para el cultivo de microorganismos fototrópicos, estando adaptado el fotobiorreactor para comprender un líquido de cultivo y estando adaptado el fotobiorreactor para que esté rodeado, parcial o totalmente, por agua de un cuerpo de agua, en el que el fotobiorreactor comprende medios para determinar la diferencia de densidad entre el líquido de cultivo y el agua circundante.

Debido a que las pequeñas diferencias de densidad en el agua dentro y fuera del fotobiorreactor causadas por una diferencia en la salinidad y/o la temperatura son las únicas fuerzas impulsoras para mover el reactor, es preferente tener un material delgado y flexible en las paredes del fotobiorreactor. Tener paredes delgadas y flexibles optimizará la capacidad del fotobiorreactor para autoestabilizarse.

45 Preferentemente, el fotobiorreactor cerrado puede comprender un compartimiento, denominado en el presente documento el compartimiento de algas, confinado por paredes de un material hermético al agua, transparente y flexible.

50 El material hermético al agua, transparente y flexible puede ser preferentemente además un material liviano o de baja densidad. Preferentemente, el material puede ser un material basado en polímero, tal como una película delgada de un polímero basado en poliolefina, por ej., polietileno o polipropileno. Otros polímeros adecuados para su uso con la presente invención los reconocerá fácilmente un experto en la técnica de materiales poliméricos. El espesor de las paredes debe seleccionarse dependiendo de las propiedades, tales como flexibilidad, transparencia y durabilidad del material específico a utilizar, y puede estar por ejemplo en el intervalo de 10-1000 μm o en el intervalo de 25-500 μm o en el rango de 50-150 μm . Con respecto a la durabilidad del material, se prefiere fabricar las paredes del fotobiorreactor lo más delgadas posibles con el fin de maximizar la flexibilidad y la transparencia. Como ejemplo no limitante, se ha descubierto que es adecuado para su uso en las paredes del fotobiorreactor una película de polietileno que tenga un espesor de aproximadamente 100 μm .

5 Como ejemplo, el compartimiento de algas del fotobiorreactor puede comprender una lámina superior y una lámina inferior del material hermético al agua, transparente y flexible unidas la una a la otra de modo que se forme un compartimiento cerrado entre las dos láminas, pero también se consideran otras disposiciones que den como resultado un compartimiento sellado confinado por paredes de un material hermético al agua, transparente, flexible y liviano.

El compartimiento de algas del fotobiorreactor puede comprender además varios puertos de entrada y salida a los que se les pueden conectar mangueras, bombas, fuentes de líquido o gas y otro equipo adicional requerido o útil para el funcionamiento del fotobiorreactor.

10 Los medios para determinar la diferencia de densidad pueden comprender medios para determinar la salinidad y/o la temperatura del líquido de cultivo. Los medios para determinar la diferencia de densidad pueden comprender medios para determinar la salinidad y/o la temperatura del agua circundante. Un experto en la técnica puede identificar los medios adecuados para determinar la salinidad del líquido de cultivo o del agua circundante y su función puede basarse, por ejemplo, en la medición de la conductividad del medio en el que se va a determinar la salinidad. Un experto en la técnica puede identificar los medios adecuados para determinar la temperatura del líquido de cultivo o del agua circundante y pueden ser, por ejemplo, un par termoelectrónico u otro dispositivo para la medición de la temperatura que provea una señal eléctrica que represente la temperatura.

15 El fotobiorreactor puede estar equipado con uno o más compartimientos o tubos adicionales adaptados para controlar adicionalmente la flotabilidad del fotobiorreactor. Los compartimientos o tubos pueden contener gas, agua o cualquier otro líquido. De este modo, los compartimientos o tubos adicionales aumentan la velocidad a la que se controla la posición del fotobiorreactor en el cuerpo de agua. Por lo tanto, el/los compartimiento(s) o tubo(s) adicional(es) se puede(n) usar cuando la posición del fotobiorreactor requiera adaptarse rápidamente, tal como en respuesta a cambios a corto plazo de la temperatura del líquido de cultivo. "Cambios a corto plazo" se refiere a cambios en la escala de minutos o de horas.

20 El fotobiorreactor puede equiparse con medios mecánicos para acelerar la sumersión o flotación cuando la posición del fotobiorreactor requiera adaptarse rápidamente, por ej., para optimizar las condiciones de crecimiento de las algas, por ej., la temperatura, o debido a condiciones relacionadas con el clima, tales como vientos fuertes. Dichos medios mecánicos pueden comprender, por ejemplo, una red o al menos un elemento alargado, como una cuerda, cable o varilla, extendido por encima del fotobiorreactor y dispuesto para que suba o baje para ayudar a la sumersión o flotación del fotobiorreactor. Dicha red o al menos un elemento alargado puede estar fijo o no a la superficie del fotobiorreactor. En general, será útil tener dos o más elementos alargados dispuestos en paralelo y distribuidos a distancias adecuadas a lo largo de la longitud del fotobiorreactor. Los elementos alargados pueden bajarse o subirse simultáneamente o en secuencia, por ejemplo, de modo que todo el fotobiorreactor sea sumergido simultáneamente, o de modo que un lado del reactor sea sumergido primero y el otro lado del reactor sea sumergido subsiguientemente.

25 El fotobiorreactor puede tener forma de panel plano. En comparación con, por ejemplo, fotobiorreactores en forma de tubo, un reactor de panel plano requiere menos material de construcción, requiere menos entrada de energía debido a una menor resistencia de flujo y tiene menos restricciones en escalabilidad.

30 El compartimiento de algas del fotobiorreactor también puede comprender dos o más subcompartimientos adaptados para comprender el líquido de cultivo. Dichos subcompartimientos pueden estar adaptados para comprender una porción del líquido de cultivo presente en el fotobiorreactor. Preferentemente, cuando el fotobiorreactor comprende dos o más de dichos subcompartimientos, el líquido de cultivo puede distribuirse uniformemente entre subcompartimientos. El uso de subcompartimientos en el fotobiorreactor puede ayudar a estabilizar el reactor cuando sea parcial o completamente sumergido ya que los subcompartimientos ayudan a reducir los efectos adversos potenciales de aglomeración del líquido de cultivo y grandes burbujas de gas como se analizará más en detalle en el presente documento.

35 Los subcompartimientos pueden sellarse entre sí. Si los subcompartimientos se sellan entre sí, los subcompartimientos actuarán como una disposición de fotobiorreactores más pequeños. Esto reducirá adicionalmente los problemas de aglomeración y de grandes burbujas de gas cuando el fotobiorreactor sea sumergido.

40 Los subcompartimientos también pueden estar conectados para permitir transporte limitado de líquido y/o gas entre los subcompartimientos. Esto reducirá problemas de aglomeración y grandes burbujas de gas cuando el fotobiorreactor sea sumergido, y al mismo tiempo se conservará la flexibilidad del fotobiorreactor y la ventaja de la distribución común de CO₂ y otros nutrientes al líquido de cultivo y la retirada de oxígeno del reactor.

45 El fotobiorreactor puede comprender además medios para dividir temporalmente el compartimiento de algas del fotobiorreactor en dos o más subcompartimientos. La división temporal del compartimiento de algas del fotobiorreactor permite los beneficios combinados de tener una estructura de panel plana sin restricciones cuando el fotobiorreactor esté flotando sobre una superficie de agua y una estructura de subcompartimiento cuando el fotobiorreactor esté en una posición parcial o completamente sumergida. El fotobiorreactor o el compartimiento de

algas del mismo, cuando flota sobre la superficie del agua circundante, comprenderá generalmente al menos una lámina superior flexible de cara a la atmosfera, y una lámina inferior flexible de cara al agua, entre las dos láminas se mantiene el cultivo de algas. El medio para dividir temporalmente el compartimiento de algas del fotobiorreactor puede comprender por ejemplo, un elemento adaptado para presionar una lámina superior del fotobiorreactor hacia una lámina inferior del fotobiorreactor de modo que se forme un subcompartimiento dentro del fotobiorreactor a cada lado de la depresión. En un modo de realización, dicho medio para dividir el compartimiento de algas del fotobiorreactor en dos o más subcompartimientos, comprende al menos un elemento alargado, tal como una cuerda, cable o varilla extendida por encima del fotobiorreactor y dispuesta para que baje para presionar la lámina superior del fotobiorreactor hacia la lámina inferior del fotobiorreactor de modo que se forme un subcompartimiento dentro del fotobiorreactor a cada lado de dicho al menos un elemento alargado.

En otro modo de realización, dicho medio para dividir el fotobiorreactor en dos o más subcompartimientos comprende al menos un compartimiento o tubo adicional, separado del compartimiento de las algas y dispuesto en contacto con la lámina superior del fotobiorreactor y adaptado para que sea llenado con un líquido que tenga una densidad más alta que el líquido de cultivo, de modo que cuando el compartimiento o tubo adicional sea llenado con el líquido de alta densidad, el compartimiento o tubo llenado pueda presionar la lámina superior del fotobiorreactor hacia la lámina inferior del fotobiorreactor de modo que se forme un subcompartimiento dentro del compartimiento de algas del fotobiorreactor a cada lado de dicho compartimiento llenado.

Breve descripción de los dibujos

- La figura 1a es una vista esquemática de un sistema de fotobiorreactor.
- La figura 1b es una vista en sección transversal de un sistema de fotobiorreactor.
- La figura 2a muestra una vista tridimensional de un fotobiorreactor con un tubo de suministro de CO₂ que flota en el compartimiento del líquido de cultivo debido a su baja densidad.
- La figura 2b muestra una sección transversal vertical de un fotobiorreactor con un tubo de suministro de CO₂ que flota en el líquido de cultivo debido a su baja densidad.
- La figura 3 muestra un fotobiorreactor con un compartimiento adicional para controlar la posición vertical y o la forma del reactor.
- La figura 4a es una vista esquemática de un fotobiorreactor con cuerdas para crear subcompartimientos temporales y para acelerar el proceso de sumersión.
- La figura 4b es una ampliación de la Figura 4a de un perfil vertical con un riel para guiar el movimiento del reactor.
- La figura 5 muestra un fotobiorreactor con subcompartimientos sellados.
- La figura 6a es una vista esquemática de un fotobiorreactor, en el que las láminas superior e inferior del reactor están conectadas en varios puntos.
- La figura 6b es una vista en sección transversal esquemática de un fotobiorreactor, en el que las láminas superior e inferior del reactor están conectadas en varios puntos.
- La figura 7 es una vista en sección transversal esquemática de un fotobiorreactor con compartimientos en la parte superior del reactor que se pueden llenar con líquido de alta densidad para formar subcompartimientos dentro del fotobiorreactor.

Descripción detallada de modos de realización preferentes de la invención

En los dibujos adjuntos se pueden encontrar ejemplos no limitantes del modo de realización de la invención y se describe además en el siguiente texto. Los términos líquido de cultivo y medio de cultivo se usan de manera intercambiable en el presente documento y se pueden referir a todo el cultivo de algas, es decir, la mezcla de algas y el medio acuoso en el que las algas están suspendidas, o simplemente al medio acuoso usado para suspender las algas.

La Figura 1a es una vista de un sistema de fotobiorreactor completo. El fotobiorreactor en forma de panel 1 (también denominado en el presente documento el "reactor") flota sobre un cuerpo de agua, aquí un estanque artificial 2. El tamaño de dicho fotobiorreactor 1 puede variar, una longitud de 50 metros y un ancho de aproximadamente 10 metros podría ser una realización posible. El fotobiorreactor 1 está fabricado de un material transparente flexible y dentro del fotobiorreactor está el líquido de cultivo, en el que se suspenden las algas. Por radiación solar en el fotobiorreactor 1, se permite que las algas produzcan biomasa por medio de la fotosíntesis. Durante este proceso se usa dióxido de carbono y se produce oxígeno. Por lo tanto, el medio de cultivo siempre se está moviendo mientras esté iluminado con el fin de proporcionar nuevo dióxido de carbono y retirar el oxígeno que puede ser tóxico para las algas. El medio de cultivo se moverá por medio de una bomba 3. De este modo, el medio de cultivo se mueve a través del fotobiorreactor y se devuelve por medio del tubo 4. El intercambio de gas tendrá lugar en un depósito 5 al

que un sistema de tubo 6 proporcionará constantemente una mezcla de gas rica en dióxido de carbono por medio de un compresor 7. La mezcla de gas rica en dióxido de carbono puede tener su origen, por ejemplo, en una planta de energía eléctrica que use combustibles fósiles. El oxígeno desgasificado saldrá por medio de un tubo 8 equipado con un filtro estéril. Se puede sacar del sistema el líquido de cultivo con biomasa de algas por medio de una válvula 9 y almacenarse en un depósito 10 hasta que se procese adicionalmente este volumen cosechado. Un nuevo medio se provee al sistema por medio de otra válvula 11 desde un depósito de almacenamiento 12. Esto sirve para nivelar la pérdida de líquido causada por la cosecha y para suministrar líquido de cultivo con nutrientes nuevos.

