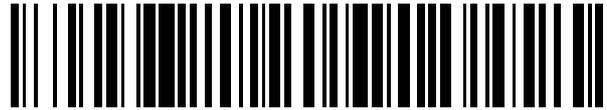


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 645 251**

51 Int. Cl.:

C12M 1/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **06.06.2011 PCT/IB2011/052457**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.12.2011 WO11154886**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.06.2011 E 11730446 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.08.2017 EP 2576758**

54 Título: **Fotobiorreactor de flujo continuo o discontinuo y procedimiento de uso**

30 Prioridad:

07.06.2010 CH 903102010

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

04.12.2017

73 Titular/es:

**ROUX DIT BUISSON, JEAN-LOUIS (100.0%)
Im Leisibuehl 5
8044 Gockhausen, CH**

72 Inventor/es:

ROUX DIT BUISSON, JEAN-LOUIS

74 Agente/Representante:

LÓPEZ CAMBA, María Emilia

ES 2 645 251 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 de flujo continuo o discontinuo y procedimiento de uso

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un fotobiorreactor para el cultivo de biomasa, especialmente para la fotosíntesis de biomasa de algas.

10 Antecedentes de la invención

En los últimos diez años ha emergido en todo el mundo la preocupación por el aumento en los niveles globales de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera. Los países y los gobiernos intentan continuamente poner en marcha marcos reguladores dirigidos a estimular esfuerzos para reducir las emisiones globales de CO₂ y/o gases de invernadero equivalentes. Para abordar este problema recientemente se ha explorado el secuestro biológico del carbono, aunque la fotosíntesis es una forma natural de reciclar el carbono. Además, el agotamiento mundial de los depósitos de combustibles fósiles ha impulsado la investigación de alternativas a los productos procesados actualmente a partir del petróleo. En algunas aplicaciones en las que se necesitan cantidades elevadas de combustibles a gran distancia de las fuentes de suministro (por ejemplo, bases militares avanzadas o experiencias en campos de exploración remotos), los costes asociados con los combustibles convencionales son elevados, debido principalmente a los gastos en que se incurre por el suministro de combustible y a la contaminación asociada debida a los medios de transporte. Por tanto, para reducir estos costes se han investigado alternativas para producir combustibles en el punto de uso, en lugar de tener que transportarlos hasta el lugar deseado. En este esfuerzo se ha identificado a los biocombustibles, como el biodiésel, como una posible alternativa para sustituir el consumo de combustibles fósiles sin aumentar el contenido de CO₂ de la atmósfera. Sin embargo, el proceso implicado en la creación de biocombustible a partir de la biomasa es caro en relación con el proceso de extracción y refinado del petróleo.

Diversas estrategias se centran en procedimientos para aumentar la captación de dióxido de carbono en sistemas biológicos como plantas verdes a través de la luz solar y la captación de CO₂ mientras la investigación conseguía optimizar los rendimientos de producción, la diversificación y valoración de los productos de biomasa resultantes de la fotosíntesis. Sin embargo, el desarrollo industrial de estas estrategias se ha visto obstaculizado por numerosas dificultades a la hora de transponer los procedimientos experimentales en soluciones ampliables de escala y/o rentables económicamente. En particular, el control de los principales parámetros que afectan a la velocidad de la fotosíntesis, por ejemplo, una temperatura, intensidad y longitud de onda de la luz favorables, y la disponibilidad de nutrientes como dióxido de carbono se ha demostrado delicado en aplicaciones en sistemas cerrados (por ejemplo, fotobiorreactores), mientras que los estanques abiertos para el crecimiento de biomasa adolecen de riesgos de contaminación y muestran altos costes operativos.

Entre los microorganismos fototróficos, las microalgas figuran entre los organismos más eficientes para convertir la energía solar usando dióxido de carbono como nutriente de crecimiento y constituyen un eficiente productor de oxígeno y biomasa. Componentes valiosos como los hidratos de carbono, los azúcares, las proteínas y las grasas pueden recogerse de la biomasa y convertirse directa o indirectamente en productos de alto valor añadido como productos farmacéuticos, nutracéuticos, productos de cosmética, productos alimentarios, sustancias químicas finas sintetizadas normalmente en plantas químicas o suministros de energía como metano o, de forma más interesante, biodiesel y otros combustibles usados en turbinas y/o motores de ciclo térmico para generar movimiento, esencialmente en el transporte.

Se sabe que la productividad de las microalgas está limitada por tres factores principales: disponibilidad de luz y nutrientes, y temperatura. Históricamente, la mayoría de los esfuerzos se han invertido en desarrollar los nutrientes óptimos para microalgas específicas, especialmente por saturación del sistema de fotosíntesis con CO₂. Las plantas de cultivo de microalgas con base terrestre (por ejemplo, estanques), a la vez que muestran cierta eficacia en la captura de CO₂, están limitadas por el espacio de tierra disponible, los suministros de agua (debido principalmente a la evaporación), la contaminación externa (por ejemplo, otras especies, deyecciones de aves), la productividad (no funcionan de noche) y los costes asociados con el procesamiento de inmensas cantidades de agua. Las condiciones óptimas de temperatura para una producción eficiente de biomasa suelen seleccionarse de acuerdo con las condiciones climáticas que prevalecen en un lugar dado. Aun así, en dichos lugares, las temperaturas invernales y nocturnas, así como las de primera hora de la mañana, plantean serias limitaciones a las tasas de crecimiento.

Además, la exposición UV del cultivo de microalgas en plantas de producción en exterior produce la oxidación de las microalgas en la superficie del agua. Los intentos por resolver estos problemas condujeron a la creación de estanques o canales superficiales. Sin embargo, estos enfoques de aguas superficiales generan una alta evaporación y depósitos salinos, lo que también reduce la eficacia del crecimiento continuo en el exterior. En conjunto, el tiempo meteorológico, los ciclos diurnos, la invasión por especies oportunistas y las contaminaciones externas agravan aún más las dificultades del cultivo en masa de masa en lugares al aire libre.

Los fotobiorreactores (FBR) para cultivo de biomasa de fotosíntesis proporcionan una infraestructura compacta diseñada para abordar los problemas anteriores. El aumento de escala de los fotobiorreactores para conseguir una producción viable comercialmente de productos de algas se ve obstaculizado por la limitación de la iluminación disponible, tanto en términos de suministro y distribución de luz como de gasto de energía. Por ejemplo, los procedimientos actuales de cultivo en masa de algas marinas incluyen cilindros translúcidos de fibra de vidrio, bolsas de polietileno, tanques cilíndricos y depósitos bajo iluminación artificial o iluminación natural en invernaderos. Durante el proceso de crecimiento de las microalgas los organismos se multiplican y aumenta la densidad del cultivo, y la luz termina por no poder penetrar más allá de unos centímetros de profundidad por debajo de la superficie del cultivo de algas con lo que se reduce la productividad por volumen del sistema.

La patente de EE.UU. nº 3.520.081 describe un depósito rotatorio que mejora el contacto entre las microalgas y la luz con el fin de acelerar el crecimiento de las microalgas. Si bien dichos depósitos rotatorios ofrecen algunos beneficios, la imposibilidad práctica de la escala se hace evidente cuando se abordan sistemas a muy gran escala, por ejemplo, sistemas de varios millones de litros. La patente de EE.UU. nº 6.579.714 describe un aparato de cultivo de microalgas y un procedimiento que usa un aparato de crecimiento que tiene paredes interiores y exteriores separadas que tienen forma de cúpula, cónica o cilíndrica. La luz puede pasar a través de las paredes al espacio entre las cuales se cultivan las algas. La patente de EE.UU. nº 5.958.761 describe un biorreactor tubular que incluye un receptáculo tubular que rodea a una envoltura tubular hecha de un material translúcido y que define un espacio intermedio que se llenará con un fluido de índice de refracción selectivo y la potencia de concentración de radiación en el reactor se controla modificando el índice de refracción del fluido. El documento US-2009/0.029.445 describe un reactor de crecimiento biológico que comprende un mezclador, una cámara de mezclado y una cámara de reacción que comprende una varilla de distribución de luz y dispensación de fluido. El documento US-2009/0.291.485 describe un sistema de cultivo que comprende un depósito de cultivo, una matriz de luz giratoria y un impulsor rotacional. El documento US-2010/003.405 se refiere a un aparato para el crecimiento de algas que funciona por lotes.

Sin embargo, en los FBR actuales, los costes de iluminación y los requisitos de energía han convertido en poco prácticas las soluciones anteriores para todos los casos salvo el cultivo de organismos usados en productos de alto valor como productos farmacéuticos, cosméticos, productos alimentarios y/o neutraceuticos. Por tanto, a pesar de los altos rendimientos del cultivo de microalgas obtenidos en algunos experimentos de laboratorio muy bien controlados, hasta la fecha los esfuerzos en cultivos en masa de microalgas han sido decepcionantes dado que fueron ineficaces y antieconómicos y en particular los actuales procedimientos de procesamiento de microalgas han fracasado en su intento por conseguir biocombustibles derivados de microalgas rentables económicamente.

Resumen de la invención

Un objeto de la presente invención es proporcionar un fotobiorreactor para cultivar y procesar biomasa de fotosíntesis, especialmente biomasa de microalgas, que puede hacerse funcionar en flujo continuo o semicontinuo, permite altos rendimientos de producción de biomasa (por ejemplo, por unidad de tiempo, de volumen y de área superficial de huella) y proporciona un aumento de escala eficaz de las unidades de producción.

Los objetos de la presente invención se han alcanzado proporcionando un fotobiorreactor según la reivindicación 1.

Descripción detallada

En la presente memoria descriptiva se describe un fotobiorreactor para cultivo en flujo continuo o semicontinuo de biomasa de fotosíntesis, incluyendo el fotobiorreactor un receptáculo que define una cámara interior que comprende una parte de cámara de cultivo y una parte de cámara de alimentación de gas; un sistema de regulación de temperatura; un sistema de regulación de flujo que comprende una entidad de mezcla y concentración de cultivo que comprende un dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa; y un sistema de iluminación, comprendiendo la parte de cámara de cultivo una zona de concentración de cultivo y una zona de recogida de cultivo, estando el sistema de regulación de temperatura y el sistema de regulación de flujo en la parte de cámara de cultivo, estando el sistema de iluminación dentro de la zona de concentración de cultivo y de manera que el sistema del dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa genera un flujo vertical de medio de cultivo contenido en el receptáculo de manera que la biomasa se concentra en la zona de concentración de cultivo.

Ventajosamente, el dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa permite concentrar la biomasa en la parte de cámara de cultivo en una zona de concentración de cultivo independientemente, o en contra, del efecto de la gravedad en el fotobiorreactor que tiende a inducir, durante el proceso de cultivo, que la biomasa se sedimente lentamente en el fondo de la parte de cámara de cultivo desde el fotobiorreactor.

El dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa puede configurarse para crear ventajosamente dos flujos verticales opuestos del medio de biomasa para transportar y concentrar la biomasa en la zona de concentración de cultivo situada esencialmente en una parte intermedia o central de la parte de cámara de cultivo, a la vez que permite el mezclado homogéneo de la biomasa concentrada.

El sistema de regulación del flujo permite aumentar el tiempo de residencia de la biomasa (por ejemplo, concentrando y manteniendo la biomasa) en una zona definida desde la parte de cámara de cultivo denominada zona de concentración de cultivo en la que los parámetros de cultivo (por ejemplo, temperatura, concentración de nutrientes, pH, concentración de nutrientes gaseosos, iluminación) se ajustan de manera que se obtienen velocidades y rendimientos de conversión óptimos (por ejemplo, rendimientos de crecimiento, rendimientos de producción de productos derivados de la biomasa), a la vez que se proporciona un mezclado homogéneo de la biomasa concentrada en esta zona de concentración de cultivo para evitar que aparezcan factores de limitación del cultivo como sobrecalentamiento local, radiación luminosa local excesiva, radiación de luz insuficiente, variaciones locales del pH, y aumentar el contacto superficial entre el nutriente gaseoso y la biomasa concentrada. Además, el sistema de regulación del flujo permite un mezclado suave y de baja cizalla de la biomasa concentrada en esta zona de concentración de cultivo evitando daños traumáticos en la biomasa, a la vez que induce la dispersión homogénea de gases metabólicos (por ejemplo, O₂ y H₂) expulsados en la superficie del medio de cultivo para facilitar su recogida. Normalmente, la densidad de población celular dentro de la zona de concentración de cultivo está comprendida entre aproximadamente 1 y aproximadamente 50 x 10¹⁰ células por mililitro en el caso de *Chlorella vulgaris*.

