

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 754 265**

51 Int. Cl.:

C12M 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **02.12.2015 PCT/FR2015/053294**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.06.2016 WO16087779**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.12.2015 E 15810693 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.08.2019 EP 3227427**

54 Título: **Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético por medio de un fotobiorreactor y al menos un distribuidor de luz**

30 Prioridad:

02.12.2014 FR 1461778

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

16.04.2020

73 Titular/es:

**SUNOLEO (100.0%)
Sis Pépinière d'entreprises de Pertuis, 139 rue
Philippe de Girard
84120 Pertuis, FR**

72 Inventor/es:

BARBARIN, FRÉDÉRIC

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 754 265 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

Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético por medio de un fotobiorreactor y al menos un distribuidor de luz

5 **Campo técnico de la invención**

La invención se refiere al campo de los dispositivos de producción de cultivos fotosintéticos y, en particular, por medio de un fotobiorreactor.

10 **Estado de la técnica anterior**

El cultivo de microalgas está en el centro de los procedimientos de reciclado. En efecto, las microalgas son una fuente alternativa particularmente para la producción de biocarburantes, biomasa, aceites, proteínas, ésteres o etanol. Además, tales cultivos pueden ser utilizados para el reciclado y la purificación de las aguas residuales, el tratamiento de residuos de fertilizantes, CO₂, NO_x, SO_x de determinadas fábricas.

El desarrollo de los cultivos fotosintéticos de microalgas requiere, no obstante, la implementación de sistemas de producción específicos que se adaptarán de acuerdo con la aplicación prevista, las condiciones industriales de explotación, la cepa que se va a cultivar y las condiciones geográficas, climáticas o de insolación.

Asimismo, una dificultad bien conocida en este campo se refiere a la penetración de la luz en el fotobiorreactor. En efecto, sobre una superficie de terreno dada, una simple extensión de agua horizontal, tal como las "pistas de carreras" (*raceways*) (fotobiorreactor de estanque abierto de gran tamaño y poca profundidad), solo utiliza parcialmente el potencial solar ya que, a partir de pocos centímetros de profundidad, la opacidad del agua según su concentración de microalgas limita la penetración de la luz en profundidad. Dado que el exceso de luz directa no puede atravesar la opacidad de los medios de cultivo (o agua de algas), este es absorbido parcialmente por ella en forma de calor, en lugar de servir para el crecimiento de las microalgas, lo que da lugar a un problema de evaporación del agua.

Igualmente, las "pistas de carreras" pueden generar problemas asociados a contaminaciones exteriores (bacterias, depredadores, algas competidoras introducidas...) que pueden perjudicar la producción. Otro inconveniente de las "pistas de carreras" se refiere a la elevada tasa de evaporación del agua.

Para subsanar estos problemas se han desarrollado fotobiorreactores de capas finas estancas. No obstante, es indispensable un sistema de refrigeración para evitar una alteración de las microalgas, haciendo más complicada la gestión del cultivo y disminuyendo su rendimiento. En efecto, estos fotobiorreactores requieren equipos de gestión compleja proporcionalmente al volumen de agua usada, lo que implica que es imposible su industrialización para la producción en masa.

Se ha desarrollado otro modo de realización en el que los fotobiorreactores utilizan difusores de luz en su interior a fin de aumentar el volumen de agua útil para la producción de microalgas.

Tales dispositivos se describen en la solicitud internacional WO 2013/063075, en la que se disponen varios LED en el interior del fotobiorreactor a fin de aumentar el rendimiento del cultivo fotosintético.

Asimismo, determinados biorreactores de la técnica anterior tienen una construcción relativamente compleja y utilizan a veces ópticas complejas para iluminar el agua de algas.

Este tipo de dispositivo requiere una alimentación de energía que eleva el coste de producción del cultivo de microalgas. Por tanto, con frecuencia es preferente la luz solar.

El documento WO 2012/152637 divulga un fotobiorreactor en el que un elemento difusor de luz situado en la cámara de cultivo está acoplado ópticamente a una fuente de luz artificial, por ejemplo, uno o varios LED. Además, este dispositivo no está adaptado al estanque de cultivo de gran tamaño en la medida en que los difusores de luz que no están llenos de líquido no pueden resistir una presión hidrostática del agua demasiado elevada.

La solicitud internacional WO 2009/116853 presenta una alternativa de difusores de luz, en este caso de la luz solar, mediante la adición al tanque de un dispositivo rígido transparente que comprende al menos una superficie de recepción de luz dispuesta para recibir la luz solar y al menos una superficie de emisión, sumergida en el agua de algas, dispuesta para emitir al menos una parte de la luz recibida en el agua de algas.

Este tipo de fotobiorreactor, además de utilizar materiales de paredes espesas y costosas, requiere una exposición importante a la radiación solar, lo que aumenta la evaporación del agua de algas y hace más complicada la gestión del cultivo fotosintético.

Por otro lado, tales difusores de luz presentan un volumen espacial muy grande independientemente del tipo de

tanques utilizados. Esto hace difícil su mantenimiento, su sustitución y su utilización en fotobiorreactores de tamaño industrial.

5 La solicitud internacional WO 2013/011448 describe un fotobiorreactor en el que los distribuidores de luz compuestos por mangas hechas de un material flexible, transparente, resistente a la tracción y a la presión se suspenden verticalmente desde un soporte y se sumergen en la solución de algas. Preferentemente, el soporte cierra el estanque. Por tanto, este soporte debe presentar la resistencia mecánica necesaria para soportar el peso del conjunto de mangas llenas de agua, lo que limita el tamaño de los estanques.

10 **Exposición de la invención**

La invención pretende superar los inconvenientes del estado de la técnica y, en particular, proponer un dispositivo de producción de un cultivo fotosintético que comprende al menos un fotobiorreactor que forma una cámara provista de medios de alimentación/evacuación y que comprende:

- 15
- un líquido acuoso que comprende un cultivo fotosintético,
 - al menos un medio de alimentación y de evacuación de fluidos de dicha cámara que interactúa con un sistema de gestión,
 - al menos un distribuidor de luz que comprende:
- 20
- al menos una primera pared dispuesta para recibir luz en un extremo proximal,
 - al menos una segunda pared dispuesta para emitir al menos una parte de la luz recibida,
 - una cavidad estanca delimitada por dichas al menos una primera y una segunda pared,
 - al menos una parte de la pared emisora está sumergida en el líquido acuoso que comprende el cultivo
- 25
- fotosintético,
 - al menos un fluido que llena al menos en parte dicha cavidad estanca,

- un medio de cubrimiento de dicho fotobiorreactor apto para limitar la evaporación de dicho líquido acuoso,

30 caracterizado por que dicho medio de cubrimiento está provisto al menos de una abertura, apta para mantener dicho al menos un distribuidor de luz en una posición fija en dicha cámara del fotobiorreactor caracterizado por que dicho al menos un distribuidor de luz está flotando y permite mantener el medio de cubrimiento por encima del plano del agua de algas.

35 Por "líquido acuoso que comprende un cultivo fotosintético" se entiende preferentemente cualquier cultivo de microalgas; las microalgas se seleccionan en función de la aplicación prevista (por ejemplo la producción de proteínas, aceite, etanol, biomasa) y de las condiciones de cultivo, particularmente geográficas, climáticas y de temperatura. Asimismo, la expresión "líquido acuoso que comprende un cultivo fotosintético" puede ser sustituida por "agua de algas" sin que esto influya sobre el alcance de la protección conferida por la presente solicitud.

40 Por "fluido" se entiende cualquier líquido o gas adecuado para el funcionamiento del fotobiorreactor o el desarrollo del cultivo fotosintético.

45 Por "distribuidor de luz" se entiende cualquier cuerpo que posee al menos dos paredes, la primera que recibe una radiación de luz, preferentemente solar, la segunda que emite al menos una parte de la radiación de luz. Preferentemente, dicho cuerpo es un cilindro o una variación de un cilindro que se extiende por su altura según un eje X ortogonal al plano soporte sobre el que reposa dicha cámara de dicho fotobiorreactor. Adicionalmente, la altura de dicho al menos un distribuidor de luz es similar a la altura de dicha cámara. Es decir, que la altura de dicho al menos un distribuidor de luz está comprendida entre un 100 % y un 85 % de la altura de dicha cámara.

50 Por "extremo proximal" se entiende el extremo más alejado del plano soporte para un uso normal de dicho al menos un distribuidor de luz, es decir, cuando este se sumerge en el fotobiorreactor de eje X.

55 Por "extremo distal" se entiende el extremo más próximo al plano soporte para un uso normal de dicho al menos un distribuidor de luz.

60 Por "medio de cubrimiento" se entiende cualquier medio que permite cerrar la superficie de dicho fotobiorreactor a fin de formar una cámara estanca, preferentemente hermética, por ejemplo una tapa, una lona o cualquier otro medio técnicamente equivalente. Asimismo, el medio de cubrimiento puede ser transparente u opaco, coloreado, y se puede producir a partir de una tira de polímero cortada y adherida o de una sola pieza.

De forma ventajosa, se lleva a cabo una cooperación de forma entre al menos un borde de dicha abertura de dicho medio de cubrimiento y un relieve de superficie de dicho al menos un distribuidor de luz, a fin de mantener dicho al menos un distribuidor de luz en una posición fija en dicha cámara del fotobiorreactor.

65 Preferentemente, dicha pared de recepción de luz del dicho al menos un distribuidor de luz está dispuesta en el

exterior del volumen definido por dicha cámara del fotobiorreactor.

En otras palabras, al menos una parte de dicho al menos un distribuidor de luz no está cubierta por el medio de cubrimiento y sobrepasa dicho medio de cubrimiento, de forma que el plano formado por dicho medio de cubrimiento separa las dichas al menos una primera y una segunda pared del dicho al menos un distribuidor de luz.

