

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 983 625**

51 Int. Cl.:

B01D 63/02 (2006.01)
B01D 67/00 (2006.01)
B01D 69/08 (2006.01)
C02F 3/20 (2013.01)
B01D 71/06 (2006.01)
B01D 65/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.09.2017 PCT/EP2017/074922**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.04.2018 WO18060510**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.09.2017 E 17787341 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.07.2024 EP 3519084**

54 Título: **Una membrana de fibra hueca autoenrollable**

30 Prioridad:

01.10.2016 EP 16191999

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

24.10.2024

73 Titular/es:

**OXYMEM LIMITED (100.0%)
Blyry Business and Commercial Park
Athlone, Co. Westmeath N37 CK06, IE**

72 Inventor/es:

**SYRON, EOIN;
SEMMENS, MICHAEL;
WHELAN, MALCOLM;
GEANEY, JOHN;
COOMBES, NIGEL;
BYRNE, WAYNE y
HEFFERNAN, BARRY**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 983 625 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

Una membrana de fibra hueca autoenrollable

5 **Campo de la invención**

Esta invención se refiere a membranas que se usan para la transferencia de gas, hacia y desde un líquido, hacia y/o desde una capa química o biológicamente activa en la superficie de la membrana, o para la filtración de sólidos de líquido en el agua o la industria de transformación. En particular, la invención se refiere a membranas de fibra hueca que son autoenrollables; y en las que el diámetro de la espiral se reduce y el paso de la espiral aumenta cuando está bajo tensión; y cuando se libera (elimina) la tensión, la membrana vuelve a su estado natural autoenrollado, sin dañar las membranas.

15 **Antecedentes de la invención**

Las membranas se utilizan cada vez más como dispositivos de separación en una multitud de procesos diferentes, desde la industria sanitaria y farmacéutica hasta la industria del agua y las aguas residuales. Debido a la compacidad de los módulos de membrana, su alta área de superficie específica por unidad de volumen y su coste cada vez menor, los procesos de separación basados en membranas se están volviendo cada vez más comunes en la industria y en el mundo en general. Las membranas se producen generalmente como fibras huecas o láminas planas. Estas unidades básicas pueden disponerse alrededor o conectarse a soportes para lograr diferentes configuraciones, por ejemplo, las láminas planas pueden configurarse para crear módulos enrollados en espiral y las fibras huecas pueden tejerse o entrelazarse juntas para formar una tela. Estas membranas y sus configuraciones de módulo se mantienen típicamente en su lugar mediante marcos y soportes estructurales rígidos, y pueden estar confinadas dentro de una carcasa o cubierta. Diferentes diseños pueden permitir un movimiento limitado de las membranas o pueden restringirse y mantenerse en una posición fija mediante el marco, que a su vez está alineado y conectado a otros marcos. Las membranas de fibra hueca están conectadas a al menos un colector/cabezal a través del cual el fluido que pasa a través de la pared de la membrana se suministra o se extrae del lumen de la membrana. En muchos casos, las membranas de fibra hueca están conectadas a dos cabezales, uno en cada extremo de la fibra hueca.

Cuando los líquidos fluyen sobre la superficie exterior o interior de una membrana, se desarrolla una capa límite de líquido debido a la condición antideslizante en la superficie de la membrana. El espesor de la capa límite es una función del número de Reynolds local (afectado por la viscosidad cinemática del líquido y la velocidad del líquido más allá de la membrana) y la distancia que el fluido recorre sobre la superficie de la membrana como se ilustra en la Figura 1. Habitualmente, la capa límite crece en espesor desde el borde delantero de la superficie de la membrana hasta que alcanza un espesor de estado estable máximo. Como resultado, la difusión controla el transporte de masa a través de esta capa límite y se forman gradientes de concentración a través de la capa límite. En aplicaciones de transferencia de gas, esta capa límite gruesa actúa como una "película líquida" que rodea la membrana y, a menudo, limita la tasa de transferencia de gas a través de la membrana y se dice que la transferencia de masa está "controlada por difusión de película líquida". En aplicaciones de filtración, los contaminantes rechazados por la membrana, tanto en partículas como moleculares, se acumulan en la capa límite y solo pueden escapar de vuelta a la solución a granel mediante difusión. Por lo tanto, la filtración también se controla por difusión de película, y la acumulación de contaminantes cerca de la membrana se denomina comúnmente "polarización por concentración". En resumen, la capa límite de líquido que se desarrolla en la superficie de la membrana afecta gravemente al rendimiento de las aplicaciones de proceso de membrana. En aplicaciones de filtración, es habitual el retrolavado del permeado a través de la membrana para romper y dispersar las partículas o moléculas acumuladas en el límite.

Se han realizado muchos estudios para encontrar formas de minimizar el impacto del control de difusión de película líquida para que se pueda realizar todo el potencial de transferencia de masa de la membrana. Desafortunadamente, cualquier intento de reducir el espesor de la capa límite conlleva una penalización energética. Las altas velocidades del agua aumentan el cizallamiento y reducen el espesor de la capa límite, pero incurren en caídas de presión más altas y requieren más energía de bombeo. La aireación, que utiliza burbujas para romper las capas límite y aumentar el cizallamiento, requiere compresión de gas. Fomentar que el agua fluya normal a los ejes de las membranas de fibra hueca (flujo cruzado), en lugar de paralela a la longitud de las fibras (flujo paralelo) puede reducir drásticamente el espesor de la capa límite, ya que la capa límite tiene poca distancia para desarrollarse en flujo cruzado, sin embargo, el flujo cruzado viene con arrastre y caídas de presión más altas. Además, el flujo cruzado no es factible con módulos de membrana de fibra hueca sumergidos y flojos, ya que las fibras se empujan entre sí y se reduce el área de superficie efectiva de las fibras. Muchos otros enfoques que incluyen flujo pulsátil, vórtices de Dean, ultrasonidos, sistemas de vibración, etc. sufren todos de la misma penalización de mayores costes de energía, y ninguno de estos métodos puede aplicarse realmente de manera efectiva a módulos de membrana sumergidos. Se han realizado algunos trabajos para investigar una desviación de la configuración general de fibra hueca paralela (Yang et al, 2011 y 2014). En ese estudio, se utilizaron fibras de membrana porosas, cilíndricas pero rizadas y tejidas con espaciador hechas de difluoruro de polivinilideno (PVDF) en módulos para destilación por membrana. Si bien se aumentó la mejora del flujo, la forma rizada de la membrana se logró mediante un proceso adicional, en este

caso, el tratamiento térmico de la membrana enrollada alrededor de una varilla de acero inoxidable que se llevó a cabo después de la fabricación. La forma de las membranas rizadas no era adaptable ya que el ángulo de enrollamiento se fijaba a 60° y no podía cambiarse o alterarse cuando estaba en funcionamiento.

- 5 Es un objeto de la presente invención superar al menos uno de los problemas mencionados anteriormente.

Sumario de la invención

10 El objeto de la presente invención es evitar o mantener al mínimo el desarrollo de capas límite gruesas sobre las superficies exteriores de las membranas de fibra hueca, mientras se minimiza la penalización de energía asociada. Se ha demostrado que las membranas rizadas o enrolladas tienen características de transferencia de masa mejoradas en comparación con las membranas de fibra hueca rectas. Hasta la fecha, todas las membranas con esta naturaleza rizada u ondulada se han fabricado produciendo primero una membrana de fibra hueca y luego usando un enrollamiento u otro mecanismo similar, como una máquina rebordeadora, para doblar o crear el rizado en la membrana. Esto da como resultado un coste y una complejidad adicionales en el proceso de fabricación. El diámetro de la espiral y el paso entre las espirales es entonces regular y el mismo para todas las membranas fabricadas con este proceso. Esto da como resultado el anidamiento de las membranas entre sí y se evita el contacto del líquido con el exterior de cada una de las membranas. La presente invención proporciona membranas con forma de espiral o hemihélice, con un paso y diámetro de espiral irregulares. La estructura tridimensional creada por estas membranas cuando se encapsulan en paquetes tiende a reducir el espesor de capa límite efectivo que puede desarrollarse a medida que el agua fluye alrededor y sobre las fibras en un paquete. El diseño de módulo de membrana descrito en el presente documento utilizando las membranas de la invención reivindicada proporciona trayectorias de flujo de fluido dinámicas intrincadas para el agua que fluye alrededor y a través de grandes paquetes de las membranas de fibra hueca para optimizar el contacto de fluido con las membranas y garantizar que todas las membranas dentro la carcasa de la membrana se utilizan de manera efectiva. Este diseño ofrece un rendimiento de transferencia de masa superior al tiempo que minimiza la entrada de energía requerida.

De acuerdo con la presente invención, se proporciona, como se establece en las reivindicaciones adjuntas, una membrana de fibra hueca que se puede usar para la separación de gases, la eliminación de gases de un líquido, el suministro de gas a un líquido o el suministro de gas a una capa química o bioquímicamente reactiva sobre la superficie exterior de la membrana, tal como una biopelícula o la filtración de sólidos de un líquido. Cuando esta membrana o una matriz de dichas membranas está conectada a un colector en ambos extremos longitudinales, se puede extraer líquido del lumen de la membrana, se puede extraer gas del lumen de la membrana o se puede suministrar gas al lumen de la membrana.

Se proporciona una fibra hueca formada por extrusión que tiene una hemihélice, una forma original helicoidal u ondulada, en la que la membrana se puede estirar hasta 4 veces su longitud original sin deformación plástica, y en donde la forma original de la membrana se produce por el flujo asimétrico de polímero líquido a través de una abertura de un troquel o boquilla.