Ventajosamente, el sistema de regulación de temperatura permite controlar la temperatura en la parte de cámara de cultivo y en particular dentro de la zona de concentración de cultivo con el fin de ajustar la temperatura a un valor óptimo y obtener tasas de crecimiento y/o rendimientos de conversión óptimos.

Un fotobiorreactor según la invención puede comprender además un sistema de alimentación de gas, un dispositivo de alimentación y un sistema de recogida.

Un fotobiorreactor según la invención puede comprender además una unidad de control de retroalimentación.

Ventajosamente, la unidad de control de retroalimentación permite monitorizar de forma constante y ajustar rápidamente los parámetros de cultivo para obtener tasas de crecimiento y rendimientos de conversión óptimos. Además, el sistema de control de retroalimentación permite la rápida detección de disfunciones operativas o contaminación de cultivos. En particular, la unidad de control de retroalimentación permite accionar el fotobiorreactor según la invención en un modo continuo o semicontinuo.

Un fotobiorreactor según la invención puede comprender un sistema de iluminación que comprende un dispositivo de soporte de fuente luminosa, una unidad de control de luz y un soporte rotatorio que tiene un impulsor. Ventajosamente, dicho sistema de iluminación permite la iluminación homogénea (por ejemplo, tiempo de iluminación, intensidad) de la biomasa concentrada dentro de la zona de concentración de cultivo, a la vez que proporciona un mezclado más homogéneo.

Ventajosamente, un fotobiorreactor según la invención puede comprender un dispositivo de soporte de fuente luminosa que comprende al menos un soporte de fuente luminosa y una pluralidad de fuentes luminosas montadas en el soporte de fuente luminosa de manera que las fuentes luminosas están dispuestas esencialmente en paralelo al eje del fotobiorreactor y están distribuidas de forma sustancialmente uniforme dentro de la zona de concentración de cultivo.

Un fotobiorreactor según la invención puede comprender un sistema de alimentación de gas que comprende una plataforma de distribución de burbujas de gas que comprende una entrada de gas y un dispositivo de regulación de la presión de gas. La entrada de gas puede comprender pasos de gas y un regulador de flujo de gas.

Un fotobiorreactor según la invención puede comprender una entidad de mezcla y concentración de cultivo que comprende un dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa que comprende palas montadas en un soporte rotatorio que tiene un impulsor. Ventajosamente, las palas deben ser perfiladas y la velocidad de rotación del soporte rotatorio de dichas palas debe ajustarse para dirigir la biomasa hacia la zona de cultivo de concentración, con el fin de mantener la biomasa así concentrada en esta zona de concentración de cultivo y para proporcionar un mezclado no traumático de la biomasa. Normalmente, la velocidad de rotación del soporte rotatorio de estas palas a partir del dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa está comprendida entre aproximadamente 0,1 y más de 60 rpm dependiendo del diámetro del reactor y de la sensibilidad del tipo de organismo cultivado al esfuerzo de cizalla.

Un fotobiorreactor según la invención puede comprender una unidad de control de retroalimentación que comprende una unidad de recogida de muestras, un analizador de muestras y un dispositivo de control. El analizador de muestras puede comprender además al menos un sensor para analizar la muestra de cultivo y un sistema de adquisición por ordenador. Ventajosamente, la unidad de control de retroalimentación permite además la medida continua o semicontinua de parámetros indicativos del tamaño y/o densidad de las células de biomasa presentes en la muestra de cultivo y el ajuste instantáneo de los parámetros de cultivo para obtener tasas de crecimiento y rendimientos de conversión óptimos basándose en el valor de los parámetros medidos.

Ventajosamente, el receptáculo del fotobiorreactor permite trabajar a una presión superior a la presión atmosférica, con lo que se induce un aumento en la concentración del nutriente gaseoso en el medio de cultivo. Normalmente, el

receptáculo del fotobiorreactor es adecuado para trabajar a presiones absolutas de 1 milibares hasta 5 bares o más.

Además, en la presente memoria descriptiva se describe una planta de producción que comprende al menos un fotobiorreactor según la invención.

5 Además, en la presente memoria descriptiva se describe un procedimiento para desarrollar biomasa de fotosíntesis en un modo continuo o semicontinuo que comprende:

- 10 (i) suministro de un cultivo de fotosíntesis en un medio de cultivo acuoso en una parte de cámara de cultivo con regulación de temperatura;
- (ii) alimentación del cultivo de fotosíntesis con nutrientes;
- (iii) mezcla y concentración de dicho cultivo de fotosíntesis en una zona de concentración de cultivo desde dicha parte de cámara de cultivo;
- 15 (iv) suministro homogéneo de nutriente gaseoso al medio de cultivo de fotosíntesis;
- (v) suministro homogéneo de una exposición luminosa controlada a dicho cultivo de fotosíntesis en la zona de concentración desde el interior del medio de cultivo;
- (vi) recogida continua o semicontinua de una biomasa desde dicho cultivo de fotosíntesis.

20 Los objetos y aspectos ventajosos adicionales de la invención serán evidentes a partir de las reivindicaciones y de la siguiente descripción detallada de realizaciones de la invención con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

la **Figura 1A** es una vista en sección transversal de un fotobiorreactor según una realización de la invención;

25 la **Figura 1B** es una vista en sección transversal de un fotobiorreactor según otra realización de la invención;

la **Figura 2** es una vista en sección transversal de un fotobiorreactor según otra realización de la invención, comprendiendo el fotobiorreactor una entidad de mezcla y concentración de cultivo que tiene una pluralidad de conjuntos de palas montadas en un soporte rotatorio, una pluralidad de conjuntos de dispositivos de soportes de fuente luminosa montados en un soporte rotatorio y una pluralidad de líneas de alimentación;

30 la **Figura 3A** es una vista esquemática en sección transversal de un sistema de iluminación del fotobiorreactor según una realización, que ilustra un dispositivo de soporte de fuente luminosa y soporte rotatorio visto en paralelo al eje del fotobiorreactor;

35 la **Figura 3B** es una vista esquemática en sección transversal de un dispositivo de soporte de fuente luminosa y soporte rotatorio visto en perpendicular al eje del fotobiorreactor según una realización de la invención;

40 la **Figura 3C** es una vista esquemática de una disposición de fuentes luminosas vista en un plano perpendicular al eje del fotobiorreactor según una realización de la invención;

45 la **Figura 4** describe esquemáticamente una vista en sección transversal de una plataforma de distribución de burbujas de gas según una realización de la invención en la que la entrada de gas se consigue a través de pasos de gas perfilados hechos en una placa perforada de manera que las burbujas de gas son liberadas en la parte de cámara de cultivo no verticalmente a la superficie de la plataforma de distribución de burbujas de gas.

50 las **Figuras 5A y 5B** ilustran esquemáticamente sistemas de cultivo de fotosíntesis según realizaciones de la invención que muestran una configuración de una pluralidad de fotobiorreactores dispuestos en serie para cultivar microorganismos, en las que la figura 5A ilustra fotobiorreactores R^1 y R^2 en serie para cultivar microorganismos en diferentes fases de desarrollo y la figura 5B ilustra un fotobiorreactor R^1 para cultivar microorganismos dispuestos en serie con biorreactores para la bioconversión (R^2 y R^3 dispuestos en paralelo).

55 En referencia a la figura 1, un fotobiorreactor 1 según una realización de la invención comprende un receptáculo 2 que define una cámara interior 58 que comprende una parte de cámara de cultivo 8 para contener un medio de cultivo líquido y una parte de cámara de alimentación de gas 60, un sistema de regulación de temperatura 9, un sistema de regulación de flujo 3 que comprende una entidad de mezcla y concentración de cultivo 23 que comprende un dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa 47 y un sistema de iluminación 5. La parte de cámara de cultivo 8 comprende una zona de concentración de cultivo 18, una zona de recogida de cultivo 19 y una zona de recogida de gas 43, estando dispuesto el sistema de regulación de temperatura 9 y el sistema de regulación de flujo 3 en la parte de cámara de cultivo 8 y estando dispuesto el sistema de iluminación 5 dentro de la zona de concentración de cultivo 18. El fotobiorreactor 1 según una realización de la invención comprende además un sistema de alimentación de gas 12, un dispositivo de alimentación 4 y un sistema de recogida 7.

60 La cámara interior 58 está confinada por el receptáculo de biorreactor 59 que comprende paredes laterales, inferior y superior 59a, 59b, 59c conectadas a al menos un orificio de alimentación superior 13 que puede cerrarse mediante una válvula 14a, al menos un orificio de alimentación inferior 15 que puede cerrarse mediante una válvula 14d en comunicación fluida con la parte de cámara de alimentación de gas 60 y al menos un orificio de flujo de salida 17 a

la altura de la zona de recogida de cultivo 19 y que puede cerrarse mediante una válvula 14c.

El sistema de regulación de temperatura 9 está configurado de manera que controla la temperatura del medio de cultivo en la zona de cultivo 8 y en particular dentro de la zona de concentración de cultivo 18 y comprende un elemento de detección de temperatura 10 y un órgano de calentamiento/enfriamiento 61.

El sistema de alimentación de gas 12 comprende una plataforma de distribución de burbujas de gas 21 configurada para suministrar y controlar el suministro de burbujas de gas, en particular burbujas de nutriente gaseoso, al medio de cultivo en la parte de cámara de cultivo 8, en particular en la zona de concentración de cultivo 18. La plataforma de distribución de burbujas de gas 21 comprende una entrada de gas 40 y un dispositivo de regulación de la presión de gas 22. La entrada de gas 40 está configurada para controlar el tamaño, el flujo y las trayectorias de las burbujas de gas que entran en la parte de cámara de cultivo 8 desde la parte de cámara de alimentación de gas 60. La entrada 40 comprende pasos de gas 41 (Figura 4) para conducir el gas desde la parte de cámara de alimentación de gas 60 a la parte de cámara de cultivo 8 y un regulador de flujo de gas 45 con el fin de regular el flujo de gas a través de estos pasos 41. El regulador de flujo de gas 45 comprende un soporte rotatorio 28a que tiene un impulsor 57a cuyo eje de rotación es esencialmente paralelo al eje del fotobiorreactor. El dispositivo de regulación de la presión de gas 22 está configurado de manera que controla la presión de gas dentro de la parte de cámara de alimentación de gas 60 y comprende al menos un sensor de presión.

La parte de cámara de alimentación de gas 60 puede estar llena parcialmente con elementos de mezclado líquidos y sólidos tales como bolas de vidrio cuya función es dividir la corriente de gas que entra en la plataforma de distribución de gas 21 en burbujas de pequeño diámetro.

Los mezcladores Venturi permiten alcanzar tamaños de solo 40 μm y pueden instalarse en la línea de alimentación de gas 25 alimentando directamente las burbujas en el líquido contenido en la cámara de alimentación de gas 60.

El sistema de regulación de flujo 3 está configurado de manera que concentra la biomasa de fotosíntesis en suspensión en el medio de cultivo en una zona de la parte de cámara de cultivo 8 denominada zona de concentración de cultivo 18. El sistema de regulación de flujo 3 comprende una entidad de mezcla y concentración de cultivo 23 que comprende un dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa 47 que comprende palas 44 montadas en un soporte rotatorio 28b que tiene un impulsor 57b cuyo eje de rotación es esencialmente paralelo al eje del fotobiorreactor.