De forma ventajosa, el número ($nb_{distribuidor}$) y la altura sumergida ($H_{distribuidor}$) del dicho al menos un distribuidor de luz y el espacio (d) entre los diferentes distribuidores de luz se determinan a partir de las fórmulas siguientes: En una cámara de sección transversal circular o rectangular de superficie $S_{cámara}$ (en m^2),

$$nb_{distribuidor} = \frac{4 \cdot \xi \cdot S_{cámara}}{\pi \cdot D^2} \quad (1)$$

ξ : la fracción volumétrica ocupada por los distribuidores de luz con respecto al volumen total de agua en la cámara.

La fracción ξ está comprendida preferentemente entre 0,6 y 0,8.

D : el diámetro del distribuidor de luz (en m).

La ecuación anterior no tiene en cuenta los efectos de borde.

$$H_{distribuidor} = \frac{D}{4 \cdot q_2} (n \cdot q_{solar} - q_2) \quad (2)$$

$H_{distribuidor}$: Altura de la segunda pared del distribuidor de luz (parte sumergida) (en mm).

q_{solar} : flujo incidente de una día de insolación (en $\mu\text{moles de fotones}/m^2 \cdot s^{-1}$).

q_2 : flujo luminoso deseado en la pared emisora de luz del distribuidor de luz para la buena producción de una cepa de microalgas dada (en $\mu\text{mol}/m^2 \cdot s^{-1}$).

η : rendimiento de transmisión entre la primera pared receptora de luz y la segunda pared emisora del distribuidor de luz.

La altura $H_{distribuidor}$ puede estar comprendida entre 1 m y 12 m, preferentemente entre 4 m y 8 m, mientras que el diámetro del distribuidor de luz puede estar comprendido entre 1 m y 3 m.

$$d = \sqrt{\frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \xi \cdot \cos 30}} \quad (3)$$

d : distancia en metros entre los ejes longitudinales X de 2 distribuidores de luz.

Preferentemente, dicho al menos un distribuidor de luz está provisto de medios de alimentación y de extracción de fluidos. Dichos medios de alimentación y de extracción de fluidos pueden ser independientes, parcialmente o totalmente mezclados entre sí.

Preferentemente, dicho al menos un fluido que llena al menos en parte dicha cavidad estanca está compuesto por agua y aire. Así, la inmersión de dicho distribuidor de luz en el agua de algas está controlada por la relación agua/aire presente en dicha cavidad de dicho al menos un distribuidor de luz.

Además, dicho fluido que llena al menos en parte dicha cavidad estanca es adecuado para presurizar el volumen interno de dicho al menos un distribuidor de luz a fin de hacer estanca la cooperación de forma entre el borde de dicha abertura y dicho relieve de superficie del dicho al menos un distribuidor de luz.

Por otro lado, dichos distribuidores de luz son flotantes y permiten mantener el medio de cubrimiento por encima del plano del agua de algas, de forma ventajosa a una distancia comprendida entre 10 cm y 50 cm. Así, en un modo de realización de la invención, los distribuidores de luz actúan como flotadores que mantienen el medio de cubrimiento por encima del plano del agua de algas. El mantenimiento del medio de cubrimiento por encima del plano del agua de algas permite la circulación de los gases entre la superficie del agua de algas y el medio de cubrimiento. Tal realización del dispositivo de la invención permite liberarse del uso de un soporte rígido por encima del plano del

agua de algas y, en consecuencia, del problema de la capacidad de carga. Así, es posible utilizar, sin limitación, un estanque de cultivo de gran tamaño. De este modo, el medio de cubrimiento puede ser una estructura no rígida tal como una simple lona.

5 De forma ventajosa, dicho al menos un distribuidor de luz está provisto de un medio de anclaje dispuesto en un extremo distal.

10 Por "medio de anclaje" se entiende cualquier masa unida o no al fondo del fotobiorreactor, cualquier modo de conexión entre dicho al menos un distribuidor de luz y el fondo del fotobiorreactor, tal como una cuerda, una cadena o cualquier otro medio conocido por el experto en la técnica, adecuado para inmovilizar en una posición deseada dicho al menos un distribuidor de luz.

15 De acuerdo con otra característica, dichas paredes del dicho al menos un distribuidor de luz están formadas por al menos una membrana flexible preferentemente con un alto grado de transparencia y una resistencia a la elasticidad. Tal membrana flexible puede ser de un polímero, por ejemplo, de polietileno, de polipropileno o de poliamida, o de PVC o también una multicapa de polímeros que tienen propiedades que son complementarias.

20 Así, de acuerdo con esta característica, dicho al menos un distribuidor de luz es hinchable/deshinchable. Es decir, que para obtener su forma de uso, dicho al menos un distribuidor de luz debe tener dicha cavidad estanca llena de fluido, particularmente de agua y de aire, y debe tener una presión superior a la presión atmosférica, preferentemente de aproximadamente 50 hectopascales.

25 Por otro lado, el polímero de la membrana puede presentar cierto grado de impermeabilidad al oxígeno, sobre toda su superficie o localmente, a fin de limitar la porosidad de las paredes del difusor de luz. De acuerdo con la mejora de la gestión del aire en la parte proximal del difusor de luz, se pueden conservar varios canales. Es decir, intentar limitar al máximo los intercambios gaseosos con el entorno exterior a fin de disminuir el aporte de aire para mantener a su nivel de inmersión el difusor de luz. En esta solución, la porosidad del oxígeno podría ser, por ejemplo, inferior a $0,1 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}^{-1}$. Es decir, facilitar por el contrario la evacuación del oxígeno del agua de algas hacia el agua del difusor de luz.

30 Además, cuando dicha cavidad estanca del dicho al menos un distribuidor de luz no contiene fluido, particularmente cuando este está almacenado o no se ha instalado aún en dicho fotobiorreactor, dicho al menos un distribuidor de luz puede estar doblado o enrollado a fin de limitar su volumen espacial.

35 De forma ventajosa, dicha membrana de polímero ha recibido o comprende durante su fabricación al menos un tratamiento de superficie interior y/o exterior entre los siguientes: antigoteo, antipolvo, filtro UV y/o infrarrojo, estabilizantes UV, efecto difusor, semirreflejante, hidrófobo, antipolvo, antialgas (por ejemplo: óxidos de titanio).

40 Por ejemplo, un tratamiento con óxidos de titanio permite evitar sobre la primera pared, receptora de la luz solar, la formación de gotas de condensación que pueden perturbar el paso de la luz en dicho al menos un distribuidor de luz y evitar sobre la segunda pared el fenómeno de ensuciamiento (*fouling*), es decir, el depósito de algas sobre las paredes.

45 Un tratamiento sobre la superficie interior con un filtro del infrarrojo lejano permite retener el infrarrojo lejano en el distribuidor de luz a fin de calentar el interior por el efecto invernadero.

Un tratamiento anti-UV puede evitar la destrucción del cultivo fotosintético por los rayos UV.

50 Un tratamiento semirreflejante permite una mejor transferencia de la luz hacia la parte distal del distribuidor de luz mediante un "efecto espejo", cuya absorción luminosa intrínseca no deberá superar el 10 %. Este tratamiento local se sitúa en la zona proximal sobre la segunda pared en el interior de la cavidad estanca del distribuidor de luz, y se puede llevar a cabo mediante inmersión o mediante pulverización de un material metálico.

55 De acuerdo con otra característica, dicho fotobiorreactor comprende al menos un medio de burbujeo con aporte de CO_2 , dispuesto al menos sobre una parte del fondo de la cámara del fotobiorreactor, a fin de permitir una agitación permanente de dicho líquido acuoso que comprende dicho cultivo fotosintético.

60 Por "medio de burbujeo" se entiende cualquier medio conocido por el experto en la técnica adecuado para suministrar gas al interior de dicha cámara, particularmente en forma de burbujas.

Breve descripción de las figuras

Otras características, detalles y ventajas de la invención aparecerán durante la lectura de la descripción que sigue, con referencia a las figuras adjuntas, que ilustran:

65 - la figura 1 desvela una representación 3D de un modo de realización de acuerdo con la invención,

- la figura 2 desvela una representación 3D de un modo de realización del fotobiorreactor sin el medio de cubrimiento,
- la figura 3 es una vista detallada de un modo de realización de un distribuidor de luz instalado en un fotobiorreactor de acuerdo con la invención, mantenido en una posición fija por el medio de cubrimiento,
- 5 - la figura 4 es un corte longitudinal de un modo de realización de un distribuidor de luz,
- la figura 5 es una vista superior de un modo de realización de una parte del medio de cubrimiento,
- la figura 6 es un esquema del extremo proximal de un modo de realización de dicho distribuidor de luz,
- la figura 7 es un corte esquemático ortogonal al plano formado por el soporte de un modo de realización de la red de alimentación y de extracción/descarga de los fluidos del fotobiorreactor,
- 10 - la figura 8 desvela una representación en tres dimensiones de un modo de realización a gran escala de un dispositivo de producción de acuerdo con la invención que comprende varios fotobiorreactores.

Para mayor claridad, los elementos idénticos o similares se marcan mediante signos de referencia idénticos en el conjunto de las figuras.

15

Descripción detallada de un modo de realización

La figura 1 ilustra un modo de realización de la invención en el que el dispositivo de producción de un cultivo fotosintético 1 comprende al menos un fotobiorreactor 2 que forma una cámara 3 provista de medios de alimentación/evacuación 4 y adecuada para contener un agua de algas.

20

A modo de ejemplo, la cámara puede ser una cavidad natural tal como un lago, una laguna o en el mar, o artificial, de cemento, chapa, geomembrana, etc. Puede estar pintada de blanco permitiendo así la reflexión de la luz, recubierta de una materia impermeable al agua, y/o aislada térmicamente del interior y/o del exterior.

25

Dicho fotobiorreactor puede ser de forma cúbica, paralelepípeda, cilíndrica, esférica, piramidal, prismática o cualquier variante de estas. Preferentemente, se seleccionará una forma paralelepípeda o cilíndrica cuyas dimensiones son adecuadas para la producción industrial de un cultivo fotosintético. A modo de ejemplo, para un fotobiorreactor paralelepípedo: 100 m por 30 m y 8 m de altura; o para un fotobiorreactor cilíndrico: 7 m de diámetro por 4 m de altura. Las dimensiones del fotobiorreactor se determinarán y se adaptarán, por supuesto, en función del tipo de instalación industrial deseada.