En un modo de realización alternativo (no mostrado), se provee dióxido de carbono a las algas en crecimiento desde un tubo o manguera localizada en el reactor; teniendo el tubo o manguera una o más salidas para el dióxido de carbono. De este modo, en este modo de realización, el líquido de cultivo no debe moverse para pasar al depósito 5 con el fin de que sea suministrado con dióxido de carbono.

Los sensores 13 para la determinación de la salinidad y la temperatura del líquido de cultivo, y los sensores 14 para la determinación de la salinidad y la temperatura del agua circundante están conectados a una unidad de control 15. La unidad de control 15 determina la diferencia de densidad entre el líquido de cultivo y el agua circundante, en base a la información de los sensores 13, 14 así como otros parámetros y datos almacenados. La unidad de control controla las bombas (no mostrado) que suministran agua marina y agua dulce, respectivamente, al estanque 2. En otro modo de realización (no mostrado), la unidad de control 15 controla el medio para cambiar la salinidad del líquido de cultivo en el fotobiorreactor 1.

La Figura 1b muestra una sección transversal a través de dicho sistema. El fotobiorreactor 1 está cortado de forma lateral; en esta figura, el fotobiorreactor flota sobre un cuerpo de agua 2. Típicamente, el espesor vertical del líquido de cultivo en el fotobiorreactor es de entre 1 y 30 cm. La profundidad del cuerpo de agua 2 puede variar significativamente. El tubo 4 que se usa para circular el líquido de cultivo se ve también en el corte lateral.

El líquido de cultivo del fotobiorreactor

El cultivo de algas queda en el líquido de cultivo en el fotobiorreactor. El líquido de cultivo es una solución acuosa que comprende diferentes sales y otros nutrientes, por ejemplo, fuentes de carbono tales como CO₂, glucosa o succinato, de modo que las algas puedan producir biomasa o moléculas específicas. El contenido en nutrientes específicos del líquido de cultivo puede variar dependiendo del tipo de algas cultivadas en el fotobiorreactor o de las diferentes moléculas que se supone que produce el cultivo de algas. Se puede reemplazar el líquido de cultivo en el fotobiorreactor bombeando líquido de cultivo fresco en todo el fotobiorreactor a cualquier caudal, de modo que se provean nutrientes frescos al cultivo de algas. Si se bombea el líquido de cultivo en todo el fotobiorreactor, el caudal al que se bombea el líquido de cultivo se ajusta preferentemente con el fin de minimizar cualquier pérdida de algas del fotobiorreactor. La temperatura del líquido de cultivo en el fotobiorreactor y el agua circundante se mide continuamente. La temperatura medida se compara con los valores de temperatura predeterminados, que pueden ser temperaturas dentro de un intervalo de temperatura en el que las condiciones para el cultivo de algas sean óptimas, por ejemplo, un intervalo de temperatura que estimule la tasa de crecimiento más alta del cultivo de algas o la tasa de producción más alta de una molécula específica.

Suministro de CO₂ al líquido de cultivo del fotobiorreactor

Las algas requieren para su crecimiento grandes cantidades de CO₂ debido a que lo usan como una fuente clave de carbono. Además, en el proceso de la fotosíntesis se produce oxígeno, que puede ser tóxico para las algas. Por lo tanto, la transferencia de masa de estos gases a través de la barrera líquido-gas es crucial para una productividad alta. A continuación en el presente documento se describirá un número de formas posibles de proporcionar CO₂ al cultivo de algas y de retirar el oxígeno formado en el mismo. Los procedimientos descritos en el presente documento no deben interpretarse como limitantes de la presente invención. Otros procedimientos que también serán evidentes para los expertos en la técnica teniendo en cuenta la presente divulgación también se considera que están dentro del alcance de la presente invención.

En un modo de realización (no mostrado), la transferencia de masa de CO₂ al medio de cultivo se logra por medio de difusión pasiva de CO₂ gaseoso en un área de superficie grande del medio de cultivo. Asumiendo que la cinética de los procesos de difusión según se describe en la primera y segunda ley de Fick y los subsiguientes procesos de hidratación y desprotonización son lo suficientemente rápidos para proveer al cultivo de algas con suficiente CO₂ y evitar efectos tóxicos de O₂ por foto-oxidación, será suficiente una difusión pasiva de CO₂ en una superficie grande. La difusión pasiva tiene la ventaja de que no se necesita energía para mover el agua o para forzar CO₂ en el agua. Adicionalmente, se reducirán los costos de inversión puesto que no se requiere aireación activa. En tal caso, la transferencia de CO₂ tendrá lugar en la capa de interfase entre el agua y el gas CO₂ sin que se añada más energía. En un modo de realización más específico, esto puede realizarse generando una burbuja de gas rico en CO₂ sobre el medio de cultivo dentro del fotobiorreactor.

En otro modo de realización (no mostrado), se burbujea CO₂ en todo el medio de cultivo. Preferentemente, el CO₂ gaseoso se puede suministrar por un tubo o dispositivo parecido a un tubo, que se extienda dentro del medio de cultivo. Dicho sistema puede comprender agujeros a través de los que se puede empujar un gas rico en CO₂

aplicando presión desde un dispositivo externo. Los tubos o dispositivos parecidos a tubos pueden fijarse, por ejemplo, en la parte inferior del reactor y la dirección típica de los agujeros sería en la dirección de la superficie del agua.

5 Durante el funcionamiento del fotobiorreactor, se puede suministrar el gas rico en CO₂ continuamente al medio de cultivo. Esta modalidad también tiene la ventaja adicional de que conduce a una continua desgasificación de oxígeno cercana a *statu nascendi*, es decir, que el oxígeno producido se retira del medio de cultivo poco tiempo después de que se forme.

10 De forma alternativa, se puede añadir el gas rico en CO₂ en impulsos cortos. Existen varios medios para determinar la longitud de un impulso, la cantidad de gas empujada, la presión a la que se empuja el gas y el tiempo entre impulsos. En un modo de realización, se puede impulsar el gas por un cronómetro, que emite una señal regular, por ejemplo cada 5 minutos para un impulso de 1 minuto. En otro modo de realización, se controla el impulso por una unidad especial capaz de estimar la cantidad de CO₂ usado por las algas y de calcular la longitud óptima del impulso, la cantidad de gas que se va a empujar, la presión a la que se empuja el gas y el tiempo entre impulsos. Para estimar la cantidad de CO₂ requerida, la unidad puede comprender diferentes sensores, por ejemplo, un sensor que mida la intensidad de luz, un sensor que mida la temperatura y un sensor que mida la densidad de biomasa en el fotobiorreactor. Usando los puntos de datos recibidos por estos sensores, un controlador de proceso calcularía el patrón de impulsos óptimo del sistema de fotobiorreactor.

20 La cantidad de CO₂ añadida también puede estar relacionada con el pH en el reactor. En el medio de cultivo se dispone un electrodo de pH, y este electrodo mide continuamente el voltaje a través de una membrana semipermeable que permite que los protones pasen la membrana frente a un sistema redox definido, por ejemplo, frente a un electrodo de Ag/AgCl. El voltaje es registrado por una unidad de control de proceso. La unidad de control de proceso añadirá un impulso CO₂ tan pronto el voltaje llegue a un punto predefinido. Los parámetros del impulso, tales como tiempo, cantidad de impulsos por minuto, voltaje para detener los impulsos, se pueden introducir en la unidad de control de proceso.

25 En otro modo de realización, mostrado en las figuras 2a y 2b, se puede suministrar CO₂ gaseoso al medio de cultivo por un tubo o un dispositivo parecido a un tubo que se extiende dentro del fotobiorreactor y dispuesto para que flote en la parte superior de la superficie del medio de cultivo debido a su baja densidad. El burbujeo de CO₂ gaseoso se realiza de forma similar al caso descrito anteriormente, en el que el tubo o dispositivo parecido a un tubo se extiende dentro del medio de cultivo. Sin embargo, el tubo o el dispositivo parecido al tubo a través del que se suministra el CO₂ será diseñado específicamente para que flote en la superficie del medio de cultivo en el fotobiorreactor. Esto se logra porque la densidad de todo el sistema de aireación (16) es más baja que la densidad del medio de cultivo de algas (17). Preferentemente, los agujeros (18) en el tubo o en el dispositivo parecido al tubo a través de los que se empuja el CO₂ dentro del medio de cultivo pueden apuntar hacia abajo en este modo de realización para lograr la mejor transferencia de gas posible. De este modo, los agujeros estarán colocados en, o levemente por debajo de, la superficie del medio de cultivo.

35 Durante el funcionamiento del fotobiorreactor, se puede suministrar el gas rico en CO₂ continuamente al medio de cultivo. Este modo de realización también tiene la ventaja adicional de que conduce a una continua desgasificación de oxígeno cercana a *statu nascendi*, es decir, que el oxígeno producido se retira del medio de cultivo poco tiempo después de que se forme.

40 De forma alternativa, se puede añadir el gas rico en CO₂ en impulsos cortos. Existen varios medios para determinar la longitud de un impulso, la cantidad de gas empujada, la presión a la que se empuja el gas y el tiempo entre impulsos. En un modo de realización, se puede impulsar el gas por un cronómetro, que emite una señal regular, por ejemplo cada 5 minutos para un impulso de 1 minuto. En otro modo de realización, se controla el impulso por una unidad especial capaz de estimar la cantidad de CO₂ usado por las algas y de calcular la longitud óptima del impulso, la cantidad de gas que se va a empujar, la presión a la que se empuja el gas y el tiempo entre impulsos. Para estimar la cantidad de CO₂ requerida, la unidad puede comprender diferentes sensores, por ejemplo, un sensor que mida la intensidad de luz, un sensor que mida la temperatura y un sensor que mida la densidad de biomasa en el fotobiorreactor. Usando los puntos de datos recibidos por estos sensores, un controlador de proceso calcularía el patrón de impulsos óptimo del sistema de fotobiorreactor.

50 La cantidad de CO₂ añadida también puede estar relacionada con el pH en el reactor. En el medio de cultivo se dispone un electrodo de pH, y este electrodo mide continuamente el voltaje a través de una membrana semipermeable que permite que los protones pasen la membrana frente a un sistema redox definido, por ejemplo, frente a un electrodo Ag/AgCl. El voltaje es registrado por una unidad de control de proceso. La unidad de control de proceso añadirá un impulso CO₂ tan pronto el voltaje llegue a un punto predefinido. Los parámetros del impulso, tales como tiempo, cantidad de impulsos por minuto, voltaje para detener los impulsos, se pueden introducir en la unidad de control de proceso.

55 El CO₂ no tiene que suministrarse necesariamente al medio de cultivo en forma de CO₂ gaseoso dentro del fotobiorreactor. El medio enriquecido con CO₂ también se puede preparar fuera del fotobiorreactor, por ejemplo, burbujeando CO₂ gaseoso en un medio acuoso. En otras palabras, en lugar de suministrar el CO₂ en la parte

transparente del fotobiorreactor, esto se puede hacer fuera del fotobiorreactor. En un modo de realización, un sistema de este tipo puede emplear un depósito vertical que contenga un medio acuoso, en el que se suministra el gas rico en CO₂ en la parte inferior o cerca de la parte inferior del depósito. Mientras las burbujas de CO₂ suben por el medio acuoso, se transferirá CO₂ desde las burbujas dentro del medio acuoso, y al mismo tiempo se puede retirar el oxígeno del medio de cultivo. En un modo de realización preferido, el medio acuoso enriquecido con CO₂ es el medio de cultivo del fotobiorreactor que se enriquece con CO₂ y posteriormente se devuelve al fotobiorreactor. Debido a que el depósito puede tener una altura de varios metros, el tiempo residencial de CO₂ puede ser comparativamente largo, lo que permite una buena transferencia de masa. Para burbujear CO₂ en un depósito vertical, se requiere energía para trabajar, por ejemplo contra la presión hidrostática. Esa energía, que se pone para presurizar el gas, también se puede usar para mover el medio acuoso desde el compartimiento de algas dentro del dispositivo de enriquecimiento de CO₂ y de regreso al compartimiento de algas.