Cada una de las membranas de fibra hueca tiene forma de hemihélice, una hélice o resorte o espiral, el lumen hueco es continuo a lo largo de toda la longitud de la membrana. El diámetro interno puede variar entre 50 µm y 100 mm de tamaño. Preferiblemente, el diámetro interno puede variar entre 50 µm y 10 mm de tamaño. Idealmente, el diámetro interno puede variar entre 50 µm y 2 mm de tamaño. Debido a que la fibra hueca tiene forma helicoidal/enrollada, siempre hay una parte de la fibra de la membrana que es perpendicular al flujo de líquido a granel, sin importar la dirección del flujo de líquido a granel. Esto significa que no se permite que se desarrolle una gran capa límite a lo largo de la longitud de la fibra hueca.

En aplicaciones donde se produce el ensuciamiento de la membrana, o se fomenta el crecimiento de una capa biológica sobre la superficie de la membrana, tal como un reactor de biopelícula de membrana, la capacidad de cambiar, temporalmente, el diámetro de la espiral y el paso de la espiral de la fibra de la membrana aumentando la distancia entre los cabezales superior e inferior aproximadamente el 1 % y aproximadamente el 200 % de la longitud original de las fibras, volviendo las fibras de la membrana a su diámetro de espiral y paso originales una vez que la distancia entre ambos cabezales ha vuelto a su distancia original del uno al otro. El cambio en el paso y el diámetro de las fibras de la membrana cambia posteriormente (i) la densidad de empaquetamiento de la membrana o (ii) el área de superficie específica (m² del área de superficie de la membrana por m³) del módulo al aumentar el volumen ocupado por el módulo de la membrana. Estos cambios de volumen que se producen dentro del módulo pueden utilizarse para mejorar la limpieza de la membrana, la eliminación de incrustaciones o el control de la biopelícula. Por ejemplo, bajo tensión, o cuando se extiende la distancia entre los cabezales superior e inferior, el diámetro de la espiral se reducirá y el paso de la espiral aumentará, lo que significa que las membranas se volverán más rectas y se acercarán entre sí. Esto también dará como resultado un aumento en el espacio entre cada uno de los grupos de membranas que permite la fácil extracción y lavado de las partículas de suciedad o biomasa desprendidas. Además, el contacto fibra-fibra creado al cambiar la forma de la membrana en forma de hélice/enrollada puede actuar por sí mismo para cizallar y desalojar las incrustaciones y la biopelícula de las superficies de la fibra.

De acuerdo con la presente invención, se proporciona, como se establece en las reivindicaciones adjuntas, una

membrana de fibra hueca, que favorece una forma helicoidal enrollada, rizada o irregular cuando está en un estado destensado. La forma helicoidal enrollada/rizada/irregular de la membrana de fibra es una propiedad natural de la membrana después de la fabricación. La forma helicoidal enrollada, rizada o irregular de la membrana de fibra se crea mediante el flujo asimétrico del polímero fluido que sale del troquel/boquilla, sin necesidad de ningún tratamiento posterior. La fabricación de la membrana es mediante extrusión. El material polimérico puede solidificarse mediante métodos conocidos, tales como enfriamiento o termoendurecimiento. Con cada uno de estos métodos, solidificar la membrana de polímero crea la fibra hueca de membrana con elementos tales como poros de pared, junto con otras propiedades de membrana tales como tortuosidad. Una vez que se ha producido la membrana de fibra hueca de forma helicoidal enrollada/rizada/irregular, generalmente se enrolla en una bobina y se almacena hasta que se fabrica en un módulo. Tradicionalmente, si la membrana va a tener una forma no lineal, esta modificación se ha creado previamente mediante uno de los siguientes métodos:

- Calentar y envolver suavemente la membrana alrededor de un cilindro donde el calor hace que la membrana sea más flexible y permite que adopte la nueva forma sin dañar la membrana. Tanto la membrana como el cilindro se dejan enfriar. Y una vez enfriada, la membrana adopta la forma ondulada enrollada. Este método da como resultado una membrana con una hélice regular que tiene un diámetro y paso de espiral uniformes (Yang et al. 2011)
- Después de que la membrana haya salido de un baño de agua, se empuja entre dispositivos que crean las ondulaciones. (US 5470659)
- Enrollado de cuerda. (Luelfet al. 2016). El enrollado de cuerda líquida también se conoce para fibras de silicona sólidas de Tian *et al.* 2017.

En la presente invención, la naturaleza enrollada de la membrana se crea en el proceso de fabricación de la membrana. Al crear un flujo asimétrico de la membrana de fluido (solución de polímero) en la punta donde la solución sale del troquel o boquilla, la membrana, cuando se solidifica, adopta una forma no lineal/rizada/enrollada/de hemihélice. El flujo asimétrico se crea mediante una combinación de la forma y el tamaño del troquel y la aguja, lo que provoca un flujo asimétrico en el polímero fluido a medida que sale del troquel o boquilla, lo que hace que las membranas, cuando se solidifican, adopten una forma no lineal/rizada/enrollada/de hemihélice.

En una realización, la forma no lineal es una forma helicoidal, una forma de hemihélice o una forma ondulada. En una realización, la abertura del troquel o boquilla tiene un diámetro de al menos 1,01 a 4 veces el diámetro exterior de la membrana de fibra hueca. Preferiblemente, la abertura del troquel o boquilla tiene un diámetro de al menos 1,01 a 3 veces el diámetro exterior de la membrana de fibra hueca. Idealmente, la abertura del troquel o boquilla tiene un diámetro de al menos 1,01 a 2 veces el diámetro exterior de la membrana de fibra hueca.

Cuando se coloca bajo tensión extendiendo la distancia entre los cabezales superior e inferior entre aproximadamente el 1 % y aproximadamente el 200 % del estado natural original (destensado) de la membrana, la forma no lineal de la membrana de fibra hueca tiene su espiral y paso alterados de modo que la membrana de fibra hueca pase de una forma no lineal a una forma sustancialmente lineal. Las espirales irregulares se reducen en diámetro y el paso entre las espirales posteriores aumenta en longitud. Cuando se elimina la tensión de la membrana y la distancia entre los cabezales superior e inferior vuelve a su valor original, la membrana vuelve a su forma rizada original, sin ninguna deformación. Cuando se coloca bajo tensión, la membrana de fibra hueca tiene su paso alterado de modo que la membrana de fibra hueca pasa de una forma no lineal a una forma sustancialmente lineal.

En una realización, cada membrana de fibra hueca define un lumen configurado para contener una fase gaseosa o una fase líquida, que está separada de la fase gaseosa o líquida fuera de la membrana por la pared de membrana. En una realización, la membrana de fibra hueca es permeable a los gases.

En una realización, la membrana de fibra hueca comprende poros de menos de 5 μm

En una realización, la membrana de fibra hueca comprende poros de menos de 5 nm.

En una realización, la membrana de fibra hueca es una membrana densa y sustancialmente libre de poros, pero aún permeable a gases y vapores.

En una realización, un diámetro interno de la membrana de fibra hueca está entre 50 μm y 10 mm.

Preferiblemente, el diámetro interno de la membrana de fibra hueca es de 50 μm y 2 mm.

En una realización, la membrana de fibra hueca tiene una sección transversal interior y exterior cilíndrica. En una realización, la membrana de fibra hueca tiene una sección transversal interior cilíndrica y exterior no cilíndrica. En una realización, la membrana de fibra hueca tiene una sección transversal interior y exterior no cilíndrica.

En una realización, la membrana de fibra hueca tiene una superficie exterior que es desigual o irregular, que incluye salientes o crestas que se extienden hacia fuera desde la superficie exterior de la membrana o con muescas que se extienden hacia dentro.

5 La membrana está hecha de polidimetilsiloxano (PDMS). El material de fabricación es tal que es lo suficientemente elástico para que cuando la distancia entre el cabezal superior e inferior aumente entre aproximadamente el 1 % y el 200 % de su longitud destensada, no se produzca ningún daño permanente en la membrana y la membrana vuelva a su forma y longitud originales. La membrana de fibra hueca puede estirarse hasta 4 veces su longitud sin ninguna deformación plástica de la membrana de fibra. En una realización, la membrana de fibra hueca está configurada para eliminar gas disuelto de un líquido o para disolver gas en un líquido.

10 En una realización, la membrana de fibra hueca está configurada para separar un líquido de una mezcla de ese líquido que contiene partículas sólidas suspendidas.

15 En una realización, cuando está en uso, al menos una parte de la membrana de fibra hueca es siempre perpendicular a un flujo de fluido a granel.

En una realización, la membrana soporta una biopelícula. Preferiblemente, la biopelícula se suministra con un gas desde el lumen de la membrana.

20 De acuerdo con la presente invención, se proporciona una membrana de silicona de fibra hueca que tiene una forma original hemihélice, helicoidal u ondulada; en la que la membrana se puede estirar hasta 4 veces su longitud original sin deformación plástica, tiene una superficie exterior que es desigual o irregular que comprende salientes o crestas que se extienden hacia fuera desde la superficie exterior de la membrana, y en donde la forma original de la membrana se produce por el flujo asimétrico de polímero líquido a través de una abertura de un troquel o una boquilla. La abertura del troquel o boquilla tiene un diámetro de al menos 1,01 a 2 veces el diámetro exterior de la fibra de la membrana hueca.

25 De acuerdo con la presente invención, también se proporciona, como se establece en las reivindicaciones adjuntas, una matriz de membranas de fibra hueca alineadas verticalmente que comprenden membranas de fibra hueca que favorecen una forma enrollada, rizada, helicoidal, de hemihélice o similar a un resorte cuando están en su estado original, en donde las membranas están unidas en cualquier extremo a un colector, y en donde el lumen de la membrana está en comunicación con un espacio interior del colector y el colector puede usarse para suministrar o eliminar líquido o gas hacia o desde el lumen de la membrana.