El sistema de iluminación 5 está configurado de manera que proporciona la biomasa de fotosíntesis en suspensión en el medio de cultivo con una iluminación controlada en términos de intensidad, longitud de onda, tiempo de iluminación y ciclos de iluminación (activo e inactivo) de las fuentes luminosas 30 de una forma homogénea en la zona de concentración 18 (por ejemplo, cada elemento de volumen en la zona de concentración 18 puede recibir esencialmente la misma duración de iluminación e intensidad). El sistema de iluminación 5 comprende un dispositivo de soporte de fuente luminosa 26, una unidad de control de luz 27 y un soporte rotatorio 28c que tiene un impulsor 57c cuyo eje de rotación es esencialmente paralelo al eje del fotobiorreactor. El dispositivo de soporte de fuente luminosa 26 comprende al menos un soporte de fuente luminosa 29 y una pluralidad de fuentes luminosas 30 montadas en el soporte de fuente luminosa 29 de manera que las fuentes luminosas 30 están dispuestas esencialmente en paralelo al eje del fotobiorreactor y están distribuidas esencialmente de manera uniforme dentro de la zona de concentración de cultivo 18. La unidad de control de luz 27 está configurada para el seguimiento independientemente de la intensidad, las longitudes de onda, el tiempo de iluminación y los ciclos de iluminación (activo e inactivo) de las fuentes luminosas 30.

El dispositivo de alimentación 4 comprende una línea de alimentación superior 24 en comunicación fluida con el orificio de alimentación superior 13 a través de la apertura de una válvula 14a y una línea de alimentación inferior 25 en comunicación fluida con el orificio de alimentación inferior 15 a través de la apertura de una válvula 14d. La línea de alimentación superior 24 está configurada para introducir material de alimentación de cultivo tal como un medio de cultivo (por ejemplo, agua) y nutrientes (por ejemplo, nitrógeno por ejemplo en forma de nitratos, sales y minerales) y la biomasa de fotosíntesis en la zona de cultivo 8. La línea de alimentación inferior 25 está configurada para introducir gas en la parte de cámara de alimentación de gas 60. El sistema de recogida 7 está configurado de manera que recoge la biomasa cultivada en modo continuo o semicontinuo desde el fotobiorreactor y comprende una línea de flujo de salida 38 en comunicación fluida con un depósito de recogida 56 a través de una válvula de flujo de salida 14c.

El fotobiorreactor puede comprender además una unidad de control de retroalimentación 6 configurada para controlar independientemente diversos parámetros del medio de cultivo tales como temperatura, iluminación, pH, flujo de gas, presión del gas, concentración de nutrientes, tamaño y densidad de la zona de concentración de cultivo 18 a través del análisis de una muestra de cultivo dentro de la zona de concentración de cultivo 18 y una acción de retroalimentación en dichos parámetros dependiendo de los resultados del análisis de la muestra. En particular, la unidad de control de retroalimentación 6 está configurada para controlar el tiempo de residencia de la biomasa de fotosíntesis en la zona de concentración 18. La unidad de control de retroalimentación 6 comprende una unidad de recogida de muestras 31, un analizador de muestras 33 y un dispositivo de control 37.

La unidad de recogida de muestras 31 está configurada para recoger una muestra de cultivo desde la zona de concentración de cultivo 18 a través de un orificio de control 16 en una pared 59a desde el receptáculo 2 en un modo continuo o semicontinuo. La unidad de recogida de muestras 31 comprende una línea de control 32 dispuesta en comunicación fluida con un orificio de control 16 a través de la apertura de una válvula 14b y una bomba 42. La bomba 42 está configurada para recoger una muestra del medio de cultivo dentro de la zona de concentración a través de la línea de control 32 y para impulsar la muestra recogida al analizador de muestras 33.

El analizador de muestras 33 comprende al menos un sensor 50 para analizar la muestra de cultivo y un sistema de adquisición de datos por ordenador 51 para almacenar los datos del análisis y compararlos con valores estándar almacenados previamente en el sistema de adquisición de datos por ordenador 51. El sistema de adquisición de datos por ordenador 51 está configurado de manera que envía información al dispositivo de control 37 sobre cualquier desviación con respecto a los valores estándar en relación con los parámetros de las condiciones de cultivo tales como temperatura, presión del gas, densidad y tamaño de las células, pH, concentración de CO₂ en la zona de concentración 18 desde la parte de cámara de cultivo 8.

El dispositivo de control 37 está configurado de manera que controla independientemente el funcionamiento del sistema de regulación de temperatura 9, el sistema de alimentación de gas 12, el sistema de regulación de flujo 3, el sistema de iluminación 5, el sistema de recogida 7 y el dispositivo de alimentación 4 basándose en la información recibida del sistema de adquisición de datos por ordenador 51 en relación con los parámetros de las condiciones de cultivo. El dispositivo de control comprende un accionador de válvulas múltiples 34 configurado de manera que lleva un seguimiento del flujo en la línea de alimentación superior 24, la línea de alimentación inferior 25, la línea de control 32 y la línea de flujo de salida 38 a través del control de la válvula de alimentación superior 14a, la válvula de alimentación inferior 14d, la válvula de control 14b y la válvula de flujo de salida 14c, respectivamente.

La unidad de control de retroalimentación 6 puede comprender además una línea de reinyección de muestra 36 en comunicación fluida con la línea de alimentación superior 24 a través de la apertura de una válvula de múltiples orificios 35 para la reinyección de la muestra (por ejemplo, agua, nutrientes disueltos, biomasa, gases disueltos) recogida en la unidad de recogida de muestras 31 en la parte de cámara de cultivo 8. La válvula de múltiples orificios 35 está configurada para ser accionada también por el accionador de válvulas múltiples 34.

Las paredes 59a o 59c en la parte superior del receptáculo 2, en la zona de recogida de gas 43 sobre la superficie del medio líquido en la parte de cámara de cultivo 8, pueden comprender además un orificio de ventilación 51 en comunicación fluida con el exterior del fotobiorreactor a través de la apertura de una válvula 14e. El orificio de ventilación 51 está configurado de manera que recoge gas desde el fotobiorreactor por ejemplo CO₂ no usado u O₂ o H₂ producidos. La válvula 14e está configurada para ser accionada también por el accionador de válvulas múltiples 34. El orificio de ventilación 51 puede estar conectado a un sistema colector de gas a través de una línea de gas de purga 68, estando el sistema colector de gas 67 configurado de manera que captura y en su caso purifica el gas recogido desde el orificio de ventilación 51.

Las paredes 59a o 59c en la parte superior del receptáculo 2, en la zona de recogida de gas 43 sobre la superficie del medio líquido en la parte de cámara de cultivo 8 pueden comprender además un sensor de desbordamiento 53, una salida de desbordamiento 54 en comunicación fluida con el exterior del biorreactor a través de la apertura de una válvula 14f. El sensor de desbordamiento 53 está configurado de manera que envía información relativa al nivel de la superficie del medio líquido en la parte de cámara de cultivo 8 al sistema de adquisición de datos por ordenador 51 desde la unidad de control de retroalimentación 6 y/o para controlar una alarma en el dispositivo de control 37 en el caso de mal funcionamiento que provoque un aumento en el nivel del líquido en la parte de cámara de cultivo 8 por encima de un nivel predeterminado. La válvula 14f está configurada para ser accionada también por el accionador de válvulas múltiples 34. La salida de desbordamiento 54 puede estar conectada a un sistema colector de desbordamiento a través de una línea de desbordamiento 70, estando el sistema colector de desbordamiento 69 configurado de manera que captura el desbordamiento de cultivo líquido recogido de la salida de desbordamiento 54. El cultivo líquido capturado puede ser enviado a continuación a la sección de gestión de residuos de una planta industrial.

El fotobiorreactor puede comprender además bombas 54a y 54b configuradas para bombear los nutrientes y el gas de las fuentes de nutrientes y gas en las líneas de alimentación superior e inferior 24 y 25, respectivamente. El fotobiorreactor puede comprender además una bomba 54c configurada para bombear el cultivo recogido desde la línea de flujo de salida 38. Las bombas 54a, 54b, 42, 54c son cualquier dispositivo adecuado capaz de bombear la suspensión sin dañar las células. En una realización en particular, los sistemas de bombeo adecuados son aquellos que no crean esfuerzo de cizalla a la altura de la membrana celular tales como las bombas de movimiento alternativo o peristálticas. Los ejemplos de otros dispositivos adecuados incluyen, sin limitación, bombas centrífugas, bombas impulsoras o bombas rotatorias.

En una realización ventajosa en particular, el fotobiorreactor según la invención es adecuado para trabajar bajo presión y comprende un receptáculo hermético resistente a la presión 2.

Los materiales adecuados que pueden usarse para formar el receptáculo 2 del fotobiorreactor incluyen, pero no se limitan a acero inoxidable o cualquier polímero o copolímero que tiene propiedades de resistencia ultravioleta tales como policarbonatos, resinas acrílicas, polipropileno, polietileno, policloruro de vinilo y vidrio, y/o los mismos revestidos con recubrimientos específicos que muestran filtrado de la luz. Normalmente, las paredes interiores 59a, 59c y en su caso 59b del receptáculo del fotobiorreactor pueden estar hechas o revestidas con un material biocompatible seleccionado entre la lista anterior o pueden estar revestidas con recubrimientos que muestran propiedades lipóforas con el fin de evitar la aglomeración de material, tales como recubrimientos superficiales formados al menos por dos capas dependiendo del sustrato y del entorno en el que se colocará el reactor. En general, las capas que están en contacto con la superficie del reactor son normalmente óxidos metálicos, nitruros, oxinitruros, boruros o carburos. La capa intermedia puede estar formada también por CMOS (materiales semiconductores de óxido metálico complementarios). Las capas intermedias se usan para la adhesión, así como para las propiedades metalúrgicas. La capa funcional que está situada frente a la mezcla líquida en la parte de la cámara de cultivo 8 puede estar saturada con fracciones de flúor, y esta superficie puede modificarse para interactuar con sustancias químicas específicas, sitios de proteínas en las formas prescritas.

El órgano de calentamiento/enfriamiento 61 puede estar ventajosamente en forma de un fluido térmico (por ejemplo, un líquido o un gas) que circula en una envoltura interna 46 (por ejemplo, paredes con doble revestimiento) que presenta un orificio de entrada de fluido térmico 71 y un orificio de salida de fluido térmico 72 dentro de las paredes 59 desde el receptáculo 2, estando el órgano de calentamiento/enfriamiento 61 configurado de manera que calienta/enfría el fluido térmico bajo el control del elemento de detección de temperatura 10.

Los pasos de gas 41 pueden estar formados por cabezales de boquilla, perforaciones en una placa, o un injerto o malla metálica. Los pasos de gas 41 en forma de perforaciones en una placa pueden estar en forma de orificios rectos o canales perfilados que están configurados para liberar burbujas de gas en ángulo oblicuo a la dirección vertical (axial), hasta situarse tangencialmente o casi tangencialmente con respecto a la superficie de la entrada de gas 40 tal como se muestra en la Figura 4. Esto ayuda ventajosamente a aumentar el tiempo de residencia de las burbujas de gas dentro de la zona de concentración de cultivo 18. En particular, la plataforma de distribución de burbujas de gas 21 presenta la ventaja de elevar al máximo la tasa de absorción de dióxido de carbono introduciendo CO₂ en la zona de concentración de cultivo 18 en forma de burbujas de pequeño tamaño que tienen una velocidad vertical lo más baja posible y dispersándolas de manera homogénea dentro de la zona de concentración de cultivo 18. Normalmente, las burbujas de CO₂ que tienen un diámetro medio de aproximadamente 40 µm a aproximadamente 5 mm pueden circular a través de la plataforma de distribución de gas 21.

En una realización en particular, la entrada de gas 40 está situada esencialmente en la parte inferior de la zona de concentración de cultivo 18. La línea de alimentación inferior 25 puede estar en conexión fluida con un depósito de almacenamiento de CO₂.

