

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 993 713**

51 Int. Cl.:

B01D 53/02 (2006.01)

B01J 20/00 (2006.01)

B01D 53/62 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.07.2021** **PCT/US2021/042834**

87 Fecha y número de publicación internacional: **27.01.2022** **WO22020634**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.07.2021** **E 21846455 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.07.2024** **EP 4076701**

54 Título: **Aparato, método y sistema para la captura directa de aire utilizando la desorción por radiación de excitación electromagnética de sorbentes de amina sólida para liberar dióxido de carbono**

30 Prioridad:

22.07.2020 US 202063055285 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
07.01.2025

73 Titular/es:

ATWOOD, MATTHEW (100.00%)
2629 7th Street
Berkeley, CA 94710-2509, US

72 Inventor/es:

ATWOOD, MATTHEW

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 993 713 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

Aparato, método y sistema para la captura directa de aire utilizando la desorción por radiación de excitación electromagnética de sorbentes de amina sólida para liberar dióxido de carbono

Campo de la invención

La presente invención se refiere a métodos, composiciones y dispositivos para capturar de manera eficiente el dióxido de carbono de la atmósfera y regenerar los sorbentes usados para capturar el dióxido de carbono.

Antecedentes de la invención

Las emisiones de gases de efecto invernadero antropogénicos son la principal causa de calentamiento global, con el dióxido de carbono como el principal contribuyente que procede de tanto fuentes puntuales como emisiones distribuidas. Aunque la captura de carbono después de la combustión es una estrategia de mitigación efectiva a corto plazo para combatir las emisiones de dióxido de carbono, las tecnologías de carbono negativo deben emplearse para evitar emisiones excesivas de dióxido de carbono ya que un tercio de las emisiones de dióxido de carbono proviene de fuentes puntuales y la ampliación de las tecnologías para la captura y el almacenamiento de carbono después de la combustión son desafiantes y han progresado lentamente.

Las emisiones netas de dióxido de carbono (CO₂) que incluyen no solo los requisitos domésticos cumplidos por los servicios de energía, el transporte, el uso del suelo, la agricultura, sino también la producción industrial es un componente crítico para estabilizar la temperatura media global. Algunos servicios de energía tales como el calentamiento y enfriamiento ya sea de naturaleza doméstica o industrial pueden obtenerse al generar electricidad a partir de fuentes de energía renovables. Sin embargo, los procesos industriales que necesariamente utilizan y liberan dióxido de carbono en la atmósfera presentan un problema con consecuencias graves. Adicionalmente, el dióxido de carbono es un producto usado ampliamente en la industria para una amplia variedad de propósitos tales como en los sectores de alimentación y bebidas y agricultura. HAKAN NIGAR Y OTROS: "Amine-functionalized mesoporous silica: A material capable of CO₂ adsorption and fast regeneration by microwave heating", AICHE JOURNAL, JOHN WILEY & SONS, INC, Estados Unidos, vol. 62, núm. 2, 15 de diciembre de 2015 (15-12-2015), páginas 547-555, XP071011574, ISSN: 0001-1541, DOI: 10.1002/AIC.15118 y HAKAN NIGAR Y OTROS: "Removal of VOCs at trace concentration levels from humid air by Microwave Swing Adsorption, kinetics and proper sorbent selection", SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY, vol. 151, 1 de septiembre de 2015 (01-09-2015), páginas 193-200, XP055973302, NL; ISSN: 1383-5866, DOI: 10.1016/j.seppur.2015.07.019 describen explícitamente la adsorción y desorción de CO₂ mediante el uso de sistemas y métodos de adsorción por oscilación de microondas.

Resumen de la invención

Las características técnicas esenciales de la presente invención se definen explícitamente en las redacciones de las reivindicaciones independientes 1, 4 y 10. Otras características técnicas de la invención se definen explícitamente en las redacciones de las reivindicaciones dependientes.

En una modalidad de la presente invención, la eliminación del dióxido de carbono de la atmósfera se lleva a cabo mediante el uso de DAC con un sorbente y la liberación del dióxido de carbono mediante el uso de irradiación de microondas (MW) para regenerar el sorbente. En una modalidad de la presente invención, la eliminación del dióxido de carbono de la atmósfera se lleva a cabo mediante el uso de DAC con un sorbente de poliamina y la liberación del dióxido de carbono mediante el uso de irradiación de microondas (MW) para regenerar el sorbente de poliamina. En una modalidad de la presente invención, la eliminación del dióxido de carbono de la atmósfera se lleva a cabo mediante el uso de DAC con un sorbente de poliamina y la liberación del dióxido de carbono mediante el uso de irradiación de radiofrecuencia (RF) para regenerar el sorbente de poliamina. En una modalidad de la presente invención, el sorbente de poliamina puede ser polietilendiimina (PEI). En una modalidad de la presente invención, los sorbentes de PEI pueden injertarse o cargarse sobre soportes sólidos. En una modalidad de la presente invención, los soportes sólidos pueden ser de acetato de celulosa, gamma alúmina, titania o dióxido de sílice de acetato de celulosa funcionalizado. En una modalidad alternativa de la presente invención, el sorbente de poliamina puede ser material sorbente de dióxido de sílice de acetato de celulosa funcionalizado con PEI ramificada. En una modalidad de la presente invención, el consumo de energía de irradiación de MW puede monitorearse para optimizar el tiempo necesario para la regeneración eficiente del sorbente de poliamina y de esta manera aumentar la eliminación de dióxido de carbono. En una modalidad de la presente invención, una tecnología de oscilación de MW utiliza contactores de flujo laminar con sorbentes de amina sólida acoplados con una etapa de desorción de oscilación de MW (MWSD). En una modalidad de la presente invención, puede emplearse un mecanismo continuo para mover los contactores a través de la cavidad de desorción de MW. En una modalidad alternativa de la presente invención, puede emplearse un proceso para mover la cavidad resonante y la guía de ondas alrededor del material sorbente.

Breve descripción de las figuras

Esta invención se describe con respecto a las modalidades específicas de la misma. Los aspectos adicionales pueden apreciarse a partir de las Figuras en las cuales:

La Figura 1A es un diagrama esquemático que muestra uno de una pluralidad de los contenedores 1040 con contactores monolíticos asociados 1035 en los que el sorbente se asocia (no etiquetado) expuesto a un flujo laminar de aire 1060 generado por un ventilador 1030, de acuerdo con una modalidad de la invención;

La Figura 1B es un diagrama esquemático que muestra un contenedor 1040 con contactores monolíticos asociados 1035 en los que el sorbente se asocia (no etiquetado) insertado a través de una entrada sellable al gas 1045 en una cavidad resonante 1015 en la que una fuente de microondas o radiofrecuencia 1010 y una guía de ondas 1080 se usan para irradiar el sorbente, donde se usa un puerto de vacío 1025 para evacuar dióxido de carbono, de acuerdo con varias modalidades de la invención; y la Figura 1C es un diagrama esquemático que muestra un contenedor 1040 con contactores monolíticos asociados 1035 en los que el sorbente se asocia (no etiquetado) insertado a través de una entrada sellable al gas 1045 en una cavidad resonante 1015 en la que una fuente de microondas o radiofrecuencia 1010, una guía de ondas 1080 y un elemento de sintonización 1070, se usan para irradiar el sorbente, donde un puerto de vacío 1025, bomba de vacío 1020 evacúa el dióxido de carbono, de acuerdo con varias modalidades de la invención.

Descripción detallada de la invención

Definiciones

El término de transición “que comprende” es sinónimo de “que incluye”, “que contiene” o “caracterizado por”, es inclusivo o abierto y no excluye elementos o etapas del método no mencionados, adicionales.