30 En una realización, cada una de las membranas en la matriz tiene una forma helicoidal, una forma de hemihélice, una forma que se desvía considerablemente de la lineal, de modo que la anchura de la espiral de las membranas destensadas es entre 2,5-50 veces el diámetro exterior de la membrana.

35 En una realización, la membrana tiene una forma en espiral, donde las fibras de la membrana tienen un diámetro de espiral irregular o variable y una longitud de paso irregular o variable.

40 En una realización, cada membrana tiene una forma en espiral y las membranas en la matriz tienen diferentes pasos, diámetro de espiral y dirección de espiral, variando la dirección de espiral entre el sentido horario y el sentido antihorario a lo largo de la longitud de la membrana de fibra hueca.

45 En una realización, la dirección de la forma rizada, forma hemihelicoidal, forma helicoidal, forma enrollada o forma ondulada de cada fibra de la membrana es en una dirección en sentido horario o en una dirección en sentido antihorario, o una combinación de las mismas. En una realización, el cambio en la longitud de las membranas de fibra hueca y la tensión aplicada a las mismas se controla mediante al menos un colector adaptado para moverse en una dirección vertical reversible con respecto al extremo opuesto de la matriz.

50 En una realización, cuando el al menos un colector se mueve en una dirección vertical reversible con respecto al extremo opuesto de la matriz, se produce tensión en la dirección lineal de las membranas de fibra hueca, provocando un cambio en la longitud de las membranas de fibra hueca. El cambio de longitud da como resultado que las membranas cambien de su forma destensada y enrollada (no lineal) a una forma lineal. Como alternativa, cuando el al menos un colector se mueve en una dirección vertical hacia el extremo opuesto de la matriz, la tensión en las membranas de fibra hueca disminuye (destensadas) haciendo que las membranas de fibra hueca vuelvan a su estado enrollado natural. En una realización, un cambio en la forma de las membranas de fibra hueca debido a un aumento en la distancia entre los cabezales superior e inferior altera la estructura 3D de la matriz y cambia el patrón de flujo de líquido alrededor y sobre el área de superficie de la membrana.

55 En una realización, se proporciona una matriz de membranas de fibra hueca descrita anteriormente para su uso en sistemas de tratamiento de agua o de aguas residuales, tales como, pero sin limitación, biorreactores de membrana, filtración de membrana sumergida, reactores de biopelícula de membrana, destilación de membrana, nanofiltración, ósmosis inversa y ósmosis directa. En una realización, la membrana de fibra hueca puede usarse para la filtración

de partículas sólidas o moléculas grandes de un líquido.

En una realización, la membrana de fibra hueca puede usarse para el suministro de gas a un líquido.

5 En una realización, la membrana de fibra hueca puede usarse para la eliminación de gas disuelto de un líquido.

En una realización, la membrana de fibra hueca puede usarse para suministrar una especie reactiva (por ejemplo, gas) directamente a una capa química o bioquímica unida a la superficie exterior de la membrana (por ejemplo, en un reactor de biopelícula de membrana).

10 En una realización, todas las fibras huecas en una matriz siguen la misma dirección de giro (todas tienen una espiral en sentido horario o en sentido antihorario).

15 En una realización, un porcentaje de las fibras huecas en una matriz se enrolla en sentido horario mientras que las membranas restantes se enrollan en sentido antihorario. En una realización, las fibras huecas en una matriz pueden tener espirales tanto en sentido horario como en sentido antihorario.

20 En una realización, se proporciona un método de fabricación de las membranas de fibra hueca hemihelicoidales, helicoidales u onduladas descritas anteriormente, comprendiendo el método las etapas de pasar un polímero líquido a través de una abertura de troquel y alrededor de una aguja que están alineadas asimétricamente, en donde la abertura produce un flujo asimétrico de polímero líquido a medida que sale del troquel o boquilla para producir una membrana enrollada, hemihelicoidal, helicoidal u ondulada.

25 La membrana de fibra hueca se fabrica mediante un proceso de extrusión. Se imparte una tensión adicional extruyendo la membrana de fibra hueca sobre un transportador que funciona a una velocidad mayor que la membrana polimérica fluida que sale del troquel o boquilla. La velocidad del transportador después del horno de curado es de 5 a 600 metros por segundo. Como puede observarse en las figuras adjuntas, la densidad de empaquetamiento de las membranas es variable a lo largo de la longitud debido a la diferencia de tensión entre las diferentes regiones a lo largo de la longitud de la membrana. Este diámetro de espiral, así como el paso entre espirales, varía a lo largo de la longitud de la fibra hueca, es variable con la tensión en la fibra y puede verse influenciado por la dirección y la velocidad del flujo de fluido, alrededor del exterior de las membranas. Adicionalmente, el paso o ángulo de enrollamiento (como lo describe Yang et al, 2011) no es fijo sino que puede ajustarse in situ ajustando la tensión en la longitud de las membranas. El flujo cruzado no es factible con módulos de membrana de fibra hueca, lineales, sumergidos y flojos, ya que las fibras se empujan entre sí y se reduce el área de superficie efectiva de las fibras. La presente invención describe una membrana, que cuando se incorpora en un diseño de módulo de membrana sumergida, puede mantener un área de superficie efectiva alta y proporcionar una transferencia de masa mejorada con baja entrada de energía con flujo cruzado o flujo paralelo.

40 Definiciones

En la memoria descriptiva, el término "sensible a la tracción" o "tensión" debe entenderse que significa que cuando se aplica una fuerza de tensión al extremo o extremos de la fibra hueca, por ejemplo, mediante el aumento de la distancia entre el cabezal superior e inferior, el diámetro de la espiral y el paso entre las espirales (como se define en la Figura 2) de la membrana cambia de forma. El cambio de tensión a lo largo de una membrana de fibra hueca debido a su propio peso se puede observar en la Figura 5B, variando el diámetro de la espiral y la longitud de paso a lo largo de la longitud de la membrana debido a los cambios de tensión a lo largo de la longitud de la membrana. Cuando se usa suficiente tensión para superar la fuerza de autoenrollado del estado natural de las fibras, la fibra hueca se vuelve recta y su longitud se puede extender hasta aproximadamente el 200 % (dos veces) al 1000 % (diez veces) de su longitud original destensada (predispuesta). Cuando se reduce o elimina la tensión, la membrana recupera de nuevo su forma enrollada, helicoidal o rizada original, sin deformación plástica.

55 En la memoria descriptiva, los términos "helicoidal", "enrollada", "rizada", "en forma de resorte", "hemihélice" y "espiral irregular", cuando se usan en relación con la membrana de fibra hueca descrita en el presente documento, deben entenderse como la forma en que la membrana de fibra hueca se encuentra después de la fabricación en su estado destensado (predispuesto). La forma original autoenrollada se forma debido a las tensiones ejercidas sobre el flujo de polímero fluido que sale del troquel/boquilla en el proceso de fabricación antes de convertirse en un sólido y sin ninguna etapa posterior específica de conformación. El término "hemihélice" debe entenderse que significa una forma geométrica curva cuasi-helicoidal caracterizada por una estructura helicoidal que se divide en dos (o más) secciones de quiralidad opuesta, con una transición entre las dos en el medio. En la memoria descriptiva, debe entenderse que la expresión "propiedad natural" o "estado autoenrollado natural" significa que las membranas de fibra hueca descritas en el presente documento no experimentan ninguna modificación posterior a la fabricación, tal como las modificaciones descritas en Yang et al, 2011., Patente de EE. UU. n.º 3,616,928 (engaste mecánico) o Patente de EE. UU. n.º 5,470,659 (engaste mecánico), Patente de EE. UU. n.º 5626758, Moulin et al, 1995, para lograr una forma no lineal. Las membranas de fibra no están tejidas ni rizadas para lograr sus formas rizadas o en forma de resorte o enrolladas o helicoidales

En la memoria descriptiva, debe entenderse que el término "fluido" significa cualquier material que se deforma y es libre de fluir por sí mismo o bajo una tensión de cizalla, e incluye tanto gases como líquidos. Debe entenderse que "líquido" significa un fluido casi incompresible que se adapta a la forma de su recipiente pero retiene un volumen sustancialmente constante independientemente de la presión. Típicamente, un fluido o líquido tiene una viscosidad aparente de menos de 1×10^9 centipoises (1×10^6 Pa·s).

En la memoria descriptiva, la membrana de fibra hueca está compuesta de polidimetilsiloxano (PDMS).

En la memoria descriptiva, debe entenderse que la expresión "reactor de biopelícula de membrana" (Membrane Biofilm Reactor, MBfR) significa un reactor en el que se pretende hacer crecer una capa de biopelícula activa en la superficie de la membrana y pasar un sustrato a través de la pared de la membrana hasta la biopelícula, y donde la biopelícula recibe otro sustrato de la superficie libre en contacto con el fluido circundante, lo que da como resultado una biopelícula de contradifusión. Un ejemplo del MBfR es el reactor de biopelícula aireado de membrana (Membrane Aerated Biofilm Reactor, MABR). En el MABR, una biopelícula se inmoviliza naturalmente en una membrana permeable al oxígeno. El oxígeno se difunde a través de la membrana hacia la biopelícula donde tiene lugar la oxidación de los contaminantes, suministrados en la interfaz de biopelícula-líquido. La tasa de suministro de oxígeno se controla mediante la presión parcial de oxígeno intramembrana (un parámetro de proceso) y el área de superficie de la membrana (un parámetro de diseño). También es un objeto de la presente invención maximizar la tasa de transferencia de masa de los contaminantes de las aguas residuales a la biopelícula degradante de contaminantes evitando la formación de capas límite laminares sobre la superficie de la biopelícula en las aguas residuales contaminadas. El MBfR consiste en millones de membranas de fibra hueca, todas conectadas a un suministro de gas. En el caso del MABR, estas membranas están rodeadas por el agua residual que está siendo tratada por biopelícula en la superficie. En la memoria descriptiva, debe entenderse que la expresión "flujo asimétrico" significa que el flujo en sección transversal del polímero desde el troquel no es simétrico en todos los diámetros.