30

Preferentemente, dicho fotobiorreactor está por encima del suelo; a fin de limitar el volumen espacial de tal instalación, se puede enterrar parcialmente. Se puede situar en las proximidades de una fábrica emisora de CO₂, de una planta de tratamiento de aguas residuales, metanizadores/digestores, en el marco del reciclado (biogás, cogeneración, compostaje, reciclado del CO₂). Por otro lado, se puede situar en tierras áridas o en desiertos, en la proximidad del mar para el suministro de agua.

35

Dicha cámara 3 está cubierta, en su extremo proximal, por un medio de cubrimiento 5 suficientemente resistente a fin de tolerar al menos el peso de un hombre una vez instalado. Por ejemplo, una lona plástica o una combinación de capas de polímeros, o también una tela impermeable de tipo poliéster con un revestimiento de PVC usada normalmente para el cubrimiento de tiendas de campaña o de remolques de vehículos pesados.

40

El espesor del cubrimiento 5 es, por ejemplo, de 0,6 mm con un peso de aproximadamente 600 g/m². Por otro lado, el medio de cubrimiento 5 posee en su periferia un medio de sujeción 21 para permitir una aplicación estanca sobre las paredes de la cámara 3. Este puede ser, por ejemplo, un reborde con ojales por los que pasan tensores, o bien vainas en las que se insertan tubos metálicos. Además, puede ser ventajoso que su densidad sea inferior a 1 para que pueda flotar a fin de facilitar su instalación.

45

50 Dicho fotobiorreactor 2 está provisto de al menos un distribuidor de luz 6.

Dicho al menos un distribuidor de luz 6 tiene preferentemente forma tubular, cilíndrica, que se extiende longitudinalmente según un eje X, cuyas dimensiones se adaptan a las dimensiones del fotobiorreactor.

55

La forma tubular del distribuidor de luz 6 se ha mantenido dado que es sencilla y fácil de realizar en fábrica, incluso para grandes dimensiones, con respecto a otras formas geométricas.

Dicho al menos un distribuidor de luz o "depósito" 6 está delimitado por una membrana flexible preferentemente de polímero, adecuada para hacer variar el volumen de dicho al menos un distribuidor de luz 6 tal como un depósito hinchable/deshinchable y posee al menos dos paredes, al menos una primera pared 7 dispuesta para recibir luz en un extremo proximal, al menos una segunda pared 8 dispuesta para emitir al menos una parte de la luz recibida.

60

La membrana flexible preferentemente es ligeramente extensible y poco elástica, a fin de minimizar el fenómeno de abombamiento sobre la parte tubular del depósito 6. El espesor de la membrana puede ser, por ejemplo, de aproximadamente 200 μm. La membrana que permite realizar la cavidad estanca del distribuidor de luz 6 puede estar constituida por varias partes adheridas entre sí. Por ejemplo, una parte tubular larga con dos extremos

65

adheridos. Las numerosas películas transparentes usadas específicamente para los invernaderos son muy económicas ya que se fabrican en gran cantidad mediante un método de extrusión por soplado o de coextrusión. Estos procedimientos de fabricación son muy ventajosos, ya que no solamente los costes de producción son los más bajos, sino que además permiten constituir películas multicapa que combinan diferentes características. El experto en la técnica sabrá utilizar perfectamente estos procedimientos conocidos para fabricar la película transparente adecuada para la constitución de las paredes 7 y 8 del distribuidor de luz 6.

Asimismo, el grado de transmisión de luz global de la membrana 7, 8 es preferentemente superior al 90 %. El efecto difusor del polímero debe alterar lo menos posible su grado de transmisión de luz. La transmisión de luz es una propiedad importante de la membrana. No obstante, hay que distinguir la diferencia entre la luz directa y la luz indirecta denominada también difusa. Demasiada luz directa podría llevar a una destrucción de las microalgas y a pérdidas por absorción en forma de calor, sobre todo en las regiones de fuerte radiación solar. La incorporación de cargas minerales en la fabricación de la membrana permite obtener una mejor distribución de la luz, que se hace más difusa y homogénea. Además, los copolímeros (tipo EVA) tienen como función bloquear las radiaciones del infrarrojo lejano y ralentizan las caídas de temperatura.

La pared 7 receptora de luz en la parte proximal del distribuidor de luz tiene preferentemente una forma ligeramente abombada. Esta forma permite una mejor captación de la luz con relación a la posición del sol a lo largo de todo el día.

Las dimensiones y el número de los distribuidores de luz 6 así como la distancia entre cada distribuidor de luz 6 se determinan a partir de las fórmulas siguientes:

$$nb_{\text{distribuidor}} = \frac{4 \cdot \xi \cdot S_{\text{cámara}}}{\pi \cdot D^2} \quad (1)$$

$$H_{\text{distribuidor}} = \frac{D}{4 \cdot q_2} (n \cdot q_{\text{solar}} - q_2) \quad (2)$$

$$d = \sqrt{\frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \xi \cdot \cos 30}} \quad (3)$$

Con:

$H_{\text{distribuidor}}$: altura de la segunda pared 8 del distribuidor de luz 6 (parte sumergida) (en m)

D : diámetro del distribuidor de luz 6 (en m).

q_{solar} : flujo incidente de una día de insolación (en $\mu\text{moles de fotones/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

q_2 : flujo luminoso deseado en la pared emisora de luz del distribuidor de luz para la buena producción de una cepa de microalgas dada en ($\mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

η : rendimiento de transmisión entre la primera pared 7 receptora de luz y la segunda pared 8 emisora del distribuidor de luz.

$nb_{\text{distribuidor}}$: número del distribuidor de luz 6 en la cámara 3 del fotobiorreactor.

$S_{\text{cámara}}$: superficie de una cámara de sección transversal circular o rectangular (en m^2)

ξ : la fracción volumétrica ocupada por los distribuidores de luz con respecto al volumen total de agua en la cámara.

La fracción ξ está comprendida preferentemente entre 0,6 y 0,8.

d : distancia en metros entre los ejes longitudinales X de 2 distribuidores de luz.

A título ilustrativo, para una fracción ξ igual a 0,6857, y cuando el diámetro D de cada distribuidor es de 2 metros, la distancia d entre los ejes longitudinales X de 2 distribuidores de luz directamente adyacentes es de 2,30 m, es decir, 30 cm de espacio entre las paredes tal como muestra la figura 5.

La distancia d puede estar comprendida, por ejemplo, entre 1 m y 3 m.

El valor ξ representa igualmente, en la parte proximal, la superficie cubierta por la totalidad de dichos distribuidores de luz con respecto a la superficie total del fotobiorreactor 2. Por ejemplo, para $\xi = 0,667$, 2/3 de la superficie de la cámara 3 están cubiertos por la primera pared 7 del distribuidor de luz 6, estando el otro tercio cubierto por el medio de cubrimiento 5. Para una fracción comprendida entre 0,6 y 0,8, el agua contenida en los distribuidores de luz, por tanto, representa aproximadamente de un 60 % a un 80 % del volumen total de agua en la cámara 3, y el agua de algas representará de un 20 % a un 40 % del volumen de agua total.

Desde luego, las dimensiones mencionadas en la presente solicitud del fotobiorreactor 2 y de al menos un distribuidor de luz 6 no son exhaustivas y podrán evolucionar en función de los rendimientos obtenidos y de la ergonomía buscada.

El número de distribuidores de luz podrá estar comprendido, por ejemplo, entre 1 y 10 000 por cámara 3. Los distribuidores de luz 6 se disponen de forma equidistante entre sí en la cámara 3 tal como muestra la figura 5. Esta disposición forma una sucesión de filas colocadas al trespelillo, es decir, una fila está desplazada la mitad de la distancia entre dos distribuidores de luz, con respecto a la fila anterior y a la siguiente. Esta disposición optimiza la superficie luminosa útil en el volumen de agua de algas.

La ventaja de la introducción de los distribuidores de luz en el agua de algas es prioritariamente la gestión de la gran cantidad de flujo de luz en exceso del sol. En un estanque de tipo "pistas de carreras", durante un día de insolación, la cantidad de luz incide directamente sobre el plano de agua horizontal. Si una parte de la cantidad de fotones es absorbida por fotosíntesis, una gran cantidad de la energía luminosa se perderá en forma de calor. En efecto, las microalgas hasta un determinado umbral no absorben ya una luminosidad demasiado grande e, inversamente, esto puede generar la fotoinhibición. Asimismo, un exceso de la temperatura del agua en la superficie puede inhibir el crecimiento de las microalgas y se pierde mucha agua por evaporación. Un planteamiento en tres dimensiones permite sortear estos problemas, al difundir el flujo luminoso sobre una superficie máxima de modo que aumenta la cantidad de fotones captados por las microalgas. Igualmente, la penetración de la luz hasta la parte distal del depósito 6 es determinante para la buena producción fotosintética, de ahí el interés por una membrana con características adecuadas que permitan captar mejor el flujo luminoso del sol y difundirlo de la forma más homogénea posible sobre toda la superficie de la segunda pared 8 emisora de luz.