En otro modo de realización, en lugar de burbujear CO₂ en el cultivo de algas dentro o fuera del fotobiorreactor, el suministro de CO₂ se facilita por el uso de una membrana semipermeable. El uso de este tipo de membrana tendría varias ventajas en comparación con el burbujeo:

a) Dicha membrana funcionaría como válvula de paso único, lo que quiere decir que la membrana permitiría que el CO₂ entre en el medio de cultivo, pero evitaría que entrara agua en el sistema de suministro de CO₂, ya que dicha sería permeable para el CO₂ pero no para el agua.

b) Consumo de energía más bajo. Debido a que no se requiere la generación de burbujas, el procedimiento de membrana permite el suministro de CO₂ con un consumo de energía más bajo en comparación con el proceso de burbujeo.

c) Esfuerzo cortante bajo. Al evitar el burbujeo se reduce el esfuerzo cortante en las células de las algas. Un menor esfuerzo cortante en las algas da como resultado menos células de algas muertas en el medio de cultivo de algas y por lo tanto, menos material orgánico propenso a descomposición lo que puede reducir la eficiencia del fotobiorreactor. Además, esto reduciría significativamente el riesgo de contaminación por organismos heterotróficos.

d) Tasa de transferencia de masa incrementada. El uso de una membrana permite una presión de CO₂ más alta que el modo de realización que emplea la difusión pasiva descrita anteriormente, debido a que la presión de CO₂ contra la membrana no se limita a la presión de aire atmosférica circundante como sería el caso de la difusión pasiva. Además, la membrana puede tener un área de superficie más alta que una superficie plana, tal como la superficie del medio de cultivo, con el mismo tamaño que la membrana.

La transferencia de masa de CO₂ y/u oxígeno también puede facilitarse moviendo el fotobiorreactor, por ejemplo, inclinando el reactor.

El fotobiorreactor en un cuerpo cerrado de agua

El término "cuerpo cerrado de agua" se refiere a sistemas bien definidos de agua que permiten el control de, por ejemplo, la cantidad o el tipo de agua, tal como agua dulce, salobre o salada, en ellos. Ejemplos de cuerpos cerrados de agua son estanques o albercas naturales o artificiales.

En un modo de realización, el fotobiorreactor descansa sobre la superficie de un cuerpo cerrado de agua de mar, es decir, agua salada, como posición de inicio. Cuando el fotobiorreactor descansa, o flota, en la superficie de un cuerpo de agua de mar, la densidad del fotobiorreactor es más baja en comparación con la densidad del cuerpo de agua de mar. Si se necesita bajar la posición del fotobiorreactor, se regula la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el cuerpo de agua de mar. Como ejemplo, se puede necesitar bajar la posición del fotobiorreactor cuando la temperatura medida del líquido de cultivo sea más alta o se espere que sea más alta que un valor de temperatura predeterminado. Para regular la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el cuerpo de agua de mar, se reduce la salinidad del cuerpo de agua de mar. Esto se logra reemplazando el agua de mar por agua dulce. A medida que el agua de mar es reemplazada por agua dulce, se reduce gradualmente la salinidad del cuerpo cerrado de agua, es decir, se reduce la densidad del agua que rodea el fotobiorreactor. Como alternativa, se puede reemplazar el agua de mar por agua salobre. La densidad del líquido de cultivo, la densidad total del fotobiorreactor así como la densidad del agua circundante se miden continuamente de modo que se determine continuamente la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua circundante. El fotobiorreactor se hunde en el cuerpo cerrado de agua debido a su densidad más alta en comparación con el agua circundante y se baja la posición del fotobiorreactor. La posición del fotobiorreactor puede bajarse hasta que la temperatura medida del líquido de cultivo esté dentro de un intervalo de temperatura deseable.

En otro modo de realización, el fotobiorreactor descansa sobre la superficie de un cuerpo cerrado de agua dulce como posición de inicio. Cuando el fotobiorreactor descansa o flota sobre la superficie de un cuerpo de agua dulce, la densidad del fotobiorreactor es más baja en comparación con la densidad del cuerpo de agua dulce. Si se necesita bajar la posición del fotobiorreactor, se regula la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el cuerpo de agua dulce. Como ejemplo, se puede necesitar bajar la posición del fotobiorreactor cuando la temperatura medida del líquido de cultivo sea más alta o se espere que sea más alta que un valor de temperatura predeterminado. Para regular la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el cuerpo de agua dulce, se

aumenta la salinidad del líquido de cultivo. Esto se logra reemplazando o complementando el líquido de cultivo por un líquido de cultivo de salinidad más alta, es decir, bombeando al fotobiorreactor un líquido de cultivo de salinidad más alta. El caudal del líquido de cultivo se ajusta con el fin de permitir que las algas se adapten a las concentraciones de sal más altas en el líquido de cultivo y minimizar cualquier pérdida de algas en el fotobiorreactor.

5 A medida que el líquido de cultivo es reemplazado o complementado por líquido de cultivo de salinidad más alta, la densidad del fotobiorreactor aumenta. La densidad del líquido de cultivo, la densidad total del fotobiorreactor así como la densidad del agua circundante se miden continuamente de modo que se determine continuamente la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua circundante. El fotobiorreactor se hunde en el cuerpo cerrado de agua debido a su densidad más alta en comparación con el agua circundante y se baja la posición del
10 fotobiorreactor. La posición del fotobiorreactor puede bajarse hasta que la temperatura medida del líquido de cultivo esté dentro de un intervalo de temperatura deseable.

En otro modo de realización, el fotobiorreactor descansa por debajo de la superficie de un cuerpo cerrado de agua de mar, como agua salada, como posición de inicio. Cuando el fotobiorreactor está por debajo de la superficie de un cuerpo de agua de mar, la densidad del fotobiorreactor es más alta en comparación con la densidad del cuerpo de
15 agua de mar. Si se necesita subir la posición del fotobiorreactor, se regula la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el cuerpo de agua de mar. Como ejemplo, se puede necesitar subir la posición del fotobiorreactor cuando la temperatura medida del líquido de cultivo sea más baja o se espere que sea más baja que un valor de temperatura predeterminado. Para regular la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el cuerpo de agua de mar, se reduce la salinidad del líquido de cultivo. Esto se logra reemplazando o complementando el líquido de cultivo
20 por el líquido de cultivo de salinidad más baja, es decir, bombeando al fotobiorreactor un líquido de cultivo de salinidad más baja. El caudal del líquido de cultivo se ajusta para permitir que las algas se adapten a las concentraciones de sal más bajas en el líquido de cultivo y minimizar cualquier pérdida de algas en el fotobiorreactor. A medida que el líquido de cultivo es reemplazado o complementado por el líquido de cultivo de salinidad más baja, se reduce la densidad del fotobiorreactor. La densidad del líquido de cultivo, la densidad total
25 del fotobiorreactor, así como la densidad del agua circundante se miden continuamente de modo que se determine continuamente la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua circundante. La posición del fotobiorreactor se eleva en el cuerpo cerrado de agua debido a su densidad más baja en comparación con el agua circundante. Subir el fotobiorreactor en el cuerpo de agua podrá continuar hasta que la temperatura del líquido de cultivo esté dentro de un intervalo de temperatura deseable.

En otro modo de realización, el fotobiorreactor descansa por debajo de la superficie de un cuerpo cerrado de agua dulce como posición de inicio. Cuando el fotobiorreactor está por debajo de la superficie de un cuerpo de agua dulce, la densidad del fotobiorreactor es más alta en comparación con la densidad del cuerpo de agua dulce. Si se necesita subir la posición del fotobiorreactor, se regula la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el cuerpo
30 de agua dulce. Como ejemplo, se puede necesitar subir la posición del fotobiorreactor cuando la temperatura medida del líquido de cultivo sea más baja o se espere que sea más baja que un valor de temperatura predeterminado. Para regular la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el cuerpo de agua dulce, se aumenta la salinidad del agua circundante. Esto se logra reemplazando el agua dulce por agua de mar, es decir, agua salada. A medida que el agua dulce es reemplazada por agua salada, la salinidad del cuerpo cerrado de agua aumenta gradualmente, es decir, aumenta la densidad del agua que rodea el fotobiorreactor. La densidad del líquido de cultivo, la densidad
35 total del fotobiorreactor, así como la densidad del agua circundante se miden continuamente de modo que se determine continuamente la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua circundante. La posición del fotobiorreactor se eleva en el cuerpo cerrado de agua debido a su densidad más baja en comparación con el agua circundante. Subir el fotobiorreactor en el cuerpo de agua podrá continuar hasta que la temperatura del líquido de cultivo esté dentro de un intervalo de temperatura deseable.

En uno modo de realización, en particular cuando el fotobiorreactor está en un cuerpo cerrado de agua, la densidad del líquido de cultivo y la densidad del agua circundante se cambian simultáneamente. De este modo, la salinidad del agua circundante se reduce simultáneamente a medida que se aumenta la salinidad del líquido de cultivo, o se
45 aumenta simultáneamente la salinidad del agua circundante a medida que se reduce la salinidad del líquido de cultivo. La regulación simultánea de la salinidad del cuerpo de agua, preferentemente cerrado, y el líquido de cultivo aumenta la velocidad a la que se regula la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua circundante, aumentando con ello la velocidad a la que se sube o se baja el fotobiorreactor en el agua circundante.
50

En un modo de realización, en particular cuando el fotobiorreactor esté en un cuerpo cerrado de agua, la temperatura del cuerpo de agua se usa como un medio adicional para proveer una diferencia de densidad deseable, es decir, se regula la temperatura como complemento o como alternativa para regular la salinidad del líquido de
55 cultivo o del agua alrededor del reactor. Cuando se necesita bajar la posición del fotobiorreactor, se aumenta la temperatura del cuerpo cerrado de agua, reduciendo con ello la densidad del agua circundante. Además, cuando se necesita subir la posición del fotobiorreactor, se reduce la temperatura del cuerpo cerrado de agua, aumentando con ello la densidad del agua circundante. De este modo, regular la temperatura del agua alrededor del reactor influye en la velocidad a la que se sube o se baja el fotobiorreactor en el agua circundante.

En un modo de realización en el que el fotobiorreactor descansa sobre la superficie de un cuerpo cerrado de agua de mar, es decir, agua salada, como posición de inicio, se añaden otros aditivos que no sean agua dulce al agua circundante con el fin de reducir la densidad del medio alrededor del reactor. Por ejemplo, se añade un líquido no
60

acuoso de densidad más baja que el agua al cuerpo cerrado de agua con el fin de reducir la densidad del medio alrededor del reactor.

5 En un modo de realización en el que el fotobiorreactor descansa por debajo de la superficie de un cuerpo cerrado de agua dulce como posición de inicio, se añaden otros aditivos que no sean agua de mar, es decir, agua salada, al cuerpo cerrado de agua dulce con el fin de aumentar la densidad del medio alrededor del reactor. Por ejemplo, se añade un líquido no acuoso de densidad más alta que el agua al cuerpo cerrado de agua con el fin de aumentar la densidad del medio alrededor del reactor.

El fotobiorreactor cerrado en agua abierta

10 El término “agua abierta” se refiere a los cuerpos naturales de agua, tales como lagos, ríos o mar, en los que es difícil o imposible un control efectivo de las propiedades químicas o físicas del agua.