Método de fabricación

La extrusión de caucho de silicona es muy común y se ha realizado durante muchos años. Puede encontrar información sobre la extrusión de silicona en www.wacker.com (Solid and liquid silicone rubber, material and processing guidelines, https://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6709_EN.pdf). Un método típico para producir las fibras huecas, compuestas de silicona o PDMS, como se describe en el presente documento, es el siguiente:

1. La silicona líquida o el fluido de silicona con un catalizador premezclado se alimenta a una extrusora, este catalizador puede ser a base de peróxido de platino.
2. El barril de la extrusora se mantiene frío para garantizar que el caucho de silicona no comience a reticularse (vulcanizarse) antes de llegar al troquel de la extrusora.
3. El caucho de silicona líquida pasa alrededor de una aguja central a través del anillo/abertura de troquel para formar una fibra hueca. El centro de la aguja debe estar conectado a una fuente de aire o a una atmósfera que permita que el aire entre en el lumen de la fibra hueca extruida, de lo contrario, existe el riesgo de que el tubo recién formado se colapse debido a la creación de un vacío en el centro de la fibra hueca.
4. El troquel puede tener una abertura asimétrica de entre 1,01 y 2 veces el diámetro exterior de la membrana de fibra hueca final. El anillo de fluido que sale del troquel tiene un diámetro mayor con una pared más gruesa que la membrana de fibra hueca final deseada. Estos se prestan a la creación de un flujo desigual del polímero líquido a través del troquel.
5. La fibra hueca de silicona pasa a través de un horno de curado donde se calienta hasta una temperatura de entre 150 °C y 300 °C. El aumento de la temperatura acelera la reacción de reticulación entre las moléculas de PDMS y cura o vulcaniza el caucho de silicona para convertirse en un sólido.
6. La fibra hueca pasa a continuación a un transportador. El transportador está funcionando a una velocidad más rápida que el material que sale del troquel de la extrusora y, por lo tanto, reduce el tamaño de la fibra hueca extruida. El transportador normalmente funciona a entre 5 y 600 metros por segundo.
7. Cuando la fibra hueca sale del horno de curado, es un caucho elástico sólido que el transportador, funcionando a alta velocidad, mantiene bajo tensión.
8. Después del transportador, el material puede disponerse adicionalmente para hacerlo adecuado para su disposición en una matriz y su fabricación en módulos. Por lo general, se enrolla en una bobina o en una madeja y se almacena para su posterior montaje.

Este método de fabricación puede usarse para membranas de fibra hueca tanto rectas como rizadas. La diferencia en los dos tipos de membranas de fibra se produce debido a las tensiones desiguales que se producen alrededor del

perímetro de la membrana solidificada debido al flujo asimétrico del material de fluido polimérico a medida que sale del troquel de aguja que crea las membranas de fibra rizadas, sin ningún procesamiento mecánico posterior ni etapa de fabricación adicional.

5 Otros tipos de fabricación de membrana que están fuera del ámbito de la invención, tales como TIPS y SIPS, que crean una membrana sólida cuando las fases de polímero se separan del disolvente, también pueden crear una membrana rizada similar creando un flujo asimétrico de la solución de polímero que sale de la boquilla o troquel, sin ningún procesamiento posterior mecánico o etapa de fabricación adicional.

10 El proceso de TIPS implica el calentamiento del polímero y el hilado de la fibra hueca a través de una boquilla de troquel en un baño de líquido frío (generalmente agua) para enfriar. El polímero fragua y se endurece cuando se enfría. La boquilla del troquel tiene una abertura de entre 1,01 y 2 veces el diámetro exterior de la membrana de fibra hueca final. El anillo de fluido que sale del troquel tiene un diámetro mayor con una pared más gruesa que la de la membrana de fibra hueca final deseada. A medida que el fluido se hace girar a través del troquel que tiene esta
15 disposición, el fluido fluye asimétricamente y la membrana resultante está predispuesta a adoptar una configuración en espiral cuando se enfría.

El proceso de SIPS implica disolver el polímero en un disolvente que luego se vierte desde una boquilla de troquel en un baño de agua. La boquilla del troquel tiene una abertura de entre 1,01 y 2 veces el diámetro exterior de la
20 membrana de fibra hueca final. En este caso, el anillo de fluido asimétrico que sale del troquel tiene un diámetro mayor con una pared más gruesa que la de la membrana de fibra hueca final deseada. El disolvente se elimina de la solución de disolvente/polímero en el agua ya que el disolvente es miscible en agua pero el polímero es inmisible, el polímero cristaliza a continuación y la membrana de fibra hueca resultante adopta una configuración enrollada/helicoidal sin aplicar ninguna tensión. En otras palabras, la membrana está predispuesta a adoptar una
25 configuración enrollada/helicoidal.

Breve descripción de los dibujos

30 La invención se entenderá más claramente a partir de la siguiente descripción de una realización de la misma, dada a modo de ejemplo únicamente, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

La Figura 1 ilustra la teoría de cómo se desarrolla una capa límite líquida sobre la superficie de una membrana.

35 La Figura 2 ilustra una sección de espiral de una membrana enrollada. Este dibujo ilustra que el espesor de la capa límite se minimiza a lo largo de la longitud de la membrana independientemente de la dirección del flujo del agua.

La Figura 3 es una ilustración gráfica de la distancia corta de contacto entre el agua y la membrana. La Figura (A) muestra una vista en planta y la Figura (B) muestra una perspectiva horizontal de la membrana enrollada.

40 La Figura 4 ilustra el comportamiento de las membranas enrolladas en un paquete. (A) Las fibras con exactamente el mismo paso y dirección de espiral tenderán a anidarse juntas, como se muestra, independientemente de la tensión aplicada. (B) Cuando las espirales tienen diferente paso y dirección de espiral, tienden a empujarse naturalmente entre sí y separarse lateralmente a medida que se reduce la tensión.

45 Figura 5: Muestra una fotografía de una única membrana de fibra hueca que está bajo 4 tensiones diferentes, (a) la nueva membrana de fibra hueca en forma de hélice cuando no está bajo tensión; (b) la nueva membrana de fibra hueca en forma de hélice cuando se cuelga por su propio peso; (c) la nueva membrana de fibra hueca en forma de hélice bajo tensión y (d) la nueva membrana de fibra hueca en forma de hélice cuando está bajo
50 suficiente tensión para estirarse en línea recta.

La Figura 6 es una fotografía de un conjunto de membranas autoenrollables (A) sin tensión adicional y (B) bajo tensión con peso unido al extremo. La Figura 7 es un gráfico que representa la tasa de transferencia de oxígeno medida experimentalmente de un conjunto de 550 membranas de PDMS de fibra hueca enrolladas de manera
55 natural con un conjunto de 550 membranas de PDMS de fibra hueca rectas.

La Figura 8 ilustra un ejemplo de perfiles en sección transversal de membranas con resultado de flujo asimétrico a través de una boquilla de troquel, t = espesor nominal de membrana, y $t_1 > t$ donde el espesor es mayor que el
60 espesor nominal.

La Figura 9 ilustra la disposición de boquilla de troquel para flujo simétrico (lineal) y flujo asimétrico (no lineal) para su uso en el proceso de extrusión de fabricación de membranas de fibra hueca.

65 La Figura 10 ilustra cómo se genera un flujo asimétrico en un proceso de TIPS, SIPS o hilado que cae fuera del alcance de la invención utilizando una disposición de boquilla de troquel simétrica.