La cantidad de luz q_{solar} varía en función de la latitud geográfica del lugar de instalación del sitio de producción. La iluminación de un día de insolación de verano en Francia es de 80 000 Lux, es decir un flujo incidente q_{solar} de aproximadamente $1350 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Las microalgas solo requieren unos pocos μmoles de fotones/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, incluso unas decenas de $\mu\text{moles}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, para sobrepasar el punto de compensación entre respiración y fotosíntesis y comenzar, así, a crecer y multiplicarse. La tabla siguiente retoma los resultados de diferentes estudios publicados sobre la producción diaria de microalgas diversas, de acuerdo con la intensidad del flujo luminoso:

Cepa de microalga	Concentración celular en fase estacionaria (x 10E ⁶ células/ml)	Producción volumétrica de biomasa (g/l/día)	Producción de lípidos (g/l/día)	Flujo luminoso ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Referencias de la bibliografía
<i>Chlorella Vulgaris</i>	6	0,037	40 %	76	Illman <i>et al.</i> (2000)
<i>Chlorella Vulgaris</i>		0,485			Dragone <i>et al.</i> (2011)
<i>Chlorella Vulgaris</i>		0,254			Liang <i>et al.</i> (2009)
<i>Chlorella Vulgaris</i>		1,437		400	Shih-Hsin Ho <i>et al.</i> (2012)
<i>Chlorella Vulgaris</i>		0,39		90	Shih-Hsin Ho <i>et al.</i> (2012)
<i>Chlorella Vulgaris</i>		0,272	0,144		Yeh y Chang (2012)
<i>Chlorella Vulgaris</i>	33,2			100	Jean Hee Bae <i>et al.</i> (2011)
<i>Chlorella Vulgaris</i>	64,9			100	Jean Hee Bae <i>et al.</i> (2011)
<i>Chlorella Vulgaris</i>	227,2				Zaleha <i>et al.</i> (2013)
<i>Nannochloropsis oculata</i>	112,3			100	Jean Hee Bae <i>et al.</i> (2011)
<i>Nannochloropsis oculata</i>		0,382		0,17	Su <i>et al.</i> (2011)
<i>Nannochloropsis oculata</i>			0,151		Chiu <i>et al.</i> (2009)
<i>Nannochloropsis oculata</i>	(7,9 g/l)	1,5		21	Ramanathan <i>et al.</i> (2011)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	22,5			34	Roncallo <i>et al.</i> (2012)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	37,5			34	Roncallo <i>et al.</i> (2012)
<i>Nannochloropsis sp.</i>		0,124	0,074		Jiang <i>et al.</i> (2011)

<i>Nannochloropsis sp.</i>			0,148		Cheirsilp y Torpee (2012)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	107,3			100	Jean Hee Bae <i>et al.</i> (2011)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	92,2			17 8h/24	Zaleha <i>et al.</i> (2013)
<i>Desmodesmus sp.</i>		0,762	0,263	700	Shih-Hsin Ho <i>et al.</i> (2014)
<i>Desmodesmus sp.</i>		0,433	0,213	700	Shih-Hsin Ho <i>et al.</i> (2014)
<i>Desmodesmus sp.</i>		0,67	0,302	700	Shih-Hsin Ho <i>et al.</i> (2014)
<i>Scenedesmus obliquus</i>		0,151		60	Shih-Hsin Ho <i>et al.</i> (2010)
<i>Scenedesmus obliquus</i>		0,201		60	Shih-Hsin Ho <i>et al.</i> (2010)
<i>Nannochlorum sp.</i>	250			80	Pereira <i>et al.</i> (2011)
<i>Tetraselmis sp.</i>	40			80	Pereira <i>et al.</i> (2011)
<i>Tetraselmis sp.</i>	(12,38 g/l)		0,173	30 12h/24	Mohd Shamzi <i>et al.</i> (2013)
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	20			52	Robert & His (1987)
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	14,7		35,40 %		Kwangdinata <i>et al.</i> (2014)
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	(8,1 g/l)	1,7		21	Ramanathan <i>et al.</i> (2011)
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	10			13	Kaspar <i>et al.</i> (2013)
<i>Chlamydomonas sp</i>	7,5 (4 g/l)		0,169	250	Nakanishi <i>et al.</i> (2013)
<i>Spirulina Platensis</i>	(1,59 g/l)			52	Chauhan & Pathak (2010)
<i>Spirulina Platensis</i>	(1,84 g/l)			77 12h/24	Gami <i>et al.</i> (2011)

Aunque los estudios se llevan a cabo muy a menudo en pequeños volúmenes en el laboratorio, la disparidad de rendimientos de producción para una iluminación dada es grande. Determinados estudios muestran, no obstante, buenas producciones volumétricas con una iluminación baja de unas pocas decenas de $\mu\text{moles de fotones/m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ solamente. Uno de los estudios de Roncallo *et al.* (2012) da una concentración máxima de microalgas *Nannochloropsis sp.* de $37,5 \times 10^6$ células/ml para una luminosidad de aproximadamente $34 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (2000 Lux) solamente, en un fotobiorreactor de columna vertical de 25 cm de diámetro. Uno de los estudios de Ramanathan *et al.* (2011) muestra una producción diaria de *Chaetoceros calcitrans* de hasta $1,7 \text{ g/l}\cdot\text{día}^{-1}$, para una luminosidad de tan solo $21 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (1200 Lux), en tubos verticales de 4,5 cm de diámetro.

En la bibliografía actual, los rendimientos de producción superficial en $\text{g/m}^2\cdot\text{día}^{-1}$, son dispares. Los resultados van desde unos gramos por $\text{m}^2\cdot\text{día}^{-1}$ a 130 gramos por $\text{m}^2\cdot\text{día}^{-1}$. El estudio indio de Sudhakar *et al.* (2012) muestra, por ejemplo, rendimientos superficiales en estanque convencional de tipo "pistas de carreras" en promedio de $73 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}^{-1}$ y $76 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}^{-1}$ en dos sitios de producción de biomasa distintos.

Retomado la ecuación (2) con los valores D y q_{solar} mencionados anteriormente como ejemplo, partiendo de una cantidad de luz q_2 emitida en la superficie de la segunda pared 8 por ejemplo, $85 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ suficiente para el buen crecimiento de una cepa de microalgas dada, y un rendimiento de transmisión η del 80 % en la cavidad estanca del depósito 6, la altura H de la segunda pared 8 del distribuidor de luz será entonces de 6 m.

Flujo luminoso q_2 emitido en el distribuidor con $D = 2 \text{ m}$, $H = 6 \text{ m}$, $\text{rdto} = 80 \%$			
	Cielo cubierto	Buen tiempo	
Iluminación:	25 000	80 000	Lux
Flujo incidente q solar:	430	1377	$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$
q_2 distribuidor:	26	85	$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$

La absorción de la radiación visible en la altura de la columna de agua del distribuidor de luz 6 deberá ser la más baja posible a fin de conservar un buen rendimiento de transmisión η de la luz. Es decir, tener un agua filtrada con la menor turbidez. En el agua, la luz roja en el intervalo de longitudes de onda situado entre 600 y 700 μm se absorbe más rápidamente que la luz azul (400 a 500 μm). A 10 m de profundidad, aproximadamente un 80 % de la luz azul está disponible todavía en un agua clara, mientras que la roja será absorbida por completo. No obstante, todas las microalgas fotosintetizan, entre otras, la luz azul. El experto en la técnica tendrá en cuenta esto, evidentemente, en función de la altura del agua deseada en la cámara 3. Por ejemplo, en diatomeas, la producción de lípidos se ve favorecida por las longitudes de onda azules, precisamente las que son absorbidas con menos rapidez por el agua.

El agua contenida en la cavidad estanca del depósito 6 puede ser agua dulce o agua de mar. La mayor parte de sustancias que componen la sal marina tienen poco efecto sobre la absorción de la luz en el agua. Prácticamente no hay diferencia entre el espectro de absorción de un agua de mar muy clara y el del agua destilada.

5 Se podrá distribuir una cantidad de fotones máxima de $300 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ sobre la superficie de la segunda pared 8 del depósito 6. Para una cantidad de PAR (Radiación fotosintéticamente activa, expresada en $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ o en W/m^2) dada a una latitud geográfica, la cantidad media de fotones disponible en la cámara 3 depende evidentemente del diámetro del distribuidor de luz proporcionalmente a su profundidad, y esta cantidad se ha calculado de acuerdo con la fórmula (2).

10 Asimismo, la concentración máxima de microalgas en el agua de algas se ha de adaptar para una producción fotosintética diaria óptima. El modo de producción semicontinua es conveniente. Consiste en concentrar la densidad celular hasta la fase estacionaria, es decir, el umbral al cual las microalgas ya no pueden desarrollarse más en un medio de cultivo y a una luminosidad dados. A este umbral de saturación, se lleva a cabo una extracción de una parte del agua de algas mediante el medio de evacuación 4, a fin de filtrarla y recoger la biomasa de la misma. El estudio de Shih-Hsin Ho *et al.* (2014) muestra que una extracción a un 90 % de volumen de agua de algas cada 5 días permite una mejor producción volumétrica diaria de microalgas *Desmodesmus sp.* que una extracción al 10 % cada dos días (0,67 g/l/día frente a 0,20 g/l/día, respectivamente). La frecuencia de la recogida dependerá de la rapidez de crecimiento de la cepa de microalgas dada para llegar al umbral de saturación y de la cantidad de agua de algas extraída en cada recogida.

Una producción de biocarburante se puede calcular basándose en una productividad volumétrica teórica, cuyos valores se dan en la tabla siguiente:

Número de días de producción:	300	días/año
Diámetro D de los distribuidores 6:	2	m
Altura H de los distribuidores 6:	6	m
Superficie emisora de los distribuidores:	40,86	m ²
Valor de la fracción épsilon:	0,7495	
Distancia d entre distribuidores (en los ejes X)	2,2	m
Número de distribuidores/ha (ecuación 2)	2386	
Número de m ² superficiales por hectárea:	97 490	m ² /ha
Volumen de agua de algas:	16 539	m ³ /ha
Equivalencia de profundidad de las "pistas de carrera":	17	cm
Producción superficial en el distribuidor:	60	g/m ² /día
Producción volumétrica de biomasa:	0,354	g/l/día
% de terreno no ocupado (camino, etc.):	15 %	por ha
Producción de biomasa por hectárea:	1492	T/ha/año
% de lípidos en la biomasa:	30 %	
Producción anual de biocarburante por ha:	508 000	l/ha/año

25 En un modo de realización alternativo, el diámetro de la primera pared 7 puede ser diferente del diámetro de la segunda pared 8.

30 En otra realización alternativa de la invención, la primera pared 7 recibe la luz y es de plástico rígido de tipo policarbonato, y la segunda pared 8 es de tipo membrana flexible. La interfaz entre las dos paredes 7, 8 es estanca. Asimismo, las dos paredes pueden estar separadas para el almacenamiento y/o el mantenimiento.