15 En un modo de realización, el fotobiorreactor descansa sobre la superficie de agua dulce abierta como posición de inicio. Cuando el fotobiorreactor descansa, o flota, en la superficie de agua dulce abierta, la densidad del fotobiorreactor es más baja en comparación con la densidad del agua dulce. Si se necesita bajar la posición del fotobiorreactor, se regula la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua dulce abierta. Como ejemplo, se puede necesitar bajar la posición del fotobiorreactor cuando la temperatura medida del líquido de cultivo sea más alta o se espere que sea más alta que un valor de temperatura predeterminado. Para regular la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua circundante, se aumenta la salinidad del líquido de cultivo. Esto se logra reemplazando o complementando el líquido de cultivo por un líquido de cultivo de salinidad más alta, es decir, bombeando al fotobiorreactor el líquido de cultivo de salinidad más alta. El caudal del líquido de cultivo se ajusta con el fin de permitir que las algas se adapten a las concentraciones de sal más altas en el líquido de cultivo y minimizar cualquier pérdida de algas en el fotobiorreactor. A medida que el líquido de cultivo es reemplazado o complementado por el líquido de cultivo de salinidad más alta, aumenta la densidad del fotobiorreactor. La densidad del líquido de cultivo, la densidad total del fotobiorreactor así como la densidad del agua dulce abierta se miden continuamente de modo que se determine continuamente la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua circundante. El fotobiorreactor se hunde en el agua dulce abierta debido a su densidad más alta en comparación con el agua circundante y se baja la posición del fotobiorreactor. La posición del fotobiorreactor puede bajarse hasta que la temperatura medida del líquido de cultivo esté dentro de un intervalo de temperatura deseable.

30 En otro modo de realización, el fotobiorreactor descansa por debajo de la superficie del agua de mar abierta, es decir, agua salada, como posición de inicio. Cuando el fotobiorreactor está por debajo de la superficie de agua de mar abierta, la densidad del fotobiorreactor es más alta en comparación con el agua de mar. Si se necesita subir la posición del fotobiorreactor, se regula la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua de mar. Como ejemplo, se puede necesitar elevar la posición del fotobiorreactor cuando la temperatura medida del líquido de cultivo sea más baja o que se espere sea más baja que un valor de temperatura predeterminado. Para regular la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua de mar, se reduce la salinidad del líquido de cultivo. Esto se logra reemplazando el líquido de cultivo por un líquido de cultivo de salinidad más baja, es decir, bombeando al fotobiorreactor un líquido de cultivo de salinidad más baja. El caudal del líquido de cultivo se ajusta con el fin de permitir que las algas se adapten a las concentraciones de sal más bajas en el líquido de cultivo y minimizar cualquier pérdida de algas en el fotobiorreactor. A medida que el líquido de cultivo es reemplazado por líquido de cultivo de salinidad más baja, se reduce la densidad del fotobiorreactor. La densidad del líquido de cultivo, la densidad total del fotobiorreactor así como la densidad del agua de mar se miden continuamente de modo que se determine continuamente la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua circundante. La posición del fotobiorreactor se sube en el agua de mar debido a su densidad más baja en comparación con el agua circundante. Subir el fotobiorreactor en el agua de mar podrá continuar hasta que la temperatura medida del líquido de cultivo esté dentro de un intervalo de temperatura deseable.

45 *Sistema de control*

50 En un modo de realización, la salinidad del líquido de cultivo, y de este modo, indirectamente la posición del fotobiorreactor se regula mediante un sistema multipropósito. Este sistema está programado con información relacionada con el fotobiorreactor, como el peso y la densidad totales del fotobiorreactor y la cantidad de biomasa y líquido de cultivo que se contiene en el fotobiorreactor. Más aún, el sistema mide continuamente la temperatura, salinidad y densidad del líquido de cultivo y la densidad del agua circundante, de este modo determinando continuamente la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua circundante. El sistema también controla la concentración de los diferentes componentes del líquido de cultivo, tal como la concentración de sal. Después, el sistema puede regular automáticamente la posición del fotobiorreactor en el agua circundante como respuesta a un cambio en la temperatura del líquido de cultivo, con el fin de mantener el cultivo de algas a temperatura constante. Así, el sistema puede estar equipado con circuitos de control o algoritmos conocidos, tales como algoritmos de control con mecanismos de retroalimentación, para permitir una óptima estabilidad cuando se regule la posición del fotobiorreactor.

En otro modo de realización, cuando el fotobiorreactor esté en un cuerpo cerrado de agua, la salinidad y la temperatura del agua circundante son reguladas por el sistema multipropósito descrito anteriormente. En un modo

de realización del fotobiorreactor que tenga compartimientos o tubos adicionales, el sistema de control también regula el llenado y vaciado de gas, agua y otros líquidos de los compartimientos o tubos. En un modo de realización, el sistema multipropósito no sólo controla parámetros relacionados con la colocación del fotobiorreactor, sino también parámetros relevantes al crecimiento de las algas. De este modo, el sistema de control también mide y regula el contenido de O₂ y de CO₂ del cultivo de algas.

Medios adicionales para controlar la posición y/o forma del fotobiorreactor

La posición vertical y/o forma del fotobiorreactor según la presente invención puede controlarse suministrando una diferencia de densidad adecuada entre el líquido de cultivo y el agua circundante en la que está suspendido el reactor. Sin embargo, algunas veces pueden ser útiles medios adicionales para controlar la posición y/o forma del fotobiorreactor. Este puede ser el caso, por ejemplo, cuando se necesita sumergir rápidamente el fotobiorreactor. Dichos medios pueden incluir compartimientos o tubos adicionales que puedan llenarse con un medio de alta o baja densidad con el fin de ayudar a la sumersión o flotación del fotobiorreactor, medios mecánicos para ayudar a la sumersión o flotación del fotobiorreactor, y subcompartimientos dentro del compartimiento de algas del fotobiorreactor para controlar la forma del reactor cuando se sumerja. A continuación en el presente documento se analizarán en detalle estos tres tipos de medios.

Compartimientos o tubos adicionales que se puedan llenar con medio de alta o baja densidad

En un modo de realización, el fotobiorreactor está equipado con compartimientos o tubos adicionales que proveen medios para aumentar la velocidad a la que se cambia la posición del fotobiorreactor. Los compartimientos o tubos pueden contener gas, agua o cualquier otro líquido. Cuando el fotobiorreactor descansa sobre una superficie de agua, los compartimientos o tubos pueden contener sólo gas. Si se necesita bajar la posición del fotobiorreactor, los compartimientos o tubos se llenan con agua o con un líquido de alta densidad, aumentando de este modo la densidad total del fotobiorreactor. Cuando el fotobiorreactor está por debajo de la superficie del agua y se necesita subir la posición del fotobiorreactor, se empuja el agua o el líquido de alta densidad en los compartimientos o tubos y se reemplaza por gas, reduciendo de este modo la densidad total del fotobiorreactor. De este modo, los compartimientos o tubos adicionales aumentan la velocidad a la que se regula la diferencia de densidad entre el fotobiorreactor y el agua circundante. Por lo tanto, los compartimientos o tubos adicionales pueden usarse cuando se necesite adaptar rápidamente la posición del fotobiorreactor, tal como en respuesta a cambios a corto plazo de la temperatura del líquido de cultivo. "Cambios a corto plazo" se refiere a cambios en la escala de minutos u horas. Los compartimientos o tubos adicionales pueden disponerse en cualquier lugar en el fotobiorreactor. Los compartimientos o tubos adicionales pueden ser del mismo material que el resto del fotobiorreactor o de un material diferente, que sea más rígido y potencialmente también más durable. Los compartimientos o tubos adicionales también pueden comprender un sistema de varios tubos en conexión líquida entre sí o pueden comprender un compartimiento más ancho que tenga puntos de pegamento o soldadura o conexiones hechas por técnicas similares para proveer estabilidad estructural.

En un modo de realización mostrado en la Figura 3, se dispone un compartimiento adicional en la parte superior del fotobiorreactor. En este modo de realización, la densidad del sistema del reactor total puede cambiarse añadiendo un líquido con alta densidad, preferentemente agua salada, en el compartimiento adicional (19), que está separado del compartimiento de algas (20). Cuando está lleno, el compartimiento aumentará la densidad de todo el sistema reactor de modo que se acelere el proceso de hundimiento. En este modo de realización, el compartimiento adicional está dispuesto en la parte superior del fotobiorreactor. El compartimiento adicional comprende puntos de pegamento interiores (21) para proveer estabilidad estructural. Los compartimientos o tubos adicionales pueden estar conectados a un suministro de líquido de alta densidad por una o más mangueras (22) provistas de válvulas (23) a un lado del reactor, y una conexión similar al lado opuesto del reactor. Cuando se usa para acelerar la sumersión del fotobiorreactor según este modo de realización, el compartimiento adicional se llenará con agua de un lado, y las válvulas al otro lado también se abrirán. Comenzando el proceso de llenado de un lado, este lado se sumergirá primero. El aire que quede en el compartimiento adicional se puede recoger de este modo en un lado del fotobiorreactor y empujar hacia afuera con mayor eficiencia. El proceso de llenado continuará hasta que salga todo el aire y el reactor completo comience a hundirse. A continuación, se cierran las válvulas opuestas a las mangueras de llenado. El proceso de llenado puede detenerse en este punto o continuar el proceso de llenado por un tiempo. Continuar con el proceso de llenado aumenta la presión en el compartimiento adicional, aumentando de este modo la rigidez de este compartimiento y permitiéndole proveer una estabilidad estructural adicional al fotobiorreactor durante la sumersión y en un modo parcial o totalmente sumergido.

Cuando el sistema de reactor debe subir, el agua salada del compartimiento adicional será bombeada por una bomba, habiendo cerrado las válvulas opuestas a la bomba con el fin de evitar que las burbujas de aire ingresen al nuevo compartimiento. Para acelerar el proceso de subida, las válvulas opuestas a la bomba se abrirán y con las respectivas mangueras, se empujará hacia adentro aire presurizado o gases de proceso.

Medios mecánicos para ayudar a la sumersión o flotación del fotobiorreactor

El fotobiorreactor puede estar equipado con medios mecánicos para acelerar la sumersión o flotación cuando se necesite adaptar rápidamente la posición del fotobiorreactor, por ejemplo, para optimizar las condiciones de

crecimiento de las algas, por ejemplo, la temperatura, o debido a condiciones relacionadas con el clima, tales como vientos fuertes. Este tipo de medios mecánicos puede comprender, por ejemplo, una red o al menos un elemento alargado, tal como una cuerda, cable o varilla, extendida por encima del fotobiorreactor y dispuesta para que baje o suba para ayudar a la sumersión o flotación del fotobiorreactor. Generalmente, será útil tener dos o más elementos
 5 alargados dispuestos en paralelo y distribuidos a distancias adecuadas a través de la longitud del fotobiorreactor. Los elementos alargados pueden subirse o bajarse simultáneamente o en secuencia, por ejemplo, de modo que todo el fotobiorreactor se sumerja simultáneamente, o de modo que primero se sumerja un lado del reactor y posteriormente se sumerja el otro lado del reactor.

En la Figura 4a se ilustra un modo de realización específico. Por encima del biorreactor (24), están instaladas
 10 cuerdas (25) a distancias regulares, esto puede realizarse en una distancia de por ejemplo, cada 1-2 metros. Las cuerdas tienen como mínimo la longitud del tamaño del reactor y a ambos extremos están conectados a perfiles verticales (26). Cuando se vaya a sumergir el fotobiorreactor, se tira de las cuerdas hacia abajo en los perfiles verticales a cada lado del reactor, respectivamente, de modo que las cuerdas empujen el reactor (27) hacia abajo. Se pueden usar varias disposiciones con el fin de fijar y mover las cuerdas. En un modo de realización específico,
 15 como se muestra en la Figura 4b, las cuerdas pueden fijarse a una estructura en forma de T (29), que es movable verticalmente a lo largo de un perfil plástico o metálico. El perfil plástico o metálico se fija verticalmente al suelo y contiene un riel en el que la estructura movable puede moverse hacia arriba o hacia abajo. La cuerda se fija a la estructura movable. Para mover la estructura, se requiere energía y un sistema mecánico. El sistema mecánico puede ser un pistón (30) en cada uno de los perfiles o un pistón central puede suministrar la fuerza mecánica para
 20 varios perfiles. Cada pistón puede accionarse por gas presurizado (31). El gas presurizado puede suministrarse, por ejemplo, por un tubo de gas, un compresor, o puede ser gas rico en CO₂ presurizado de un emisor, por ejemplo, una planta eléctrica. Preferentemente, la fuente de CO₂ puede ser la misma que se usa para suministrar CO₂ al líquido de cultivo.