Descripción detallada

- Las membranas de la presente invención pueden adoptar una forma helicoidal irregular, helicoidal o rizada que varía en longitud de paso y diámetro de espiral cuando se aplica tensión. Cuando la tensión es baja, la membrana parece un resorte o hélice en la que las espirales tienen un paso muy pequeño (espirales muy juntas) y un diámetro de espiral entre 2 y 50 veces el diámetro exterior de la membrana. A medida que aumenta la tensión en la membrana, o aumenta la longitud de la membrana, también aumenta la distancia de paso de una espiral a la siguiente, y las espirales se separan más con el diámetro de la espiral reducido. En el extremo, bajo suficiente tensión, la membrana se vuelve lineal. Si los extremos de las membranas de fibra hueca están encapsulados, la tensión en las membranas enrolladas aumentará a medida que los extremos encapsulados se separen más. Si la membrana es a la vez enrollada y elástica, también puede estirarse más allá de su longitud nominal. Por ejemplo, una membrana de fibra hueca de 1 m de largo puede tener solo 0,5-0,75 m de longitud cuando está enrollada y en su estado natural rizado o enrollado (sin tensión, su estado predispuesto/original). Sin embargo, si la membrana es elástica, también puede estirarse más allá de su longitud nominal hasta una longitud de, por ejemplo, 1,1 m-1,50 m. La membrana también puede estirarse hasta 4 veces su longitud nominal sin causar ningún daño a la elasticidad de la membrana. La membrana siempre volverá a su longitud original conservando su elasticidad y volviendo a su estado natural rizado o enrollado. Por lo tanto, la forma y la longitud efectiva de la membrana se pueden modificar cambiando la distancia entre los colectores superior e inferior a los que se aseguran los extremos encapsulados de las fibras huecas.
- El impacto de la forma helicoidal o enrollada de las membranas en el desarrollo de la capa límite se ilustra mejor observando la Figura 2 y la Figura 3. En la Figura 2, se muestra una única espiral de una membrana de fibra hueca con forma helicoidal, y las flechas indican ejemplos de flujo de fluido horizontal y vertical sobre la superficie de la membrana. Independientemente de la dirección del flujo, el fluido solo está en contacto con una longitud corta de la superficie de la membrana y esto no permite que se forme una capa límite gruesa. Este efecto se aclara en la Figura 3. La Figura 3 A muestra una vista en planta de una membrana enrollada alineada verticalmente con un diámetro de espiral de D_{espiral} y la Figura 3B muestra una perspectiva en alzado de la membrana enrollada. La forma helicoidal adopta un aspecto circular en una vista en planta y un flujo de fluido horizontal a través de la membrana enrollada tendría longitudes de contacto con la membrana como se ilustra con las líneas horizontales marcadas 1, 2 y 3 en la Figura 3 A. La línea 1 representa la longitud de contacto más corta, que es igual al diámetro de la membrana, y la 3 representa la longitud de contacto más larga posible y es aproximadamente igual al diámetro de la espiral. Las Figuras 2 y 3B también muestran que si el fluido fluye verticalmente a través de la membrana enrollada, entonces el fluido atraviesa el diámetro de la membrana de fibra hueca en un ángulo que depende del paso, y la distancia de contacto entre el fluido y la membrana también es corta.
- Cuando los paquetes de membranas de fibra hueca enrolladas se encapsulan en colectores, es importante asegurarse de que las fibras enrolladas no se anidan entre sí como se ilustra en la Figura 4A. Cuando las fibras se anidan de esta manera, las fibras permanecen muy juntas y en contacto entre sí, independientemente de la tensión en las membranas. Este comportamiento de anidamiento dificulta la transferencia de masa al reducir el área de superficie efectiva de las membranas y dificultar el flujo de fluido alrededor y entre las fibras huecas individuales. Este comportamiento de anidamiento puede evitarse encapsulando membranas de fibra hueca autoenrollables, que tienen un paso ligeramente diferente, así como mezclando fibras enrolladas en diferentes direcciones (en sentido horario y antihorario). La Figura 4B ilustra el comportamiento del paquete deseado. Cuando las fibras se encapsulan de esta manera, las fibras huecas individuales tienden a empujarse entre sí y, por lo tanto, se extienden lateralmente. El resultado es una estructura mucho más abierta que expone más área de membrana para la transferencia de masa. Además, la estructura más porosa del paquete de membranas fomenta un mejor flujo de fluido hacia el interior del paquete y entre las fibras huecas.
- La anchura lateral del paquete de fibras mostrado en la Figura 4B, es decir, está sujeta a cambios de longitud cuando se estira aumentando la distancia entre el colector superior e inferior. Bajo tensión, las tres fibras ilustradas en las Figuras 4A y 4B volverán a una forma lineal que tiene la misma anchura lateral. Sin embargo, a medida que se relaja la tensión, es decir, cuando se reduce la distancia entre el colector superior e inferior, las fibras de la Figura 4B se separarán mucho más lateralmente, mientras que las fibras de la Figura 4A tendrán poca o ninguna tendencia a separarse, solo cambiará el paso.
- Normalmente, cuando se usan grandes cantidades de grandes paquetes de fibras, como es común en los sistemas comerciales a gran escala, es difícil lograr un contacto fluido uniforme con todas las membranas en un reactor. Por ejemplo, las membranas de fibra hueca floja tienden a presionarse entre sí (en aplicaciones de flujo cruzado) o el suministro de fluido al centro de los paquetes verticales en flujo paralelo es deficiente y el fluido fluye preferentemente alrededor de los paquetes de fibra en lugar de a través de ellos. Estos efectos tienden a reducir el rendimiento general de la transferencia de masa de las membranas. Esta situación se mejora mediante el uso de membranas enrolladas como se muestra en la Figura 4B. La estructura abierta de los paquetes de membranas junto con su estructura enrollada conduce a un contacto eficaz entre la membrana y el fluido y una transferencia de masa superior. Otro aspecto de esta membrana es que esta naturaleza enrollada es una propiedad inherente de la membrana y se imparte a la membrana debido al método de fabricación, ya sea por extrusión, hilado o fundición. La naturaleza ondulada no se crea en una etapa posterior a la fabricación separada, tal como mediante engaste, enrollando o calentando después de la producción la membrana mientras se mantiene en un estado enrollado.

La membrana hueca se fabrica por extrusión de un polímero de PDMS líquido a través de un troquel. El troquel tiene una abertura de entre 1,01 y 2 veces el diámetro exterior de la membrana de fibra hueca final. El anillo de fluido que sale del troquel tiene un diámetro mayor con una pared más gruesa que la membrana de fibra hueca final deseada. El PDMS fluido se fuerza a través del troquel en un flujo asimétrico y cuando pasa a través del horno de alta temperatura, las moléculas del PDMS se reticular y dan como resultado la solidificación del PDMS fluido. El anillo de fluido que sale del troquel creando el flujo asimétrico, la solidificación de la membrana de fibra de PDMS y la velocidad del transportador que recibe la membrana solidificada crea una membrana enrollada/helicoidal cuando no está bajo tensión, es decir, cuando está en su estado natural y destensado.

El proceso de TIPS, que cae fuera del alcance de la invención, implica el calentamiento del polímero y el hilado de la fibra hueca a través de una boquilla de troquel en un baño de líquido frío (generalmente agua) para enfriar. El polímero fragua y se endurece cuando se enfría. La boquilla del troquel tiene una abertura de entre 1,01 y 2 veces el diámetro exterior de la membrana de fibra hueca final. El anillo de fluido que sale del troquel tiene un diámetro mayor con una pared más gruesa que la de la membrana de fibra hueca final deseada, y también puede tener una pared más gruesa en un lado, creando un flujo asimétrico. A medida que el fluido se hace girar a través del troquel que tiene esta disposición, la membrana está predispuesta a adoptar una configuración enrollada cuando se enfría.

El proceso de SIPS, que cae fuera del alcance de la invención, implica disolver el polímero en un disolvente que luego se vierte desde una boquilla de troquel en un baño de agua. La boquilla de troquel tiene una abertura de entre 1,1 y 2 veces el diámetro exterior de la membrana de fibra hueca final. En este caso, el anillo de fluido que sale del troquel tiene un diámetro mayor con una pared más gruesa que la de la membrana de fibra hueca final deseada, y una pared más gruesa en un lado, creando un flujo asimétrico. El disolvente se elimina de la solución de disolvente/polímero en el agua ya que el disolvente es miscible en agua pero el polímero es inmisible, el polímero cristaliza a continuación y la membrana de fibra hueca resultante adopta una configuración enrollada/helicoidal sin aplicar ninguna tensión. En otras palabras, la membrana está predispuesta a adoptar una configuración enrollada/helicoidal.

En cada uno de los métodos de fabricación de la membrana, la característica de una estructura similar a una espiral/hélice flexible se crea mediante una combinación de la abertura del troquel que es entre 1,01 y 2 veces el diámetro exterior de la membrana de fibra hueca final, la velocidad y la naturaleza asimétrica del flujo del material de membrana que sale del troquel y la solidificación del material polimérico mediante termoendurecimiento, enfriamiento o cristalización. Para el proceso de extrusión, la velocidad del transportador que acepta el material polimérico solidificado extruido es más rápida que la velocidad de extrusión; lo que contribuye a que la membrana adopte una configuración enrollada/helicoidal.

En la Figura 5(a), una membrana de fibra hueca helicoidal (enrollada) no está bajo tensión y está en su estado natural. En la Figura 5(b), la fibra hueca está suspendida y la parte superior de la hélice se alarga bajo la tensión provocada por el peso de la masa de la membrana inferior (o el movimiento vertical percibido del colector inferior en una dirección opuesta a la del colector superior). En la Figura 5(c) se aplica una tensión adicional sobre la fibra extendiendo ambos extremos de la fibra (donde el movimiento vertical de los colectores superior e inferior se alejan entre sí). En la Figura 5(d), la fibra se coloca bajo suficiente tensión como para que su estructura helicoidal se haya perdido y la fibra hueca se haya vuelto recta. Estos efectos son reversibles de modo que cuando se relaja la tensión (es decir, cuando disminuye la distancia entre los colectores inferior y superior), la fibra vuelve a la forma mostrada en 5(a).

La Figura 6A muestra un paquete de membranas de fibra hueca enrolladas simplemente colgando por su propio peso, mientras que la Figura 6B muestra el mismo módulo de membrana bajo tensión. Esta figura ilustra cómo las membranas se extienden lateralmente a medida que se relaja la tensión en las fibras. El paquete de fibras destensado (Figura 6A) tiene una estructura más abierta, lo que facilita que el agua fluya hacia y a través de las fibras huecas en el paquete. La Figura 6 también ilustra el cambio en la forma del paquete a medida que cambia la distancia entre los extremos superior e inferior del paquete. La distancia entre los extremos superior e inferior del paquete de membranas que se muestra en la Figura 6B es un 15 % mayor que la que se muestra en la Figura 6A.

La Figura 7 demuestra la mejora en la tasa de transferencia de oxígeno que se puede lograr con el uso de membranas autoenrollables sensibles a la tensión en condiciones en las que la transferencia de masa está limitada por la difusión a través de la capa límite líquida que rodea las membranas. Las mediciones se tomaron colocando un conjunto de membranas en un tanque vertical de agua limpia, que se mezcló por medio de una bomba de recirculación, y todo el oxígeno disuelto se eliminó inicialmente mediante la adición de sulfito de sodio en exceso. A continuación, se usó una sonda de oxígeno disuelto para monitorizar el aumento de la concentración de oxígeno disuelto en el agua a medida que se suministraba aire al lumen de la membrana de fibra hueca. A continuación, se calculó la tasa específica de transferencia de oxígeno basándose en el área de superficie externa de las membranas y los resultados mostrados se normalizan en relación con las membranas de fibra hueca rectas, no sensibles a la tensión.