El CO₂ suministrado en la parte de cámara de alimentación de gas 60 puede ser CO₂ extraído de la atmósfera o CO₂ generado desde un digestor de biomasa o CO₂ generado desde una planta de energía eléctrica que quema combustible a base de carbono (por ejemplo, carbón, petróleo, gas natural o materiales de celulosa) o cualquier combinación de lo anterior. La corriente de gas efluente rica en CO₂ pasa primero a través de una unidad de limpieza del gas en la que las sustancias tóxicas como los óxidos (por ejemplo, óxidos de fósforo, Pox; óxidos de nitrógeno, Nox) y los metales pesados de los que se sabe que tienen propiedades antibióticas como las sales de plata son eliminados y/o transformados en ingredientes útiles tales como nutrientes antes de entrar en la cámara de gas 60 desde el fotobiorreactor. Las tecnologías disponibles para capturar CO₂ y para la limpieza de la alimentación de CO₂ son bien conocidas en la técnica.

El regulador de flujo 45 puede estar formado por pasos de gas 41 montados en el soporte rotatorio 28a o por una placa perforada o una red o malla metálica montada esencialmente en perpendicular al eje de rotación del soporte rotatorio 28a sobre los pasos de gas 41. La placa perforada o red o malla presenta ventajosamente orificios o canales distribuidos esencialmente de manera uniforme en toda la superficie y dispuestos en la interfaz entre la parte de cámara de alimentación de gas 60 y la parte de cámara de cultivo 8, en particular en proximidad de la zona de concentración de cultivo 18.

En una realización en particular, los soportes de fuente luminosa 29 están hechos o recubiertos con un material polimérico biocompatible que previene el depósito de material de cultivo en su superficie tal como se describe anteriormente. En una realización en particular, los materiales adecuados que pueden usarse para formar los soportes de fuente luminosa 29 o el receptáculo de las fuentes luminosas incluyen pero no se limitan a cualquier polímero y/o copolímero que sea transparente, excelente en la transmisión de luz y que tenga propiedades de resistencia al ultravioleta tales como los policarbonatos, resinas acrílicas, polipropileno, polietileno, policloruro de vinilo y vidrio, y/o los mismos revestidos con recubrimientos específicos que muestran propiedades de filtrado y concentración de la luz.

En otras realizaciones en particular, la fuente luminosa 30 puede comprender una disposición de diodos emisores de luz (LED), tubos luminiscentes o fibras ópticas sumergibles. Los LED, tubos luminiscentes o fibras ópticas pueden montarse esencialmente en paralelo al eje de dicho fotobiorreactor en un dispositivo de soporte de fuente luminosa

26 como los mostrados en las Figuras 3A y B. Por ejemplo, la fuente luminosa 30 puede comprender una combinación de uno o más LED o tubos luminiscentes o fibras ópticas para emitir luz con una longitud de onda en el intervalo de aproximadamente 380 nm a aproximadamente 800 nm. La unidad de control de luz 27 puede realizar un seguimiento de los ciclos de iluminación de fuentes luminosas 30 que comprende normalmente el encendido y apagado de las fuentes luminosas en un ciclo de aproximadamente 1 a aproximadamente 10 segundos de encendido y de aproximadamente 1 a aproximadamente 10 segundos de apagado, normalmente de aproximadamente 1 segundo de encendido y aproximadamente 6 segundos de apagado.

Las fuentes luminosas 30 adyacentes pueden estar separadas dentro de la zona de concentración de cultivo 18 a una distancia que es menor o igual que la distancia más allá de la cual la energía de fotosíntesis de la fuente luminosa es insuficiente para generar fotosíntesis efectiva (también denominada D_{max}). En una realización particular adicional, las fuentes luminosas están separadas en un plano perpendicular al eje del fotobiorreactor de manera que cada elemento de volumen en la zona de concentración 18 recibe esencialmente la misma duración de iluminación e intensidad independientemente de su distancia desde el eje de rotación del sistema de iluminación 5, es decir, la distancia entre dos fuentes luminosas adyacentes dentro de un plano perpendicular al eje del fotobiorreactor se ajustan a la distancia que separa esta fuente luminosa al eje de rotación del sistema de iluminación 5. Por ejemplo, si D_1 corresponde al valor D_{max} para una fuente luminosa situada a una distancia r_1 desde el eje de rotación del sistema de iluminación 5, el valor D'_{max} para una fuente luminosa situada a una distancia r_2 desde el eje de rotación del sistema de iluminación 5 (D_2) se ajustará del modo siguiente: $D_2 = D_1 * r_2/r_1$. En la Figura 3C se muestra una representación esquemática de dicha configuración en la que un elemento A o B de la zona de concentración de cultivo 18 recibirá esencialmente la misma duración de iluminación e intensidad desde las fuentes luminosas 30.

En otra realización, el tiempo de iluminación de las fuentes luminosas en un plano perpendicular al eje del fotobiorreactor está regulado por la unidad de control de luz 27 de manera que cada elemento de volumen en la zona de concentración 18 recibe esencialmente la misma duración de iluminación e intensidad independientemente de su distancia desde el eje de rotación del sistema de iluminación 5, es decir, los tiempos de iluminación de las fuentes luminosas en un plano perpendicular al eje del fotobiorreactor se ajustan a la distancia que separa una fuente luminosa en el eje de rotación del sistema de iluminación 5. Por ejemplo, si T_1 corresponde al valor del tiempo de iluminación para una fuente luminosa situada a una distancia r_1 desde el eje de rotación del sistema de iluminación 5, el valor del tiempo de iluminación para una fuente luminosa situada a una distancia r_2 desde el eje de rotación del sistema de iluminación (T_2) se ajustará del modo siguiente: $T_2 = T_1 * r_2/r_1$.

En una realización en particular, las fuentes luminosas 30 pueden estar separadas dentro de la zona de concentración de cultivo 18 a distancias comprendidas en el intervalo de aproximadamente 1 a aproximadamente 15 cm a lo largo del eje del fotobiorreactor, y a distancias comprendidas en el intervalo de aproximadamente 1 a aproximadamente 15 cm perpendicularmente al eje del fotobiorreactor.

En una realización en particular, el sistema de iluminación 5 puede estar formado por una pluralidad de dispositivos de soportes de fuentes luminosas 26 esencialmente paralelos entre sí dentro de la zona de concentración de cultivo 18 por ejemplo tal como se muestra en la Figura 2C.

En una realización en particular, las longitudes de onda de la luz emitida por las fuentes luminosas 30 pueden variar dependiendo de su distancia desde el eje central en un plano perpendicular al eje del fotobiorreactor.

En una realización en particular, se cultiva *Chorella pyrenoidosa* usando iluminación artificial de aproximadamente 458 nm (región azul del espectro, absorción de clorofila intensa y efecto morfogenético) y aproximadamente 633 nm (región roja del espectro, absorción de clorofila intensa, efectos morfogenético y ontogenético).

En una realización en particular, se usa una longitud de onda entre aproximadamente 380 y aproximadamente 510 nm para cultivar células en la fase exponencial de sus ciclos de crecimiento. En otra realización en particular, se usan longitudes de onda entre aproximadamente 620 y aproximadamente 710 nm para cultivar células en el inicio de sus ciclos de crecimiento.

La unidad de control de luz 27 comprende un circuito eléctrico configurado de manera que controla el funcionamiento de las fuentes luminosas 30 (por ejemplo, tiempo y frecuencia de los ciclos de iluminación, intensidad luminosa, longitud de onda de la luz), normalmente a través de un sistema informático externo que puede estar conectado electrónicamente a la unidad de control 37 desde la unidad de control de retroalimentación 6.

En una realización en particular, el sistema de regulación de flujo 3 comprende una entidad de mezcla y concentración de cultivo 23 y la zona de concentración 18 está situada esencialmente en la parte inferior del fotobiorreactor (Figura 1). En otra realización en particular, el sistema de regulación de flujo 3 está formado por una pluralidad de entidades de mezcla y concentración de cultivo 23. En una realización particular adicional, el sistema de regulación de flujo 3 comprende dos entidades de mezcla y concentración de cultivo 23 que giran alrededor del mismo eje esencialmente paralelo al eje del fotobiorreactor pero en direcciones opuestas (por ejemplo, horaria y antihoraria en un plano esencialmente perpendicular al eje del fotobiorreactor) y la zona de concentración 18 está situada esencialmente en la parte central del fotobiorreactor tal como se muestra por ejemplo en las Figuras 2A y B.

Los soportes rotatorios 28a, 28b y 28c pueden ser accionados independientemente por impulsores separados 57a, 57b y 57c o alternativamente pueden ser accionados conjuntamente mediante el mismo impulsor. En una realización en particular, la velocidad de rotación de los impulsores 57a, 57b y 57c está controlada por retroalimentación independientemente mediante el dispositivo de control 37 desde la unidad de control de retroalimentación 6.

La unidad de control de retroalimentación del cultivo 6 puede estar formada ventajosamente por una unidad de recogida de muestras 31 configurada para la recogida de muestras de cultivo desde la zona de concentración de cultivo 18 en intervalos de tiempo predeterminados, por ejemplo, entre 1 segundo y 10 minutos a través de la línea de control 32.

El analizador de muestras 33 puede comprender al menos un sensor 50 para medir los parámetros de las muestras de cultivo tales como el pH, la temperatura, la concentración de dióxido de carbono disuelto, la concentración de oxígeno, la presión del gas y las presiones parciales, la concentración de nutrientes (por ejemplo, nitratos), el tamaño y la densidad de las células cultivadas comunes en los fotobiorreactores. Por ejemplo, el tamaño y/o el número de células puede ser valorado por el analizador de muestras 33 a través de la medida del número/tamaño de células en una muestra de cultivo por citometría de flujo tal como se describe en Arino J., Modélisation structurée de la croissance du phytoplancton en chemostat; Université J Fourrier, Thesis January 12, 2001 y determinar así rápidamente en qué fase (por ejemplo, latencia, crecimiento exponencial, decaimiento) del ciclo de vida celular se encuentra predominantemente la muestra analizada, especialmente de forma ventajosa en el caso de algas unicelulares que tienen tiempos de duplicación cortos. Por ejemplo, la densidad de células puede ser valorada por un analizador de muestras 33 a través de la medida de la turbiedad de una muestra de cultivo mediante espectrometría de absorción (por ejemplo, 680 y 800 nm).

Dependiendo del valor de los parámetros medidos por el analizador de muestras 33 en comparación con los valores de referencia para dichos parámetros (por ejemplo, almacenados previamente en el sistema de adquisición de datos por el ordenador 51), el impulsor de válvula de múltiples orificios 34 de la unidad de control de retroalimentación de cultivo 6 está configurado de manera que ordena independientemente la apertura de válvulas 14a y 14d desde las líneas de alimentación 24 y 25 para alimentar el cultivo con nutrientes y gas, la apertura de válvula 35 para reinyectar la muestra de cultivo en la línea de alimentación 24, la apertura de válvula 14c para recoger el cultivo en una línea de flujo de salida 38 y la apertura de válvula 14e para purgar el gas, la apertura de válvula 14f para recoger el desbordamiento de líquido en una línea de desbordamiento 70.

En una realización en particular, el dispositivo de alimentación 4 puede comprender además otras líneas de alimentación 24a en comunicación fluida con orificios de alimentación adicionales (por ejemplo, 13a, 13b, 13c, 13d) a través de la apertura de una válvula correspondiente (Figura 2B). Estas líneas de alimentación 24a adicionales están configuradas para introducir más material de alimentación de cultivo tal como medio de cultivo (por ejemplo, agua) y nutrientes (por ejemplo, nitrógeno, por ejemplo, en forma de nitratos, sales y minerales) y la biomasa de fotosíntesis en la zona de cultivo 8. Las válvulas correspondientes están configuradas para su accionamiento por el impulsor de válvula de múltiples orificios 34 desde la unidad de control de retroalimentación 6.

En el fotobiorreactor de la invención puede cultivarse cualquier microorganismo de fotosíntesis adecuado. Por ejemplo, un fotobiorreactor según la invención es adecuado para cultivar microorganismos acuáticos, en particular un biocultivo de fotosíntesis, en particular microalgas (por ejemplo, Viridiaeplantae (Chlorella, Chlorophycophyta), Chrysophycophyta (algas doradas), Rodophyta (algas rojas), Stramenopiles (diatomeas y algas, de la familia Bacillariophyceae, algas marrones Phaeophytophyta), procariontes fotosintéticos como Cyanobacteria, eucariotes fotosintéticos excluyendo la familia Charales, Spirulina, Nanochloropsis, Prochloron minimum), en gran escala en flujo continuo, semicontinuo (por ejemplo, pulsado) o en modo por lotes.