La frase de transición “que consiste de” excluye cualquier elemento, etapa, o ingrediente no especificado en la reivindicación, pero no excluye componentes o etapas adicionales que no están relacionados con la invención tales como impurezas comúnmente asociadas con una composición.

La frase de transición “que consiste esencialmente de” limita el alcance de una reivindicación a los materiales o etapas especificadas y a aquellos que no afectan materialmente la(s) característica(s) básica(s) y novedosa(s) de la invención reivindicada.

Un metal comprende uno o más elementos que consisten de litio, berilio, boro, carbono, nitrógeno, oxígeno, sodio, magnesio, aluminio, silicio, fosforoso, azufre, potasio, calcio, escandio, titanio, vanadio, cromo, manganeso, hierro, cobalto, níquel, cobre, zinc, galio, germanio, arsénico, selenio, rubidio, estroncio, itrio, zirconio, niobio, molibdeno, tecnecio, rutenio, rodio, paladio, plata, cadmio, indio, estaño, antimonio, telio, cesio, bario, lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio, samarium, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio, lutecio, hafnio, tantalio, tungsteno, renio, osmio, iridio, platino, oro, mercurio, talio, plomo, bismuto, polonio, francio y radio.

Un plástico comprende uno o más de poliestireno, poliestireno de alto impacto, polipropileno, policarbonato, polietileno de baja densidad, polietileno de alta densidad, polipropileno, acrilonitrilo butadieno estireno, éter polifenílico aleado con poliestireno de alto impacto, poliestireno expandido, éter de polifenileno y poliestireno impregnado con pentano, una mezcla de éter de polifenileno y poliestireno impregnado con pentano o polietileno y polipropileno.

Un polímero comprende un material sintetizado a partir de uno o más reactivos seleccionados del grupo que comprende de estireno, propileno, carbonato, etileno, acrilonitrilo, butadieno, cloruro de vinilo, fluoruro de vinilo, tereftalato de etileno, tereftalato, tereftalato de dimetilo, bis-beta-tereftalato, ácido naftaleno dicarboxílico, ácido 4-hidroxibenzoico, ácido 6-hidroxinaftaleno-2-carboxílico, monoetilenglicol (1,2 etanodiol), ciclohexileno-dimetanol, 1,4-butanodiol, 1,3-butanodiol, poliéster, ciclohexano dimetanol, ácido tereftálico, ácido isoftálico, metilamina, etilamina, etanolamina, dimetilamina, hexametilamina diamina (hexano-1,6-diamina), pentametileno diamina, metiletanolamina, trimetilamina, aziridina, piperidina, N-metilpiperidina, formaldehído anhidro, fenol, bisfenol A, ciclohexanona, trioxano, dioxolano, óxido de etileno, cloruro de adipilo, adipico, ácido adipico (ácido hexanodioico), ácido sebácico, ácido glicólico, lactida, caprolactona, ácido aminocaproico, aziridina y o una mezcla de dos o más materiales sintetizados a partir de la polimerización de estos reactivos.

Un ‘contactor’ es un crisol usado para poder contener o contener el sorbente. En una modalidad de la presente invención, el contactor es parcialmente transparente a la radiofrecuencia o microondas. En una modalidad alternativa de la invención, el contactor contiene grupos específicos unidos covalentemente para permitir la absorción de radiofrecuencia o microondas específicas. En una modalidad de la presente invención, el contactor se fabrica a partir de politetrafluoroetileno (PTFE), polímeros con constantes dieléctricas bajas, cerámicas a base de alúmina, corindón, cerámicas a base de titanio, zeolitas, cuarzo fundido o una ferrita para minimizar la absorción en la frecuencia de la cavidad resonante. En una modalidad de la presente invención, el contactor se fabrica a partir de una cerámica porosa. En una modalidad de la presente invención, la cerámica porosa es un silicato, un aluminosilicato, una diatomita, carbono, corindón, carburo de silicio o cordierita. En una modalidad alternativa de la presente invención, el contactor puede ser acetato de celulosa. En una modalidad alternativa de la presente invención, el contactor puede ser sílice

mesoporosa. En una modalidad alternativa de la presente invención, el contactor se fabrica a partir de un ferromagnético cubierto de vidrio. En una modalidad alternativa de la presente invención, el contactor se fabrica a partir de MnFe_2O . En una modalidad alternativa de la presente invención, el contactor se impregna de PTFE con moléculas no acuosas que contienen el grupo hidroxilo. En otra modalidad alternativa de la presente invención, el contactor es PTFE derivatizado con grupos hidroxilo.

Una cavidad resonante significa un recipiente adecuado para la desorción de dióxido de carbono por radiofrecuencia y/o microondas.

Un sorbente es un material que es capaz de formar un enlace con moléculas de dióxido de carbono presentes en el aire. Las moléculas de dióxido de carbono en un material de alimentación que se va a procesar se absorben o adsorben por el sorbente. En una modalidad de la invención, el material de alimentación es la atmósfera. En una modalidad de la presente invención, el sorbente es un sorbente de poliamina. En una modalidad de la presente invención, el sorbente es un plástico impregnado con una amina. En una modalidad de la presente invención, el sorbente se selecciona del grupo que consiste en PEI lineal, PEI ramificada, dióxido de sílice de acetato de celulosa funcionalizado con PEI lineal, dióxido de sílice de acetato de celulosa funcionalizado con PEI ramificada, poli(alilamina) PAA y poli(propilenimina) PPI.

Una entrada sellable al gas significa una abertura que separa el exterior (por ejemplo, de una cavidad resonante) del interior, a través de la cual los materiales tales como contactores pueden pasar de un lado al otro (por ejemplo, al cargar una cavidad resonante con un contactor) que cuando se sella limita una pluralidad de moléculas de gas que pasen de un interior al exterior. En una modalidad de la invención, una entrada sellable al gas de una cavidad resonante con una bomba de vacío unida es capaz de mantener una presión diferencial de vacío entre el exterior y el interior de la entrada sellable al gas de aproximadamente 0,2 bar. En este intervalo aproximadamente significa más o menos treinta (30) por ciento.

Una cavidad se ajusta para proporcionar un calentamiento uniforme significa calentar a través del diseño de las dimensiones geométricas de la cavidad de procesamiento y puede incluir la manipulación activa de las ondas electromagnéticas permanentes a través de una variedad de métodos tales como el movimiento de un material dieléctrico a través de la cavidad, agitar o mover un material absorbente de microondas a través de la cavidad.

Medios implementados unidos, fijados, adheridos, insertados, o asociados de cualquier otra manera. Un depósito es un recipiente usado para contener uno o más de un líquido, una muestra gaseosa o una sólida.

En la siguiente descripción, se describirán varios aspectos de la presente invención. Sin embargo, será evidente para los expertos en la técnica que la presente invención puede practicarse con solo algunos o todos los aspectos de la presente invención. Con fines explicativos, se exponen números, materiales y configuraciones específicas para proporcionar una comprensión exhaustiva de la presente invención. Sin embargo, será evidente para un experto en la técnica que la presente invención puede practicarse sin los detalles específicos. En otros casos, las características bien conocidas se omiten o simplifican para no oscurecer la presente invención.

Dióxido de carbono y CO_2 se usan indistintamente en la presente descripción.