En un modo de realización con dos o más cuerdas, el movimiento de las cuerdas puede realizarse de varias formas.
 25 Todas las cuerdas pueden bajarse con la misma velocidad, de modo que se baje simultáneamente todo el fotobiorreactor. Sin embargo, se ha descubierto que a menudo es ventajoso bajar primero las cuerdas a un lado del reactor, bajando de este modo este lado del reactor, y posteriormente bajar también el otro lado. Este tipo de procedimiento por pasos tiene varias ventajas. Si se baja primero un lado del reactor, entonces todo el gas atrapado dentro del reactor pasará al otro lado. En este tipo de sistema, las salidas de gas pueden estar dispuestas
 30 específicamente en este otro lado. Esta disposición permite que se empuje hacia fuera el gas sobrante por el movimiento del reactor. Esto puede ser ventajoso en comparación con el caso en el que el fotobiorreactor completo se baja simultáneamente, donde se pueden producir burbujas de gas o aglomerados en posiciones aleatorias dentro del reactor. De acuerdo con el mismo principio, todo el medio de cultivo se recogería en un lugar determinado y el control de la posición del medio de cultivo haría más fácil la partición posterior potencial. Además, el proceso de cosecha se facilita, ya que toda la biomasa se aglomera a un lado del reactor. Finalmente, bajar primero el reactor a
 35 un lado requiere menos fuerza y permite que el agua circundante fluya alrededor del reactor de un modo más controlado, creando menos turbulencia, lo que podría hacer este proceso más estable en comparación con un proceso en el que todo el reactor se baje simultáneamente. Debido a que el fotobiorreactor es muy flexible y puede verse afectado adversamente por la turbulencia y el movimiento rápido del agua, esta es una ventaja importante.

40 Los compartimientos o tubos adicionales, así como los medios mecánicos descritos anteriormente, además de acelerar la sumersión o la flotación, proporcionan la ventaja adicional de estabilizar la forma física del fotobiorreactor durante la sumersión y en un modo parcial o totalmente sumergido.

Subcompartimientos

45 Debido a que el fotobiorreactor de la presente invención es muy flexible, la forma del reactor puede estar influenciada por impactos e inhomogeneidades internas y externas. Por ello, con el fin de conservar la forma y la función óptima del fotobiorreactor, el control de dichos impactos e inhomogeneidades puede ser importante. Por lo tanto, a continuación en el presente documento se describen varios modos de realización de la presente invención, que tratan diferentes aspectos del funcionamiento del fotobiorreactor de la invención.

50 Si se usa un material de reactor delgado y flexible, el reactor forma un sistema plano y homogéneo perfecto cuando está flotando sobre una expansión de agua. Sin embargo, existen dos fuerzas principales, que pueden contribuir a desestabilizar el sistema del reactor. a) La forma y el comportamiento del fotobiorreactor pueden verse afectados por la formación de grandes burbujas de gas dentro del fotobiorreactor. Se puede desear el burbujeo de CO₂ gaseoso en todo el medio de cultivo para suministrar suficiente CO₂ que soporte una tasa de crecimiento óptima del cultivo de
 55 algas. El influjo constante de gas dentro del fotobiorreactor puede llevar a la formación de una o más burbujas grandes de gas por encima del líquido de cultivo. Con el fin de controlar las burbujas de gas, se pueden considerar varias soluciones. Se pueden conectar una o más salidas de gas al fotobiorreactor. El número y las posiciones de las salidas, así como el diámetro interno de las salidas son factores importantes que influyen en el tamaño de la burbuja. Otro procedimiento para controlar el tamaño y el comportamiento de las burbujas de gas es dividir el fotobiorreactor en pequeños subcompartimientos. Esto se puede lograr de varias formas diferentes, de las que unos
 60 pocos ejemplos se describen en mayor detalle a continuación en el presente documento. b) Se puede producir una aglomeración del medio de cultivo. Siempre que el reactor esté flotando sobre una expansión de agua, el medio de

cultivo se distribuirá uniformemente dentro del fotobiorreactor. Cuando el reactor se baje al agua circundante, por ejemplo, debido a que la temperatura del medio de cultivo deba bajarse o debido a vientos fuertes, se puede distorsionar esta distribución uniforme. Por lo general, este problema se presentará por el medio de cultivo de algas que se recolectan en un lugar dentro del fotobiorreactor, formando de este modo un aglomerado grande. Esto puede distorsionar la forma y el correcto funcionamiento del fotobiorreactor. Con el fin de conservar la forma y asegurar un correcto funcionamiento del reactor, en particular en reactores a gran escala, se debe evitar esta aglomeración.

Se ha descubierto que los problemas de aglomeración y formación de grandes burbujas de gas pueden reducirse o eliminarse dividiendo el fotobiorreactor en subcompartimientos más pequeños.

En su modo de realización más general, el fotobiorreactor comprende un compartimiento grande de algas, que comprende, en general, una lámina superior y una lámina inferior, unidas la una a la otra a lo largo de los perímetros de las mismas para formar un compartimiento cerrado en forma de bolsa.

En un modo de realización mostrado en la Figura 5, en lugar de que el biorreactor comprenda un compartimiento grande, el compartimiento de las algas se divide en un número de diferentes compartimientos cerrados (32) por un separador (33), que puede crearse, por ejemplo, pegando o soldando las láminas superior e inferior del fotobiorreactor para formar dos o más subcompartimientos más pequeños. Los subcompartimientos así formados actuarán como una formación de pequeños fotobiorreactores, es decir, el medio de cultivo con las algas solo se puede aglomerar en un subcompartimiento. Debido a que los subcompartimientos tienen un volumen más pequeño, se evitan grandes aglomeraciones.

El fotobiorreactor también puede dividirse parcialmente, por ejemplo, pegando o soldando las láminas superior e inferior en posiciones específicas. Las divisiones parciales pueden restringir, pero no necesariamente detener totalmente, el flujo del medio de cultivo y las potenciales burbujas de gas dentro del fotobiorreactor.

Las Figuras 6a y 6b muestran modos de realización de la invención en los que el fotobiorreactor está dividido parcialmente. Las láminas superior (34) e inferior (35) del fotobiorreactor que encierran el compartimiento de algas (36) están conectados en los bordes del fotobiorreactor (37). Dentro, las dos láminas están conectadas en varios puntos (38) dentro del fotobiorreactor, por ejemplo, por pegamento o soldadura. Un compartimiento de algas según este modo de realización tendrá aún la necesaria flexibilidad para extenderse uniformemente cuando flote, pero también impedirá que el medio de cultivo dentro del reactor forme grandes aglomerados, debido a que las capas superior e inferior están conectadas, permitiendo con ello solo un volumen limitado de fluido entre las capas. El pegado o la soldadura de las láminas superior e inferior se puede realizar en cualquier número de patrones diferentes para obtener diferentes formas en los subcompartimientos formados del fotobiorreactor.

En primer lugar, se puede variar la forma de las áreas conectadas, es decir, los puntos de pegamento o soldadura. Solo para dar ejemplos sin excluir otras posibilidades, la conexión de la capa superior e inferior puede ser en forma de un círculo pequeño (es decir, en forma de un punto de pegamento sencillo), por ejemplo, con un diámetro de 1 cm. La forma también puede ser rectangular, es decir, que la porción pegada o soldada pueda formar una línea completa o discontinua o una porción de la misma.

En segundo lugar, se pueden variar las posiciones de las porciones pegadas o soldadas dentro del fotobiorreactor. Los puntos pegados o soldados pueden distribuirse regularmente por todo el reactor, o pueden concentrarse a un lado para facilitar, por ejemplo, la recogida de biomasa o de aire al otro lado. Del mismo modo, se pueden disponer regularmente líneas pegadas o soldadas de modo que se forme un patrón tipo tubo. También se pueden construir otros patrones, por ejemplo, de modo que por la provisión de líneas pegadas o soldadas se pueda predeterminedir un flujo de líquido en el fotobiorreactor. Esto se puede comparar con la estructura de un laberinto griego (variedad de jardín inglés) donde solo hay una forma posible para que el líquido atraviese el sistema de reactor. Añadir un patrón de este tipo puede tener varias ventajas. La definición de una cierta dirección de flujo puede facilitar la cosecha de biomasa o la adición de nuevos nutrientes, ya que esto se puede realizar en un lugar predefinido en el reactor.

En otro modo de realización, el compartimiento de algas del fotobiorreactor consiste en un compartimiento flexible grande. Cuando el fotobiorreactor flota sobre la expansión de agua, este compartimiento reacciona como un compartimiento grande, dentro del que se pueden mover libremente el líquido y el gas. Con el fin de evitar posibles problemas con la formación de grandes burbujas de gas o aglomeración del medio de cultivo cuando se baje el fotobiorreactor al agua circundante, el compartimiento de algas del fotobiorreactor puede dividirse temporalmente en dos o más subsecciones diferentes antes de bajar el reactor al agua circundante. Esta división puede lograrse, por ejemplo, mediante la aplicación de fuerza al lado superior flexible del fotobiorreactor de modo que la lámina superior del fotobiorreactor se presione hacia la lámina inferior y se formen dos o más subcompartimientos virtuales dentro del compartimiento de algas del reactor.

Esta fuerza puede aplicarse, por ejemplo, por al menos un elemento alargado, como una cuerda, cable o varilla extendida a través de la superficie superior del fotobiorreactor y dispuesta para que se tire hacia abajo. La Figura 4a muestra un modo de realización específico. Por encima del fotobiorreactor (24) se han instalado cuerdas (25) a distancias regulares, esto se puede realizar a una distancia de, por ejemplo, 1-2 metros. Las cuerdas tienen como mínimo la longitud del tamaño del reactor y a ambos extremos están conectadas a perfiles verticales (26). Antes de

reducir la flotabilidad del reactor, las cuerdas se bajarán a una posición por debajo de la superficie del agua de modo que las cuerdas se “corten” dentro del fotobiorreactor flexible de modo que la lámina superior del reactor se presione contra la lámina inferior del reactor. Se generan subcompartimientos virtuales (27) por las cuerdas, en los que el medio de cultivo (28) tiende a quedarse arriba debido a que aún tiene una densidad más baja que el agua circundante y no sigue la cuerda. Cuando la densidad, y por lo tanto, la flotabilidad, del fotobiorreactor se reduzca y el reactor comience a hundirse, los subcompartimientos virtuales creados se comportan como compartimientos separados más pequeños.

Para fijar y mover las cuerdas se pueden usar varias disposiciones. En un modo de realización específico, como se muestra en la Figura 4b, las cuerdas pueden fijarse a una estructura en forma de T (29), que es movable verticalmente a lo largo de un perfil plástico o metálico. El perfil plástico o metálico se fija verticalmente al suelo y contiene un riel en el que la estructura movable se puede mover hacia arriba o hacia abajo. La cuerda se fija a la estructura movable. Para mover la estructura, se requiere energía y un sistema mecánico. El sistema mecánico puede ser un pistón (30) en cada uno de los perfiles, o un pistón central puede suministrar la fuerza mecánica para varios perfiles. Cada pistón puede accionarse por gas presurizado (31). El gas presurizado puede suministrarse, por ejemplo, por un tubo de gas, un compresor, o puede ser gas rico en CO₂ presurizado de un emisor, como de una planta eléctrica. Preferentemente, la fuente de CO₂ puede ser la misma que se utiliza para suministrar CO₂ al líquido de cultivo.

En la Figura 8 se muestra otro modo de realización basado en el principio general de dividir temporalmente el fotobiorreactor en dos o más subsecciones o compartimientos diferentes antes de que se baje el reactor al agua circundante. En este modo de realización, los compartimientos (39) no se crean por las cuerdas. Por el contrario, los compartimientos se crean por compartimientos o tubos adicionales (40), localizados por encima del compartimiento de algas (41) y que se pueden llenar con un líquido que tenga una densidad más alta que el medio de cultivo en el compartimiento de algas del fotobiorreactor. Cuando se llenan con un líquido de alta densidad, estos compartimientos o tubos adicionales se hundirán para presionar la lámina superior del fotobiorreactor hacia la lámina inferior y crear subcompartimientos virtuales dentro del compartimiento de algas.