Un fotobiorreactor según la invención también es adecuado para cultivar las especies de algas más comunes usadas en acuocultivos como por ejemplo Isochrysis affinis galbana, Chaetoceros gracillis, Chaetoceros calcitrans, Tetraselmis suecica, Thalassiosira pseudonana, Pavlova lutheri, Isochrysis galbana, Nannochloropsis y otras especies tales como: especies marinas como Fragilaria sublinearis, Cylotella nana, Pavlova gyrens, Monochrysis lutheri, Prymnesium paruum y Nitzschia palea y especies de agua dulce: Cyclotella spp, Scenedesmus spp, Navicula spp, Nitzschia spp, Chlamydomonas reinhardtii.

Los ejemplos de microorganismos de fotosíntesis adicionales que pueden cultivarse ventajosamente en un fotobiorreactor según la invención son tejidos vegetales y organismos monocelulares que contienen cloroplastos, bacterias y algas de fotosíntesis tales como los descritos en Gudin y col., 1986, "Bioconversion of solar energy in organic chemicals by microalgae" en Advances in Biotechnological processes 6, pág. 73-110.

En una realización en particular, se usa un fotobiorreactor según la invención para la producción de células fotoautótrofas, entre cuyos ejemplos se incluyen Chlorella, Scenedesmus, Chlamydomonas y Cyanobacteria.

En otra realización, las células cultivadas en un fotobiorreactor según la invención incluyen aquellas cuyo genoma ha sido modificado por técnicas de ingeniería genética con el fin de producir metabolitos específicos, o de mejorar la

fijación de CO₂, o de mejorar otros parámetros de funcionamiento.

En una realización en particular, las algas con tiempo de duplicación breve (por ejemplo, de 1 a 4 horas), alto contenido de lípidos (por ejemplo, >70%), resistencia al esfuerzo de cizalla son especies ventajosas para cultivo de biomasa de fotosíntesis cuando se consideran el rendimiento de la biomasa y el rendimiento del combustible de biomasa como objetivos operativos.

La elección del cultivo de células de fotosíntesis dependerá de los objetivos operativos tales como el rendimiento, la naturaleza de los metabolitos y los polisacáridos secretados y/o excretados desde los microorganismos (Metting y col., 1986, Enzyme Microbiol. Technol., 8, pp. 386-394). Los valores óptimos usados para pH, temperatura, nutriente, concentraciones de CO₂ y O₂, ciclo de iluminación, intensidad y longitudes de onda variarán dependiendo de la cepa específica del microorganismo, la naturaleza de los metabolitos y polisacáridos que se espera que sean secretados y/o excretados desde estos microorganismos y la fase del ciclo de crecimiento de estos microorganismos. Estos valores pueden ser determinados por un experto en la materia.

Según un aspecto, un fotobiorreactor según la invención permite la recogida continua o semicontinua de un cultivo además de la recogida por lotes realizada en los sistemas de fotobiorreactores conocidos, mejorando así el rendimiento global de la planta de producción (rendimiento de producción y tasas de producción). Además, un fotobiorreactor o un procedimiento según la invención permite controlar ventajosamente el tiempo de residencia del microorganismo dentro de la zona de concentración de cultivo 18 a través del control de retroalimentación del sistema de regulación del flujo 3 por la unidad de control de retroalimentación 6, la eficiencia de iluminación dentro de esta zona mediante el control de los flujos de cultivo (alimentación/concentración/recogida/recirculación) y los ciclos de iluminación de las fuentes luminosas 30 a través del control de retroalimentación del sistema de iluminación 5, el sistema de alimentación 4 y el sistema de recogida 7 por la unidad de control de retroalimentación 6 y el tiempo de residencia, la concentración y el flujo del nutriente gaseoso (y con ello del pH) dentro de la zona de concentración de cultivo 18 a través del control de retroalimentación del sistema de alimentación de gas 12 por medio de la unidad de control de retroalimentación 6.

En una realización en particular, el sistema de regulación de temperatura está configurado de manera que regule la temperatura del medio de cultivo en la parte de cámara de cultivo 8 entre aproximadamente 16 y aproximadamente 60°C, dependiendo de la especie que se cultivará, normalmente entre aproximadamente 29 y 32°C.

En una realización en particular, la unidad de control de retroalimentación 6 está configurada de manera que mantenga el pH del medio de cultivo en la parte de cámara de cultivo 8 entre aproximadamente 7,5 y aproximadamente 9,5 en agua dulce, normalmente entre aproximadamente 6,0 y aproximadamente 7,5 en agua salada.

El fotobiorreactor según la invención ventajosamente permite optimizar el proceso de iluminación proporcionando una exposición luminosa apropiada a la biomasa de cultivo en las frecuencias e intensidad correctas y durante el tiempo correcto (sólo el tiempo necesario para que tenga lugar el proceso de la fotosíntesis ya que la biomasa de fotosíntesis no puede usar luz mientras está absorbiendo y fijando el carbono como parte de su proceso metabólico), evitando así la fotoinhibición y/o el desperdicio de energía de fotosíntesis incidente (saturación de luz).

Además, la recogida continua o semicontinua desde un fotobiorreactor según la invención permite mantener un fotobiorreactor en condiciones de cultivo óptimas para una fase específica del ciclo de vida de un microorganismo y ofrece la posibilidad de optimizar las plantas de producción cuando estas plantas comprendan más de un fotobiorreactor según la invención.

En un ejemplo, una planta puede comprender más de un fotobiorreactor según la invención para cultivar microorganismos en serie tal como se muestra en la Figura 5A. En esta variante, cada fotobiorreactor mantiene ventajosamente los microorganismos en una fase específica y diferente del ciclo de vida (por ejemplo, crecimiento, división) en su zona de concentración de cultivo 18 a través del control de las condiciones de cultivo específicas correspondientes mediante una unidad de control de retroalimentación 6. El cultivo de microorganismos se recoge a través de una línea de flujo de salida 38 desde un primer fotobiorreactor R¹ en una fase de desarrollo específica de un microorganismo (por ejemplo, división) y a continuación se suministra a una línea de alimentación superior 24 desde un segundo fotobiorreactor R². A continuación, el cultivo de microorganismos se lleva a una fase de desarrollo posterior de un microorganismo (por ejemplo, crecimiento, madurez) a través del ajuste de las condiciones de cultivo específicas correspondientes mediante la unidad de control de retroalimentación 6 del segundo fotobiorreactor y después se recoge a través de una línea de flujo de salida 38 desde dicho segundo fotobiorreactor y a continuación se suministra en un fotobiorreactor adicional para alcanzar una fase de desarrollo posterior o para la bioconversión o para el procesamiento directo de algas en bruto o de comida generada para alimentar a las gambas, por ejemplo.

En otro ejemplo, una planta puede comprender al menos un fotobiorreactor según la invención para desarrollar microorganismos y al menos un biorreactor para la bioconversión de dichos microorganismos (liberación de al menos una sustancia seleccionada entre ácidos nucleicos, proteínas, hidratos de carbono (por ejemplo, azúcares) y lípidos (por ejemplo, aceites o ácidos grasos) a partir de los microorganismos maduros), estando estos biorreactores

dispuestos en serie tal como se muestra en la Figura 5B. El cultivo recogido de una línea de flujo de salida 38 desde el fotobiorreactor de cultivo R¹ se envía a continuación corriente abajo a las secciones de procesamiento de la planta. Por ejemplo, el cultivo recogido de una línea de flujo de salida 38 desde el fotobiorreactor de cultivo R¹ se suministra en la línea de alimentación 24a de al menos un biorreactor R² para la bioconversión (que puede ser un fotobiorreactor según la invención o un [bio]reactor convencional). En el caso de una pluralidad de biorreactores para bioconversión pueden disponerse en paralelo (R² y R³).

La bioconversión se produce al someter el medio de cultivo a una cierta tensión, por ejemplo una tensión térmica mediante inactivación del medio de cultivo por enfriamiento por debajo de una temperatura dada (normalmente, se usan temperaturas entre aproximadamente 4°C y aproximadamente 15°C para provocar la bioconversión de lípidos no saturados contenidos en las células), o tensión energética a través de la modulación de la intensidad luminosa y/o la longitud de onda y/o el tiempo de exposición, o ambas. Estos cambios pueden monitorizarse por ejemplo mediante el dispositivo de control 37.

El material resultante de la bioconversión puede excretarse desde la célula o permanecer como un producto intracelular. En cualquier caso, debe recogerse y procesarse adicionalmente hasta su forma final tal como se menciona anteriormente.

La primera etapa en el procesamiento corriente abajo desde el reactor de bioconversión consiste en separar los organismos de su disolvente (agua en caso de solución acuosa). Esta tarea se realiza normalmente mediante centrifugas tradicionales, de forma continua o en lotes. El agua se recoge y se hace recircular a través de un depósito en el que se preparan las soluciones de alimentación.

Para liberar los productos intracelulares se necesita romper las paredes de las células. A continuación, puede suministrarse la solución que contiene las células sometidas a tensión a un aparato según el estado de la técnica tal como una trituradora mecánica, una trituradora por ultrasonidos o cualquier otra tecnología existente apropiada. A continuación, pueden separarse los productos de interés de los desechos celulares exponiendo la "suspensión espesa" que comprende dichos desechos celulares descargados de las trituradoras mediante tecnologías de separación según el estado de la técnica tales como decantación, floculación, filtración, dependiendo de las propiedades fisicoquímicas respectivas de los componentes que deben separarse.

En algunos casos la biomasa simplemente se separa del agua, se seca y después se sedimenta en forma de gránulos que contienen energía.

En una disposición en particular, la planta comprende al menos un fotobiorreactor según la invención para desarrollar microorganismos y más de un fotobiorreactor para la bioconversión, estando el o los biorreactores de cultivo y el o los biorreactores de bioconversión dispuestos en serie y en los que los fotobiorreactores para la bioconversión están dispuestos en paralelo entre sí. En cada fotobiorreactor para la bioconversión se suministra una parte del material recogido desde una línea de flujo de salida 38 a partir de dicho al menos un fotobiorreactor de cultivo.

El funcionamiento de esta disposición en serie en modo continuo o semicontinuo mejora el rendimiento global del sistema del fotobiorreactor al optimizar las condiciones de cultivo para cada fase de desarrollo y al proporcionar de modo continuo un material maduro para su procesamiento adicional.

En una disposición alternativa en serie, una planta puede comprender más de un fotobiorreactor según la invención para cultivar microorganismos en serie en el que cada fotobiorreactor mantiene los microorganismos en una fase específica del ciclo de vida (la misma o diferente) y en el que el dióxido de carbono purgado a través del orificio de ventilación 51 desde el primer fotobiorreactor es suministrado a una parte de cámara de alimentación de gas 60 del mismo fotobiorreactor o de otro adicional a través del orificio de alimentación inferior 15. El funcionamiento de esta disposición en serie en modo continuo o semicontinuo mejora el rendimiento global del sistema de biorreactores al optimizar la eficacia de conversión de la alimentación CO₂ y reducir el flujo de salida global de CO₂ desde la planta de producción.

Según una realización, el O₂ producido purgado a través del orificio de ventilación 51 es capturado y reciclado ventajosamente por ejemplo en quemadores de oxcombustión (por ejemplo, oxcombustión de carbón en centrales eléctricas) para reducir más las emisiones de CO₂, o corriente arriba en una unidad de preparación de alimentación de gas para eliminar los tóxicos de la alimentación de gas.

Según otro aspecto, la invención proporciona una planta para el desarrollo y/o bioconversión de la biomasa de fotosíntesis que comprende al menos un fotobiorreactor según la invención.