La Figura 8 ilustra ejemplos de perfiles en sección transversal de membranas de fibra hueca de la invención que

resultan del flujo asimétrico de polímero plástico de la boquilla/troquel durante el proceso de fabricación. La membrana de fibra hueca tiene un espesor de pared exterior nominal, t , y también un espesor, t_1 , que es mayor que el espesor, t . En algunos casos, pueden formarse crestas o muescas en la circunferencia exterior de la pared de la membrana. Esta diferencia en los espesores de la pared de la membrana externa alrededor de la circunferencia del lumen de la membrana de fibra proporciona las tensiones que hacen que las membranas adopten una forma original rizada, enrollada, helicoidal, hemihelicoidal u ondulada sin la necesidad de interferencia de procesamiento posterior.

La Figura 9 ilustra la disposición de boquilla/troquel y aguja que produce tanto las membranas lineales de la técnica anterior como las membranas no lineales descritas en el presente documento. La disposición 1 en (A) muestra una aguja 2 situada en el centro de una abertura 3 de una boquilla/troquel 4. La disposición central de la aguja 2 produce un flujo simétrico de polímero líquido 5 a través de la abertura 3, que crea una membrana de fibra hueca 6 con una pared exterior 7 que tiene un espesor simétrico.

En (B), se ilustra una disposición 100 en la que a las etapas o partes descritas con referencia a (A) anteriores se les asignan los mismos números. En la disposición 100, la aguja 2 está alineada fuera del centro de la abertura 3 de la boquilla/troquel 4. La disposición descentrada de la aguja 2 produce un flujo asimétrico de polímero líquido 5 a través de la abertura 3, que crea una membrana de fibra hueca 10 con una pared exterior 11 que tiene un espesor asimétrico ($t_1 > t$). En la Figura 10 se ilustra una disposición 200 en la que a las etapas o partes descritas con referencia a (A) y (B) anteriores en la Figura 9 se les asignan los mismos números. En la disposición 200, el ángulo de la boquilla/troquel 4 se inclina cuando se usa durante los procesos de TIPS, SIPS o hilado que caen fuera del alcance de la invención. La boquilla/troquel 4 se inclina en un ángulo de entre 2° y 30° desde el eje vertical Y con un intervalo óptimo de entre 5° y 15° . La inclinación de la boquilla/troquel 4 crea un flujo asimétrico durante el proceso de TIPS, SIPS o hilado, que crea la membrana de fibra hueca 10 con una pared exterior 11 que tiene un espesor asimétrico.

Aplicaciones de la membrana:

Filtración de líquidos

Durante la filtración, las partículas, coloides, compuestos de gran peso molecular y microorganismos, que son retenidos por la membrana, tienden a concentrarse en la capa límite en la superficie externa de la membrana. Los sistemas de filtración por membrana comerciales están diseñados para garantizar que el agua que rodea las membranas esté bien mezclada y que las condiciones de mezcla, que crean un buen flujo de fluido más allá de la superficie de las membranas, fomenten la eliminación de los contaminantes retenidos de la superficie de la membrana. La aireación también se usa tanto para fomentar el movimiento de la membrana como para crear una turbulencia localizada, que puede ayudar a interrumpir la capa límite y minimizar la polarización de la concentración. Cuando prevalecen condiciones de mezcla deficientes y condiciones de cizallamiento bajo, los contaminantes, partículas y microorganismos se adhieren rápidamente a la superficie de la membrana, lo que hace que la superficie externa de las membranas se recubra con una capa química/biológica que impide la filtración. Este proceso se denomina ensuciamiento de membrana. El ensuciamiento es un problema costoso ya que reduce el rendimiento de filtración de la membrana. El ensuciamiento reversible se elimina de la superficie de la membrana mediante el retrolavado periódico de la membrana con permeado. A continuación, se elimina esta capa de ensuciamiento en la superficie de la membrana. El ensuciamiento irreversible también puede ocurrir y contribuye a reducir la vida útil de la membrana. Las membranas sucias irreversibles deben ponerse fuera de servicio y limpiarse químicamente para eliminar la capa de suciedad. Unas buenas condiciones de mezcla pueden reducir sustancialmente el ensuciamiento.

Difusión de gases

En los módulos de membrana para difusión de gas, la capa de líquido límite normalmente se convierte en la etapa limitante de la tasa para la transferencia de masa o flujo entre el lumen de membrana y el líquido a granel. La capa límite aumenta efectivamente la distancia a través de la cual las moléculas de gas deben difundirse para permear desde la fase gaseosa dentro de la membrana hasta la fase disuelta en el líquido a granel. Por lo tanto, la capa límite representa una resistencia a la transferencia de masa y el espesor de la capa límite afecta al coeficiente de transferencia de masa global. Cuanto más gruesa es la capa límite, menor es la transferencia de masa y más lenta es la tasa de transferencia de masa. Se han realizado muchos intentos para desarrollar métodos para romper estas capas límite de líquido, incluida la introducción de espaciadores para promover la mezcla estática (Pentair X-Flow helix, Liqui-Cel[®], colocando deflectores dentro de los módulos de membrana), cambiar o invertir la dirección del flujo, o la introducción de burbujas u otras turbulencias en el líquido alrededor de la membrana. La mayoría de estos desarrollos se basan en una adición al módulo de membrana o en un cambio periódico de las condiciones operativas para romper la capa límite.

La ventaja de usar las membranas sensibles a la tensión que pueden adoptar una configuración helicoidal similar a un resorte, como se describe en el presente documento, es que logran altas tasas de transferencia de masa al minimizar el desarrollo de la capa límite y crear una estructura 3D penetrable por líquido que proporciona una trayectoria de flujo torsional y dinámica. Hacen esto cuando se usan como paquetes de fibra autoexpandibles y que

adoptan una configuración que fomenta la interrupción frecuente de la capa límite y una capa límite correspondientemente delgada. Los paquetes de fibras que usan las membranas descritas en el presente documento proporcionarán un rendimiento de transferencia de masa superior a los diseños de módulos de membrana existentes. Además, la forma y el comportamiento reales de los paquetes serán sensibles a la tensión, de modo que el rendimiento de la transferencia de masa del sistema puede manipularse para minimizar los requisitos de energía para los flujos de aire y fluido para el control del ensuciamiento y la transferencia de gas.

REFERENCIAS:

- 10 X. Yang, R. Wang, A.G. Fane; Novel designs for improving the performance of hollow fibre membrane distillation modules. *J. Membr. Sci.* 248, (2011) 52-62.
- X. Yang, E.O. Fridjonsson, M.L. Johns, R. Wang, A.G. Fane, A non-invasive study of flow dynamics in membrane distillation hollow fiber modules using low-field nuclear magnetic resonance imaging (MRI), *J. Membr. Sci.* 451 (2014) 46-54.
- 15 Luelf, Tobias & Bremer, Christian & Wessling, Matthias. (2016). Rope coiling spinning of curled and meandering hollow-fiber membranes. *Journal of Membrane Science.* 506. 10.1016/j.memsci.2016.01.037.
- 20 P. Moulin, J. Rouch, C. Serra, M. Clifton, P. Aptel; Mass transfer improvement by secondary flows: Dean vortices in coiled tubular membranes. *J. Membr. Sci.*, 114 (1996), pp. 235-244
- X. Tian, J. Plott, H. Wang, B. Zhu, A. Shih; Silicone Foam Additive Manufacturing by Liquid Rope Coiling, *Procedia CIRP* 65 (2017) 196-201.

REIVINDICACIONES

1. Una membrana de fibra hueca de polidimetilsiloxano (PDMS), formada por extrusión, teniendo la membrana de fibra hueca de PDMS una forma original de hemihélice, helicoidal u ondulada, en donde cuando se coloca bajo
5 tensión, la membrana de fibra hueca de PDMS tiene su paso alterado y en la que la membrana se puede estirar hasta 4 veces su longitud original de modo que la membrana de fibra hueca de PDMS pasa de una forma no lineal a una forma sustancialmente lineal sin deformación plástica en donde la forma original de la membrana de fibra hueca de PDMS se produce mediante el flujo asimétrico de polímero líquido que contiene un catalizador a través de una
10 abertura de troquel y alrededor de una aguja que están asimétricamente alineados, lo que da como resultado una membrana de fibra hueca que tiene una pared exterior con un espesor asimétrico alrededor de la circunferencia de la membrana de fibra; y en donde la membrana de fibra tiene un diámetro de espiral y un paso entre espirales que varía a lo largo de la longitud de la membrana de fibra.
2. Una membrana de fibra hueca de polidimetilsiloxano (PDMS) de la Reivindicación 1, en donde un diámetro interno
15 de la membrana de fibra hueca está entre 50 μm y 2 mm.
3. Una membrana de fibra hueca de polidimetilsiloxano (PDMS) de cualquier reivindicación anterior, en donde la membrana de fibra hueca tiene una sección transversal interior y exterior cilíndrica.
- 20 4. Una membrana de fibra hueca de polidimetilsiloxano (PDMS) de la Reivindicación 1, en donde la membrana de fibra hueca tiene una sección transversal interior cilíndrica y exterior no cilíndrica.
5. Una membrana de fibra hueca de polidimetilsiloxano (PDMS) de la Reivindicación 4, en la que la membrana tiene una superficie exterior que es desigual o irregular que comprende salientes o crestas que se extienden hacia fuera
25 desde la superficie exterior de la membrana o con muescas que se extienden hacia dentro.
6. Una matriz de membranas de fibra hueca de polidimetilsiloxano (PDMS) alineadas verticalmente de acuerdo con la Reivindicación 1.
- 30 7. Un método de fabricación por extrusión de una membrana de fibra hueca de polidimetilsiloxano (PDMS) de la Reivindicación 1, comprendiendo el método las etapas de pasar polímero líquido de polidimetilsiloxano (PDMS) que contiene un catalizador a través de una abertura de troquel y alrededor de una aguja que están alineadas asimétricamente mientras permiten que el aire sea aspirado a través de la aguja hacia un lumen de la membrana de
35 fibra hueca, estando alineada la aguja fuera del centro de la abertura del troquel, teniendo el troquel una abertura entre 1,01 y 2,0 veces el diámetro exterior de la membrana de fibra hueca de polidimetilsiloxano (PDMS), en donde la abertura produce un flujo asimétrico de polímero líquido de polidimetilsiloxano (PDMS) a medida que sale del troquel o boquilla al aire para producir una membrana hemihelicoidal, helicoidal u ondulada que tiene una pared más gruesa que la membrana de fibra hueca final deseada; pasando la membrana de fibra hueca extruida a través de un horno de curado donde se calienta a una temperatura de entre 150 $^{\circ}\text{C}$ y 300 $^{\circ}\text{C}$; y en donde se imparte una tensión
40 adicional al pasar la membrana de fibra hueca de polidimetilsiloxano (PDMS) sobre un transportador que funciona a una velocidad más alta que la membrana de polidimetilsiloxano (PDMS) fluido que sale del troquel o boquilla.