Lista detallada de otros modos de realización

En la siguiente lista numerada de puntos se divulgan otros modos de realización de la presente invención.

1a. Fotobiorreactor para el cultivo de microorganismos fototróficos, caracterizado por que

a) el fotobiorreactor consiste en unidades no tubulares, representa un sistema cerrado y está rodeado parcialmente de forma externa por agua, de modo que el fotobiorreactor flote sobre un cuerpo de agua (por ejemplo, un estanque artificial, un río, un lago, el mar o un foso lleno de agua), se suspende en agua o está localizado en el suelo del cuerpo de agua;

b) se produce biomasa de organismos fototróficos, que se puede usar para la producción de cualquier tipo de biocombustibles, alimento animal, proteínas, aminoácidos, ingredientes (por ejemplo, proteínas, aceite) para nutrición básica humana, pero no para su uso como suplementos nutricionales, tales como vitaminas o ácidos grasos omega 3.

1b. Fotobiorreactor para cultivo de microorganismos fototróficos para la producción de productos químicos finos y farmacéuticos, caracterizado por que:

a) el fotobiorreactor consiste en unidades no tubulares, representa un sistema cerrado y está rodeado parcialmente de forma externa por agua, de modo que el fotobiorreactor flote sobre un cuerpo de agua (por ejemplo, un estanque artificial, un río, un lago, el mar o un foso lleno de agua), se suspende en agua o está localizado en el suelo del cuerpo de agua;

b) se produce biomasa de organismos fototróficos, que se usa para la producción de químicos finos, suplementos nutricionales, vitaminas, ácidos grasos omega-3, antioxidantes (por ejemplo, carotenoides), sustancias farmacéuticamente activas o biomasa seca para suplemento nutricional.

2. El fotobiorreactor según el punto 1a o 1b, caracterizado por que el fotobiorreactor consiste en unidades tubulares en lugar de unidades no tubulares.

3. El fotobiorreactor según el punto 1a o 1b, caracterizado por que el fotobiorreactor tiene forma plana (panel plano).

4. El fotobiorreactor según el punto 1a o 1b, caracterizado por que el cuerpo de agua alrededor del fotobiorreactor puede usarse para controlar la temperatura del líquido de cultivo en el fotobiorreactor.

5. El fotobiorreactor según el punto 1a o 1b, caracterizado por que el cuerpo de agua que rodea el fotobiorreactor puede usarse para nivelar el fotobiorreactor de modo que éste se mantenga en posición horizontal.

6. El fotobiorreactor según el punto 1a o 1b, caracterizado por que el cuerpo de agua alrededor del fotobiorreactor

contrarresta la presión hidrostática interna del fotobiorreactor.

7. El fotobiorreactor según el punto 1a o 1b, caracterizado por que el cuerpo de agua alrededor del fotobiorreactor, por medio de la presión hidrostática causada por su propio peso, se usa para reducir la tensión mecánica del material del fotobiorreactor.

5 8. El fotobiorreactor según el punto 1a o 1b, caracterizado por que las diferencias en la densidad (por ejemplo, causadas por diferencias en salinidad o temperatura) entre el líquido de cultivo en el fotobiorreactor y el cuerpo de agua (parcialmente) circundante se proveen para controlar la posición del fotobiorreactor en el agua circundante (por ejemplo, que flota en la superficie, se suspende en un cuerpo de agua circundante, se hunde en un cuerpo de agua circundante).

10 9. El fotobiorreactor según el punto 1a o 1b, caracterizado por que el fotobiorreactor consiste en un material flexible, de modo que el espesor vertical del líquido de cultivo en el fotobiorreactor puede cambiarse por el cambio en la cantidad del líquido de cultivo presente en el fotobiorreactor.

10. El fotobiorreactor según el punto 1a o 1b, caracterizado por que se puede hacer funcionar el fotobiorreactor en superficies de agua tales como lagos, ríos o mares, y por lo tanto no requiere necesariamente tierra.

15 11. El fotobiorreactor según el punto 1a o 1b, caracterizado por que el medio de cultivo en el fotobiorreactor tiene una velocidad horizontal > 0 cm/s y se mueve por un puente aéreo, una bomba o un dispositivo similar.

12. El fotobiorreactor según el punto 1a o 1b, caracterizado por que el cuerpo de agua que rodea el fotobiorreactor contribuye al mantenimiento de aproximadamente el mismo espesor vertical de líquido de cultivo en el fotobiorreactor en todas sus dimensiones horizontales.

20 EJEMPLO

Se colocó un fotobiorreactor flexible cerrado de panel plano fabricado de una película de polietileno flexible y con dimensiones de 7 metros x 5 metros sobre la superficie de una cuenca que contenía agua con una salinidad de 35 g/l. El compartimiento de algas del fotobiorreactor se alimentó con 1.800 litros de agua dulce coloreada con azul de metilo. El fotobiorreactor que contenía la solución coloreada (que representa el líquido de cultivo) se dispuso flotando sobre la superficie del agua circundante, estando distribuido el medio de cultivo en forma homogénea sobre la superficie inferior del reactor.

25 Se bajó el fotobiorreactor al agua circundante agregando agua saturada con sal dentro de un compartimiento adicional colocado en la parte superior del compartimiento de algas. Se bombeó agua salada sólo de un lado del compartimiento adicional, por medio de cinco puertos de líquido distribuidos equitativamente a lo largo del lado más largo del compartimiento adicional. El sistema de reactor comenzó a hundirse en el lado donde se bombeó el agua salada más pesada. Durante el proceso, a medida que se bombeaba más agua salada, se llenó completamente el compartimiento adicional y el otro lado del compartimiento de algas también comenzó a hundirse. Cuando estuvo completamente sumergido, el fotobiorreactor recuperó su forma general de panel plano.

30 A continuación, se devolvió el fotobiorreactor a su posición original flotando sobre la superficie del agua circundante retirando el agua salada por medio de los cinco puertos de líquido descritos anteriormente. Para retirar completamente el agua salada se empujó aire presurizado a través del compartimiento adicional.

35

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un procedimiento para hacer funcionar un fotobiorreactor cerrado para el cultivo de microorganismos fototrópicos, comprendiendo el fotobiorreactor un líquido de cultivo y estando rodeado el fotobiorreactor parcial o completamente por agua de un cuerpo de agua, en el que se provee una diferencia de densidad entre el líquido de cultivo y el agua circundante de modo que se controle la posición del fotobiorreactor en el cuerpo de agua.
2. El procedimiento de conformidad con la reivindicación 1, en el que las paredes de dicho fotobiorreactor adaptadas para comprender un líquido de cultivo comprenden un material flexible hermético al agua.
- 10 3. El procedimiento de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se provee la diferencia de densidad mediante la provisión de una diferencia de salinidad y/o temperatura entre el líquido de cultivo y el agua circundante.
4. El procedimiento de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se provee la diferencia de densidad de modo que se mantenga la posición del fotobiorreactor en el cuerpo de agua.
- 15 5. El procedimiento de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el fotobiorreactor está dotado con uno o más compartimientos o tubos adaptados para controlar adicionalmente la posición vertical y/o la forma del fotobiorreactor.
6. El procedimiento de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el fotobiorreactor está dotado con medios mecánicos adaptados para controlar adicionalmente la posición vertical y/o la forma del fotobiorreactor.
- 20 7. El procedimiento de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el fotobiorreactor tiene una forma de panel plano.
8. El procedimiento de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el fotobiorreactor comprende dos o más subcompartimientos adaptados para que comprendan el líquido de cultivo.
9. El procedimiento de conformidad con la reivindicación 8, en el que dichos subcompartimientos están sellados entre sí.
- 25 10. El procedimiento de conformidad con la reivindicación 8, en el que dichos subcompartimientos están conectados para permitir el transporte limitado de líquido y/o gas entre los subcompartimientos.
11. El procedimiento de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el fotobiorreactor comprende medios para dividir temporalmente el fotobiorreactor en dos o más subcompartimientos.
- 30 12. Un fotobiorreactor cerrado para el cultivo de microorganismos fototrópicos, estando adaptado el fotobiorreactor para comprender un líquido de cultivo y estando adaptado el fotobiorreactor para que esté parcial o totalmente rodeado de agua de un cuerpo de agua, en el que el fotobiorreactor comprende medios para determinar la diferencia de densidad entre el líquido de cultivo y el agua circundante y medios para proveer una diferencia de densidad entre el líquido de cultivo y el agua circundante de modo que se controle la posición del fotobiorreactor en el cuerpo de agua.
- 35 13. El fotobiorreactor de conformidad con la reivindicación 12, en el que los medios para proveer una diferencia de densidad son medios para la provisión de una diferencia de salinidad o de salinidad y temperatura entre el líquido de cultivo y el agua circundante.
- 40 14. El fotobiorreactor de conformidad con la reivindicación 12 o 13, en el que los medios para proveer una diferencia de densidad comprenden puerto de entrada, puerto de salida, mangueras, bombas, fuentes de líquido y/o gas.
15. El fotobiorreactor de conformidad con la reivindicación 12, 13 o 14, en el que las paredes de dicho fotobiorreactor adaptadas para comprender un líquido de cultivo comprenden un material flexible hermético al agua.
- 45 16. El fotobiorreactor de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 15, en el que el fotobiorreactor está dotado con uno o más compartimientos o tubos adaptados para controlar adicionalmente la posición vertical y/o la forma del fotobiorreactor.
17. El fotobiorreactor de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 14, en el que el fotobiorreactor está dotado con medios mecánicos adaptados para controlar adicionalmente la posición vertical y/o la forma del fotobiorreactor.
- 50 18. El fotobiorreactor de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 17, en el que el fotobiorreactor tiene una forma de panel plano.

19. El fotobiorreactor de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 18, en el que el fotobiorreactor comprende dos o más subcompartimientos adaptados para que comprendan el líquido de cultivo.
20. El fotobiorreactor de conformidad con la reivindicación 19, en el que dichos sub-compartimientos están sellados entre sí.
- 5 21. El fotobiorreactor de conformidad con la reivindicación 19, en el que dichos subcompartimientos están conectados para permitir el transporte limitado de líquido y/o gas entre los subcompartimientos.
22. El fotobiorreactor de conformidad con una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 21, en el que el fotobiorreactor comprende medios para dividir temporalmente el fotobiorreactor en dos o más subcompartimientos.