La Captura Directa de Aire (DAC) implica la eliminación y concentración de dióxido de carbono del aire y se considera una estrategia de trayectoria de mitigación de carbono atractiva y escalable si el dióxido de carbono se aísla geológicamente o se convierte hacia arriba en materiales tales como concreto, polímeros y fibras de carbono. La DAC tiene el potencial de lograr emisiones negativas netas a escala multi GT/y para el año 2050. Sin embargo, las tecnologías, costos y etapas del proceso involucradas con la DAC pueden limitar su aplicación a modalidades a mayor escala que no son adecuadas para la adopción en el mercado que requieren compresión, licuación, almacenamiento y transporte del dióxido de carbono al cliente comercial. La producción in situ de dióxido de carbono a partir de la DAC a industrias existentes que usan dióxido de carbono puede disminuir los costos del dióxido de carbono a los clientes y proporcionar un suministro más sostenible a la vez que se cumplen los objetivos/requisitos de reducción de emisiones.

La DAC requiere el contacto de dióxido de carbono del aire sobre un sorbente seguido de la desorción del dióxido de carbono para recoger el gas. Existen dos métodos predominantes para la captura de dióxido de carbono actualmente en el estado de comercialización o precomercialización – soluciones acuosas alcalinas y aminas. Para cada método, hay un sistema preferido de liberación o extracción del dióxido de carbono. Los sistemas de 'extracción por vapor' suministran la energía requerida para romper un enlace químico de amina-dióxido de carbono cuando se usan aminas para capturar el dióxido de carbono. Los sistemas de amina se describen generalmente en dos categorías: contactores de amina líquida y contactores de amina sólida (que incluyen los MOF atados con amina). Sin embargo, las aminas pueden degradarse bajo condiciones de oxidación y a temperaturas elevadas o en la presencia de humedad o vapor. Los sistemas líquidos alcalinos entran en contacto con dióxido de carbono del aire a una solución alcalina acuosa para formar carbonatos los cuales luego se descomponen mediante el uso de calor para producir dióxido de carbono que requiere grandes costos de capital y energía y no se prestan a aplicaciones que se ajustan al mercado de dióxido de carbono del comercio sin transporte.

La DAC requiere el contacto de dióxido de carbono del aire sobre un sorbente seguido de la desorción del dióxido de carbono para recoger el gas. Actualmente existen dos métodos predominantes para la captura de dióxido de carbono (i) la absorción a través de soluciones acuosas alcalinas y (ii) la adsorción a través de la quimiosorción de aminas o la fisisorción de zeolitas. Los sistemas de solución acuosa alcalina entran en contacto con dióxido de carbono gaseoso (del aire) con una solución alcalina acuosa para formar carbonatos, de esta manera eliminar el dióxido de carbono del aire. Los carbonatos se descomponen luego mediante el uso de calor para generar el dióxido de carbono y regenerar la solución alcalina. El proceso requiere grandes costos de capital y altos costos de energía. El proceso no se presta a aplicaciones que se ajusten al mercado de dióxido de carbono del comercio sin transporte. Los sistemas de amina se describen generalmente en dos categorías: contactores de amina líquida y contactores de amina sólida (polimérica), que incluyen Armazones Orgánicos de Metal (MOF) atados con amina. Los sistemas de amina polimérica sólida generalmente se impregnan o se injertan sobre estructuras de soporte porosas tales como sílice, arcillas, zeolitas y carbonos. Los sistemas de DAC de amina polimérica requieren regeneración de CO₂ mediante calor (adsorción de oscilación térmica TSA), presión (adsorción de oscilación de vacío VSA) o una combinación (adsorción de oscilación de vacío térmica TVSA).

El CO₂ es útil para la industria y la DAC permite la utilización de suministros más rentables y sostenibles de CO₂ a mercados existentes y futuros. Adicionalmente, el CO₂ suministrado desde la DAC puede reemplazar las fuentes de CO₂ existentes usadas en la industria que finalmente aumentan la carga atmosférica de CO₂. La DAC puede usarse para cumplir con los requisitos de reducción de emisiones de la industria.

Las consideraciones de primer orden al diseñar sistemas de DAC son a) el costo de energía de poner en contacto dióxido de carbono con el sorbente, b) la regeneración del sorbente, y c) el costo de capital y mantenimiento del sistema.

La DAC requiere mover grandes volúmenes de masa de aire a través del contactor sorbente debido a las bajas concentraciones de CO₂ en el aire. Por lo tanto, el costo de energía de poner en contacto el dióxido de carbono mediante el movimiento del aire dicta que los contactores de baja caída de presión tales como los contactores de flujo laminares son muy preferidos sobre modalidades alternativas, ya que la caída de presión y por lo tanto el consumo de energía del contacto de flujo laminar tiene una relación lineal con la velocidad del aire, mientras que el flujo turbulento aumenta con el cuadrado de velocidad del aire y por lo tanto es exponencialmente más costoso. En el contactor de flujo laminar, el dióxido de carbono se conduce hacia los sitios de captura de amina principalmente a través del gradiente de difusión perpendicular al flujo de aire, y de forma secundaria debido a las fuerzas de cizallamiento presentes en el flujo laminar. Además, la caída de presión a través del contactor es lo suficientemente baja como para no contribuir significativamente al costo total del proceso. Los contactores monolíticos extrudidos tales como los que se usan en conversores catalíticos de automóviles tienen excelentes propiedades tanto como maximizan el área superficial por caída de presión permitiendo una alta transferencia de masa de adsorción de dióxido de carbono en el régimen de flujo laminar.

Debido al hecho de que la DAC requiere el contacto de bajas concentraciones de dióxido de carbono del aire a altos regímenes de flujo de masa, se prefieren velocidades de aire más altas para maximizar la cantidad de CO₂ capturado en un volumen de contactor dado. Esto requiere una caída de presión exponencialmente mayor y por lo tanto un costo de energía. En el régimen de flujo laminar dentro del contactor monolítico, el dióxido de carbono se conduce hacia los sitios de captura de amina principalmente a través de un gradiente de difusión que es perpendicular al flujo de aire, y de forma secundaria debido a las fuerzas de cizallamiento presentes en el flujo laminar. Por lo tanto, un contactor de régimen de flujo laminar maximiza la transferencia de masa mientras que minimiza los costos de energía asociados con la DAC activa. Un régimen de flujo laminar se prefiere adicionalmente sobre el flujo turbulento ya que la fuerza de difusión para la captura de dióxido de carbono ocurre rápidamente y es una fuerza impulsora que no requiere una entrada de energía adicional distinta del movimiento de aire en el régimen de flujo laminar. La Figura 1A es un diagrama esquemático que muestra uno de una pluralidad de los contenedores 1040 con contactores monolíticos asociados 1035 en los que el sorbente se asocia (no etiquetado) expuesto a un flujo laminar de aire 1060 generado por un ventilador 1030, de acuerdo con una modalidad de la invención.

La desorción representa el mayor costo de energía para la DAC, aunque puede hacerse un argumento de que aprovechar el calor residual reduce los costos de desorción; sin embargo, este enfoque limita el potencial de mercado de la DAC al requerir la coubicación con las fuentes de calor térmico residual.

Los contactores monolíticos disponibles comercialmente maximizan el área superficial por caída de presión permitiendo una alta transferencia de masa de adsorción de dióxido de carbono en el régimen de flujo laminar. Para la DAC, la carga de dióxido de carbono de los contactores es una función de la velocidad del aire, la carga de amina y las eficiencias innovadoras de dióxido de carbono. También son adecuados contactores de flujo laminar alternativos con suficiente porosidad.

$$P = v_{aire} * A * Pd * 1/Eff_{ventilador}$$

Ecuación 1

Donde P es el requisito de potencia (energía) para el movimiento del aire a través de un contactor, v es la velocidad del aire dada en m/s, A es el área superficial frontal del contactor dada en m², Pd es la caída de presión dada en Pa (J/m³) y Eff es la eficiencia del ventilador.