Según otro aspecto, la invención proporciona un procedimiento para desarrollar biomasa de fotosíntesis en un modo continuo o semicontinuo que comprende:

(i) suministro de un cultivo de fotosíntesis en un medio de cultivo acuoso en una parte de cámara de cultivo regulada

- por temperatura;
- (ii) alimentación del cultivo de fotosíntesis con nutrientes;
- (iii) mezcla y concentración de dicho cultivo de fotosíntesis en una zona de concentración de cultivo desde dicha parte de cámara de cultivo;
- 5 (iv) suministro homogéneo de nutriente gaseoso al medio de cultivo de fotosíntesis;
- (v) suministro homogéneo de una exposición luminosa controlada a dicho cultivo de fotosíntesis en la zona de concentración desde el interior del medio de cultivo;
- (vi) recogida continua o semicontinua de una biomasa desde dicho cultivo de fotosíntesis.
- 10 En una realización adicional, la invención proporciona un procedimiento según la invención en el que el nutriente gaseoso es proporcionado al medio de cultivo de fotosíntesis dentro de la zona de concentración de cultivo desde dicha parte de cámara de cultivo.
- 15 En una realización adicional, la invención proporciona un procedimiento según la invención en el que la recogida de la biomasa se realiza en o en la parte inferior de la zona de concentración de cultivo desde dicha parte de cámara de cultivo.
- 20 En una realización adicional, la invención proporciona un procedimiento según la invención en el que la exposición luminosa homogénea controlada proporcionada en la etapa (v) se consigue proporcionando dentro de la zona de concentración de cultivo un sistema de iluminación controlado que comprende un soporte de fuente luminosa montado en un soporte rotatorio que tiene un eje de rotación esencialmente paralelo al eje de la parte de cámara de cultivo y que comprende una pluralidad de fuentes luminosas.
- 25 En una realización adicional, la invención proporciona un procedimiento según la invención en el que la provisión homogénea de nutriente gaseoso al medio de cultivo de fotosíntesis en la etapa (vi) se consigue proporcionando a la zona de concentración de cultivo un sistema de alimentación de gas controlado que comprende una plataforma de distribución de burbujas de gas que comprende una entrada de gas formada por pasos de gas y un regulador de flujo de gas.
- 30 En una realización adicional, la invención proporciona un procedimiento según la invención en el que el procedimiento comprende una etapa adicional (vii) de supervisión independientemente de un valor representativo de al menos un parámetro del medio de cultivo seleccionado entre temperatura, pH, presión del gas, concentración de nutrientes, densidad de las células y tamaño de las células y una etapa (viii) adicional de comparación de dicho valor representativo con un valor de referencia predeterminado y una etapa (ix) adicional de ajuste de al menos un
- 35 parámetro del medio de cultivo seleccionado entre temperatura, pH, flujo de gas, presión, concentración de nutrientes, iluminación (longitud de onda, intensidad, tiempo de iluminación, ciclo de iluminación), flujos de alimentación, concentración y recogida basándose en el resultado de dicha comparación.

Lista de elementos referidos en las figuras

- 40 Biorreactor de flujo continuo
- 2 Receptáculo (hermético, esencialmente cilíndrico)
- 58 Cámara interior
- 45 8 Parte de cámara de cultivo
- 18 Zona de concentración de cultivo
- 19 Zona de recogida de cultivo
- 43 Zona de recogida de gas
- 60 Parte de cámara de alimentación de gas
- 50 59 Paredes (59a lateral, 59b inferior, 59c superior)
- 13 Orificio de alimentación superior
- 14a válvula
- 55 15 Orificio de alimentación inferior
- 14d válvula
- 16 Orificio de control
- 14b válvula
- 17 Orificio de flujo de salida
- 14c válvula
- 60 51 Orificio de ventilación
- 14e válvula
- 54 Salida de desbordamiento
- 14f válvula
- 9 Sistema de regulación de temperatura
- 65 10 Elemento de detección de temperatura
- 61 Órgano de calentamiento/enfriamiento

		46 Envoltura interna
		71 orificio de entrada de fluido térmico
		72 orificio de salida de fluido térmico
5	12 Sistema de alimentación de gas	
	21 Plataforma de distribución de burbujas de gas	
	40 Entrada de gas	
		41 Pasos de gas
		45 Regulador de flujo de gas
10		28a soporte rotatorio
		57a Impulsor
		22 Dispositivo de regulación de la presión de gas
	3 Sistema de regulación de flujo	
	23 Entidad de mezcla y concentración de cultivo	
15		47 Dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa
		44 Palas
		28b Soporte rotatorio
		57b Impulsor
	4 Dispositivo de alimentación	
20	24 Línea de alimentación superior	
		35 Válvula de múltiples orificios
		54a Bomba
	25 Línea de alimentación inferior	
		54b Bomba
25	5 Sistema de iluminación	
	26 Dispositivo de soporte de fuente luminosa	
		29 Soporte de fuente luminosa
		30 Fuente luminosa
		27 Unidad de control de luz
30		28c Soporte rotatorio
		57c Impulsor
	6 Unidad de control de retroalimentación	
	31 Unidad de recogida de muestras	
		42 Bomba
		32 Línea de control
35	33 Analizador de muestras	
		50 Sensores
		51 Sistema de adquisición de datos por ordenador
	34 Impulsor de válvula de múltiples orificios	
40	36 Línea de reinyección de muestra	
	37 Dispositivo de control	
	7 Sistema de recogida	
	38 línea de flujo de salida	
		54c Bomba
		56 Depósito de recogida
45	67 Sistema colector de gas	
	68 Línea de gas de purga	
	69 Sistema colector de desbordamiento	
	70 Línea de desbordamiento	
50	53 Sensor de desbordamiento	

REIVINDICACIONES

1. Fotobiorreactor para cultivo en flujo continuo o semicontinuo de biomasa de fotosíntesis, incluyendo el fotobiorreactor un receptáculo (2) que define una cámara interior (58) que comprende una parte de cámara de cultivo (8) y una parte de cámara de alimentación de gas (60), un sistema de regulación de temperatura (9), un sistema de regulación de flujo (3) que comprende una entidad de mezcla y concentración de cultivo (23) que comprende un dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa (47) y un sistema de iluminación (5), comprendiendo la parte de cámara de cultivo una zona de concentración de cultivo (18) y una zona de recogida de cultivo (19), estando el sistema de regulación de temperatura, el sistema de regulación de flujo en la parte de cámara de cultivo, el sistema de iluminación en la zona de concentración de cultivo y el dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa generando un flujo vertical de medio de cultivo contenido en el receptáculo de manera que la biomasa se concentra en la zona de concentración de cultivo.
2. Un fotobiorreactor según la reivindicación 1 que comprende además un sistema de alimentación de gas (12), un dispositivo de alimentación (4) y un sistema de recogida (7).
3. Un fotobiorreactor según las reivindicaciones 1 ó 2 que comprende además una unidad de control de retroalimentación (6).
4. Un fotobiorreactor según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3 en el que el sistema de iluminación (5) comprende un dispositivo de soporte de fuente luminosa (26), una unidad de control de luz (27) y un soporte rotatorio (28c) que tiene un impulsor (57c).
5. Un fotobiorreactor según la reivindicación 4 en el que el dispositivo de soporte de fuente luminosa (26) comprende al menos un soporte de fuente luminosa (29) y una pluralidad de fuentes luminosas (30) montadas en el soporte de fuente luminosa de manera que las fuentes luminosas están dispuestas esencialmente en paralelo al eje del fotobiorreactor y están distribuidas de forma sustancialmente uniforme en la zona de concentración de cultivo (18).
6. Un fotobiorreactor según la reivindicación 5 en el que las fuentes luminosas (30) están separadas en la zona de concentración de cultivo (18) a una distancia que es inferior o igual a la distancia más allá de la cual la energía de fotosíntesis de la fuente luminosa es suficiente para generar fotosíntesis efectiva (Dmax).
7. Un fotobiorreactor según la reivindicación 5 en el que las fuentes luminosas (30) están separadas en un plano perpendicular al eje del fotobiorreactor de manera que el elemento de volumen dentro de la zona de concentración de cultivo (18) recibe esencialmente la misma duración de iluminación e intensidad independientemente de su distancia desde el eje de rotación del sistema de iluminación (5).
8. Un fotobiorreactor según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 7 en el que el sistema de alimentación de gas (12) comprende una plataforma de distribución de burbujas de gas (21) que comprende una entrada de gas (40) y un dispositivo de regulación de la presión de gas (22).
9. Un fotobiorreactor según la reivindicación 8 en el que la entrada de gas comprende pasos de gas (41) y un regulador de flujo de gas (45).
10. Un fotobiorreactor según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9 en el que el dispositivo de propulsión de flujo que dirige la biomasa (47) comprende palas (44) montadas en un soporte rotatorio (28b) que tiene un impulsor (57b).
11. Un fotobiorreactor según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que la cámara interior (58) está confinada por un receptáculo de biorreactor (59) que comprende paredes laterales, inferior y superior (59a), (59b), (59c) conectadas con al menos un orificio de alimentación superior (13) que puede cerrarse mediante una válvula (14a), al menos un orificio de alimentación inferior (15) que puede cerrarse mediante una válvula (14d) en comunicación fluida con la parte de cámara de alimentación de gas (60) y al menos un orificio de flujo de salida (17) a la altura de la zona de recogida de cultivo (19) y que puede cerrarse mediante una válvula (14c) y en el que las paredes (59a) o (59c) en la parte superior del receptáculo (2), en la zona de recogida de gas (43) sobre la superficie del medio líquido en la parte de cámara de cultivo (8) comprenden además un orificio de ventilación (51) en comunicación fluida con el exterior del fotobiorreactor a través de la apertura de una válvula (14e).
12. Un fotobiorreactor según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 11 en el que la unidad de control de retroalimentación (6) comprende una unidad de recogida de muestras (31), un analizador de muestras (33) y un dispositivo de control (37).
13. Un fotobiorreactor según la reivindicación 12 en el que el analizador de muestras (33) comprende al menos un sensor (50) para analizar la muestra de cultivo y un sistema de adquisición por ordenador (51').

14. Una planta de producción que comprende al menos un fotobiorreactor según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13.

5 15. Un procedimiento para desarrollar biomasa de fotosíntesis en un modo continuo o semicontinuo usando el fotobiorreactor según la reivindicación 1 que comprende:

(i) suministro de un cultivo de fotosíntesis en un medio de cultivo acuoso en una parte de cámara de cultivo con regulación de temperatura;

(ii) alimentación del cultivo de fotosíntesis con nutrientes;

10 (iii) mezcla y concentración de dicho cultivo de fotosíntesis en una zona de concentración de cultivo desde dicha parte de cámara de cultivo;

(iv) suministro homogéneo de nutriente gaseoso al medio de cultivo de fotosíntesis;

(v) suministro homogéneo de una exposición luminosa controlada a dicho cultivo de fotosíntesis en la zona de concentración desde el interior del medio de cultivo;

15 (vi) recogida continua o semicontinua de una biomasa desde dicho cultivo de fotosíntesis.