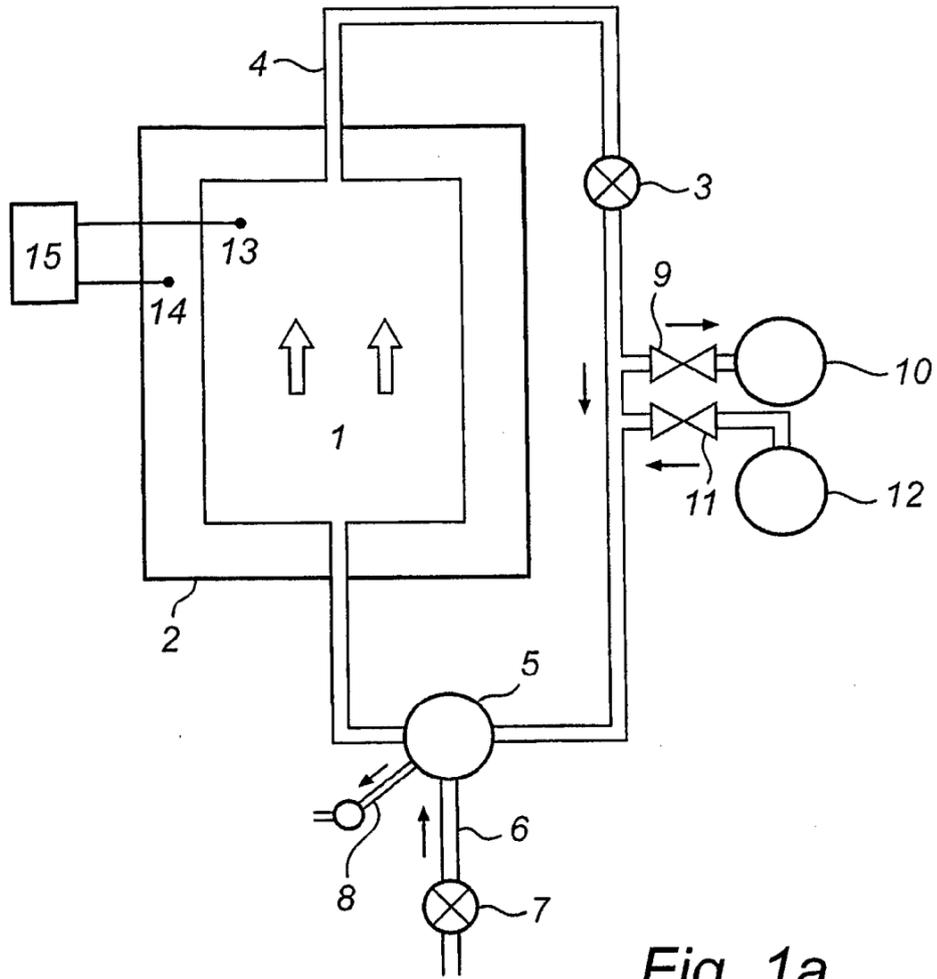


Fig. 1a

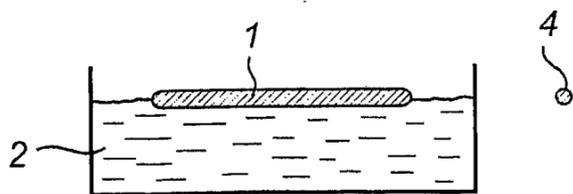
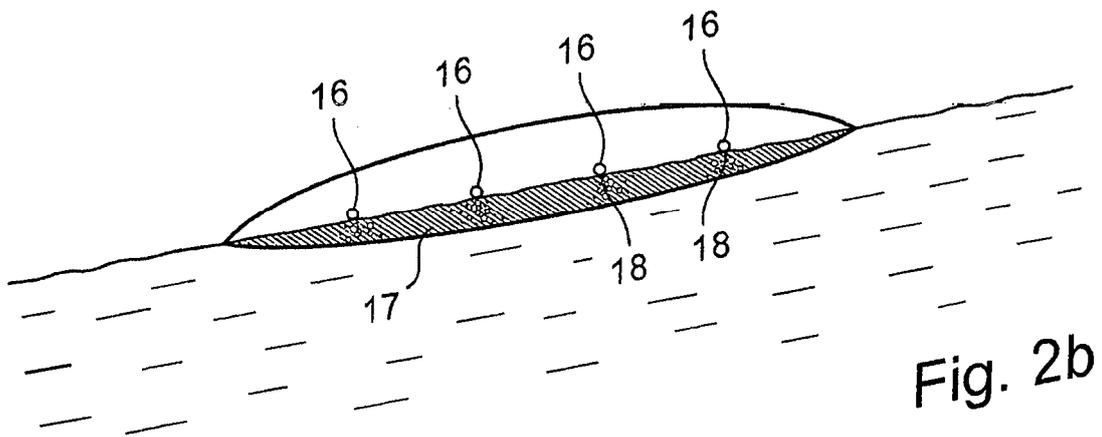
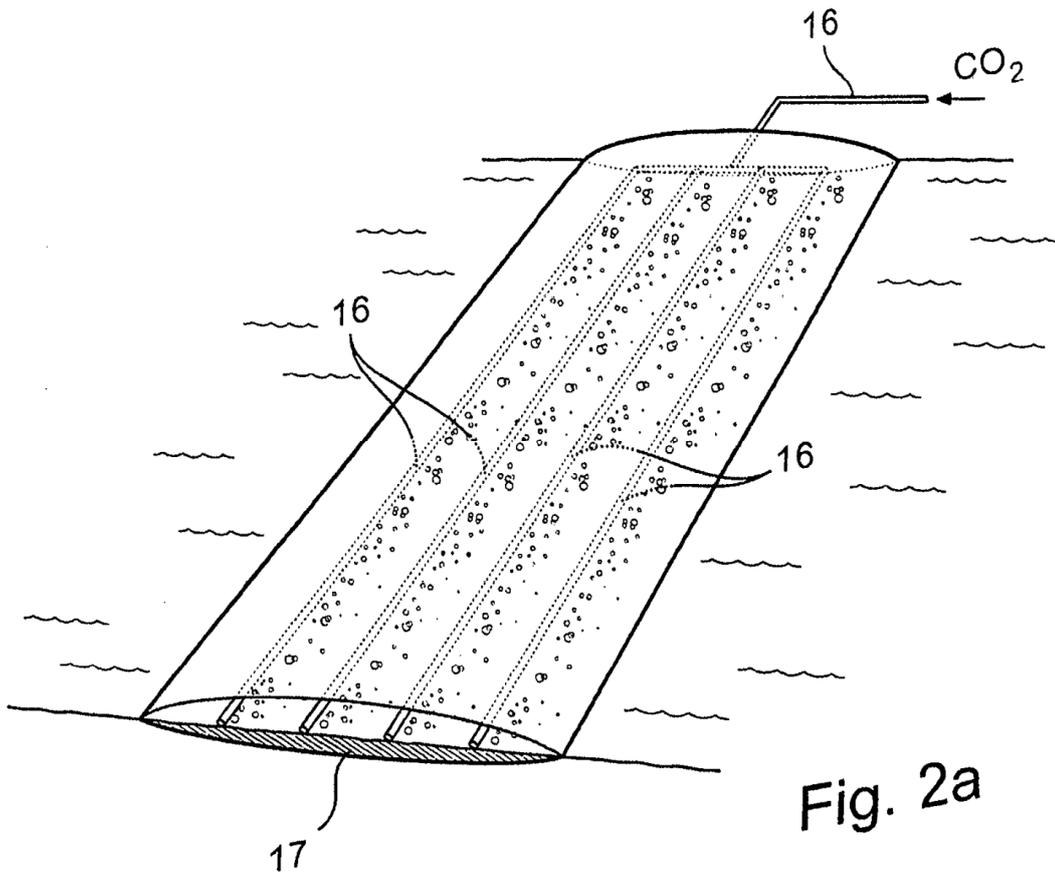