35 Por otro lado, según otro modo de realización, dicho depósito 6 está provisto en su extremo proximal de un anillo de elevación o cualquier otro medio técnicamente equivalente apto para extraer dicho depósito (preferentemente en su forma deshinchada) de dicha cámara 3.

40 Adicionalmente, dicho depósito 6 está provisto en su extremo proximal de medios 11 independientes de alimentación y de descarga, adecuados para suministrar y extraer uno o más fluidos de la cavidad estanca delimitada por las paredes 7, 8, tal como muestra la figura 3. Estos medios pueden ser insertos adheridos a la pared 7 del depósito 6. Estos insertos comprenden una rosca interior para permitir la conexión a los circuitos y pueden tener tamaños

diferentes según el tipo de fluido que se va a hacer circular.

En un modo de realización preferente, dichos fluidos introducidos en la cavidad estanca son el agua y el aire, adecuados para controlar la inmersión del dicho al menos un distribuidor de luz 6 en el agua de algas. El agua
5 contenida en la cavidad estanca es la más clara posible y está filtrada para una buena transmisión de luz en superficie y en profundidad.

En otro modo de realización, dicho al menos un distribuidor de luz 6 posee dos cavidades estancas separadas por una membrana transparente, una para el aire en la parte proximal, una para el agua para la inmersión en la parte
10 distal.

Asimismo, a fin de mantener sumergido dicho al menos un distribuidor de luz 6 según un plano paralelo al eje X, como una "boya de pesca", dicho al menos un distribuidor de luz 6 está provisto en su extremo distal de una masa
15 10. Dicha masa 10 puede ser de metal, de cemento o una cápsula de plástico moldeado rellena de arena. La forma de la masa es preferentemente plana, a fin de que ocupe el mínimo volumen espacial según el eje ortogonal X.

De acuerdo con modos de realización alternativos, dicha masa 10 puede: estar atornillada en un inserto, colgar a lo largo de una cinta situada en el extremo distal del dicho al menos un depósito 6 o, preferentemente, encontrarse en el extremo de una guía 9 que atraviesa de un lado a otro dicho depósito 6 o cualquier otro medio técnicamente
20 equivalente.

En un modo de realización preferente, dichos medios 11 independientes de alimentación y de descarga están constituidos por un medio de alimentación de agua 11a, un medio de evacuación (o de descarga) de agua 11b, un medio de alimentación de aire 11c y un medio de escape de aire 11d, pudiendo estar constituidos estos medios 11
25 por compuertas, válvulas o cualquier otro medio conocido por el experto en la técnica. Las figuras 6 y 7 ilustran esta configuración. Así, tal configuración hace posible aislar un distribuidor 6 específico del circuito de alimentación y de descarga durante una fase de mantenimiento sin comprometer los otros distribuidores de luz 6 de dicho dispositivo de producción 1.

Adicionalmente, tal como se ilustra en las figuras 2 a 7, dicho medio de alimentación de agua 11a está provisto de un tubo denominado largo 13 que se extiende esencialmente a lo largo del eje longitudinal X y desemboca en el fondo de dicho depósito; dicho medio de evacuación (o de descarga) de agua 11b está provisto de un tubo denominado corto 14 que desemboca por debajo del plano formado por la interfaz entre el agua y el aire, por
30 ejemplo a 10 o 20 cm de dicho plano; dicho medio de escape de aire 11d está provisto de un tubo de evacuación de aire 15 que desemboca sobre el plano formado por la interfaz entre el agua y el aire. Este tubo de evacuación de aire 15 es adecuado para establecer la profundidad de inmersión del depósito 6 en el agua de algas controlando el volumen de aire en el depósito 6. Preferentemente, dichos tubos corto 14 y largo 13 y dicho tubo de evacuación de
35 aire 15 están unidos a dicha guía 12; asimismo, dicho medio de alimentación de aire 11c y dicho medio de escape de aire 11d pueden estar superpuestos tal como muestran las figuras 2, 4 y 6.

Los medios de alimentación y de evacuación de aire, 11c y 11d, son medios físicos simples para absorber la dilatación o la contracción del aire en el interior de la cavidad estanca en la parte proximal del distribuidor de luz 6, independientemente de la fluctuación de la temperatura meteorológica diaria. Así, el volumen de aire en la parte proximal sigue siendo constante, asegurando la buena inmersión de dicho depósito 6 en el agua de algas.
40

Por otro lado, el tubo largo 13 de alimentación se puede utilizar igualmente para vaciar el depósito 6. En ese caso, estará perforado preferentemente de forma regular sobre toda su longitud para vaciar mejor dicho depósito 6 y de este modo evitar una colmatación demasiado rápida entre las paredes de dicho depósito y el tubo 13. Otra solución es que dicho tubo 13 esté provisto de un filtro de succión en su extremo.
45

Opcionalmente, el tubo de evacuación del aire puede tener longitudes diferentes a fin de obtener un desplazamiento en altura entre, por ejemplo, dos filas de depósitos 6 en el fotobiorreactor 2. Esto puede ser particularmente interesante para crear una ligera pendiente del medio de cubrimiento 5 y facilitar así la evacuación de las aguas de lluvia. Así, el medio de cubrimiento puede estar, por ejemplo, más alejado de la parte distal en la mitad del
50 fotobiorreactor que de los lados. El desnivel podrá ser ligero, preferentemente inferior al 2 %.

Opcionalmente, un nivel para medir la altura del agua contenida en la cavidad estanca del distribuidor de luz 6 está conectado a una caja electrónica externa de gestión (no representada). Este nivel puede ser una sonda fijada o insertada sobre la guía 12 o bien sobre el tubo largo 13.
55

Las conexiones de dichos medios 11 de alimentación y de descarga sobre el medio de evacuación 4 interactúan con el medio de gestión mediante una rampa 10 que une varios distribuidores de luz 6, por ejemplo cuatro depósitos. Después, en el borde de la cámara, la rampa está conectada al medio de gestión conectando, por ejemplo, una instalación de bombeo y de filtración del agua y del aire de los depósitos. Para una cámara de grandes dimensiones, cada fila de depósitos se alimenta, por ejemplo, con varias rampas conectadas extremo con extremo mediante tubos flexibles entre sí. Así, para facilitar el mantenimiento de manera localizada, se sitúan válvulas 20 en los extremos de
60

las filas de depósitos, y accesibles desde el borde de la cámara, a fin de aislar la fila en cuestión del resto del circuito.

5 Opcionalmente, tal como se ilustra en la figura 4, dicho al menos un distribuidor de luz 6 puede estar provisto al menos de un medio 19 de mantenimiento adicional que permite hacer rígidas sus paredes (mantener el aspecto tubular del distribuidor de luz 6) y evitar un efecto abombado sobre la segunda pared. Estos medios 19 pueden ser flejes espaciados sobre la altura del distribuidor de luz 6 o un exceso de espesor localizado de la segunda pared.

10 Tal como se ilustra en la figura 7, dicho fotobiorreactor comprende al menos un medio de burbujeo 9 de un gas, preferentemente aire, en particular con aporte adicional de CO₂ (opcionalmente con un aporte de nutrientes), dispuesto al menos sobre una parte del fondo de la cámara 3 del fotobiorreactor 2, a fin de permitir una agitación permanente de dicho líquido acuoso que comprende dicho cultivo fotosintético y de evacuar el oxígeno producido por la fotosíntesis fuera del agua de algas, permitiendo de este modo evitar el riesgo de una gran sobresaturación de oxígeno y, por tanto, de una inhibición del crecimiento de las microalgas. Para efectuar esto, la velocidad de ascensión de las burbujas podrá estar comprendida preferentemente entre 0,3 y 0,35 m/s.

Asimismo preferentemente, dicho al menos un medio de burbujeo 9 no está situado en la verticalidad del dicho al menos un distribuidor de luz 6; está situado, por ejemplo, entre dos distribuidores de luz 6.

20 Por otro lado, el aumento del número de medios de burbujeo 9 por m² tiene como ventaja el evitar los fenómenos de "flujos espirales" (*spiral-flows*). Este fenómeno de corriente ascendente del agua de algas, creado por ascensión de las burbujas que acelera la velocidad de paso de estas y afecta al intercambio gaseoso. La aproximación de los medios de burbujeo 9 entre sí anula el riesgo de "flujos espirales".

25 El aire difundido en el agua de algas puede contener una concentración de CO₂ mayor que la del aire atmosférico (400 ppm) a fin de reducir la necesidad de aireación y el coste de la misma. Por ejemplo, una proporción de CO₂ en el aire aportado a 1000 ppm sería suficiente para reducir aproximadamente a la mitad las necesidades y los costes de aireación, sin afectar a la buena evacuación del oxígeno. La proximidad del dispositivo de producción 1 con una fábrica que emite CO₂, o bien el aporte de CO₂ desde digestores de biomasa integrados con el dispositivo de producción serían una elección adecuada para optimizar los costes de producción.

30 El medio de burbujeo 9 puede comprender difusores de membrana de EPDM que permiten una buena aireación en burbujas finas. Este se presenta en forma de discos fijados a la red de suministro de aire. Los difusores de aire convencionales utilizados para la aireación de estanques de plantas de depuración pueden ser adecuados siempre que se adapten a la presión de columna de agua de dicho fotobiorreactor.

Asimismo, en un modo de realización alternativo, se puede utilizar un medio de agitación mecánica además de dicho medio de burbujeo 9, por ejemplo con hélices.

40 Opcionalmente, se pueden situar una o varias lámparas LED en el interior de la cavidad estanca del distribuidor de luz 6, por ejemplo a lo largo de la guía 12 y conectarlas eléctricamente. Tales lámparas LED permiten aumentar la producción fotosintética diaria de microalgas. Las lámparas LED preferentemente se sumergen en el agua del depósito 6 para una mejor difusión de la luz. Podrán tener una potencia de varios vatios y emitir preferentemente en el intervalo de las longitudes de onda de absorción de la clorofila durante la fotosíntesis (400 nm-700 nm). Esta iluminación podrá completar la iluminación natural los días de baja insolación y/o funcionar durante la noche, teniendo en cuenta que se podrá interrumpir según secuencias relativas a los ciclos biológicos de las microalgas.