- 5 En una modalidad de la invención, al operar en el régimen de flujo laminar un sorbente puede lograr hasta el 80% de captura de dióxido de carbono.

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_{aire} * C_{CO_2} = \rho_{aire} * v * A * C_{CO_2} \quad \text{Ecuación 2}$$

- 10 El régimen de flujo de masa de dióxido de carbono se da por la densidad de aire a STP en kg/m³, v es la velocidad del aire en m²/s, A es el área superficial en sección transversal del contactor en m², C_{CO2} es la concentración de dióxido de carbono en el aire (que es el 0,04 %).

$$m_{CO_2 \text{ captura}} = \dot{m}_{CO_2} * Eff_{CO_2} * D_{adsorción} \quad \text{Ecuación 3}$$

- 15 Donde Eff_{CO2} es de hasta el 80 % y D_{ads} es el 90 %. Por lo tanto, la masa de la captura de dióxido de carbono es de 6,5 kg/h de dióxido de carbono, que a 806W de potencia es de 124,5 kWh/MT (448 kJ/kg) de dióxido de carbono. Dadas las limitaciones de las eficiencias de ventilador y las concentraciones de aire de dióxido de carbono, las formas principales de aumentar la eficiencia energética de la captura de dióxido de carbono a través de los contactores de flujo laminares es disminuir la caída de presión (improbable) o aumentar la transferencia de masa de dióxido de carbono lo cual requeriría aumentar la EFF_{CO2}, D_{ads} o V_{aire}.

- 25 En una modalidad de la presente invención, el sorbente de poliamina puede ser polietilenimina lineal (PEI), PEI ramificada, aziridina, dietilenetriamina, trietilentetramina, dietileanetriamino organosilano, y aminopropil organosilano. En una modalidad alternativa de la presente invención, el sorbente de poliamina puede ser sorbente de dióxido de sílice de acetato de celulosa funcionalizado con PEI lineal, material sorbente de dióxido de sílice de acetato de celulosa funcionalizado con PEI ramificada, PEI lineal incorporada en un armazón orgánico de metal, PEI ramificada incorporada en un armazón orgánico de metal, y amina incorporada en un armazón orgánico de metal. En otra modalidad alternativa de la presente invención, el sorbente de poliamina puede ser un material mesoporoso seleccionado del grupo que consiste en M41S, FSM-16 y SBA-15 modificado con grupos amino tales como MCM-41 de polietileno, o 3-trimetoxisililpropil dietilentriamina SBA-15. En una modalidad alternativa de la presente invención, pueden usarse sorbentes alternativos de mayor capacidad de adsorción y materiales contactores alternativos con la MWSD. Por ejemplo, algunos materiales sorbentes de amina-sílice que se conoce que se degradan en cierta medida en la presencia de vapor pueden ser útiles con la presente invención cuando la desorción es bajo condiciones suficientemente anhidras.

- La tecnología convencional de extracción por vapor emplea un mecanismo de desorción que aprovecha una combinación de vacío y vapor a baja temperatura para proporcionar un mecanismo rápido y razonablemente eficiente de desorción de dióxido de carbono mientras se reduce el mecanismo de desactivación principal de oxidación de la amina a temperaturas elevadas. Se ha medido que la energía de adsorción para la PEI es aproximadamente 94 kJ/mol, o 2350 kJ/kg de dióxido de carbono. Sin embargo, se informa que los datos empíricos de sistemas diseñados comercialmente con múltiples monolitos requieren aproximadamente 5000 kJ/kg de dióxido de carbono. El enfriamiento del monolito para la adsorción cíclica ocurre a través de las superficies húmedas del contactor que se secan a través del flujo de aire a través de la disipación de la masa térmica del contactor que se pierde al ambiente. Como resultado, la energía latente de la masa térmica del sistema de desorción es difícil de recuperar, limitando la eficiencia energética y la exergía del sistema general.

El calor de la desorción se da por la Ecuación 4 para los procesos de regeneración isotérmica tradicionales:

$$Q_r = \frac{\lambda}{w_w} C_{p,s}(T_{de} - T_{ad}) + -\Delta H_a + \frac{Q_v F_{H_2O}}{q_w} \quad \text{Ecuación 4}$$

- Donde el calor de regeneración Q_r (kJ/kg de dióxido de carbono adsorbido), q_w es la capacidad de trabajo del sorbente en % en peso (típicamente entre el 8-10 % para la PEI), C_{p,s} es el calor específico del adsorbente (kJ/kgK) alrededor de 1,81, T_{de} es la temperatura de desorción, T_{ad} es la temperatura de adsorción (delta típica alrededor de 60), y H_a es el calor de adsorción (kJ/kg de dióxido de carbono) alrededor de 95, Q_v es el calor de vaporización del agua a STP (2257,6 kJ/kg), F_{H2O} es la absorción de humedad del aire en el sorbente, los dos últimos son dependientes de la humedad relativa presente durante la adsorción e hidrofiliidad del sorbente.

- La cabeza total de desorción se da por la Ecuación 5:

$$Q_{total} = (1 - \alpha)Q_r + (1 - \beta)Q_c + (1 - \gamma)Q_s \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde Q_c es la energía térmica requerida para el calor latente del contactor ($C_{p,c} \cdot dT$) y Q_s es la energía requerida para los restantes componentes del sistema húmedo. La recuperación térmica se considera en el diseño completo del sistema en donde $Q_r > Q_s > Q_c$; sin embargo, la eficiencia de recuperación de calor de $Q_s \gg Q_r$ & Q_c debido al enfriamiento evaporativo del contactor y el polímero.

La eficiencia de la segunda ley de la etapa de desorción dada por H_a/Q_r , y la eficiencia total de la segunda ley se da por $(H_a + RT \ln(P/P_o))$ donde P es la presión final de dióxido de carbono puro, P_o es la presión parcial inicial, R es la constante de gas ideal y T es la temperatura de trabajo.

La carga típica del sorbente sobre el contactor es aproximadamente del 30-40 % en peso. En este intervalo aproximadamente significa más o menos un veinte (20) por ciento. En VSA y TVSA convencionales, los componentes de desorción del sistema se hacen más grandes y requieren más masa con un área superficial frontal del contactor aumentada para proporcionar estabilidad estructural para la presión reducida de desorción que aumenta la masa térmica, reduciendo la eficiencia térmica con un área superficial frontal del contactor más grande y aumenta los costos totales de capital y energía.

Irradiación de Radiofrecuencia

La irradiación de radiofrecuencia (RF) incluye ondas de radio y microondas (MW). La irradiación de RF es la irradiación electromagnética oscilante en el intervalo de frecuencia de 20 kHz a 1 GHz. Típicamente, la RF por debajo de aproximadamente 1 GHz se calienta a través de la conducción iónica, mientras que por encima de 1 GHz, la MW se calienta a través del calentamiento de dipolo. En una modalidad alternativa de la presente invención, la irradiación de RF a aproximadamente 27,2 MHz, a temperatura ambiente se usará para excitar el enlace de carbamato. En otra modalidad de la presente invención, la irradiación de RF a aproximadamente 42 MHz a temperatura ambiente se usará para excitar el enlace de carbamato. En otra modalidad alternativa de la presente invención, la irradiación de RF a aproximadamente 915 MHz a temperatura ambiente se usará para excitar el enlace de carbamato. En este intervalo aproximadamente significa más o menos un veinte por ciento. En otra modalidad alternativa de la presente invención, el sustrato se calienta indirectamente (sin excitar directamente el enlace) lo que resulta en la excitación del enlace de carbamato.

