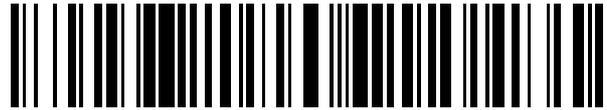


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 537 626**

51 Int. Cl.:

C12M 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.01.2011 E 11700519 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.03.2015 EP 2521767**

54 Título: **Fotobiorreactor en medio cerrado para el cultivo de microorganismos fotosintéticos**

30 Prioridad:

04.01.2010 FR 1050015

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

10.06.2015

73 Titular/es:

**ACTA ALGA (100.0%)
70 boulevard Courcelles
75017 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**BOURGOIN, JACQUES;
CONIN, MICHEL;
FRIEDERICH, ALAIN y
SUN, GUOCAI**

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 537 626 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 en medio cerrado para el cultivo de microorganismos fotosintéticos.

5 La invención se refiere al cultivo intensivo y continuo de microorganismos fotosintéticos.

Las microalgas son unos organismos vegetales fotosintéticos cuyo metabolismo y crecimiento necesitan, entre otros, CO₂, luz y nutrientes.

10 El cultivo industrial de microalgas conoce numerosas aplicaciones.

Las microalgas se pueden cultivar para valorizar y purificar las emisiones de dióxido de carbono, NO_x y/o SO_x de ciertas fábricas (WO 2008042919).

15 El aceite extraído de las microalgas se puede utilizar como biocarburante (WO 2008070281, WO 2008055190, WO 2008060571).

Las microalgas se pueden cultivar para la producción de omega-3 y de ácidos grasos poliinsaturados.

20 Las microalgas pueden también ser cultivadas para producir pigmentos.

El cultivo industrial de microalgas a gran escala utiliza el sol como fuente de luz. Para eso, frecuentemente se colocan las microalgas en estanques abiertos ("raceways") con o sin circulación (US 2008178739). Se encuentran también unos fotobiorreactores tubulares o de placas, constituidos por materiales translúcidos, que permiten el paso de los rayos luminosos en el medio de cultivo y en los que circulan las microalgas (FR 2 621 323). Otros sistemas de redes de tubos transparentes en tres dimensiones permiten mejorar la explotación del espacio (EP 0 874 043).

Estas instalaciones son extremadamente voluminosas y los rendimientos de producción son bajos dado que las incertidumbres de iluminación del sol y las fases de noche son perjudiciales para el crecimiento de las microalgas.

30 Con el fin de reducir el volumen y mejorar el rendimiento, se han desarrollado unos fotobiorreactores cerrados. Utilizan, por su parte, la disponibilidad de una iluminación artificial 24h/24 y 7 días/7, pudiendo esta iluminación ser interrumpida según unas secuencias apropiadas para los ciclos biológicos de las algas en cuestión.

35 En efecto, el factor crucial del aumento de la biomasa de las microalgas es la luz, tanto en términos de cantidad como de calidad, ya que las microalgas absorben únicamente algunas longitudes de ondas de la luz blanca.

40 Un fotobiorreactor se define como un sistema cerrado en el interior del cual se desarrollan unas interacciones biológicas, en presencia de energía luminosa, que se intenta controlar mediante el control de las condiciones de cultivo.

Cuanto más adecuada sea la luz dispensada en el fotobiorreactor para la especie de microalgas, más ventajosa será la producción de biomasa.

45 Una primera solución de iluminación artificial para resolver este problema consiste en llevar la luz de una fuente luminosa al medio de cultivo cerca de las microalgas con la ayuda de fibras ópticas (US nº 6.156.561 y EP 0 935 991).

50 Las fibras ópticas pueden estar asociadas a otros medios sumergidos que guían la luz en el interior del recinto (JP 2001178443 y DE 29819259).

El principal inconveniente es que esta solución sólo permite alcanzar unos rendimientos bajos (luz producida)/(luz eficaz). En efecto, la intensidad se reduce debido a las interfaces entre las fuentes luminosas y la guía de onda, y es difícil acoplar más de una fuente luminosa sobre la misma fibra. Además, surge un problema desde el momento en que se utilizan varias longitudes de ondas diferentes: en efecto, para extraer la luz de las fibras ópticas sumergidas en el medio de cultivo, es necesario realizar un tratamiento de superficie (rugosidad), que difundirá o difratará una fracción de la luz guiada. La solución más eficaz consiste en grabar una red en la periferia de la fibra con un paso que es del orden de la longitud de onda de la luz transmitida. Esta solución tiene una banda pasante estrecha y es totalmente inadecuada cuando se utilizan varias longitudes de ondas. El uso de una rugosidad aleatoria es, en sí misma, de baja eficacia.

Otra solución de iluminación artificial para resolver este problema consiste en sumergir directamente unas fuentes luminosas en el recinto del fotobiorreactor, como por ejemplo unas lámparas fluorescentes (US nº 5.104.803) o unos LED (Light Emitting Diode) (DE 202007013406 y WO 2007047805).

65 Esta solución permite mejorar el rendimiento energético del procedimiento de iluminación, ya que las fuentes

luminosas están más próximas y se acoplan mejor al medio de cultivo.

Sin embargo, la utilización de fuentes luminosas introducidas dentro del reactor, en particular unos LED, se debe realizar teniendo en cuenta otros tres problemas principales.

5 El primero es inherente a la penetración de la luz en el cultivo, la cual está directamente relacionada con la densidad de las microalgas. Esta densidad aumenta durante el proceso de cultivo y lleva rápidamente a la extinción del flujo luminoso en la mayor parte del reactor. Las soluciones que consisten en iluminar la pared interna del fotobiorreactor (DE 202007013406) no son por lo tanto extrapolables a unos fotobiorreactores a escala industrial de varios cientos de litros por simple homotecia, siendo las longitudes de absorción de la luz aún centimétricas al final del proceso de crianza.

15 Para suprimir las zonas de sombras que aparecen durante el proceso de cultivo, se pueden multiplicar las fuentes luminosas en el recinto e implantarlas suficientemente próximas las unas a las otras para iluminar el medio de cultivo independientemente de las longitudes de absorción variables relacionadas con el ciclo biológico. De esta manera, se plantea entonces el problema de la gestión de la térmica del reactor, que debe ser controlada con algunos grados de tolerancia, y que depende de la naturaleza del alga. Esta gestión de la térmica constituye el segundo problema importante que es necesario resolver. Es inherente a estas estructuras de reactores de primera generación, independientemente del tipo de fuentes luminosas utilizadas. Se añade el problema del coste del fotobiorreactor si las fuentes luminosas deben ser multiplicadas en un gran número.

25 El tercer problema es obtener un frente de iluminación homogénea en intensidad en el volumen de crecimiento del reactor. A la disminución progresiva de la intensidad de la onda luminosa por absorción en el medio de cultivo se añade una fuerte dispersión de la energía luminosa sobre el frente luminoso incidente. Esto es perjudicial para la optimización del procedimiento de crecimiento de biomasa para una energía incidente luminosa global dada.

30 Con el fin de solucionar estos problemas, los inventores han descubierto, de manera inesperada y sorprendente, una nueva fuente de luz adecuada para los fotobiorreactores: las células fotovoltaicas utilizadas en inyección directa que en estas condiciones emiten luz.

Esta fuente de luz presenta las ventajas de ser particularmente homogénea y de poder ser optimizada para la cepa de algas a producir, ya que las células fotovoltaicas pueden ser adecuadas para emitir la o las longitudes de ondas absorbida(s) por la cepa para su fotosíntesis.

35 En consecuencia, el objeto de la invención se refiere a un fotobiorreactor destinado al cultivo de microorganismos fotosintéticos, preferentemente de microalgas, que comprende:

- (a) por lo menos un recinto de cultivo (1) destinado a contener el medio de cultivo (3) de los microorganismos,
- 40 (b) unas células fotovoltaicas (2) aisladas del medio de cultivo (3) que emiten luz hacia el medio de cultivo (3)
- (c) unos medios de alimentación eléctrica (4) de las células fotovoltaicas (2) con el fin de hacer funcionar las células fotovoltaicas en modo de emisión de luz.

45 Una célula fotovoltaica es un componente electrónico que, expuesto a la luz (fotones), genera electricidad. Las células fotovoltaicas más difundidas están constituidas por materiales semiconductores. Para obtener una emisión de luz, es necesario que estos materiales semiconductores sean de brecha directa, tales como las aleaciones As, Ga, In, P. El material silicio (Si) es inadecuado para esta función ya que su brecha es indirecta. Se presentan generalmente en forma de finas placas de una decena de centímetros de lado, intercaladas entre dos contactos metálicos, para un grosor del orden del milímetro. El principio de las células fotovoltaicas es bien conocido (Physics of Semiconductor Devices-J Wiley & Sons, 3ª edición, Simon M. Sze, Kwok K. Ng).