Fig. 1b



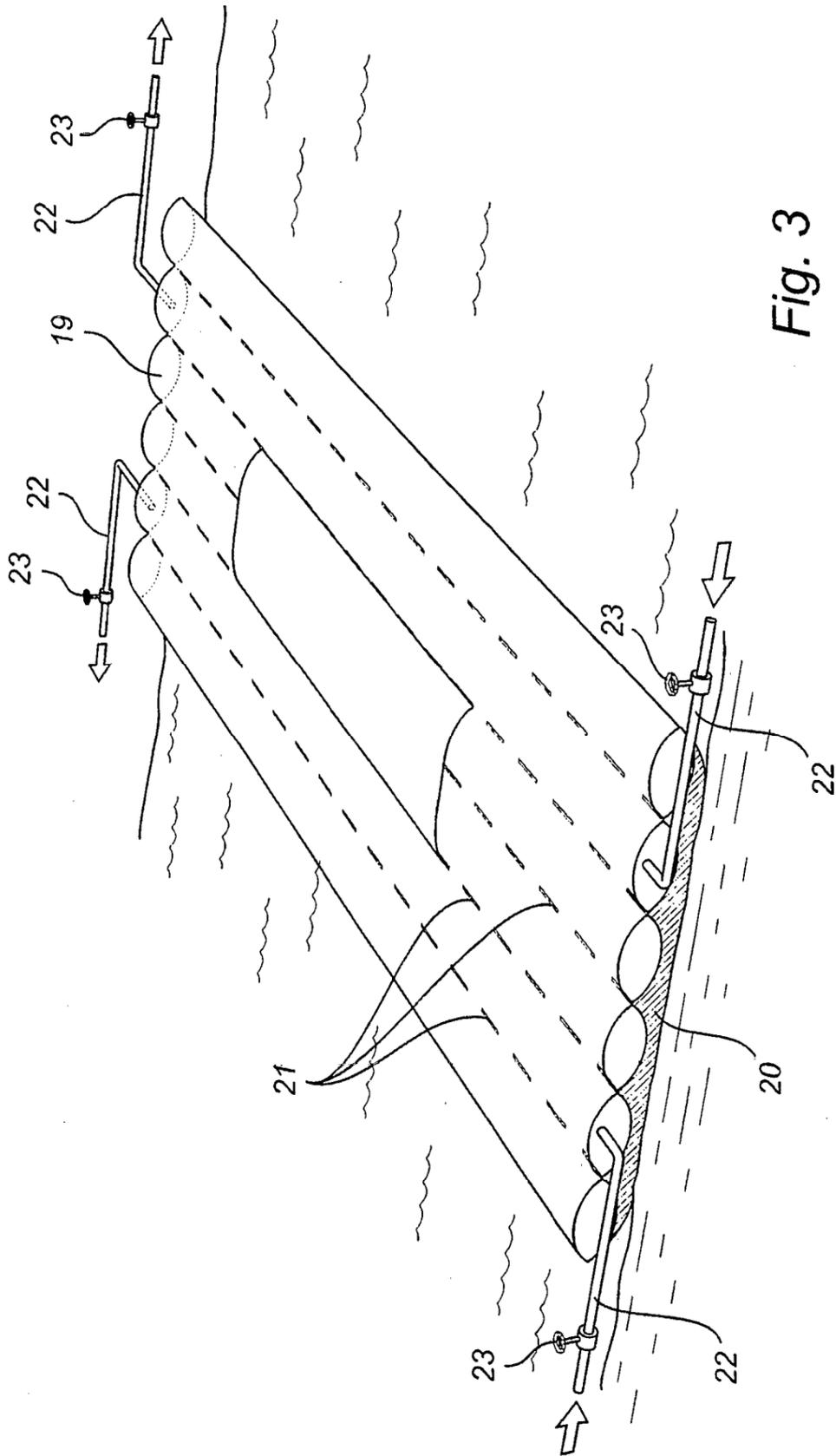


Fig. 3

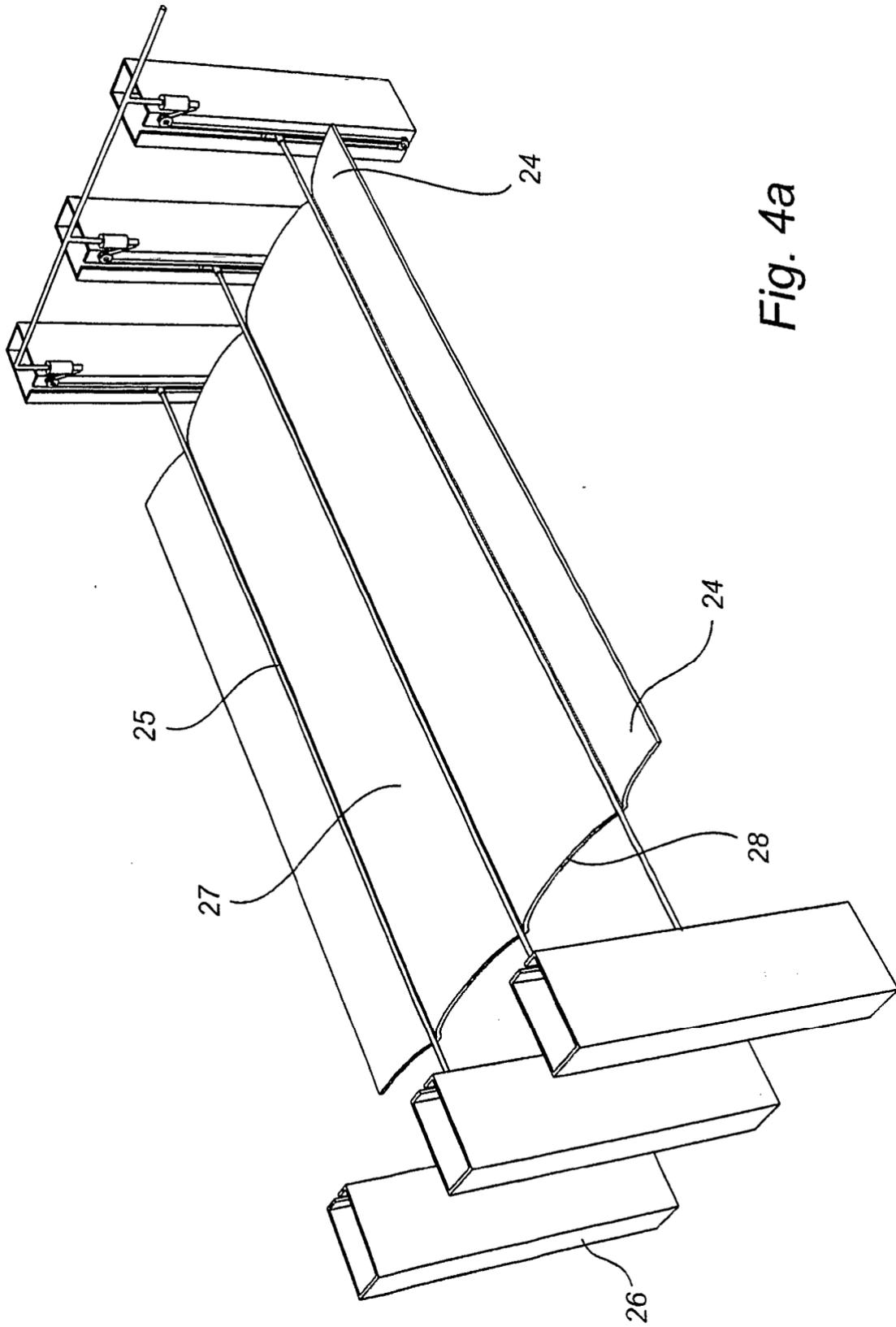


Fig. 4a

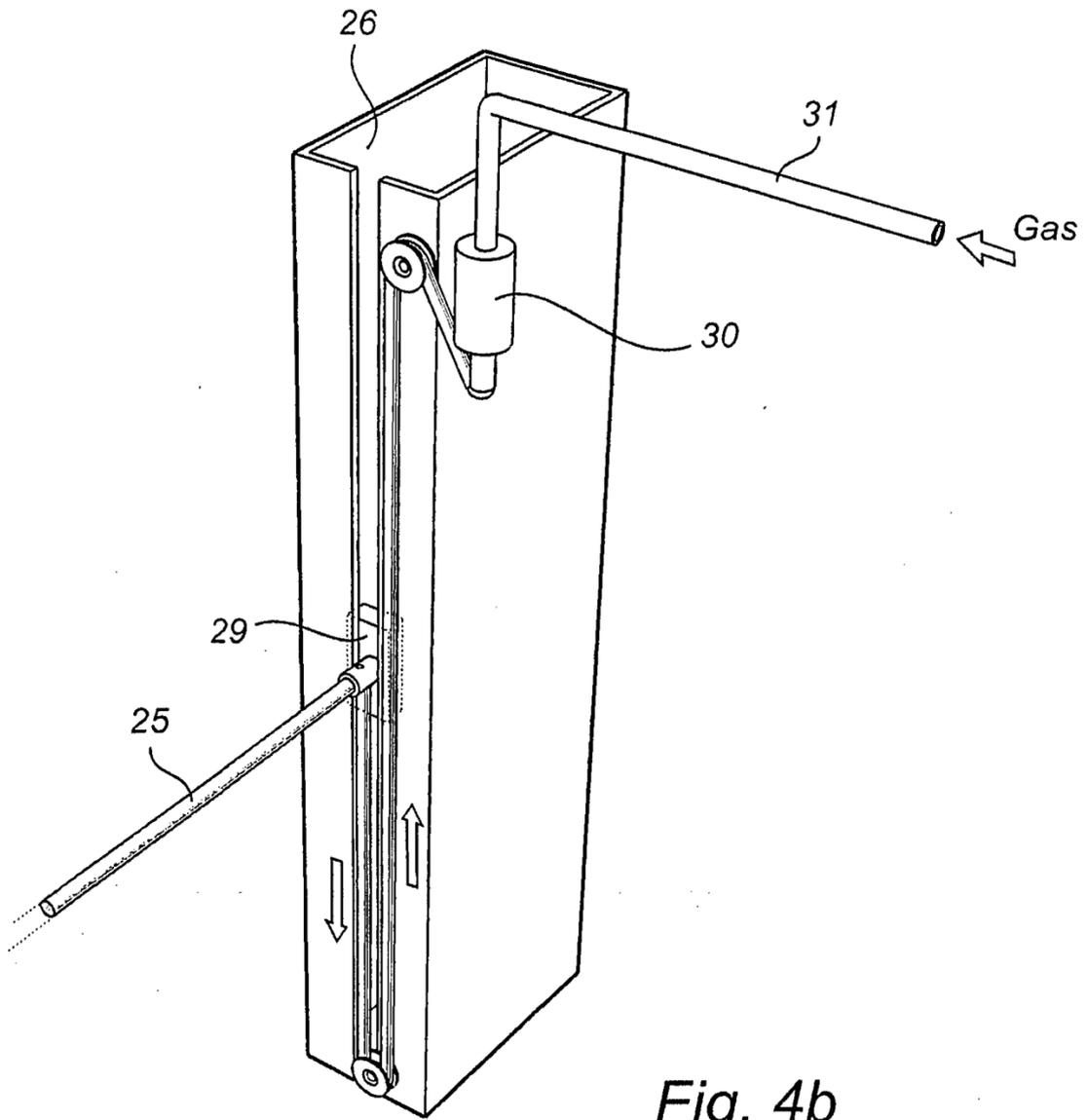
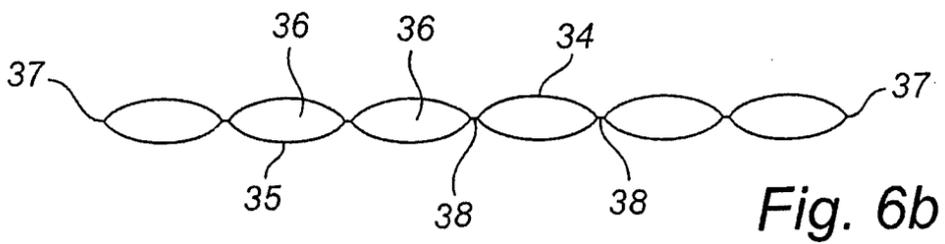
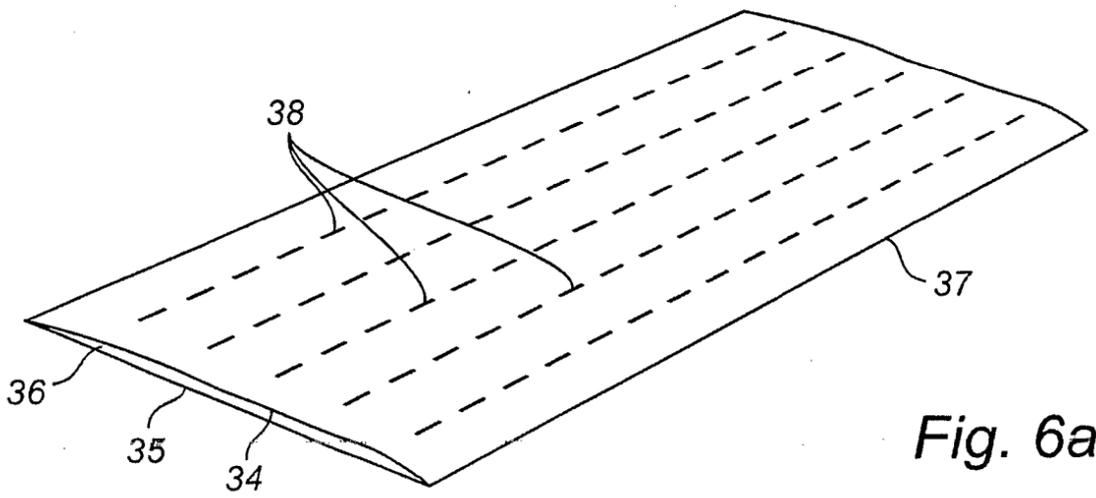
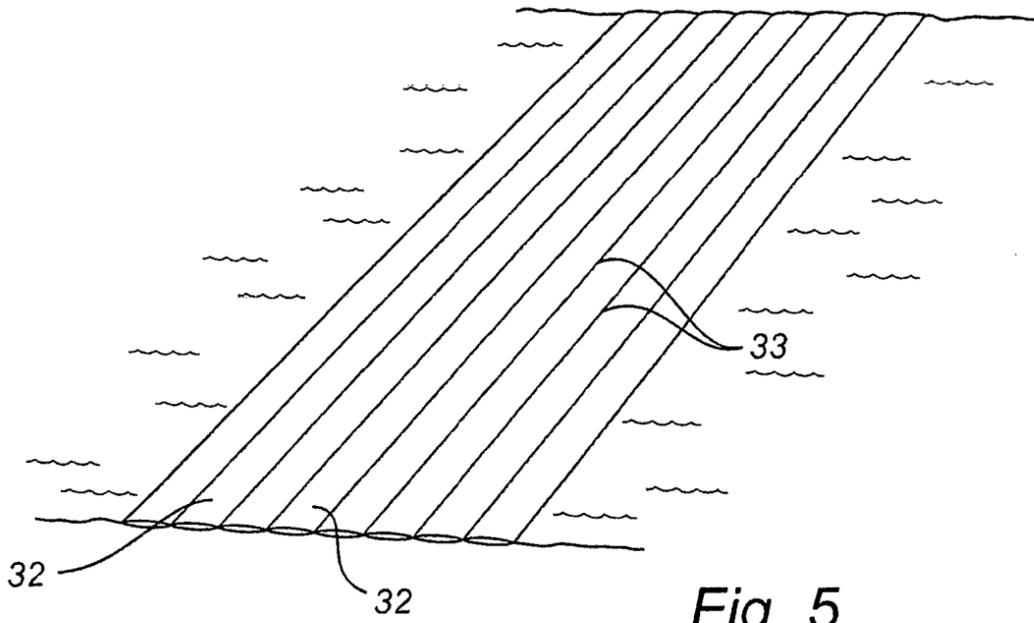


Fig. 4b



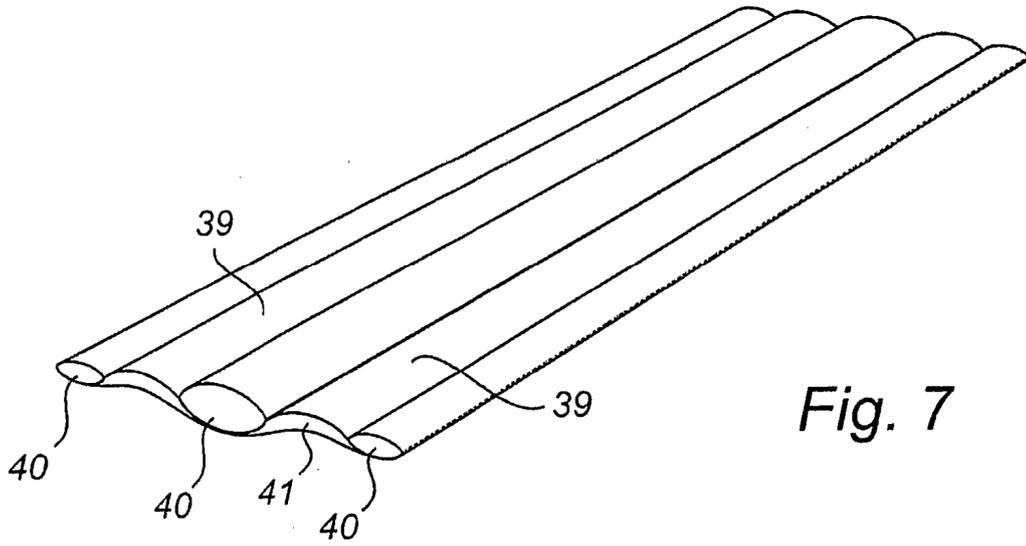


Fig. 7