Irradiación de Microondas

La irradiación de MW es la irradiación electromagnética en el intervalo de frecuencia de 1 GHz a 300 GHz. En una modalidad de la presente invención, la irradiación de MW a aproximadamente 2,45 GHz a temperatura ambiente se usará para excitar el enlace de carbamato. En este intervalo aproximadamente significa más o menos un veinte por ciento. Los hornos de MW domésticos de 'cocina' y la mayoría de los reactores de MW dedicados para la síntesis química operan a una frecuencia de 2,45 GHz (que corresponde a una longitud de onda de 12,24 cm) para evitar interferencias con las frecuencias de telecomunicaciones y telefonía celular. La energía del fotón de MW en esta región de frecuencia (0,0016 eV) la cual es generalmente demasiado baja para romper los enlaces químicos y también es menor que la energía del movimiento browniano. En consecuencia, la irradiación de microondas a una frecuencia de 2,45 GHz requiere energía adicional para inducir reacciones químicas. Típicamente, la RF por debajo de aproximadamente 1 GHz se calienta a través de la conducción iónica, mientras que por encima de 1 GHz, la MW se calienta a través del acoplamiento de calentamiento de dipolo al campo de la RF.

El calentamiento de MW se produce mediante interacciones moleculares directas con la radiación de MW que proporciona un calentamiento instantáneo y volumétrico sin las restricciones de transferencia de calor y las pérdidas de calor asociadas con los modos de calentamiento conductivo o convectivo convencionales. Las microondas interactúan directamente con las moléculas de una mezcla de reacción que transfiere energía de manera más rápida y eficiente que las técnicas de convección que dependen de la conductividad térmica donde el calor se transfiere a todo el conjunto de reactor hasta que se alcanza la temperatura de desorción objetivo. Las microondas interactúan con moléculas a través de dos métodos: la rotación de dipolo y la conducción iónica.

La química potenciada con microondas se basa en el calentamiento eficiente de materiales mediante efectos de 'calentamiento dieléctrico de microondas'. Este fenómeno depende de la capacidad de un material específico (solvente o reactivo) para absorber energía de MW y convertirla en calor. El componente eléctrico de un campo electromagnético provoca el calentamiento mediante dos mecanismos principales: la polarización dipolar y la conducción iónica. La irradiación de la muestra a frecuencias de MW da como resultado que los dipolos o iones se alineen en el campo eléctrico aplicado. A medida que el campo aplicado oscila, el campo de dipolo o iones intenta realinearse con el campo eléctrico alterno y, en el proceso, la energía se pierde en forma de calor a través de la fricción molecular y la pérdida dieléctrica. La cantidad de calor generado por este proceso está directamente relacionada con la capacidad de la matriz para alinearse con la frecuencia del campo aplicado. Si el dipolo no tiene tiempo suficiente para realinearse, o se reorienta demasiado rápido con el campo aplicado, no se produce calentamiento. La frecuencia asignada de 2,45 GHz usada en todos los sistemas comerciales se encuentra entre estos dos extremos y da al dipolo molecular tiempo para alinearse en el campo, pero no para seguir el campo alterno con precisión.

En una modalidad de la presente invención, una tecnología de oscilación de MW utiliza contactores de flujo laminar con sorbentes de amina sólida acoplados con la etapa de la MWSD. En una modalidad de la presente invención, puede emplearse un mecanismo continuo para mover los contactores a través de la cavidad de desorción de MW. En una modalidad alternativa de la presente invención, puede emplearse un proceso para mover la cavidad resonante y la guía de ondas alrededor del material sorbente.

La presencia de humedad o cualquier hidratación atmosférica de la amina resonará con energía de MW, añadiendo de esta manera energía térmica adicional al enlace sorbente-CO₂.

En la práctica, el calentamiento de MW genera ondas permanentes en base a las dimensiones de la cavidad resonante y la frecuencia que se correlacionan con los puntos calientes/altos de energía, y los puntos fríos/bajos de energía. En una modalidad de la presente invención, al generar una distribución uniforme de energía/calentamiento por todo el sistema puede garantizarse una desorción casi completa del dióxido de carbono. A medida que los enlaces de carbamato resuenan dentro del campo, el factor de pérdida ($\tan \delta$) cambiará hasta que la desorción de dióxido de carbono se produzca, afectando el patrón de onda.

En una modalidad de la presente invención, la energía de radiación de MW puede monitorearse para optimizar el tiempo necesario para la regeneración eficiente del sorbente y de esta manera aumentar la productividad y eficiencia del proceso de eliminación de dióxido de carbono. En una modalidad de la invención, un generador de microondas puede acoplarse a una cavidad resonante específicamente diseñada para la desorción de dióxido de carbono con un amplificador de Clase A/B que operará como un oscilador cuando reciba retroalimentación de la cavidad para excitar oscilaciones moleculares en el sorbente. En una modalidad de la presente invención, se usará un agitador de campo de ventilador (agitador de onda o agitador mecánico) para modificar las oscilaciones moleculares en el sorbente enlazado al dióxido de carbono generado por la irradiación de MW, que afecta los patrones de onda permanente. En una modalidad de la presente invención, se usará un reflector de ondas para modificar las oscilaciones moleculares en el sorbente enlazado al dióxido de carbono generado por la irradiación de MW. En una modalidad alternativa de la presente invención, el generador de microondas se adapta para permitir el escaneo entre frecuencias variables para optimizar el proceso de desorción. En otra modalidad alternativa de la presente invención, el generador de microondas se adapta para permitir la modulación de ancho de pulso. En una modalidad de la presente invención, el generador de microondas puede usarse para asegurar un calentamiento parejo en la cavidad de desorción que permite una desorción rápida y completa de dióxido de carbono con ciclos de trabajo de adsorción más altos y un enfriamiento más rápido, cuando se compara con el calentamiento convencional. Cuando se presentan con una mezcla de diferentes dieléctricos, las microondas se acoplarán selectivamente al componente de pérdida dieléctrica más alta. En una modalidad de la invención, el sistema puede configurarse para modularse por autofrecuencia permitiendo que el dispositivo busque automáticamente frecuencias que maximicen la desorción de dióxido de carbono y dirijan la energía de MW específicamente hacia el enlace de desorción. En un resultado inesperado, la MWSD puede dirigirse específicamente a la entalpía de la desorción sin calentar una cantidad significativa de masa térmica del contactor además de la energía mínima requerida para la desorción. La Figura 1B es un diagrama esquemático que muestra un contenedor 1040 con contactores monolíticos asociados 1035 en los que el sorbente se asocia (no etiquetado) insertado a través de una entrada sellable al gas 1045 en una cavidad resonante 1015 en la que una fuente de microondas o radiofrecuencia 1010, y una guía de ondas 1080 se usan para irradiar el sorbente, donde el dióxido de carbono se expulsa a través de un puerto de vacío 1025. En una modalidad de la invención, la cavidad resonante 1015 se adapta para moverse en relación con el contenedor 1040 para formar un sello de gas. Adicionalmente, la utilización de energía de MW requiere equipos de bajo costo de capital, no requiere agua para la transferencia de calor convectiva y es fácilmente escalable. Si hay agua presente, se acoplará al campo y se calentará. La Figura 1C es un diagrama esquemático que muestra un contenedor 1040 con contactores monolíticos asociados 1035 en los que el sorbente se asocia (no etiquetado) insertado a través de una entrada sellable al gas 1045 en una cavidad resonante 1015 en la que una fuente de microondas o radiofrecuencia 1010, una guía de ondas 1080 y un elemento de sintonización 1070, se usan para irradiar el sorbente, donde un puerto de vacío 1025, y una bomba de vacío 1020 evacúan dióxido de carbono. La Figura 1A es un diagrama esquemático que muestra uno de una pluralidad de los contenedores 1040 con contactores monolíticos asociados 1035 en los que el sorbente se asocia (no etiquetado) expuesto.