50 En el semiconductor expuesto a la luz, un fotón de energía suficiente extrae un electrón, creando a su paso un "orificio". Normalmente, el electrón encuentra rápidamente un orificio para recolocarse, y se disipa así la energía aportada por el fotón. El principio de una célula fotovoltaica es forzar a los electrones y a los orificios a dirigirse cada uno hacia una cara opuesta del material en lugar de recombinarse simplemente dentro: así, aparecerá una diferencia de potencial y por lo tanto una tensión entre las dos caras, como una batería.

60 Para ello, se dispone para crear un campo eléctrico permanente mediante una unión PN, entre dos capas dopadas respectivamente P y N. En la capa superior de la célula, existe una cantidad de electrones libres superior a una capa de material puro, de ahí la denominación de dopaje N, como negativo (carga del electrón).

65 En la capa inferior de la célula, la cantidad de electrones libres es inferior a la de una capa de material puro, los electrones están unidos a la red cristalina que, en consecuencia, está cargada positivamente. La conducción eléctrica está asegurada por los orificios, positivos (P).

En el momento de la creación de la unión P-N, los electrones libres de la región N entran en la capa P y se recombinarán con los orificios de la región P. Existirá así, durante toda la vida útil de la unión, una carga *positiva* de la región N en el borde de la unión (porque los electrones se han fugado) y una carga *negativa* en la región P en el borde de la unión (porque los orificios han desaparecido), y existe un campo eléctrico entre los dos, de N hacia P.

5 En funcionamiento clásico, un fotón arranca un electrón de la matriz, creando un electrón libre y un orificio. Los electrones se acumulan en la región N (que se convierte en el polo negativo), mientras que los orificios se acumulan en la capa dopada P (que se convierte en el polo positivo).

10 Se desarrollaron unas células que tienen una gran eficacia para aplicaciones espaciales: las células de múltiples uniones, que están constituidas por varias capas delgadas, clásicamente de una a cinco uniones.

Una célula de triple unión, por ejemplo, está constituida por los semiconductores AsGa, Ge y GaInP₂. Cada tipo de semiconductor está caracterizado por una longitud de onda máxima más allá de la cual es incapaz de convertir el fotón en energía eléctrica. Por debajo de esta longitud de onda, se pierde el exceso de energía transportada por el fotón.

Según la presente invención, las células fotovoltaicas se utilizan en modo inverso de emisión, es decir como fuente de luz. Se alimentan con corriente eléctrica denominada "corriente de inyección", y a la inversa que en su funcionamiento clásico descrito antes, producen luz. Si se les aplica una tensión positiva en el lado de la región P, los portadores mayoritarios positivos (los orificios) son empujados hacia la unión. Al mismo tiempo, los portadores mayoritarios negativos en el lado N (los electrones) son atraídos hacia la unión. Al llegar a la unión, los portadores se recombinan liberando unos fotones que tienen unas energías que corresponden a las brechas de los materiales semiconductores utilizados. Fundamentalmente, una célula fotovoltaica utilizada en inyección directa es un diodo electroluminiscente de gran superficie. Difiere además en un LED por la geometría de sus contactos de inyección que deben cubrir una gran superficie. Clásicamente, se crean unas redes de contactos con dedos separados por una longitud inferior a la longitud de difusión de los portadores. Este LED de gran superficie puede beneficiarse de todas las mejoras de los rendimientos cuánticos interno y externo utilizados en los LED clásicos (reflector de Bragg, utilización de pocillos cuánticos en la capa activa, tratamiento de superficie, etc.). En efecto, para salir del dispositivo, los fotones deben atravesar (sin ser absorbidos) el semiconductor, desde la unión hasta la superficie, y después atravesar la superficie del semiconductor sin sufrir ninguna reflexión y, en particular, sin sufrir la reflexión total interna que reenvía los fotones hacia el interior de la célula en la que terminan por ser absorbidos. Aquellos que no están sometidos a la reflexión total interna salen del semiconductor y constituyen el flujo óptico externo (hacia el aire por ejemplo).

35 En los LED puntuales, se mejora marginalmente la eficacia de transferencia externa introduciendo una óptica pegada sobre la superficie del semiconductor (índice óptico intermedio entre el del aire ($n=1$) y el del semiconductor ($3 < n < 4$). En estas condiciones, los mejores LED tienen unos rendimientos cuánticos externos próximos al 20% (potencia luminosa externa sobre potencia eléctrica proporcionada al componente). Para un LED plano de mayor tamaño según la invención, la solución será microestructurar la superficie de manera que aumente la probabilidad de que el fotón encuentre una superficie de manera casi perpendicular. El más alto rendimiento cuántico externo jamás obtenido es, hasta el momento, un poco superior al 45%. Diversos procedimientos de microestructuración son actualmente objeto de estudio en laboratorio, se basan en técnicas de litografía micrónica en uso en la industria de los semiconductores, o en técnicas de ataque químico de la superficie externa del LED. En esta última clase de tecnologías, se obtienen habitualmente unos rendimientos cuánticos externos del orden del 30%. El hecho de utilizar unos componentes de gran superficie hace que la aplicación de estas tecnologías de microestructuración sea mucho más fácil.

50 Las células fotovoltaicas utilizadas según la presente invención son de material de brecha directa (AsGa, GaInP, etc.). En estos materiales, la energía liberada durante la recombinación de un par orificio-electrón, se traduce por la emisión de un fotón eventualmente visible. La intensidad luminosa es directamente proporcional a la corriente de inyección. La longitud de onda de emisión luminosa corresponde a la energía de la brecha del material semiconductor que constituye la célula fotovoltaica. Un material semiconductor de brecha indirecta no emite luz, disipándose la energía en forma de calor. Clásicamente, los materiales de brecha directa y que emiten en el espectro visible son unas aleaciones III/V o II/VI.

60 La luz emitida corresponde a unas transiciones radiativas directas de los materiales que constituyen la célula fotovoltaica. Así, se puede seleccionar una célula fotovoltaica realizada en uno o varios materiales que emiten en una o varias longitudes de ondas, ventajosamente la o las longitudes de ondas de la especie de microorganismo fotosintético, que se cultivará en el fotobiorreactor de la invención.

Preferentemente, las células fotovoltaicas utilizadas en la presente invención son unas células de una, dos o tres uniones.

65 Preferentemente, su sustrato es el germanio o el AsGa, que tienen unos parámetros de malla comparables a los de los materiales que se desea epitaxiar para realizar las uniones. El uso de silicio como sustrato necesita, como se

muestra en la bibliografía, utilizar la tecnología denominada Smart-Cut[®]. Esta última consiste en separar la parte activa del componente (realizada sobre una capa de AsGa o de Germanio) y en pegarla por adhesión molecular sobre el sustrato de silicio. Preferentemente, los materiales de brecha directa que recubren el sustrato son unas aleaciones III/V según la tabla periódica de los elementos, de manera particularmente preferida el AsGa (Arsénico-Galio), el GalnP (Galio-Indio-Fósforo) y/o el GalnAs (Galio-Indio-Arsénico), aunque todos los materiales de brecha directa son apropiados.

De manera particularmente preferida, las células fotovoltaicas (2) utilizadas en la presente invención son unas células de material AsGa y/o GalnP sobre sustrato germanio.

Los materiales se seleccionan en función de su longitud de ondas emisora. En efecto, una de las ventajas del fotobiorreactor de la invención es proporcionar al microorganismo fotosintético cultivado la o las longitudes de ondas específicas que absorbe para su fotosíntesis y así optimizar las condiciones de multiplicación de la biomasa.

Ventajosamente, las células fotovoltaicas utilizadas según la invención presentan un sustrato y uno o dos materiales de brecha directa, es decir de dos o tres uniones, y emiten a una o dos longitudes de onda. Ventajosamente, emiten a unas longitudes de ondas que corresponden a los pigmentos clorofílicos. Ventajosamente, emiten a longitudes de ondas comprendidas en los intervalos de 400 a 450 nm y de 640 a 700 nm.

Las células fotovoltaicas miden algunas decenas de centímetros cuadrados, clásicamente aproximadamente 100 cm². Según la presente invención, están preferentemente dispuestas en placas (7). De manera particularmente preferida, recubren unas placas (7) para formar por yuxtaposición un sistema de iluminación homogéneo plano hasta una superficie del orden del metro cuadrado. Pueden estar dispuestas sobre una o las dos caras de la placa. Pueden estar constituidas por materiales diferentes en cada lado de la placa. Por ejemplo, un lado de la placa puede estar recubierto por unas células fotovoltaicas que emiten una longitud de ondas, y el otro lado de la placa puede estar cubierto por unas células fotovoltaicas que emiten otra longitud de ondas.