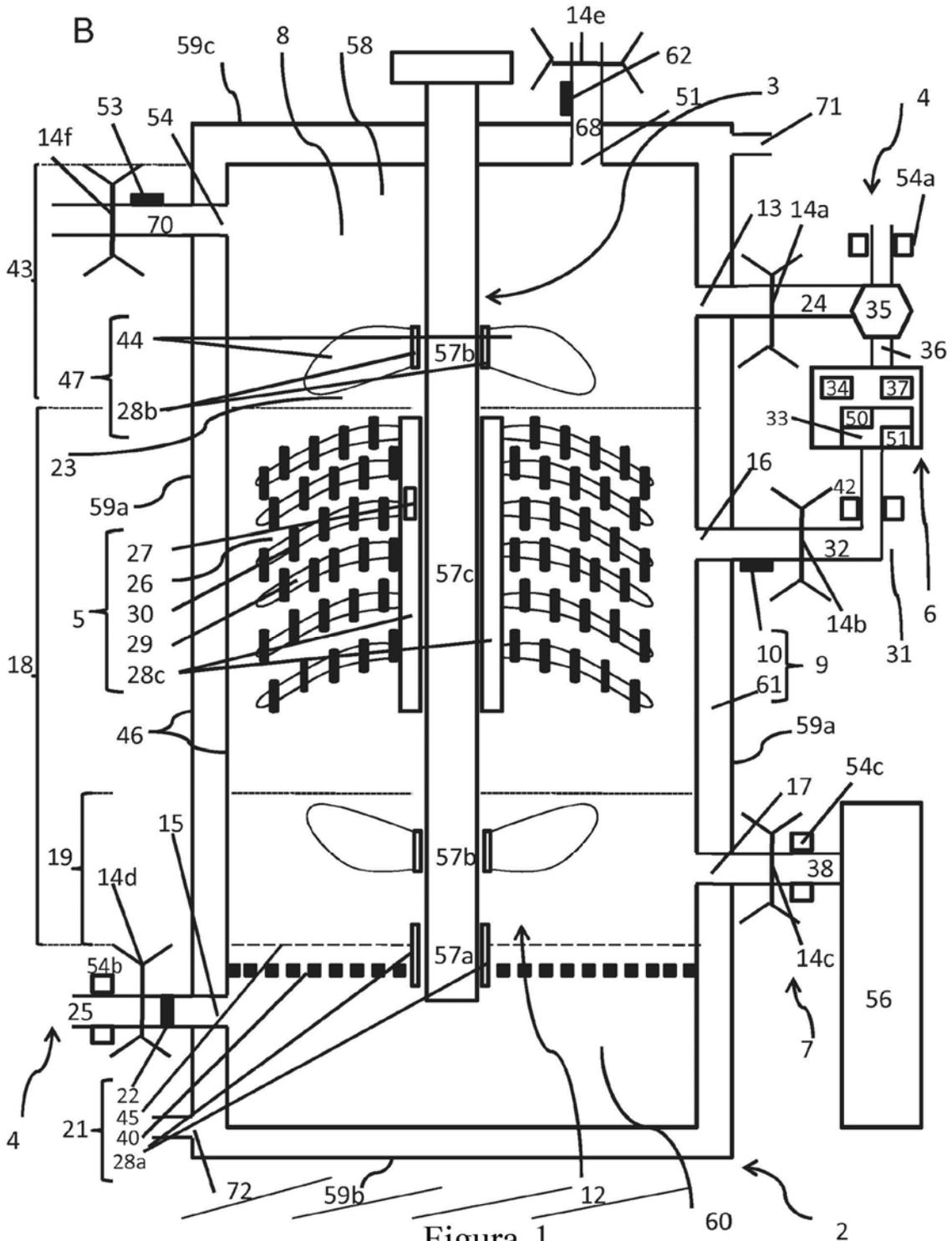


Figura 1

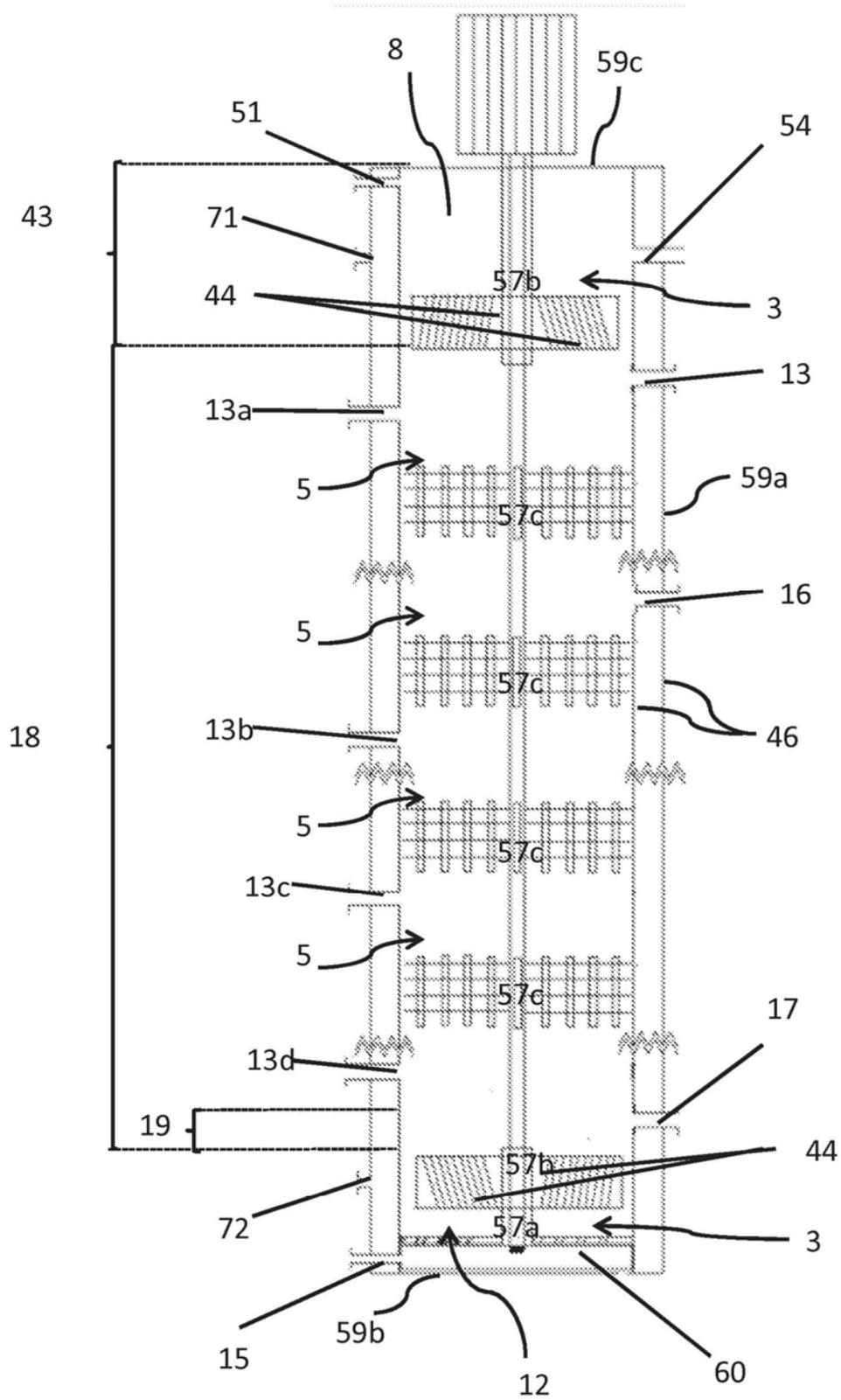


Figura 2

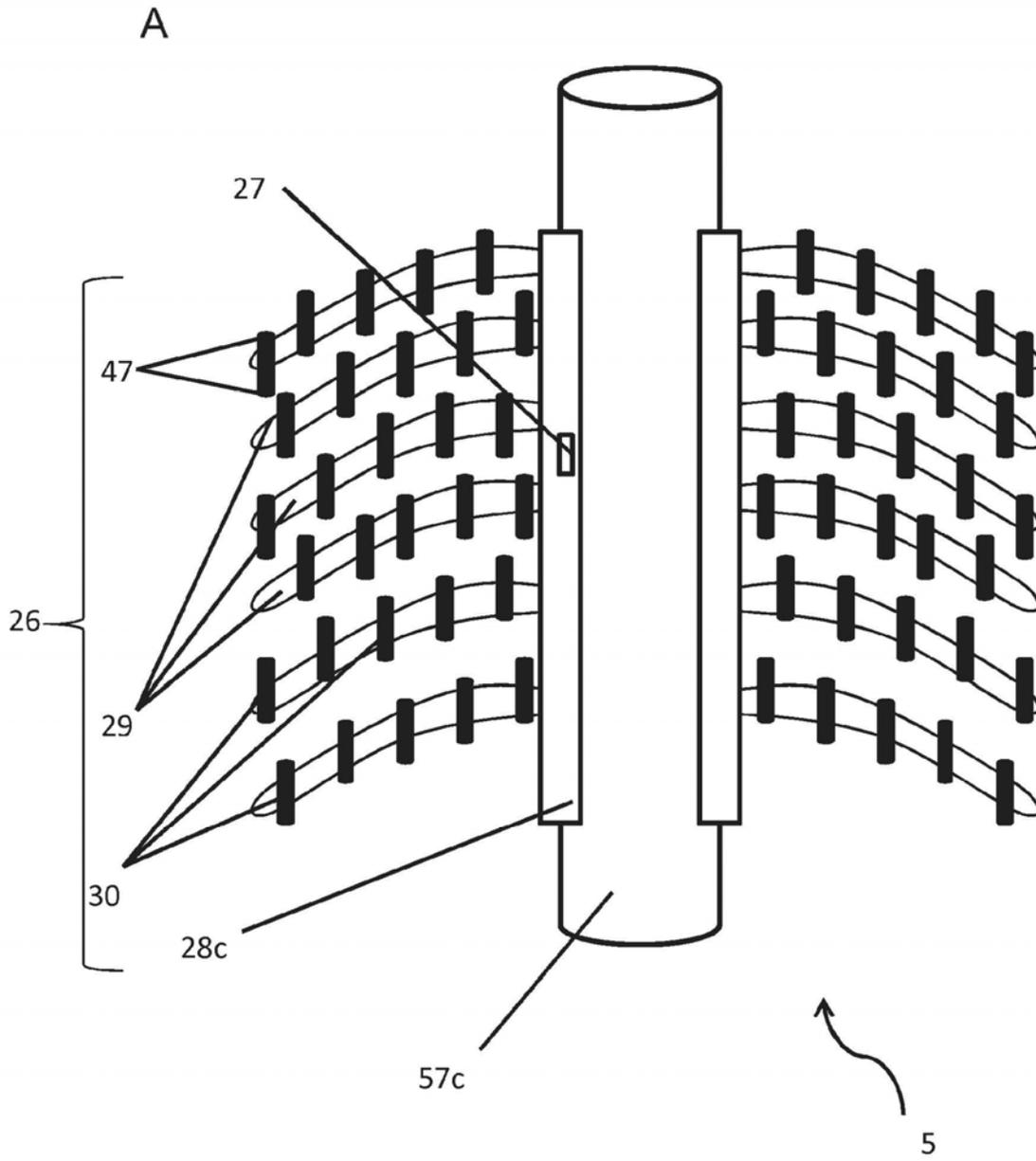


Figura 3

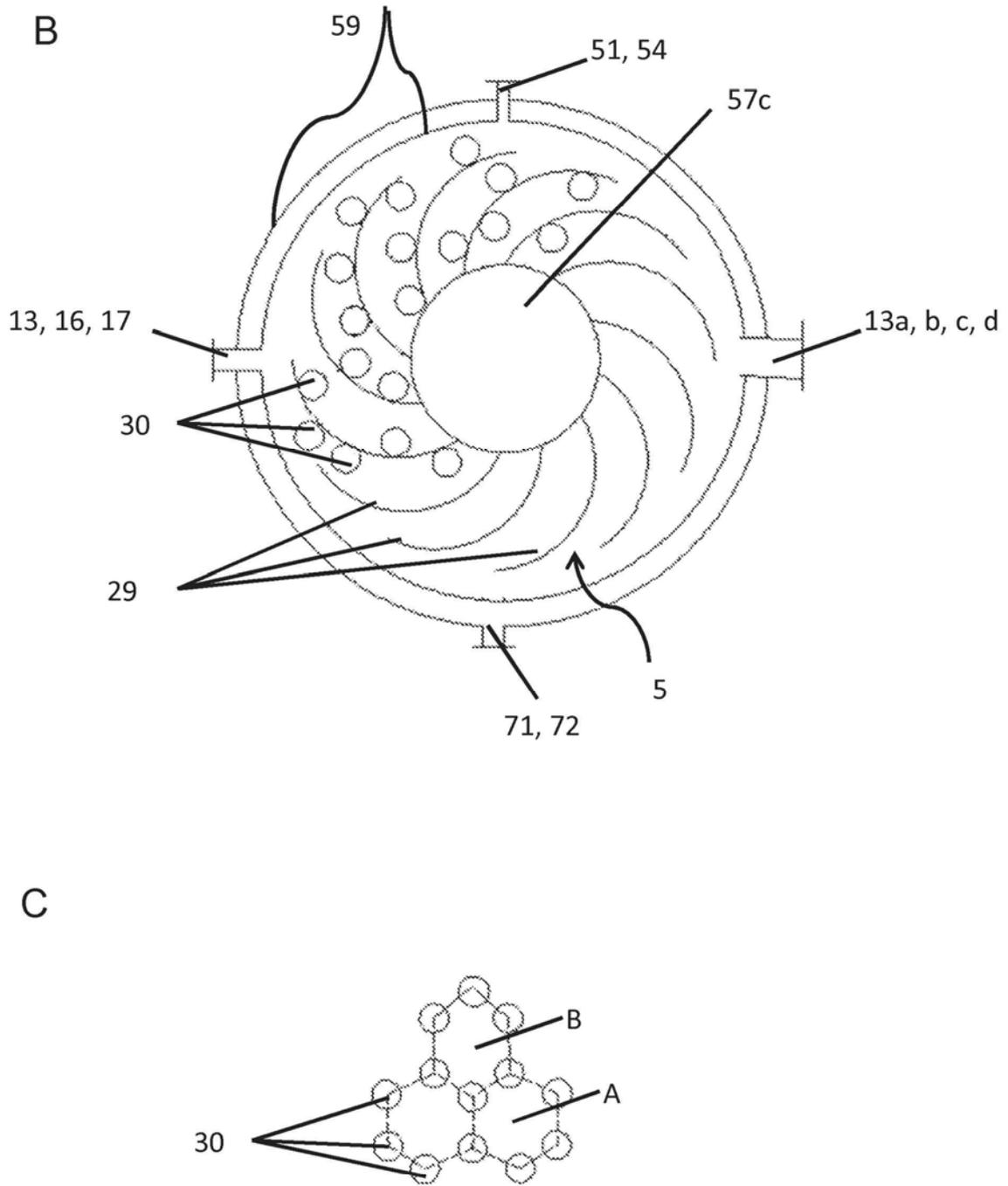