A medida que el campo aplicado oscila, el campo de dipolo o iones intenta realinearse con el campo eléctrico alterno y, en el proceso, la energía se pierde en forma de calor a través de la fricción molecular y la pérdida dieléctrica. La cantidad de calor generado por este proceso está directamente relacionada con la capacidad de la matriz para alinearse con la frecuencia del campo aplicado. Si el dipolo no tiene tiempo suficiente para realinearse, o se reorienta demasiado rápido con el campo aplicado, no se produce calentamiento. La frecuencia asignada de 2,45 GHz usada en la mayoría de los sistemas comerciales se encuentra entre estos dos extremos y da al dipolo molecular tiempo para alinearse en el campo, pero no para seguir el campo alterno de manera precisa.

Las características de calentamiento de un material particular (por ejemplo, un solvente) bajo condiciones de irradiación de MW dependen de sus propiedades dieléctricas. La capacidad de una sustancia específica para convertir energía electromagnética en calor a una frecuencia y temperatura dadas se determina por el llamado factor de pérdida $\tan \delta$. Este factor de pérdida se expresa como el cociente $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$, donde ϵ'' es la pérdida dieléctrica, que es indicativa de la eficiencia con la que la radiación electromagnética se convierte en calor, y ϵ' es la constante dieléctrica

que describe la capacidad de las moléculas para polarizarse por el campo eléctrico. Se requiere un medio de reacción con un valor de $\tan\delta$ alto para la absorción eficiente y, en consecuencia, para un calentamiento rápido.

Seguimiento del Punto de Máxima Energía

En una modalidad de la presente invención, el Seguimiento del Punto de Máxima Energía (MPPT) puede usarse para optimizar la disposición estructural de los componentes entre la fuente de MW, la ubicación de los contactores, la posición del sorbente y en los contactores, y la densidad de energía de las microondas y la geometría de las microondas. Hay dos componentes en el MPPT, la retroalimentación instrumental y el control por software que resultan en la capacidad de cambiar la densidad de energía de las microondas y/o la geometría de las microondas para proporcionar un calentamiento más eficiente del sorbente. En una modalidad de la presente invención, la retroalimentación del MPPT entre algún sensor dentro del dispositivo que puede determinar ya sea a) cuánta energía se absorbe por el sorbente, o b) que el campo EM proporciona un calentamiento uniforme por todo el aparato sorbente. En una modalidad de la presente invención, la retroalimentación del MPPT puede usarse para asegurar la desorción del dióxido de carbono enlazado entre un límite inferior de aproximadamente el cuarenta (40) por ciento y un límite superior de aproximadamente el noventa (90) por ciento y para optimizar las condiciones experimentales del proceso de desorción. En este intervalo aproximadamente significa más o menos un veinte (20) por ciento.

El coste de la DAC dominante se asocia con los requisitos de calor sensible del contactor monolítico

Se ha demostrado que los contactores monolíticos de canal paralelo extruidos comercialmente disponibles impregnados con sorbentes de amina sólida son una modalidad preferida para la adsorción de dióxido de carbono del aire debido a su disponibilidad comercial, baja caída de presión, alta capacidad de dióxido de carbono y estabilidad cíclica. Los elementos clave en el diseño de un proceso de DAC práctico y comercial son (i) la capacidad de sorción, (ii) la cinética de sorción, (iii) la baja caída de presión, (iv) la regeneración práctica del sorbente y (v) larga vida útil del sorbente

La PEI es la amina preferida actual porque se ha encontrado que es altamente estable y mantiene suficiente capacidad de absorción de dióxido de carbono en presencia de ciclos de vapor repetidos de hasta 120 °C. Sin embargo, se conoce que los materiales sorbentes de amina-sílice usados más comúnmente se degradan en cierta medida en la presencia de vapor. La PEI es un material ampliamente disponible comercialmente que puede fabricarse a gran escala y está disponible en una serie de configuraciones con diferentes propiedades químicas-físicas, y puede fabricarse mediante el uso de diferentes métodos que incluyen el calentamiento de MW. Se ha hecho un trabajo significativo que muestra que se han mostrado que son preferidos monolitos de baja caída de presión de canal paralelo con altos volúmenes de mesoporo y paredes totalmente adsorbentes frente a recubrimiento sellador. Muchos otros sorbentes con eficiencias más altas de carga de amina o unión de dióxido de carbono se han probado con resultados variables a la estabilidad a través de ciclos repetidos a temperaturas más altas que no se prestan a utilizar calor residual.

Varios estudios y datos de procesos empíricos han mostrado que la contribución dominante en el costo a la DAC basada en adsorción se asocia con los requisitos de calor sensibles del monolito y el adsorbente, que varían del 50-70%, que no son fácilmente recuperables en procesos monolíticos de regeneración de vapor.

Se ha demostrado que el material de corderita comercialmente disponible contribuye significativamente (25-45%) al costo total del proceso en gran medida debido a su alta capacidad calorífica específica. La utilización de otros materiales mesoporosos con menores capacidades caloríficas específicas tales como gamma-alúmina ha sido objeto de un desarrollo significativo debido a su C_p que es aproximadamente la mitad de la para corderita (0,8 frente a 1,4 Jg⁻¹K⁻¹).

Se ha hecho un trabajo significativo en la utilización de materiales alternativos tales como gamma-alúmina para el contactor mesoporoso, los MOF, los sorbentes de fibra hueca de polímero y otros.

En una modalidad de la invención, la modalidad de DAC utiliza contactores mesoporosos de baja caída de presión de bajo costo con aminas disponibles comercialmente y estables y utiliza un proceso de desorción que maximiza las eficiencias de la segunda ley y el ciclo de trabajo de adsorción. La tecnología propuesta utiliza los contactores de flujo laminar disponibles comercialmente preferidos (monolitos mesoporosos de canal paralelo de corderita y extruidos) con sorbentes de amina sólida disponibles comercialmente acoplados con una etapa de desorción asistida por microondas. Debido a la naturaleza del enlace de carbamato de dióxido de carbono-amina, el carbamato resultante exhibe una carga dipolo e iónica que son directamente excitables a través de campos electromagnéticos presentes en la radiación de MW. Adicionalmente, los monolitos contactores y los sorbentes magros de dióxido de carbono no tienen fuertes momentos de dipolo en comparación con el enlace de carbamato o sorbente-CO₂, y por lo tanto son en gran medida transparentes a las microondas. Una vez que el sorbente captura dióxido de carbono, el enlace de carbamato resultante exhibe un dipolo que resuena en presencia del campo electromagnético de frecuencia de MW hasta que se libera el dióxido de carbono. Una vez liberado, el sorbente tiene un dipolo significativamente reducido y una capacidad significativamente reducida para absorber la energía. Por lo tanto, un sistema puede diseñarse de manera que la energía usada durante la etapa de desorción puede usarse principalmente para la desorción, maximizando la eficiencia

de la segunda ley de la desorción y reduciendo la trayectoria de desactivación de la amina primaria de oxidación a temperaturas más altas.