Las células fotovoltaicas (2) están preferentemente colocadas:

- o bien en el o los recintos de cultivo (1) en unos recintos de transparencia adecuada (TA) y estanques (5) sumergidos en el medio de cultivo (3),
- o bien en el exterior del o de los recintos de cultivo, a poca distancia de la pared externa del o de los recinto(s) de cultivo (6), estando dicha pared constituida por un material de transparencia adecuada para el paso de la o de las longitudes de ondas que emiten. En un modo de realización particular, el fotobiorreactor de la invención comprende varios recintos de cultivo separados por unas células fotovoltaicas. Por ejemplo, varios recintos de cultivo paralelepípedicos, por ejemplo dos, están apilados y separados por unas placas (7) de células fotovoltaicas (2) (véase la figura 6).

Los recintos de "transparencia adecuada" (TA) son unos recintos que aseguran un rendimiento óptico óptimo en las longitudes de ondas que aseguran la fotosíntesis. Los materiales de transparencia adecuada apropiados son el PMMA (polimetacrilato de metilo), el plexiglás, el vidrio, el policarbonato, o unas placas PMMA.

Se entiende por "poca distancia" desde algunos milímetros hasta algunas decenas de centímetros, preferentemente de algunos milímetros hasta algunos centímetros.

En particular, se trata de una distancia de 0,1 a 20 cm, de manera preferida de 0,5 a 5 cm, de manera más preferida de 0,5 a 2 cm, de manera particularmente preferida de aproximadamente 1 cm.

En cierto tipo de funcionamiento del fotobiorreactor, se puede preferir utilizar una baja concentración de microalgas. Esto conduce a que una fracción significativa de la luz no sea absorbida por el medio de cultivo y salga por lo tanto del reactor. Se puede reenviar esta luz al medio de cultivo para una segunda pasada, transformando la pared externa del reactor en espejo (metalización Al, Ag por ejemplo).

El recinto de cultivo (1) presenta clásicamente una forma cilíndrica o paralelepípedica.

Las células fotovoltaicas se alimentan con corriente mediante contactos de inyección (8). Estos contactos (8) están dispuestos preferentemente en el extremo de las placas de células fotovoltaicas (2) emisoras. Son poco resistivos, denominados óhmicos. La modulación del paso de la red de los contactos permite modular espacialmente el frente de la energía luminosa emitida.

Preferentemente, las células fotovoltaicas están ensambladas según una arquitectura en serie.

Ventajosamente, las células fotovoltaicas están aisladas eléctricamente de su soporte por un aislante de buena conductividad térmica, por ejemplo de tipo Mylar[®], una película de polietilentereftalato desarrollado por DuPont Nemours.

- 5 Según un modo de realización, el fotobiorreactor de la invención comprende un sistema de enfriamiento (9) de las células fotovoltaicas (2). Ventajosamente, el sistema de enfriamiento (9) está constituido por un fluido caloportador (10) que circula en los recintos estancos (5), estando dichos recintos (5) unidos a un dispositivo de enfriamiento exterior a los recintos estancos para el fluido caloportador (10).
- 10 Ventajosamente, el fluido caloportador (10) se selecciona por su transparencia en el intervalo de longitudes de ondas de 0,3 micrones a 1 micrón, y no debe haber una absorción significativa en este intervalo de longitudes de ondas. Los fluidos caloportadores adecuados son el aceite de silicona, el aceite perfluorado o el aire.
- 15 El fluido caloportador (10) enfría directamente las células fotovoltaicas (2) por contacto. Está dirigido hacia el sistema de refrigeración del fotobiorreactor de la invención y es enfriado por el mismo, externo al recinto de cultivo (1). La termostatación de este fluido permite además el control termostático en el recinto de cultivo.
- 20 El fotobiorreactor de la invención puede comprender además un sistema de inyección de gas (11), en particular de CO₂ en el recinto de cultivo (1).
- 25 El recinto de cultivo (1) del fotobiorreactor según la invención se puede dimensionar para aplicaciones industriales variadas o de laboratorio.
- Las dimensiones de un recinto de cultivo (1) a escala de laboratorio son de algunas decenas de centímetros hasta algunos cientos de centímetros para la altura y el diámetro (recinto cilíndrico) o la anchura (recinto paralelepípedo). El volumen de un recinto de cultivo (1) a escala de laboratorio es de menos de un m³. Ventajosamente, el recinto de cultivo (1) es un recinto de cultivo (1) industrial.
- 30 Las dimensiones de un recinto de cultivo (1) a escala industrial son de varios metros.
- El volumen de un recinto de cultivo (1) a escala industrial es superior a un m³. El recinto de cultivo (1) se realiza en un material adecuado para contener el medio de cultivo, metálico o de polímero por ejemplo y, preferentemente seleccionado de entre el grupo constituido por PMMA, por policarbonato o por acero inoxidable. Se pueden prever asimismo unos recintos de material de construcción de tipo hormigón, por ejemplo.
- 35 Según el modo de realización en el que las células fotovoltaicas están colocadas en el exterior del recinto de cultivo, el recinto de cultivo está realizado en un material de transparencia adecuada.
- 40 Según el modo de realización en el que las células fotovoltaicas están colocadas en el recinto de cultivo, las paredes internas (12) del recinto de cultivo (1) del fotobiorreactor son ventajosamente reflectantes con el fin de reducir al máximo la pérdida de rayos luminosos fuera del recinto cerrado. Pueden estar cubiertas de una pintura o de un material reflectante. Así, se reduce el gasto energético necesario para el cultivo de los microorganismos fotosintéticos.
- 45 El fotobiorreactor de la invención puede comprender además un sistema de mezclado (13) del medio de cultivo (3).
- El sistema de mezclado (13) tiene dos funciones principales. Por un lado, debe favorecer la homogeneización de la temperatura del medio de cultivo. Por otro lado, mejora la homogeneización de la iluminación de los microorganismos. En efecto, gracias a esta mezcla, se hacen pasar los microorganismos de las zonas más iluminadas a las zonas menos iluminadas, y a la inversa.
- 50 La mezcla del medio de cultivo se realiza mediante diversas técnicas, la más habitual actualmente se denomina "air-lift". Se pueden utilizar asimismo unos tipos de agitaciones mecánicas: tornillo de Arquímedes, hélice marina, de tipo Rushton, hidropiano, etc.
- 55 Ventajosamente, la técnica de mezclado utilizada es la denominada "air lift", que consiste en inyectar un gas presurizado, por ejemplo aire, en la parte baja del recinto de cultivo (1). El aire, de densidad inferior al líquido, sube rápidamente en forma de burbujas. El líquido y las microalgas son arrastrados por el movimiento ascensional de las burbujas. La inyección de aire se puede efectuar de manera vertical, pero también de manera oblicua con el fin de provocar unos transportes de líquido de una pared a otra del medio de cultivo que favorezcan la mezcla de los nutrientes y del CO₂ necesarios para las microalgas. Este movimiento del líquido de cultivo asegura también una iluminación media para todas las microalgas durante su subida. Las microalgas vuelven a bajar entonces a los volúmenes en los que no hay subida de burbujas de aire. Se realiza así un bucle cerrado de recorrido del líquido de cultivo. Esta técnica permite una mezcla de poco consumo de energía y poco estresante para las microalgas.
- 60 La mezcla del medio de cultivo se puede realizar, en parte, por un sistema clásico air-lift, que da esencialmente un impulso vertical, completado por un sistema original de inyección lateral (CO₂ + aire) distribuido con la ayuda de "feeders" (14) sobre la altura del recinto de cultivo. Se denomina aquí "feeders" a una canalización o un tubo que permite el transporte de gas o de agua desde la fuente hasta el sitio en el que se desea inyectar el gas o el agua.
- 65

Dichos denominados "feeders" (14) se instalarán en la zona de cultivo contra las paredes (20) de los recintos estancos (5) o del recinto de cultivo (1). Los conductos de inyección (15) son distribuidos por uno (o más) "feeder(s)" (14). Su número y su inclinación estarán en función del tipo de impulso que se desea transmitir a los microorganismos (impulso transversal, impulso vertical, o impulso que permita dar un movimiento de conjunto a la biomasa, que permita que las algas vayan periódicamente de un borde al otro del reactor, con un movimiento ascensional). Ventajosamente, esta capacidad para gestionar el movimiento transversal de la biomasa será utilizada para la homogeneización de la iluminación de la misma, es decir, preferentemente dirigida hacia arriba con una inclinación precisa. Además, en esta configuración del reactor, es posible adaptar la intensidad del impulso transversal de manera que el tiempo de tránsito de los microorganismos entre las zonas iluminadas y no iluminadas lleven a realizar espacialmente el ciclo de iluminación necesario para el crecimiento de algunos tipos de algas (tiempo de iluminación/tiempo de extinción).