Figura 3

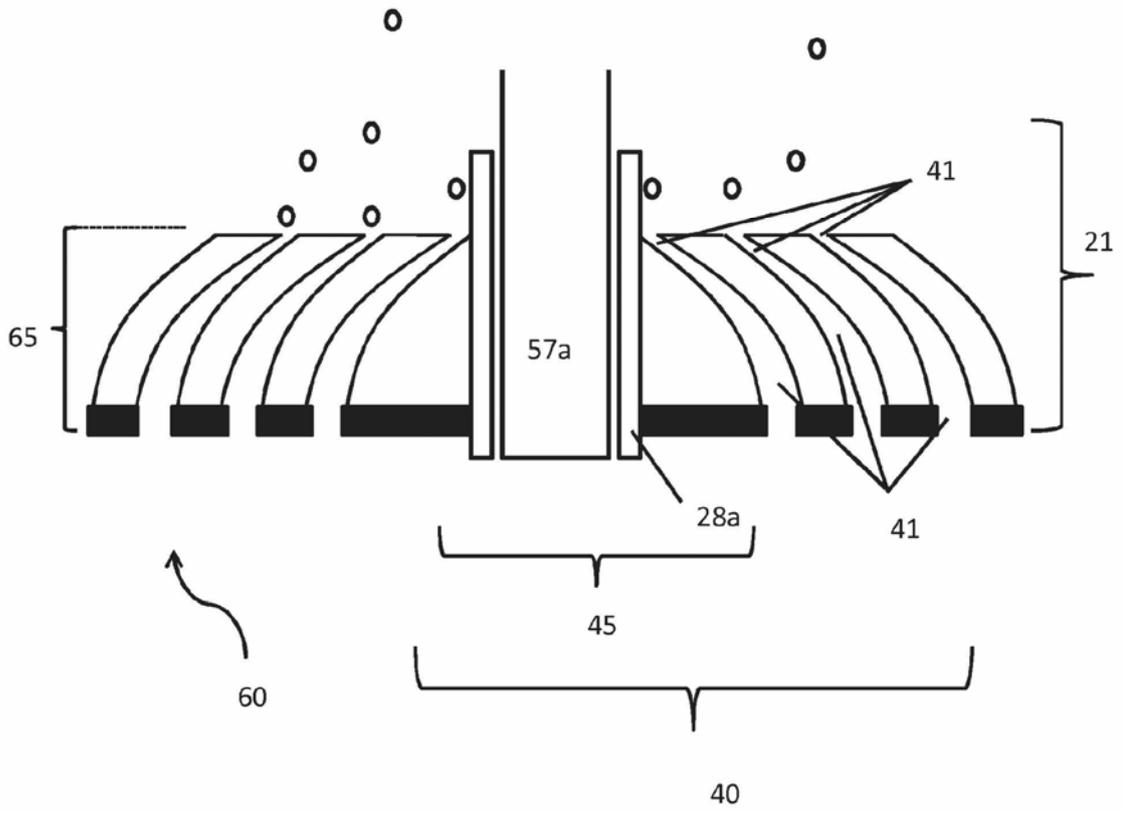


Figura 4

A

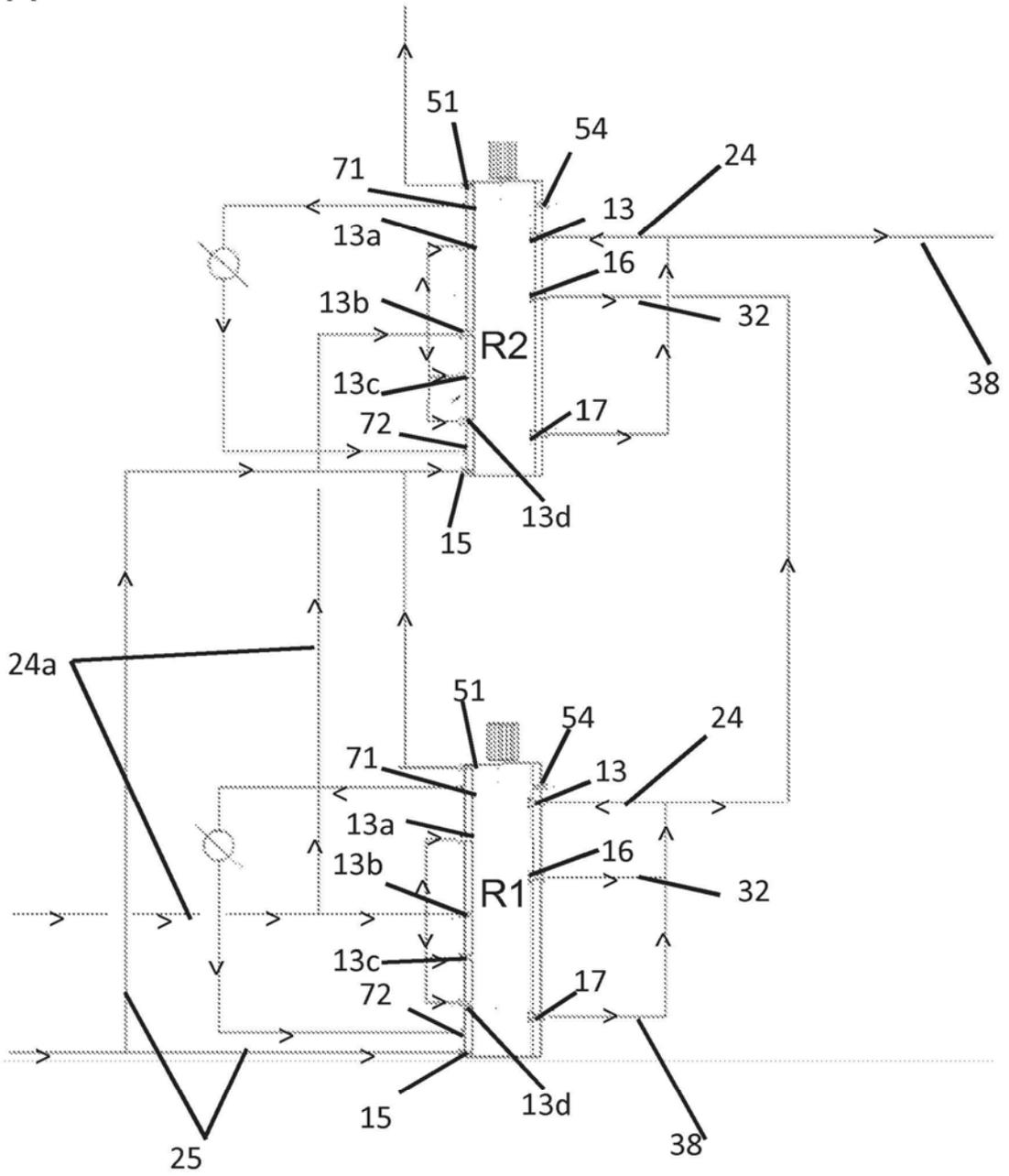


Figura 5

B

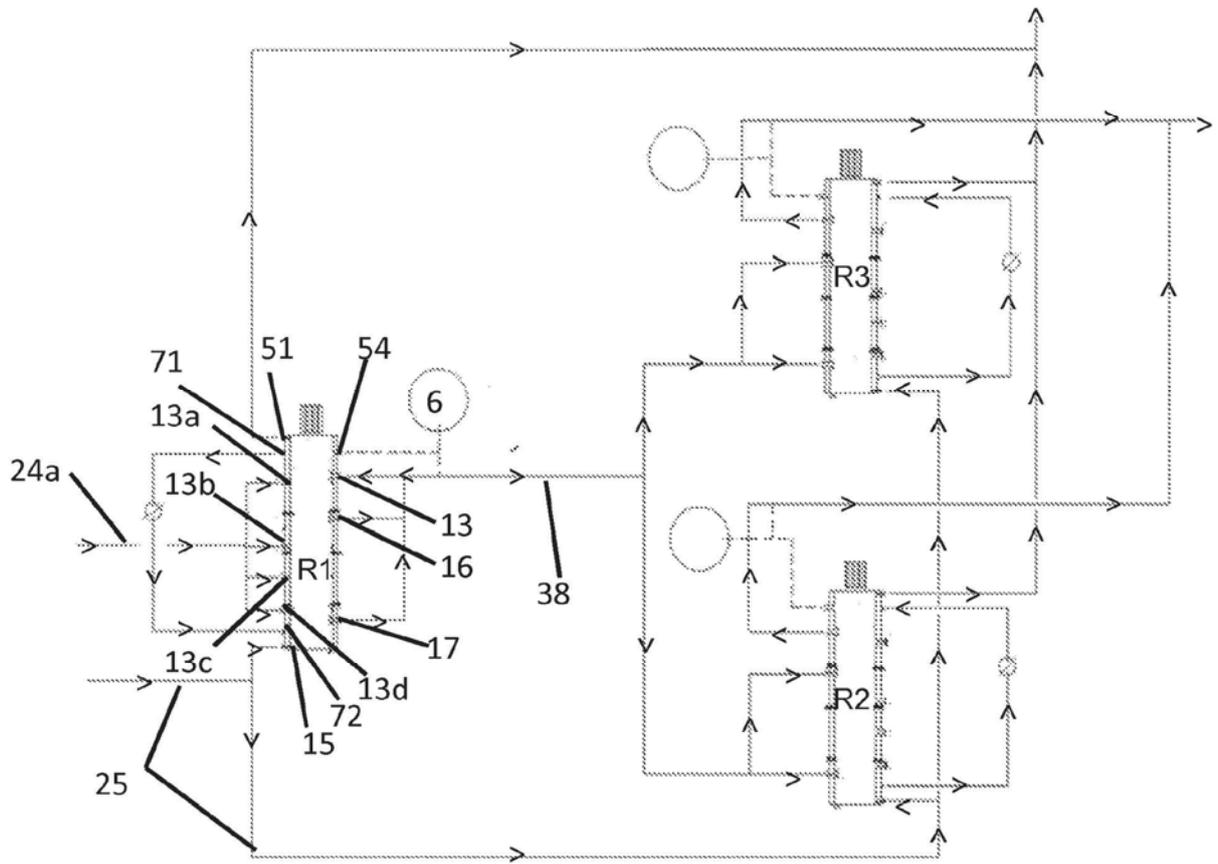


Figura 5