En una modalidad de la invención, los requisitos de diseño clave son: (i) transferencia de masa suficiente de adsorción de dióxido de carbono acoplado con un consumo de energía de desorción y tiempos de ciclo eficientes; (ii) régimen de flujo laminar para maximizar la transferencia de masa mientras se minimizan los costos de energía asociados con la adsorción; y (iii) adsorción de dióxido de carbono mediante difusión en un flujo de masa de aire alta. Los contactores monolíticos disponibles comercialmente maximizan el área superficial por caída de presión permitiendo una alta transferencia de masa de adsorción de dióxido de carbono en el régimen de flujo laminar. La tecnología emplea un mecanismo de desorción que aprovecha una combinación de vacío y vapor a baja temperatura que juntos proporcionan un mecanismo de desorción de dióxido de carbono mientras que reduce el mecanismo de desactivación principal de oxidación de amina a temperaturas de regeneración.

En una modalidad de la invención, puede añadirse agua al contactor antes de la desorción por microondas

Aunque los sistemas, métodos, y dispositivos se han ilustrado al describir los ejemplos, no es intención de los solicitantes restringir o limitar de alguna manera el alcance de las reivindicaciones adjuntas a tal detalle. Por supuesto, no es posible describir cada combinación concebible de componentes o metodologías con fines de describir los sistemas, métodos, y dispositivos proporcionados en la presente descripción. Las ventajas y modificaciones adicionales serán fácilmente evidentes para los expertos en la técnica. Por lo tanto, la invención, en sus aspectos más amplios, no se limita a los detalles específicos, el sistema y método o dispositivo representativos mostrados y descritos.

Por lo tanto, esta solicitud pretende abarcar alteraciones, modificaciones, y variaciones que caen dentro del alcance de las reivindicaciones anexas. Además, la descripción anterior no significa que limite el alcance de la invención. Más bien, el alcance de la invención debe determinarse mediante las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método para capturar moléculas de dióxido de carbono del aire con liberación contenida de moléculas de dióxido de carbono que comprende:
 - (A) exponer un contactor (1035) en el que un sorbente de poliamina se asocia con el contactor (1035) a un flujo de aire, en donde el flujo de aire es laminar, donde una pluralidad de moléculas de dióxido de carbono forman un enlace con el sorbente de poliamina;
 - (B) introducir el contactor (1035) en una cavidad resonante (1015) que comprende:
 - (a) una entrada sellable al gas adaptada para sellar la cavidad resonante (1015) con el contactor (1035) dentro de la cavidad resonante (1015);
 - (b) un puerto de vacío (1025) en conexión gaseosa con una bomba de vacío (1020); y
 - (c) un generador de microondas (1010) adaptado para conectarse electromagnéticamente a la cavidad resonante (1015), donde el generador de microondas (1010) se adapta para seleccionar una frecuencia de microondas para optimizar la ruptura del enlace con el sorbente de poliamina;
 - (C) sellar la cavidad resonante (1015);
 - (D) evacuar la cavidad resonante sellada (1015);
 - (E) irradiar el sorbente de poliamina con la frecuencia de microondas seleccionada para liberar la pluralidad de moléculas de dióxido de carbono en la cavidad resonante (1015); y
 - (F) eliminar la pluralidad de moléculas de dióxido de carbono en la cavidad resonante (1015) a través del puerto de vacío (1025) mediante el uso de la bomba de vacío (1020).
2. El método de conformidad con la reivindicación 1, donde un contenido de humedad de la cavidad resonante (1015) en la etapa (D) se reduce entre:
 - un límite inferior de aproximadamente el 10 por ciento; y
 - un límite superior de aproximadamente el 80 por ciento.
3. El método de la reivindicación 1, donde el flujo de aire está entre:
 - un límite inferior de aproximadamente 0,5 m²/s; y
 - un límite superior de aproximadamente 10 m²/s.
4. Un dispositivo continuo de captura directa de aire (DAC) que comprende:
 - una etapa móvil;
 - una pluralidad de contactores (1035) ubicados en la etapa móvil;
 - un sorbente de poliamina asociado con cada uno de la pluralidad de contactores monolíticos (1035), en donde el sorbente de poliamina es capaz de formar un enlace con una pluralidad de moléculas de dióxido de carbono en el aire; una bomba de vacío (1020);
 - una salida, donde la salida se adapta para permitir que un flujo laminar de aire pase sobre el sorbente de poliamina asociado con cada uno de la pluralidad de contactores monolíticos (1035), una cavidad resonante (1015) que comprende:
 - una o ambas de una entrada sellable y una salida sellable adaptadas para permitir que uno o más de la pluralidad de contactores (1035) entren a la cavidad resonante (1015) y para sellar la cavidad resonante (1015) que contiene el uno o más de la pluralidad de contactores (1035);
 - un puerto de vacío en conexión gaseosa con la bomba de vacío adaptada para evacuar la cavidad resonante sellada; y
 - un generador de microondas (1010) adaptado para conectarse electromagnéticamente a la cavidad resonante (1015), donde el generador de microondas (1010) se adapta para seleccionar una frecuencia de microondas para optimizar la ruptura del enlace entre el sorbente de poliamina y la pluralidad de moléculas de dióxido de carbono que liberan la pluralidad de moléculas de dióxido de carbono en el puerto de vacío, donde la pluralidad de moléculas de dióxido de carbono gaseoso liberadas por el generador de microondas (1010) se eliminan de la cavidad resonante (1015) a través del puerto de vacío.
5. El dispositivo de DAC continuo de conformidad con la reivindicación 4, donde el generador de microondas (1010) se adapta para variar la frecuencia de microondas para optimizar la desorción de la pluralidad de moléculas de dióxido de carbono.
6. El dispositivo de DAC continuo de conformidad con la reivindicación 4, donde la frecuencia de microondas está entre:

un límite inferior de aproximadamente 0,9 GHz; y
un límite superior de aproximadamente 1 GHz.