Ventajosamente, se extrae regularmente o de manera continua en la parte alta del recinto de cultivo (1) un volumen de cultivo que es inmediatamente sustituido por la inyección de un volumen equivalente de agua que contiene unos elementos nutritivos en la parte baja del recinto de cultivo (1) o en los "feeder(s)" (14). Este método permite contribuir a disminuir la energía necesaria para inducir la circulación del líquido en el reactor.

El sistema de enfriamiento (9) permite extraer el calor liberado por las células fotovoltaicas (2), ajustando al mismo tiempo la temperatura del medio de cultivo (3) del fotobiorreactor.

El sistema de enfriamiento (9) puede consistir en un intercambiador de calor. Por ejemplo, este intercambiador de calor consiste en unos medios para llevar (16) el líquido caloportador (10) caliente hacia el exterior del recinto de cultivo (1), por ejemplo unos tubos conectados al extremo superior del recinto de cultivo (1) acoplados a una bomba (17), y un refrigerador (18) que consiste en hacer circular el líquido caloportador caliente en el sentido inverso de agua fría (véase la figura 8). Ventajosamente, el líquido caloportador (10) sale del recinto de cultivo (1) por uno de sus extremos, arriba o abajo y entra en el recinto de cultivo (1) por el otro extremo. El líquido caloportador (10) frío vuelve al recinto de cultivo (1) mediante unos medios para transportarlo (19), por ejemplo unos tubos.

Ventajosamente, el número de células fotovoltaicas en el fotobiorreactor de la invención es tal que recubren unas placas (7) que se extienden aproximadamente por toda la altura del recinto de cultivo (1).

La disposición de las placas (7) de células fotovoltaicas (2) está adaptada a la forma del fotobiorreactor.

Por ejemplo, cuando el fotobiorreactor presenta un recinto de cultivo de forma cilíndrica, las placas forman entre sí un tubo de sección poligonal, preferentemente hexagonal u octogonal, para acercarse al máximo a la forma cilíndrica (véase la figura 7).

Con el fin de corregir los efectos de borde en los ángulos del polígono, la intensidad de la corriente de inyección se podrá adaptar localmente ya que la intensidad luminosa es proporcional a la intensidad de la corriente de inyección. La intensidad de la corriente de inyección se puede adaptar modulando el paso de la red de contactos de inyección (8).

Es posible asimismo utilizar un material polimérico de difusión para mejorar la homogeneización del frente de onda. Este material en película delgada puede recubrir las paredes externas (20) de los recintos estancos (5) cuando las placas (7) de las células fotovoltaicas están colocadas en el recinto de cultivo o las paredes del recinto de cultivo (6) cuando las placas (7) de las células fotovoltaicas (2) están colocadas en el exterior del recinto de cultivo (1) a poca distancia de las paredes externas (6).

Otro objeto de la invención es la utilización de células fotovoltaicas (2) alimentadas eléctricamente en modo inverso de emisión de luz para iluminar el medio de cultivo de un fotobiorreactor.

Otro objeto de la invención es la utilización de un fotobiorreactor según la invención para cultivar unos microorganismos fotosintéticos, preferentemente unas microalgas.

Otras características y ventajas de la invención aparecerán mejor con la lectura de la descripción de los modos de realización de la invención. La descripción se refiere a las figuras adjuntas siguientes.

Figuras

Figura 1: Diagrama de emisión de un LED

Figura 2: Diagrama de emisión de una célula fotovoltaica

Figura 3: Diagrama de emisión de una célula fotovoltaica con refuerzo de las corrientes de inyección sobre los bordes

Figura 4: Diagrama de emisión de una yuxtaposición de LED

Figura 5: Diagrama de emisión de un plano de células fotovoltaicas yuxtapuestas

5 Figura 6a-6b: Esquemas en perspectiva y frontal de un fotobiorreactor paralelepípedo que comprende una placa de células fotovoltaicas que se inserta entre dos recintos de cultivo

10 Figura 7a-7b: Esquemas en perspectiva y según una sección radial de un fotobiorreactor cilíndrico que comprende unas células fotovoltaicas dispuestas en un tubo de sección hexagonal colocadas en un tubo estanco sumergido en el medio de cultivo.

Figura 8: Presentación del sistema de refrigeración de las células fotovoltaicas y del sistema de regulación de la temperatura del fotobiorreactor

15 Figura 9: Esquema de un detalle del sistema de mezclado del medio de cultivo instalado en una pared

El fotobiorreactor según la invención se explicará en referencia a las figuras.

20 Las figuras 1 a 5 son unos diagramas de la emisión energética. Un LED casi puntual emite su energía de manera "lambertiana" (lóbulo). La mayor parte de la energía se emite perpendicularmente a la superficie del semiconductor. Esta energía disminuye cuando se separa de la normal al semiconductor. Es nula paralelamente a la superficie de éste. La extensión de la superficie emisiva más allá de la anchura natural del lóbulo permite mediante la adición de unos lóbulos elementales, crear una superficie emisiva constante de energía en los planos paralelos a la superficie del semiconductor (xOy). En las figuras, el LED o la célula fotovoltaica está centrada en O y su superficie está orientada perpendicularmente a (Oz). Un par de estos lóbulos está representado según el plano (xOz).

La figura 1 representa el diagrama de emisión de un LED situado en el centro de la marca. Se supone que el cátodo es casi-puntual (de un tamaño inferior al mm^2). Existe una invariancia por rotación alrededor del eje (Oz).

30 La figura 2 representa el diagrama de emisión de una célula fotovoltaica invertida como la utilizada por la invención, en este caso con una separación constante de los dedos de inyección de la corriente. La intensidad luminosa en un plano paralelo a (xOy) es constante en las proximidades del centro de la célula.

35 La figura 3 representa el diagrama de emisión energética de una célula fotovoltaica invertida en el caso de un estrechamiento de la separación de los dedos de inyección de la corriente acercando los bordes. La densidad de corriente inyectada es más importante en los bordes, por lo que aumenta la intensidad luminosa.

40 La figura 4 representa el diagrama de emisión de una regleta de LED (dispuestos según (Ox)). La suma de los flujos luminosos da lugar a un frente no homogéneo, cuya falta de homogeneidad depende de la distancia entre dos LED consecutivos sobre la regleta.

45 La figura 5 representa el diagrama de emisión de una regleta de células (dispuestas según (Ox)). Si las células están suficientemente próximas, la intensidad luminosa en un plano paralelo a (xOy) es constante, la energía recibida ya no depende por lo tanto de la distancia de la célula: en efecto, la homogeneidad del flujo es independiente de la distancia a la que se realiza la medición.

50 Según un primer modo de realización, el fotobiorreactor es cilíndrico (figura 7). Unas células fotovoltaicas (2) están dispuestas en una de las dos caras de seis placas (7) que forman entre sí un tubo de sección hexagonal. Estas placas (7) tienen como longitud la altura del fotobiorreactor. Estas placas (7) se colocan en un tubo estanco (5) de material transparente a la luz (vidrio, plástico, etc.), a su vez sumergido en el medio de cultivo (3), que se separa entre una parte "interna" (3a) y una parte "externa" (3b), visibles en la figura 7a. Las placas están unidas a los contactos de inyección de corriente (8).

55 Según un segundo modo de realización, el fotobiorreactor es paralelepípedo (figura 6). Unas células fotovoltaicas (2) están dispuestas sobre las dos caras de una o de varias placas (7) metálicas. Estas placas tienen como dimensiones las del fotobiorreactor. Estas placas (X) están colocadas en el exterior del fotobiorreactor, preferentemente entre dos recintos de cultivo apilados. Las placas están unidas a unos contactos de inyección de corriente (8). Las células fotovoltaicas están aisladas eléctricamente de la placa metálica por un aislante de buena conductividad térmica de tipo Mylar®.