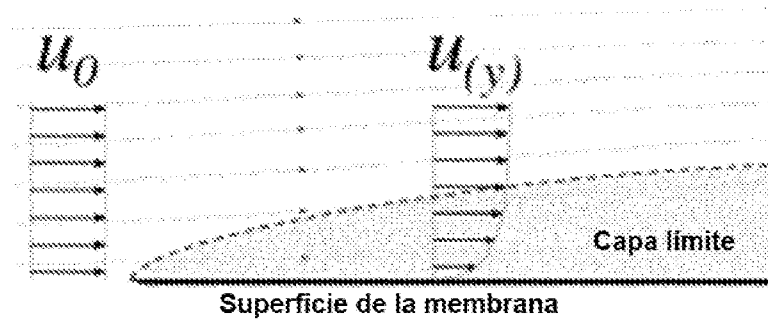


Figura 1

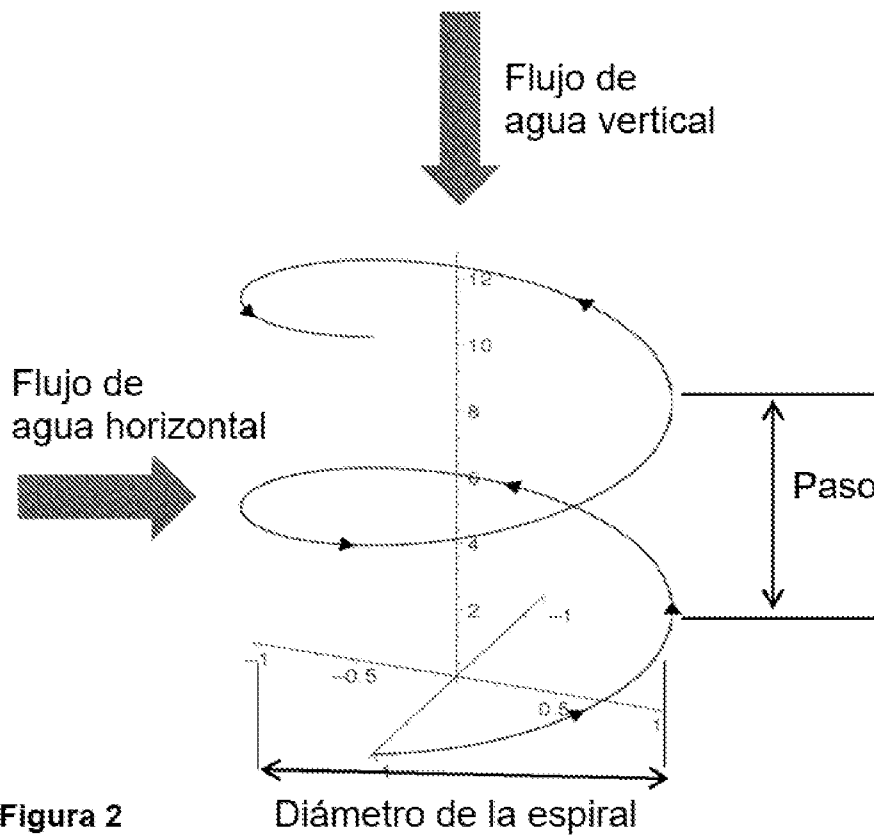


Figura 2

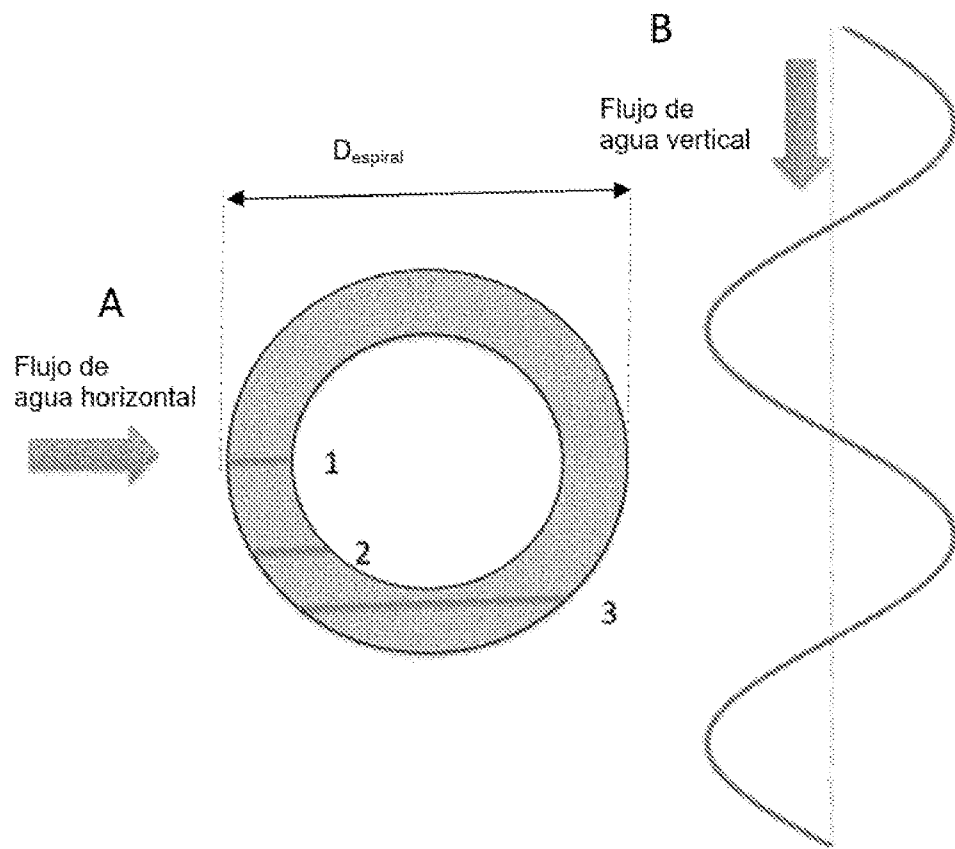


Figura 3

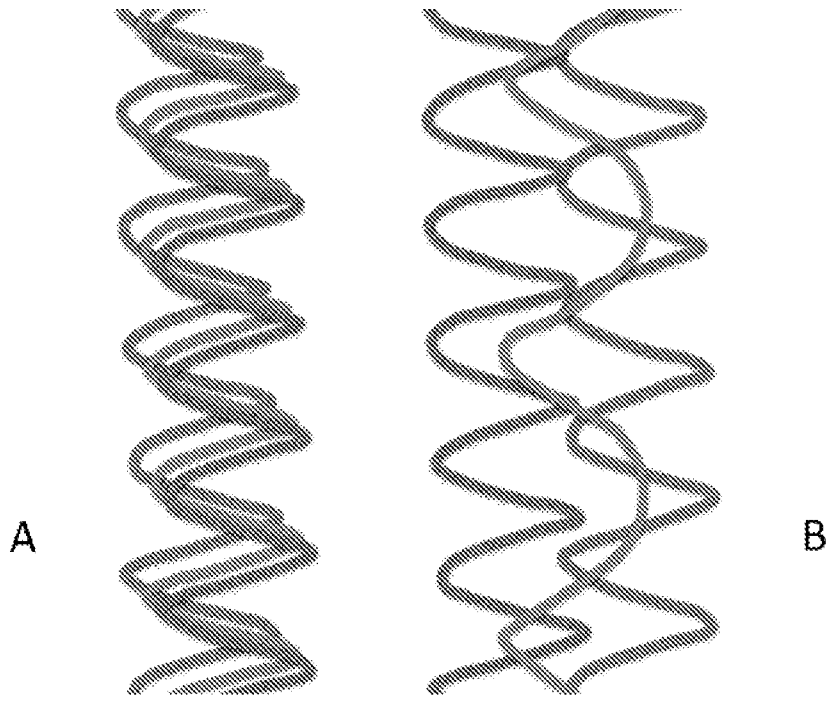