50 Tal como se ilustra en las figuras 3 a 5, el medio de cubrimiento 5 de dicho extremo proximal de la cámara 3 del fotobiorreactor 2 está provisto al menos de una abertura 16 adecuada para recibir en su interior y mantener dicho al menos un distribuidor de luz 6 en una posición fija en dicha cámara del fotobiorreactor 2. Así, cuando sea necesario, se puede sustituir un distribuidor de luz 6 sin tener que tocar dicho medio de cubrimiento ni los otros distribuidores de luz 6.

55 Tal como se muestra en la figura 6 que representa un modo de realización alternativo, el mantenimiento de dicho al menos un distribuidor de luz 6 en dicha al menos una abertura 16 se efectúa mediante cooperación de formas mecánicas entre un relieve de superficie 17 del dicho al menos un distribuidor de luz 6 y un borde 18 de dicha abertura 16.

60 Dicho relieve de superficie 17 puede ser un relieve negativo en la pared de dicho al menos un distribuidor de luz 6 tal como una ranura o hendidura en la que se alojará dicho borde 18, o una serie de relieves positivos tal como un rail o un engrosamiento que enmarcan dicho borde 18, tal como muestra la figura 6.

65 En un modo de realización alternativo, dicho relieve de superficie 17 puede ser una vaina intermedia soldada entre las paredes 7 y 8. Se pueden insertar una o varias tiras flexibles o perfiles semirrígidos en la vaina a fin de formar el engrosamiento o un anillo pretensado listo para ser alojado en dicha abertura 16.

Asimismo, el relieve de superficie 17 puede ser una vaina hinchable independientemente de la cavidad estanca del distribuidor de luz 6.

5 De forma interesante, dichos fluidos en el interior del dicho al menos un depósito 6 crean una sobrepresión, que deforma las paredes del dicho al menos un distribuidor de luz. Esto permite crear una cooperación estanca entre la pared del dicho al menos un distribuidor de luz 6 y el borde 18 de la abertura 16 del medio de cubrimiento o lona 5.

10 En otro modo de realización alternativo, dicho al menos un distribuidor de luz 6 posee un diámetro ligeramente superior al de dicha al menos una abertura 16; así cuando dicho al menos un distribuidor de luz se hincha este es bloqueado por la abertura 16 durante dicha cooperación de forma.

15 Bajo la lona 5, la evacuación del aire saturado con agua (u opcionalmente con etanol) y oxígeno, se efectúa mediante medios de evacuación 4 tales como los tubos situados a lo largo de dicha cámara 3 sin presión excesiva, para evitar las fugas. Estos gases opcionalmente se transfieren hacia una instalación para recuperar el agua, las calorías y el oxígeno de los mismos.

20 Así, el agua evaporada puede fluir a través de un condensador permitiendo reducir drásticamente el aporte de agua durante el funcionamiento del fotobiorreactor. Un equipo adaptado puede condensar más del 90 % del agua evaporada y reciclarla de este modo al agua de algas de la cámara 3. Este método de configuración se puede asociar además a un intercambiador de calor de aire / aire o agua / agua, o una bomba de calor dado que el aire que sale de la cámara 3, más caliente y saturado, puede calentar fácilmente el agua que alimenta los depósitos 6 o el aire cargado con CO₂ difundido en el agua de algas.

25 De acuerdo con un modo de realización alternativo, los medios de evacuación 4 pueden estar conectados directamente sobre la lona 5.

30 De acuerdo con la invención, sobre las paredes de la cámara 3 del fotobiorreactor se sitúan medios de alimentación/evacuación 4 tales como bocas de descarga de agua de algas filtrada, en particular hacia el extremo proximal bajo el plano del agua de algas para permitir un llenado sin turbulencia de la cámara con respecto a dicho al menos un distribuidor de luz 6. Asimismo, el vaciado del agua de algas se puede llevar a cabo mediante una red de evacuación que cuadrícula el fondo de dicha cámara 3, por ejemplo, debajo de cada distribuidor de luz 6. Igualmente, el agua de algas puede llegar a un estanque de almacenamiento o una planta de tratamiento y de filtración, centrifugación y transformación de la biomasa, a través de colectores apropiados.

35 Todos los colectores de alimentación y de retorno para el agua de algas, el agua y el aire de los distribuidores de luz y el aire que sirve para el burbujeo, pueden bordear varios fotobiorreactores, se pueden fijar en altura a lo largo de las paredes exteriores de la cámara 3, insertar entre dos paredes murales que separan dos fotobiorreactores o, incluso, formar parte de un conjunto estructurado que separa dos fotobiorreactores.

40 Asimismo, la cámara del fotobiorreactor está equipada con sondas (nivel, temperatura, composición, pH, salinidad, turbidez, O₂, CO₂, etc.), contadores y automatismos de control integrados en un sistema de gestión.

45 En un modo particular de la invención, los nutrientes que sirven para el desarrollo del medio de cultivo se inyectan en el agua de algas después de la filtración, es decir, en un circuito que retorna a la cámara 3.

50 A fin de obtener una instalación de tamaño industrial, dicho dispositivo de producción 1 comprende una pluralidad de fotobiorreactores 2 cuyas cámaras 3 se instalan unas al lado de las otras tal como ilustra la figura 8. En ese caso, los medios de alimentación, extracción, descarga, evacuación así como los medios de control y de gestión y los medios de almacenamiento, pueden ser compartidos entre los diferentes fotobiorreactores o grupos de fotobiorreactores.

55 De forma interesante, el medio de cubrimiento 5 y la pared 7 de los distribuidores de luz 6 permiten obtener un efecto invernadero entre estos y el plano del agua de algas. El principio del invernadero es un medio sencillo para captar la energía solar en exceso no utilizada por la fotosíntesis de las microalgas. Recuperada en forma de calor, contribuye a la elevación general de la temperatura del medio de cultivo.

60 La oportunidad de usar un fotobiorreactor de varios metros de profundidad con un gran volumen de agua presenta diversas ventajas. En primer lugar, la estabilidad de la temperatura del medio de cultivo. Las microalgas son muy sensibles a las variaciones de temperatura. El estudio americano de James & Boriah (2010) muestra que a una profundidad de 60 cm, la producción de biomasa es dos veces mayor que a 10 cm de profundidad, incluso con una luminosidad menor, debido a la mejor estabilidad de la temperatura. La inercia generada por el volumen de agua, por tanto, es muy importante para contrarrestar las oscilaciones de las temperaturas atmosféricas diarias.

65 Por otro lado, el volumen de agua contenido en la cámara 3 permite disipar el calor captado por este efecto invernadero en la parte proximal, evitando de este modo los excesos de temperaturas debidos a la gran insolación en la superficie. La altura de la columna de agua se usa en cierta forma como un acumulador de calorías. Así, la energía luminosa proporcionada por m² por el sol es aún más aprovechada por el fotobiorreactor, mejorando su

rendimiento al prolongar la temporada de recogida. En efecto, esta acumulación de calor no se pierde y sirve para el desarrollo de las microalgas los días de mal tiempo. Se puede hacer una analogía con un cultivo hortícola en invernadero y un cultivo en campo abierto: el cultivo en invernadero permite una producción casi permanente mientras que solo es de unos meses en pleno campo. Otra analogía posible, la temperatura del agua de una piscina bajo una cubierta de plexiglás sigue siendo más elevada y durante más tiempo en la temporada que en una piscina no cubierta.

Asimismo, la profundidad de la cámara 3 se adaptará en función de la localización geográfica del fotobiorreactor, variando la cantidad de energía solar en función de la latitud terrestre. Por ejemplo, un estanque poco profundo a nivel del ecuador tendrá una temperatura del agua de algas muy elevada para el crecimiento fotosintético, ya que la disipación del calor será demasiado baja.

Por otro lado, el medio de cubrimiento 5 y la pared 7 de los distribuidores de luz 6 tienen una función de aislamiento frente a la intemperie, mediante la capa de aire que los separa del plano de agua. Así, la temperatura del medio de cultivo en la parte proximal se verá menos influida por las condiciones meteorológicas diarias (vientos fríos, vientos cálidos, fuertes lluvias, etc.).

La agitación del agua de algas mediante la aireación de burbujas finas permite la homogeneización de la temperatura sobre toda la altura de la columna de agua. Asimismo, la circulación del agua en el interior de la cavidad estanca de los distribuidores de luz 6 es importante para homogeneizar la temperatura de arriba a abajo en la cámara 3. La circulación lenta y continua del agua superficial calentada por el sol hacia la parte distal del distribuidor de luz se efectúa mediante los medios 11 independientes de alimentación y de descarga.

Igualmente, la temperatura del agua de la cavidad estanca se puede regular mediante aporte o retirada de calorías exteriores, por ejemplo, con un intercambiador de calor o cualquier otro medio de calentamiento o de refrigeración. Así, como un "baño maría" invertido, la temperatura regulada de cada distribuidor de luz se disipa y regula a su vez la temperatura del agua de algas de la cámara 3.

Implementación de un dispositivo de acuerdo con la invención

Un método de implementación consiste en deslizar la lona 5 por encima de la cámara 3 llena de agua, insertando los depósitos 6 progresivamente desde el borde la cámara 3. La lona 5 se tensa y se mantiene sobre la superficie del agua. Se sitúan depósitos 6 en una primera línea de aberturas 16 de la lona 5 y se conectan entre sí. Se inyecta aire para permitir su flotación en el agua de la cámara 3. Y así para las otras filas, haciendo avanzar al mismo tiempo la lona 5 a fin de cubrir finalmente la cámara 3. La conexión entre la lona 5 y la cámara 3 se hace estanca. Se añade agua a los depósitos 6 hasta obtener la presurización. Aunque ya existe estanqueidad a partir de este momento entre dicho depósito 6 y la abertura 16, el borde 18 de la misma no se encaja en el relieve de la superficie 17 de dicho depósito 6. Para ello, se inyecta aire bajo la lona 5 mientras que la relación aire/agua en los depósitos 6 disminuye. La presión bajo la lona 5 hace subir el borde 18 de la abertura 16 a lo largo de la pared 7 de dicho depósito 6 hasta que encaja en el relieve 17.