60

REIVINDICACIONES

- 5 1. Fotobiorreactor destinado al cultivo de microorganismos fotosintéticos, preferentemente de microalgas, que comprende:
- (a) por lo menos un recinto de cultivo (1) destinado a contener el medio de cultivo (3) de los microorganismos,
 - (b) unas células fotovoltaicas (2) aisladas del medio de cultivo (3) que emiten la luz hacia el medio de cultivo (3)
 - 10 (c) unos medios de alimentación eléctrica (4) de las células fotovoltaicas (2) con el fin de hacer funcionar las células fotovoltaicas en modo de emisión de luz.
- 15 2. Fotobiorreactor según la reivindicación 1, caracterizado por que las células fotovoltaicas (2) están dispuestas en unas placas, preferentemente recubriendo toda la superficie.
3. Fotobiorreactor según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que las células fotovoltaicas (2) son unas células de una o dos uniones.
- 20 4. Fotobiorreactor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que las células fotovoltaicas (2) son de material de brecha directa III/V.
- 25 5. Fotobiorreactor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que las células fotovoltaicas (2) están colocadas en unos recintos de transparencia adecuada (TA) y estancos (5) sumergidos en el medio de cultivo (3).
- 30 6. Fotobiorreactor según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que las células fotovoltaicas (2) están colocadas en el exterior del o de los recintos de cultivo a poca distancia de la pared externa del o de los recintos de cultivo y la pared externa del o de los recintos de cultivo está constituida por un material de transparencia adecuada para el paso de la o de las longitudes de ondas que emiten dichas células fotovoltaicas.
- 35 7. Fotobiorreactor según la reivindicación 6, que comprende varios recintos de cultivo paralelepípedicos apilados y separados por unas placas (7) de células fotovoltaicas (2).
8. Fotobiorreactor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende un sistema de refrigeración (9) de las células fotovoltaicas (2).
- 40 9. Fotobiorreactor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende un sistema de mezclado (13) del medio de cultivo (3).
10. Fotobiorreactor según las reivindicaciones 1 a 5 y 8 a 9, que comprende:
- (a) un recinto de cultivo (1) cilíndrico destinado a contener el medio de cultivo (3) de los microorganismos,
 - (b) unas células fotovoltaicas (2) aisladas del medio de cultivo (3) que recubre unas placas (7), extendiéndose dichas placas sobre aproximadamente toda la altura del recinto de cultivo (1), colocadas en un tubo de transparencia adecuada y estanca (5) sumergido en el medio de cultivo (3) y dispuestas en un tubo de sección poligonal.
- 45 11. Fotobiorreactor según las reivindicaciones 1 a 4 y 6 a 9, que comprende:
- (a) varios recintos de cultivo (1) paralelepípedicos apilados y separados por
 - (b) unas placas (7) de células fotovoltaicas (2), presentando dichas placas las dimensiones de una cara del recinto de cultivo.
- 50 55 12. Utilización de células fotovoltaicas alimentadas eléctricamente en modo inverso de emisión de luz para iluminar el medio de cultivo de un fotobiorreactor.
- 60 13. Utilización de un fotobiorreactor según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, para cultivar unos microorganismos fotosintéticos, preferentemente unas microalgas.