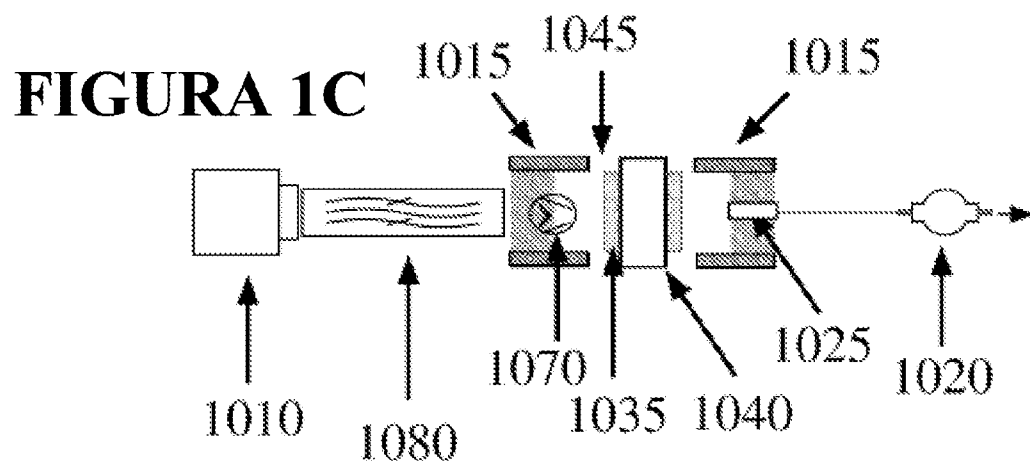
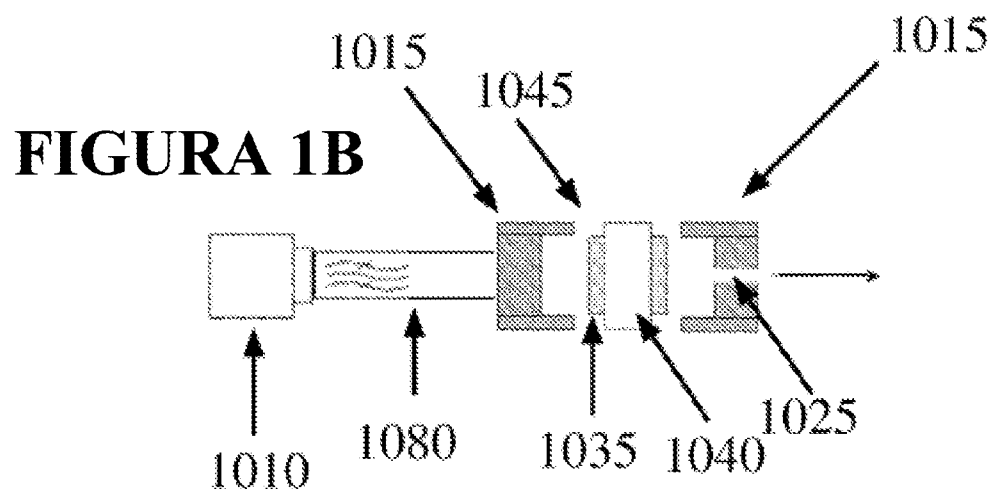
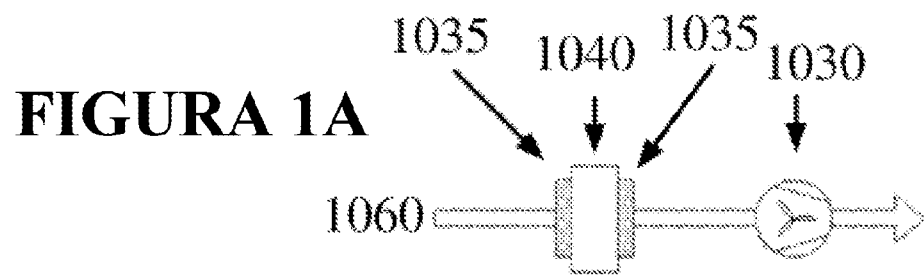
- 5 7. El dispositivo de DAC continuo de conformidad con la reivindicación 4, donde el generador de microondas (1010) se adapta para optimizar la irradiación a frecuencias entre:

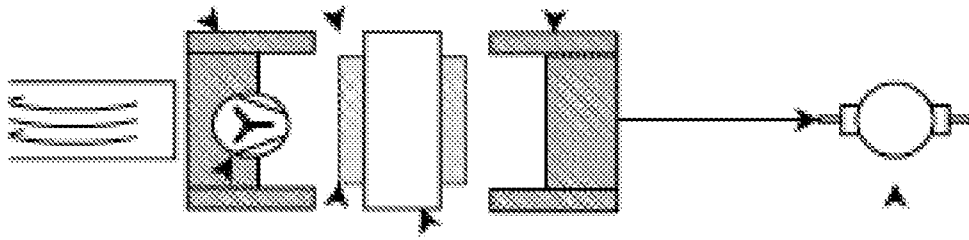
un límite inferior de aproximadamente 100 kHz ; y
un límite superior de aproximadamente 1 GHz.
- 10 8. El dispositivo de DAC continuo de conformidad con la reivindicación 4, donde la bomba de vacío (1020) reduce la presión en la cavidad resonante (1015) a entre:

un límite inferior de aproximadamente 0,2 bar; y
un límite superior de aproximadamente 0,8 bar.
- 15 9. El dispositivo de DAC de conformidad con la reivindicación 4, donde el sorbente de poliamina se selecciona del grupo que consiste en polietilenimina lineal (PEI), PEI ramificada, aziridina, dietilenetriamina, trietilenetetramina, dietileanetriamino organosilano, aminopropil organosilano, sorbente lineal de dióxido de sílice de acetato de celulosa funcionalizado con PEI, material sorbente de dióxido de sílice de acetato de celulosa funcionalizado con PEI ramificada, PEI lineal incorporada en un armazón orgánico de metal, PEI ramificada incorporada en un armazón orgánico de metal, amina incorporada en un armazón orgánico de metal, polietileno MCM-41, y 3-trimetoxisililpropil dietilenetriamina SBA-15.
- 20 10. Un método de fabricación de moléculas de dióxido de carbono a partir de un dispositivo de DAC continuo que comprende introducir un flujo laminar de aire en una cavidad resonante que comprende

una entrada,
una salida,
una etapa móvil,
30 un contactor y un sorbente de poliamina asociado con el contactor, donde una pluralidad de moléculas de dióxido de carbono presentes en el aire se enlazan covalentemente con el sorbente de poliamina, e

irradiar el sorbente de poliamina con la frecuencia de microondas generada por un generador de microondas, donde el generador de microondas se adapta para seleccionar una frecuencia de microondas para optimizar la ruptura del enlace entre el sorbente de poliamina y la pluralidad de moléculas de dióxido de carbono que liberan
35 las moléculas de dióxido de carbono.





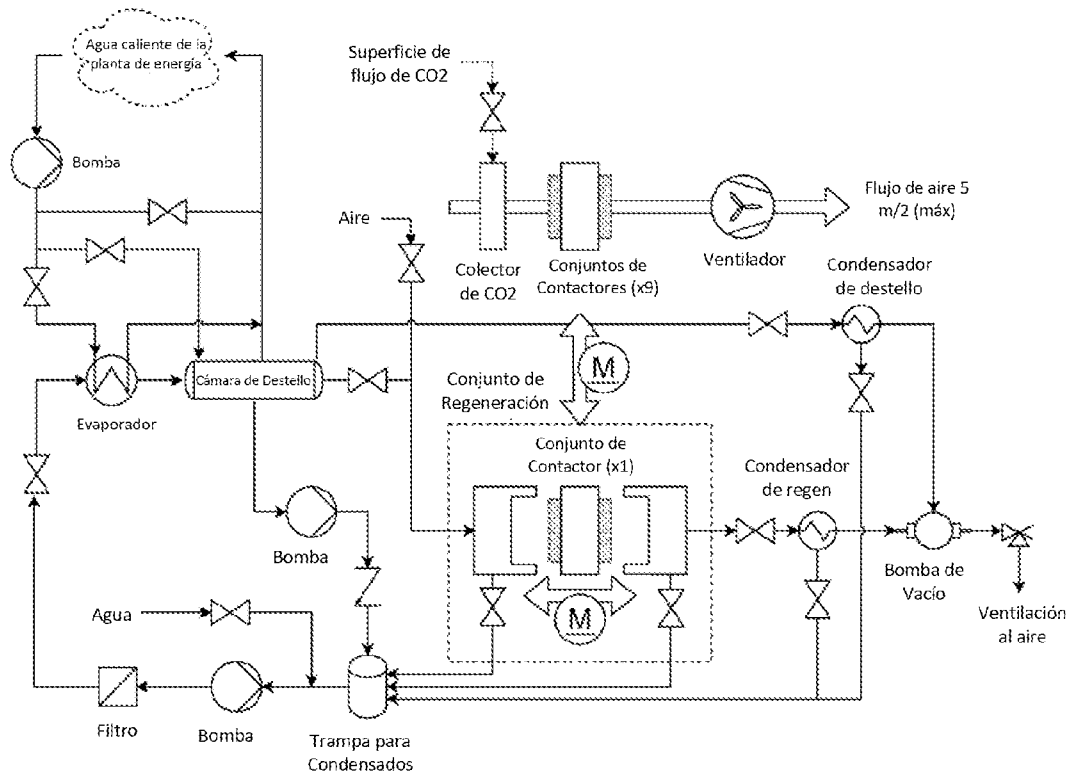


FIGURA 2