De acuerdo con otro método de uso, la lona 5 se puede instalar por encima de la cámara 3 previamente llenada con agua, por medio de una grúa o un pórtico móvil. Dichos depósitos 6 se sitúan a través de las aberturas 16 por medio de una grúa o una pasarela motorizada especialmente desarrollada para esta tarea. Dichos depósitos 6 se despliegan, se conectan y se llenan con agua y aire con una relación aire/agua baja. La membrana de dicho depósito 6 se tensa entonces por la presurización. La relación aire/agua en dichos depósitos 6 aumenta de modo que estos levantan la lona 5. El conjunto hace que la lona 5 se mantenga suspendida por dichos depósitos 6. El encaje entre el borde 18 de la abertura 16 y el relieve de la superficie 17 de dicho depósito 6 se puede efectuar mediante una fuerza ejercida hacia abajo sobre la lona 5 por medio de un equipo adaptado para tal fin. La altura de flotación de cada depósito 6 se puede regular insuflando aire hasta que este sea descargado por un tubo 15 previsto para este efecto. El nivel del agua de algas y el de los depósitos 6 se pueden ajustar de tal forma que se obtenga una altura de la lona 5 ligeramente superior al borde del muro de la cámara 3, a fin de facilitar el flujo de las aguas de lluvia hacia la periferia del fotobiorreactor.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de producción (1) de un cultivo fotosintético que comprende al menos un fotobiorreactor (2) que forma una cámara (3) provista de medios de alimentación/evacuación (4) y que comprende:

- un líquido acuoso que comprende un cultivo fotosintético,
- al menos un medio (4) de alimentación y de evacuación de fluidos de dicha cámara que interactúa con un sistema de gestión,
- al menos un distribuidor de luz (6) que comprende:

- al menos una primera pared (7) dispuesta para recibir luz en un extremo proximal,
- al menos una segunda pared (8) dispuesta para emitir al menos una parte de la luz recibida,
- una cavidad estanca delimitada por dichas al menos una primera (7) y una segunda pared (8),
- al menos una parte de la pared emisora (8) está sumergida en el líquido acuoso que comprende el cultivo fotosintético,
- al menos un fluido que llena al menos en parte dicha cavidad estanca,

- un medio de cubrimiento (5) de dicho fotobiorreactor (2) apto para limitar la evaporación de dicho líquido acuoso,

en el que dicho medio de cubrimiento (5) está provisto al menos de una abertura (16) adecuada para mantener dicho al menos un distribuidor de luz (6) en una posición fija en dicha cámara (3) del fotobiorreactor (2), caracterizado por que dicho al menos un distribuidor de luz está flotando y permite mantener el medio de cubrimiento por encima del plano del agua de algas.

2. Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que dicho al menos un distribuidor de luz permite mantener el medio de cubrimiento por encima del plano del agua de algas a una distancia comprendida entre 10 y 50 cm.

3. Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, caracterizado por que se lleva a cabo una cooperación de forma entre al menos un borde (18) de dicha abertura de dicho medio de cubrimiento (5) y un relieve de superficie (17) de dicho al menos un distribuidor de luz (6), a fin de mantener dicho al menos un distribuidor de luz (6) en una posición fija en dicha cámara (3) del fotobiorreactor (2).

4. Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que dicha pared (7) de recepción de luz del dicho al menos un distribuidor de luz está dispuesta en el exterior del volumen definido por dicha cámara (3) del fotobiorreactor (2).

5. Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que el número ($nb_{distribuidor}$) y la altura sumergida ($H_{distribuidor}$) del dicho al menos un distribuidor de luz (6) y el espacio (d) entre los diferentes distribuidores de luz (6) se determinan a partir de las fórmulas siguientes:

$$nb_{distribuidor} = \frac{4 \cdot \xi \cdot S_{cámara}}{\pi \cdot D^2} \quad (1)$$

ξ : fracción volumétrica ocupada por los distribuidores de luz (6) con respecto al volumen total de agua en la cámara (3).

D : diámetro del distribuidor de luz 6 (en m).

$S_{cámara}$: superficie de una cámara (3) de sección transversal circular o rectangular (en m²).

$$H_{distribuidor} = \frac{D}{4 \cdot q_2} (n \cdot q_{solar} - q_2) \quad (2)$$

$H_{distribuidor}$: altura de la segunda pared (8) del distribuidor de luz (parte sumergida) (en m).

q_{solar} : flujo incidente de una día de insolación (en μ moles de fotones/m².s⁻¹).

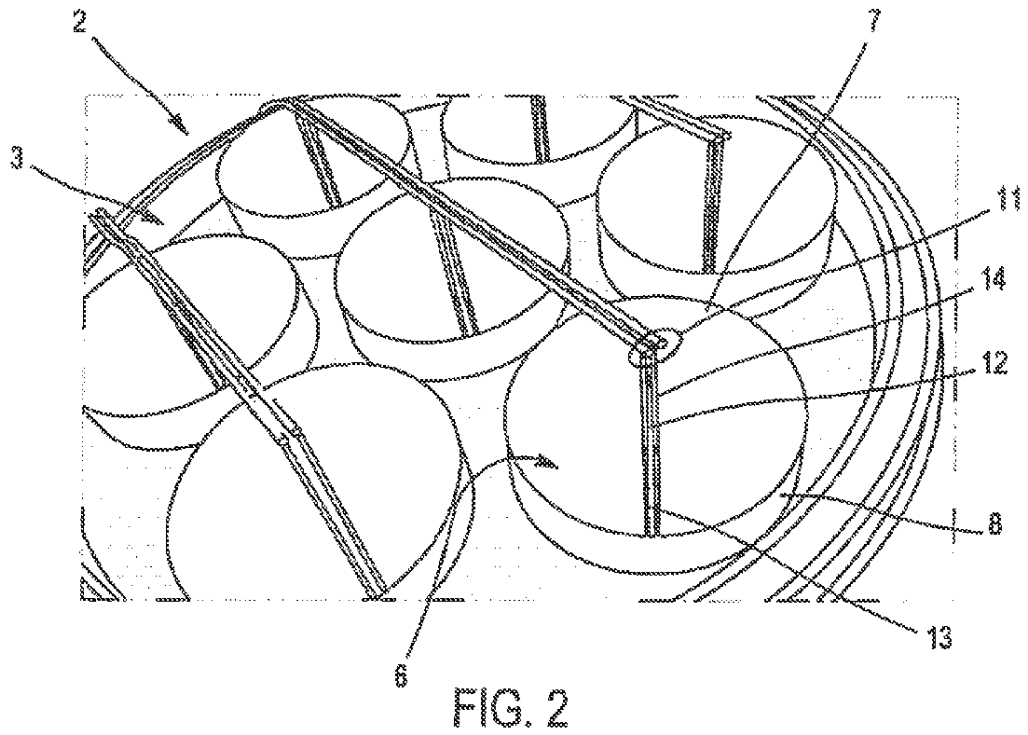
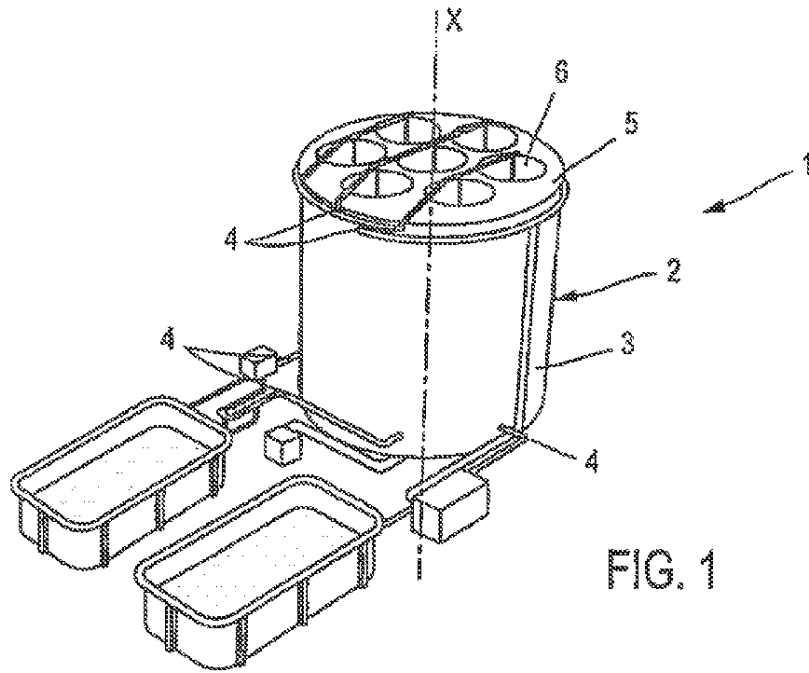
q_2 : flujo luminoso deseado en la pared emisora de luz del distribuidor de luz para la buena producción de una cepa de microalgas dada (en μ mol/m².s⁻¹).

η : rendimiento de transmisión entre la primera pared (7) receptora de luz y la segunda pared (8) emisora del distribuidor de luz

$$d = \sqrt{\frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \xi \cdot \cos 30}} \quad (3)$$

d: distancia entre los ejes longitudinales X de 2 distribuidores de luz (6) (en m).