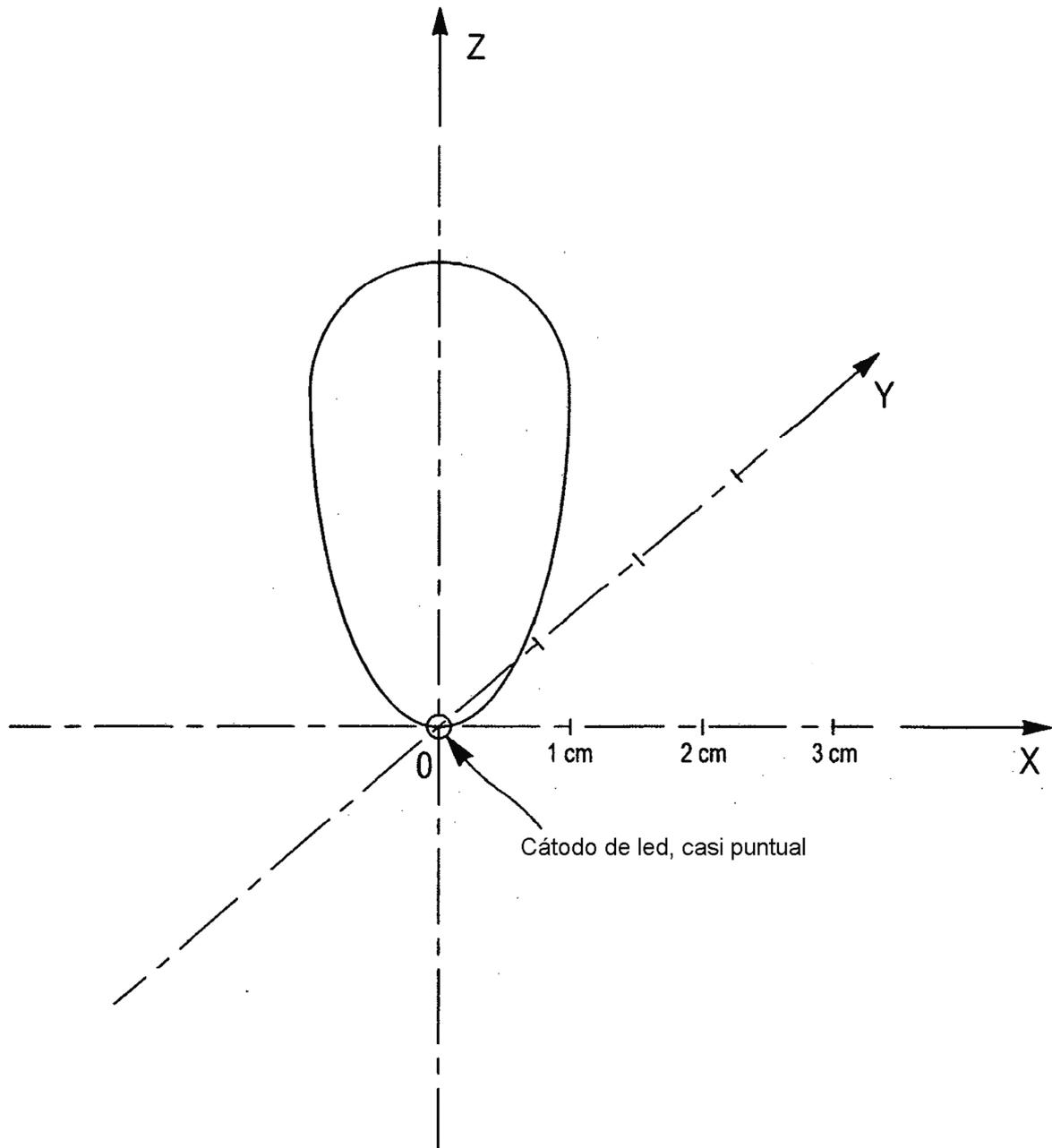


FIG. 1

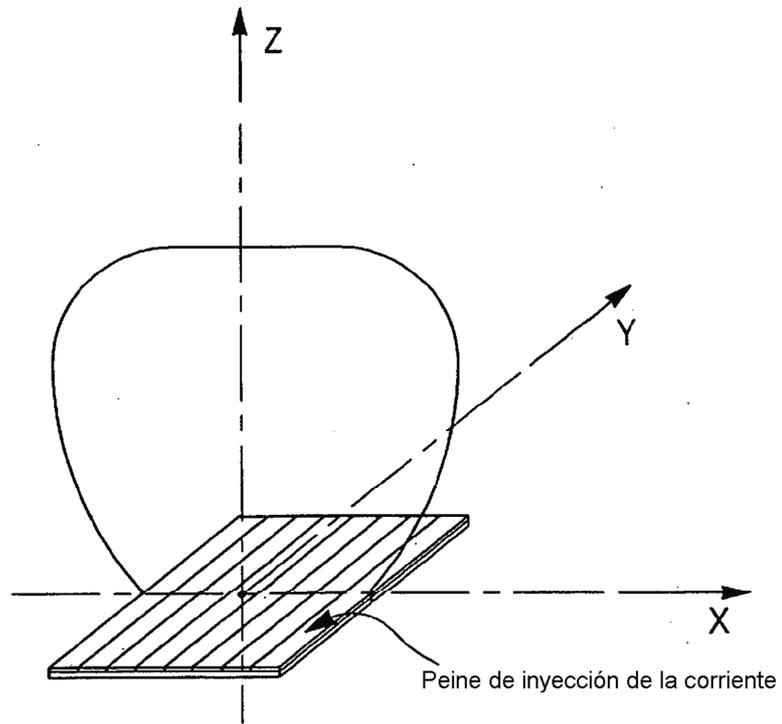


FIG. 2

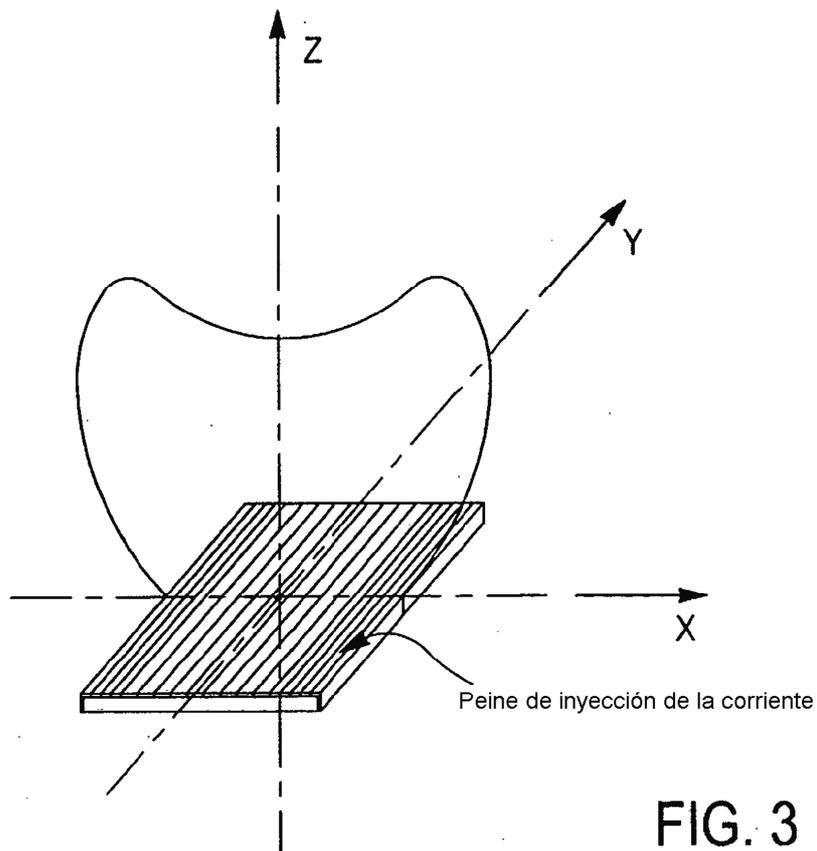


FIG. 3

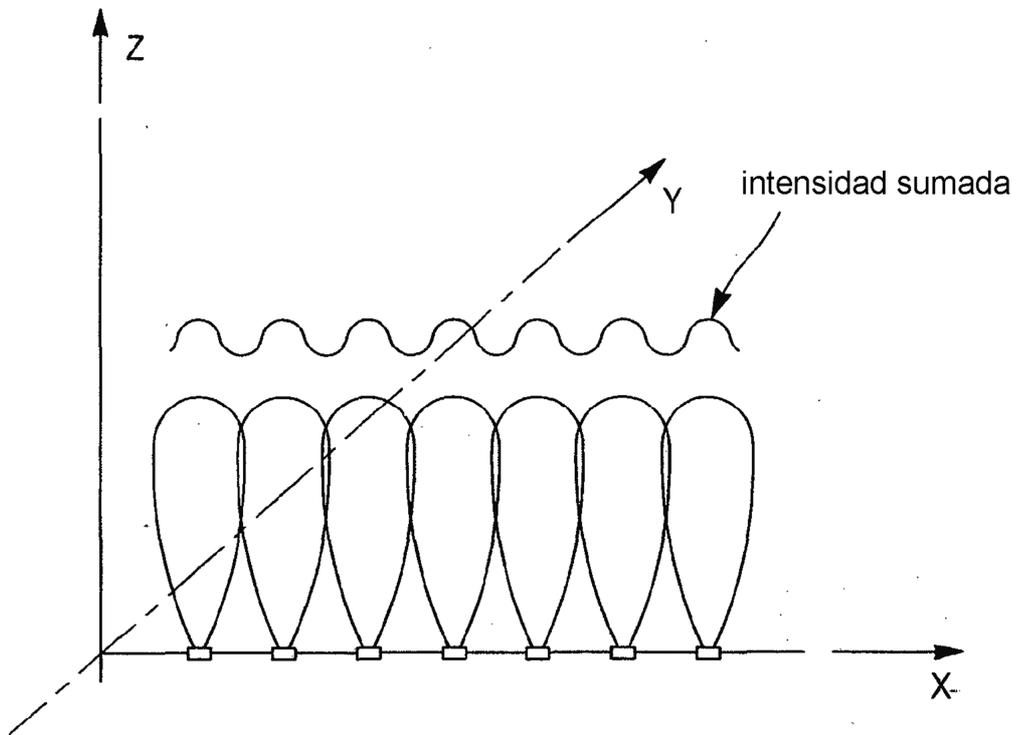


FIG. 4

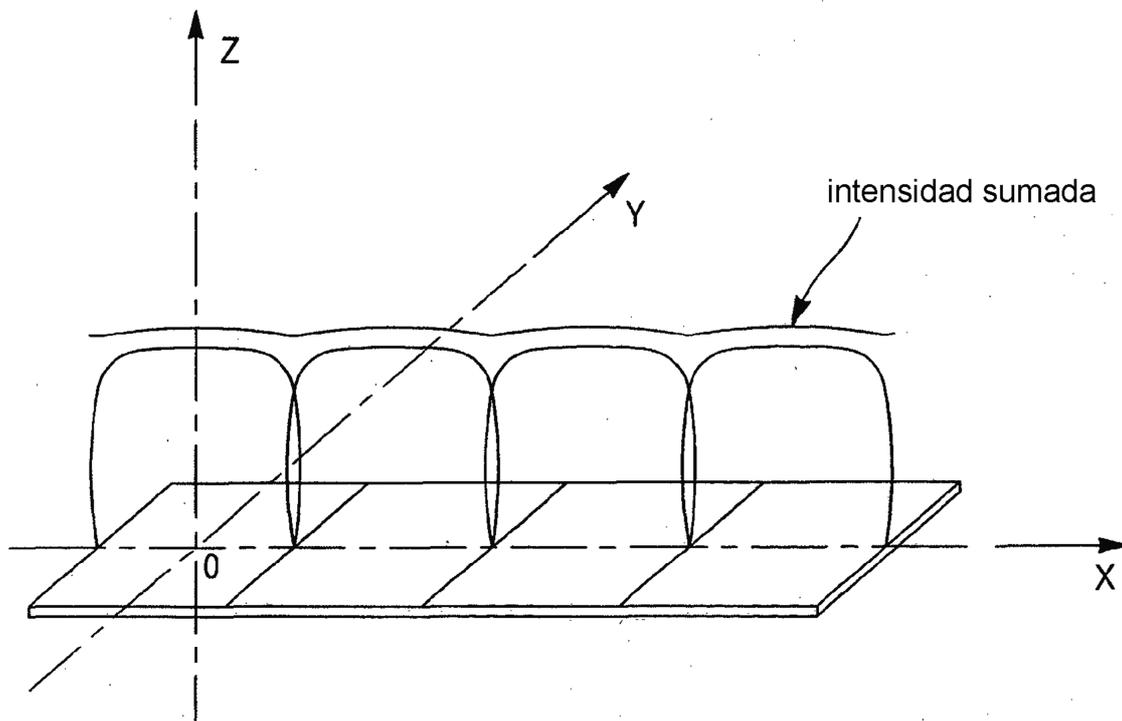


FIG. 5

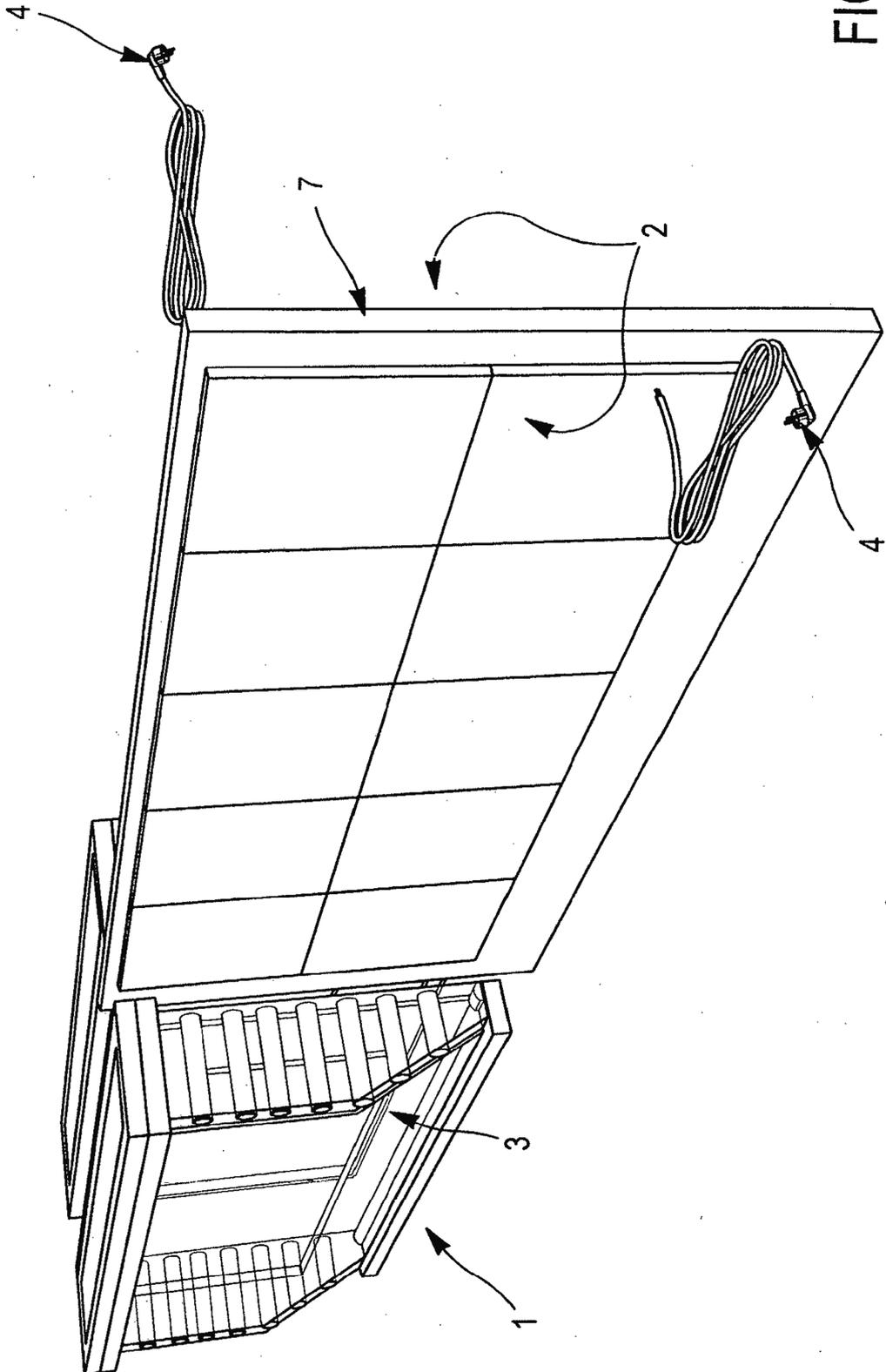


FIG. 6a

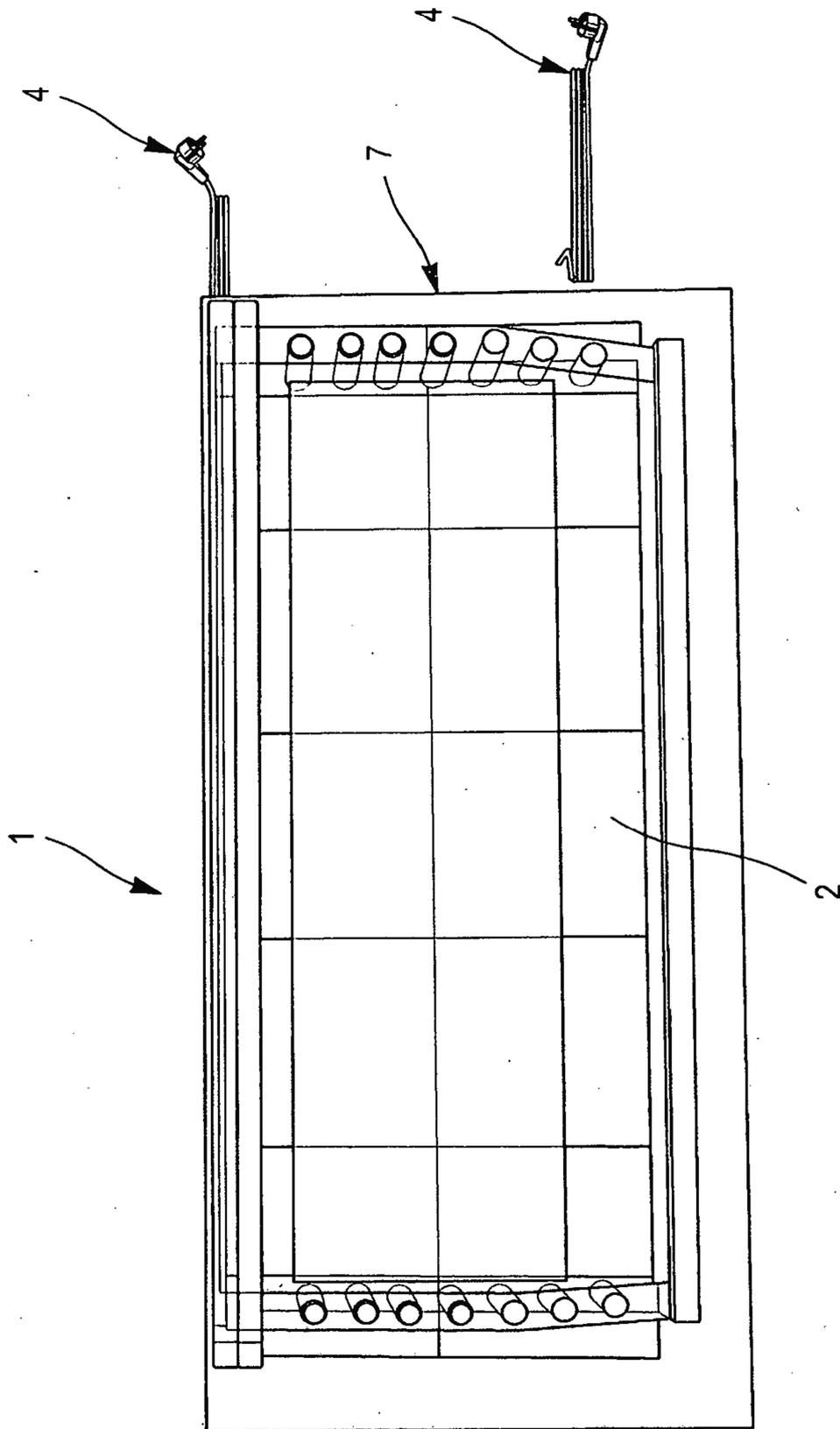


FIG. 6b