- 5 6. Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que dicho al menos un distribuidor de luz (6) está provisto de medios (11, 11a, 11b, 11c, 11d) de alimentación y de extracción de fluido.
- 10 7. Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado por que el fluido que llena al menos en parte dicha cavidad estanca está compuesto por agua y aire, adecuado para presurizar el volumen interno de dicho al menos un distribuidor de luz (6) a fin de hacer estanca la cooperación de forma entre el borde (18) de dicha abertura (16) y dicho relieve de superficie (17) del dicho al menos un distribuidor de luz (6).
- 15 8. Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que dicho al menos un distribuidor de luz (6) está provisto de un medio de anclaje (10) dispuesto en un extremo distal.
- 20 9. Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que dichas paredes (7, 8) de dicho al menos un distribuidor de luz están formadas por al menos una membrana flexible de polímero.
- 25 10. Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético de acuerdo con la reivindicación anterior, caracterizado por que dicha membrana flexible ha recibido o comprende durante su fabricación al menos un tratamiento de superficie interior y/o exterior entre los siguientes: antigoteo, antipolvo, filtro UV y/o infrarrojo, estabilizantes UV, efecto difusor, hidrófobo, antipolvo, antialgas.
- 30 11. Dispositivo de producción de un cultivo fotosintético de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado por que dicho fotobiorreactor (2) comprende al menos un medio de burbujeo (9) con aporte de CO₂, dispuesto al menos sobre una parte del fondo de la cámara (3) del fotobiorreactor (2), a fin de permitir una agitación permanente de dicho líquido acuoso que comprende dicho cultivo fotosintético.



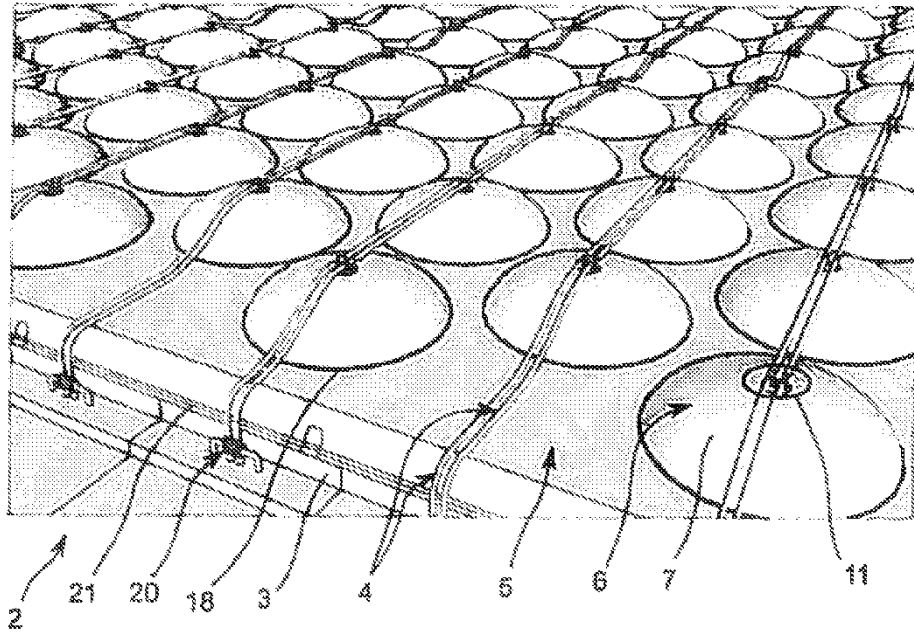


FIG. 3

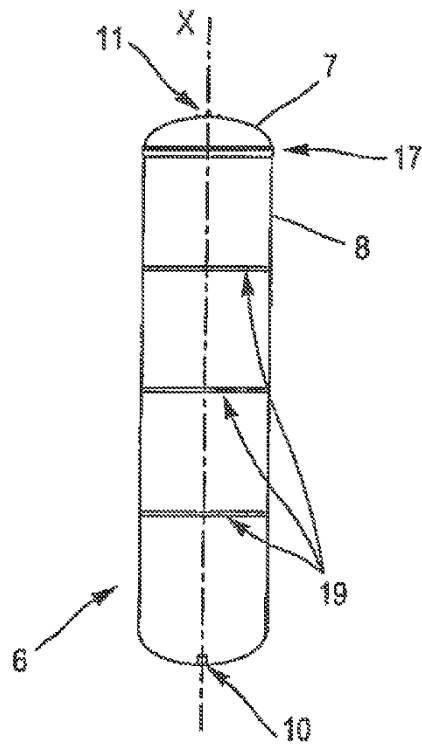


FIG. 4

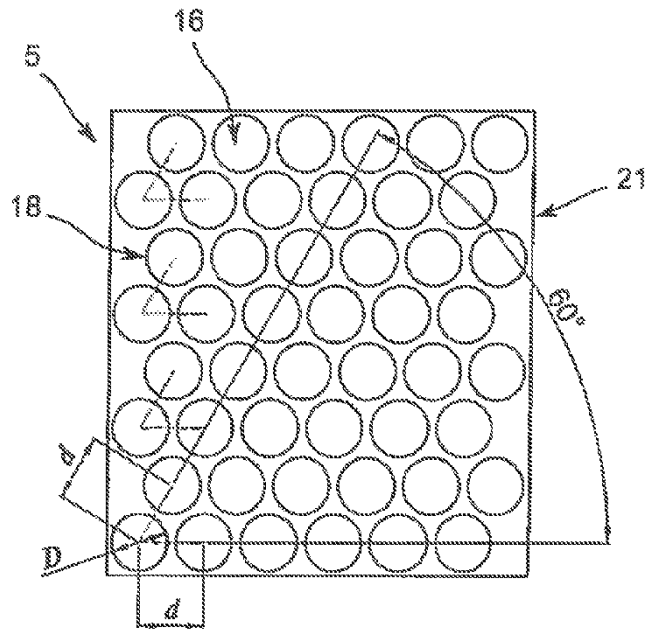


FIG. 5

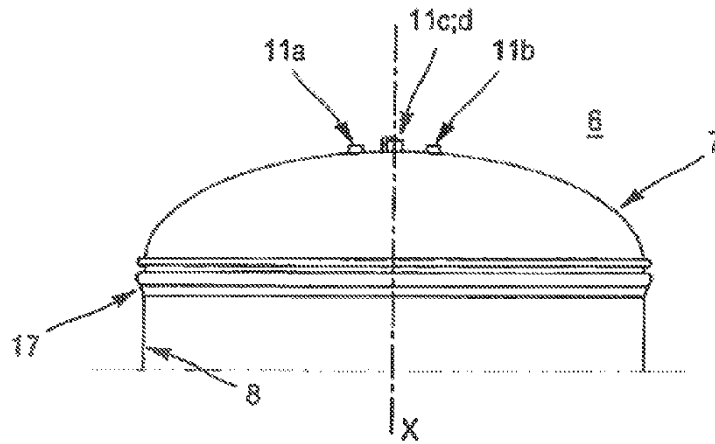


FIG. 6

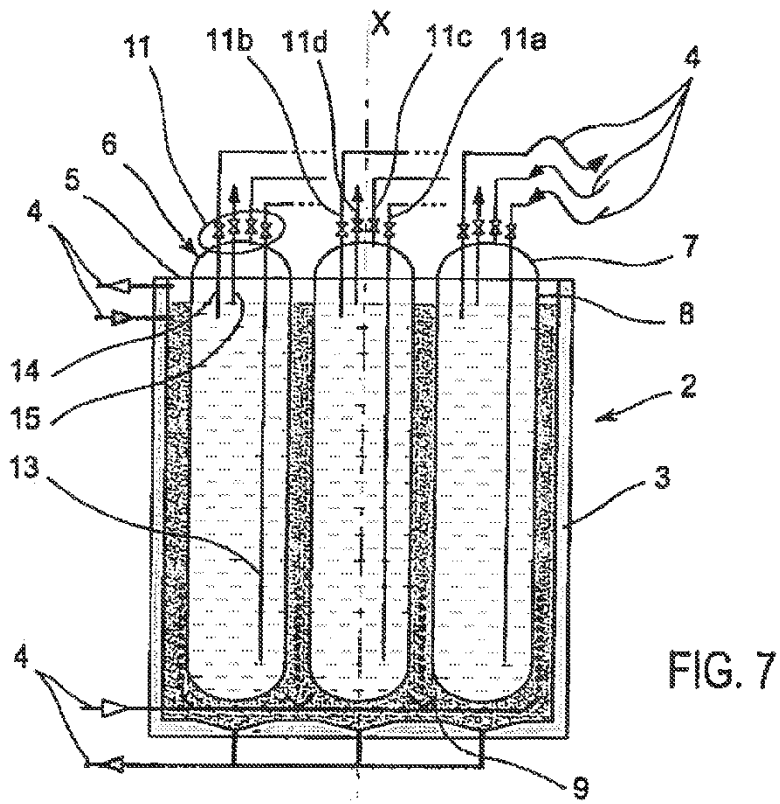


FIG. 7

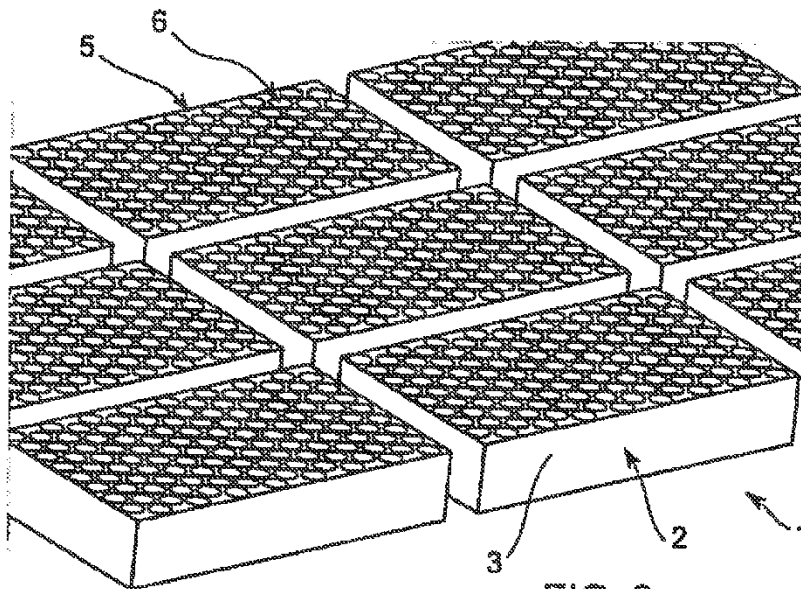


FIG. 8