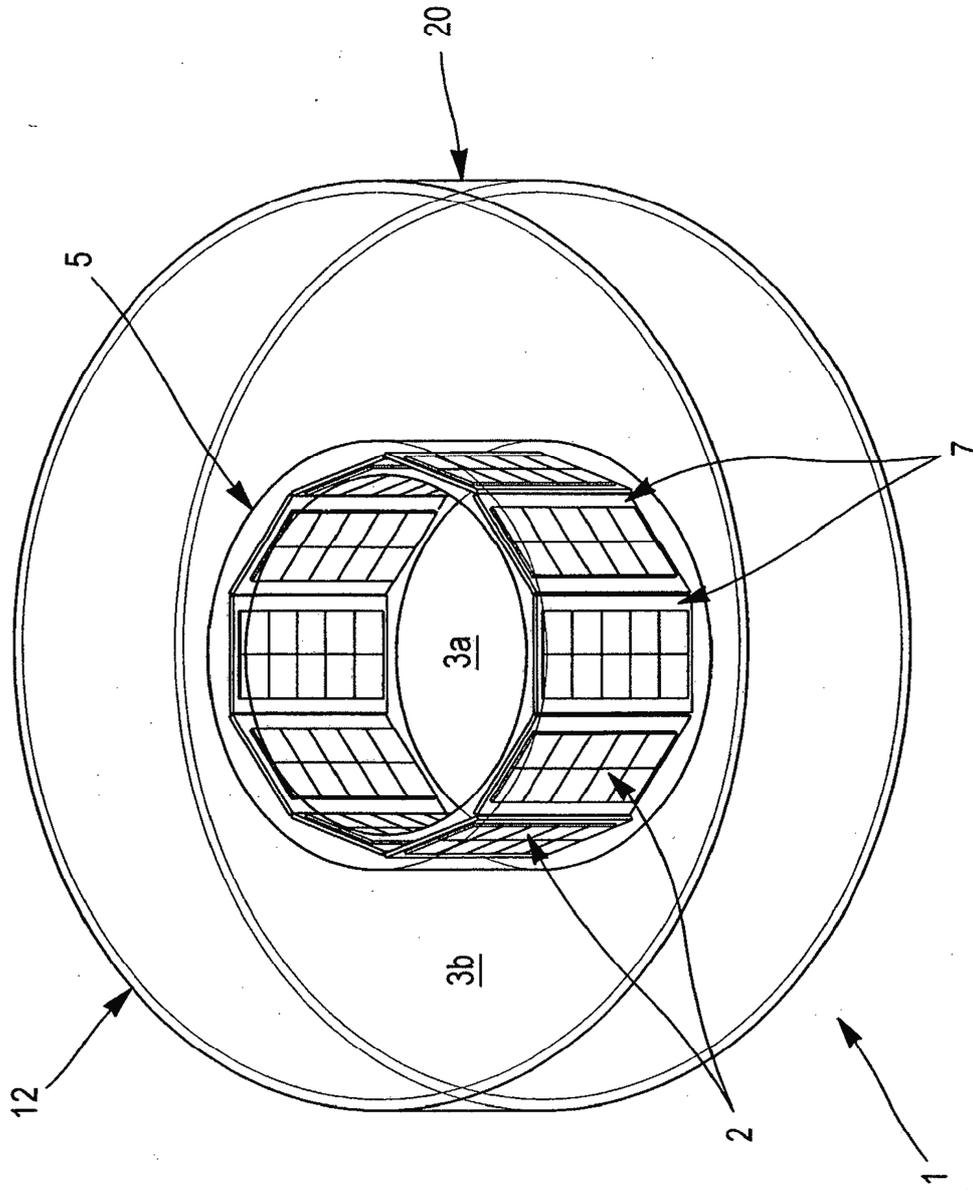


FIG. 7A

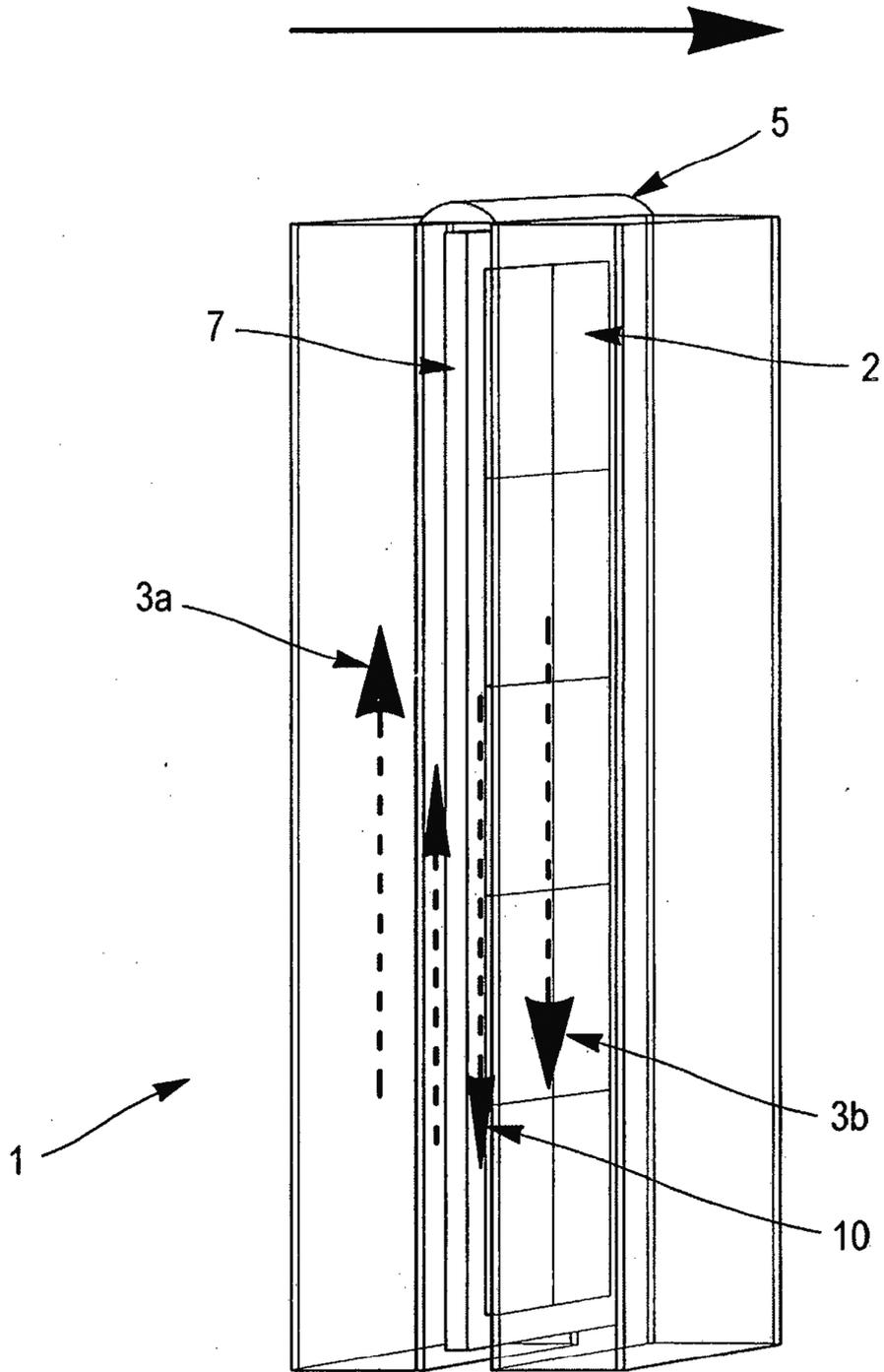


FIG. 7B

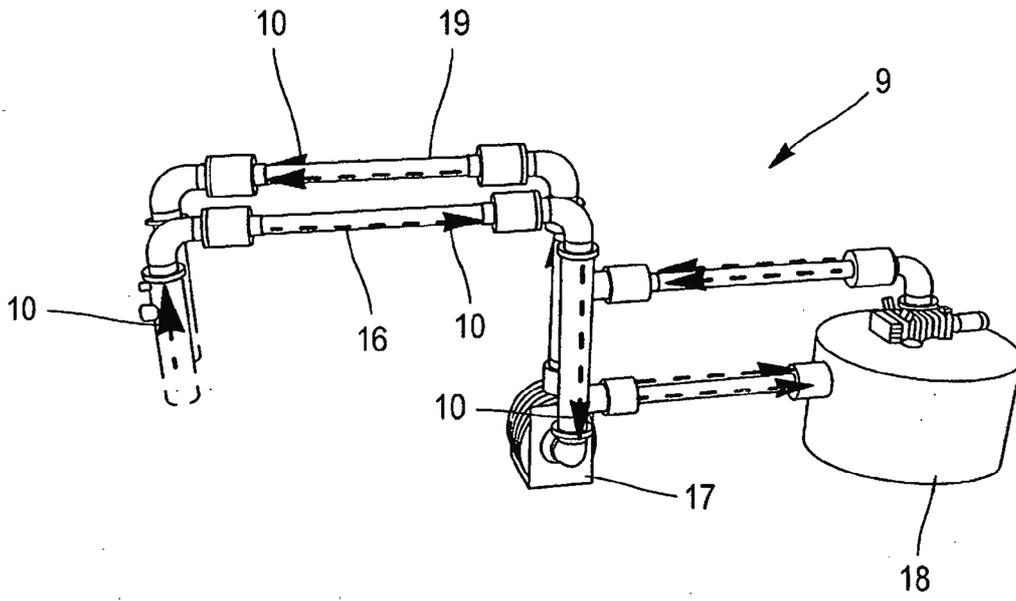


FIG. 8

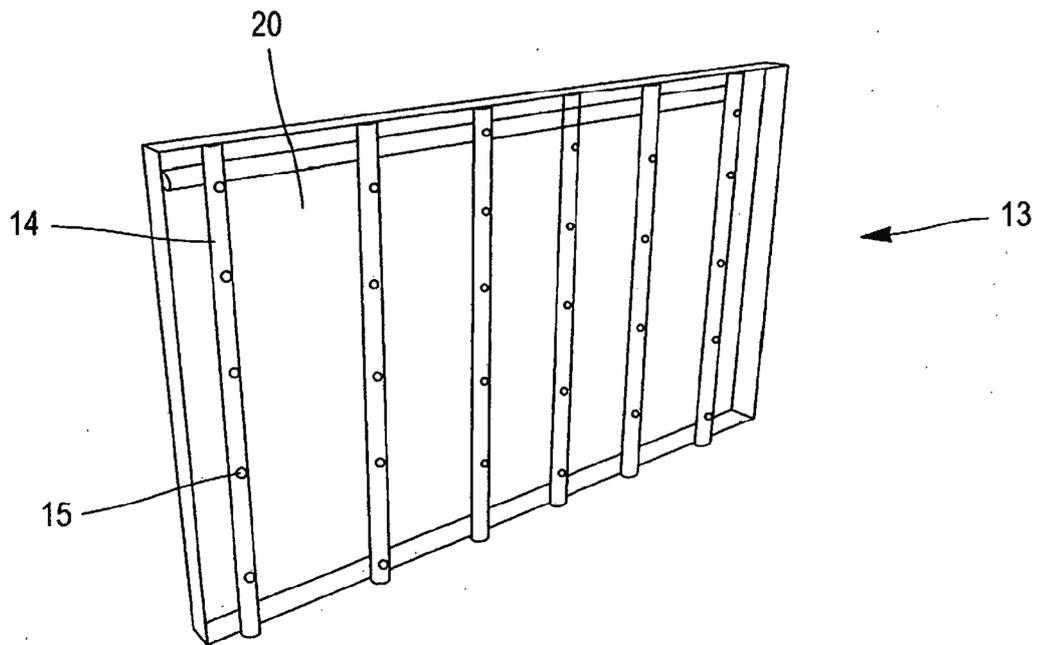


FIG. 9