Figura 4

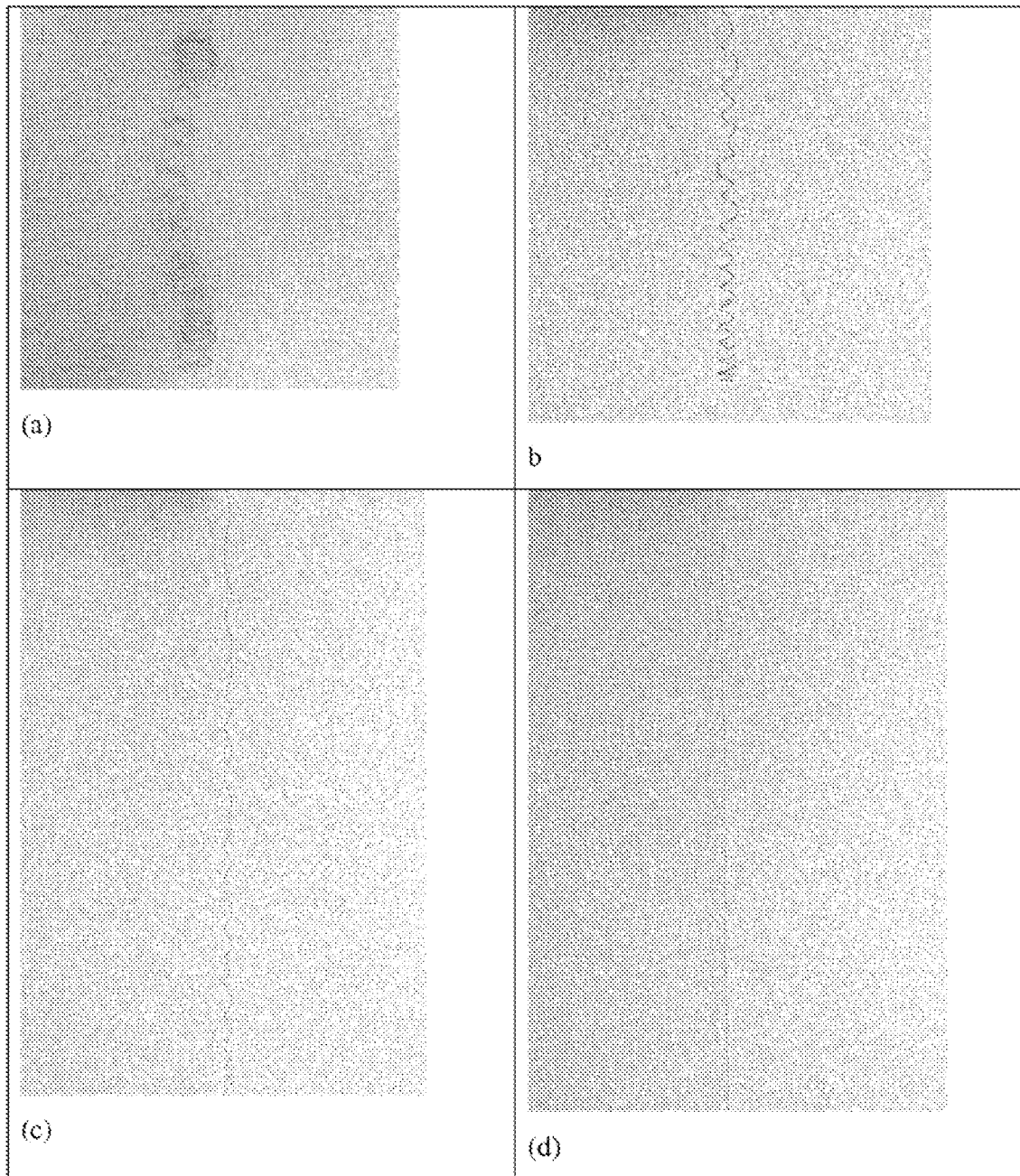


Figura 5

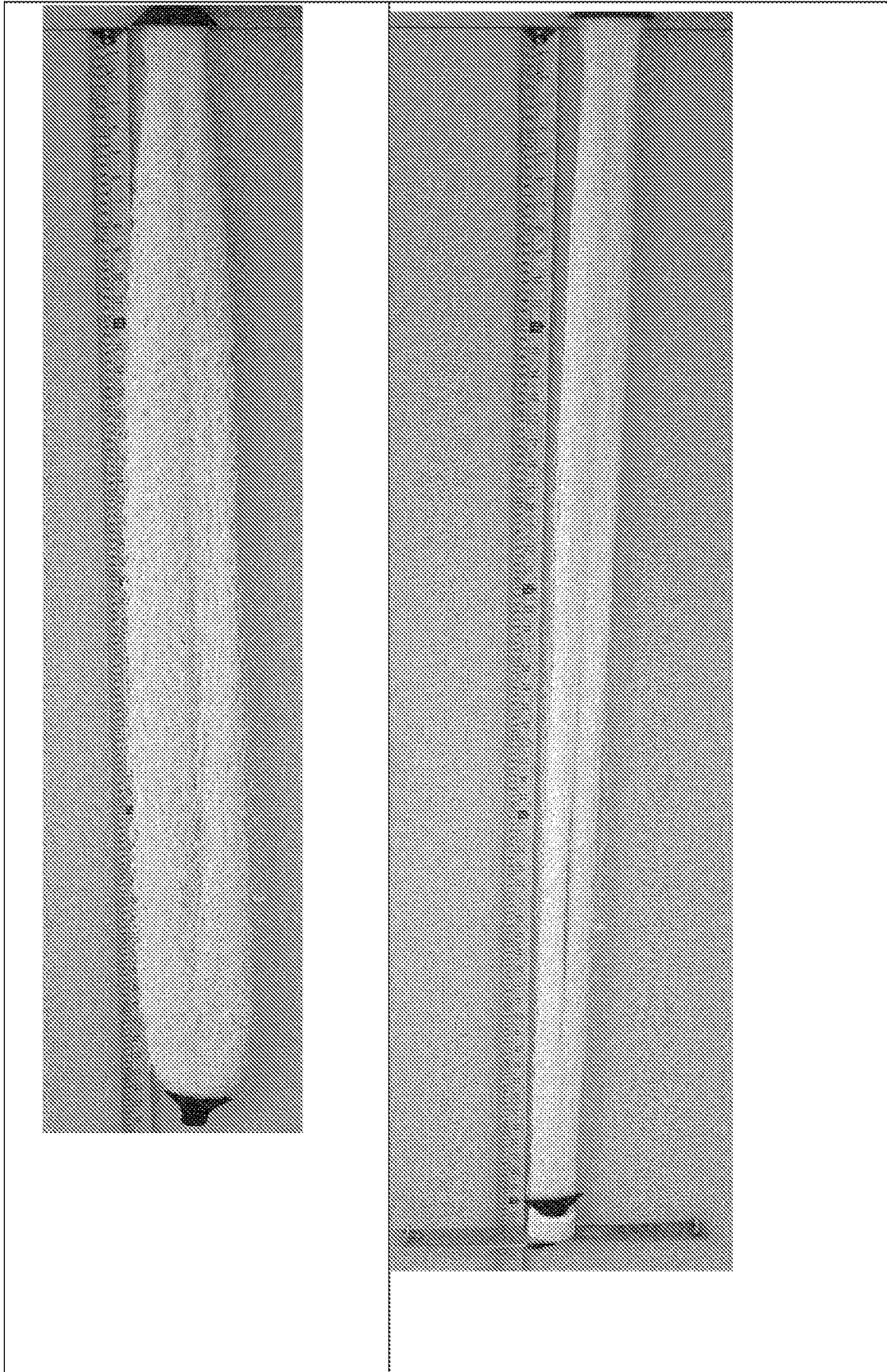


Figura 6

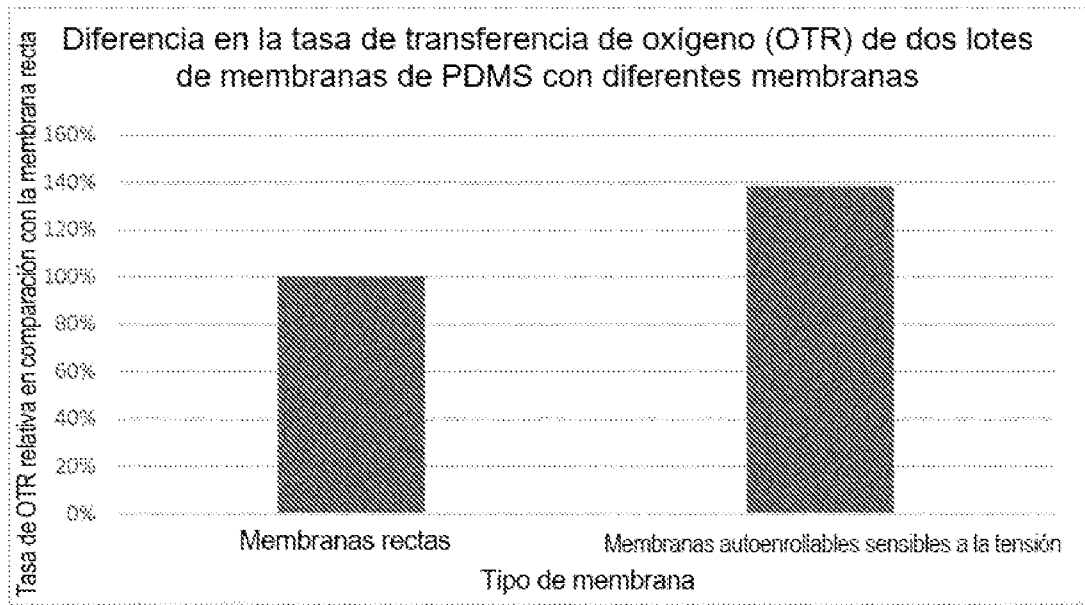


Figura 7

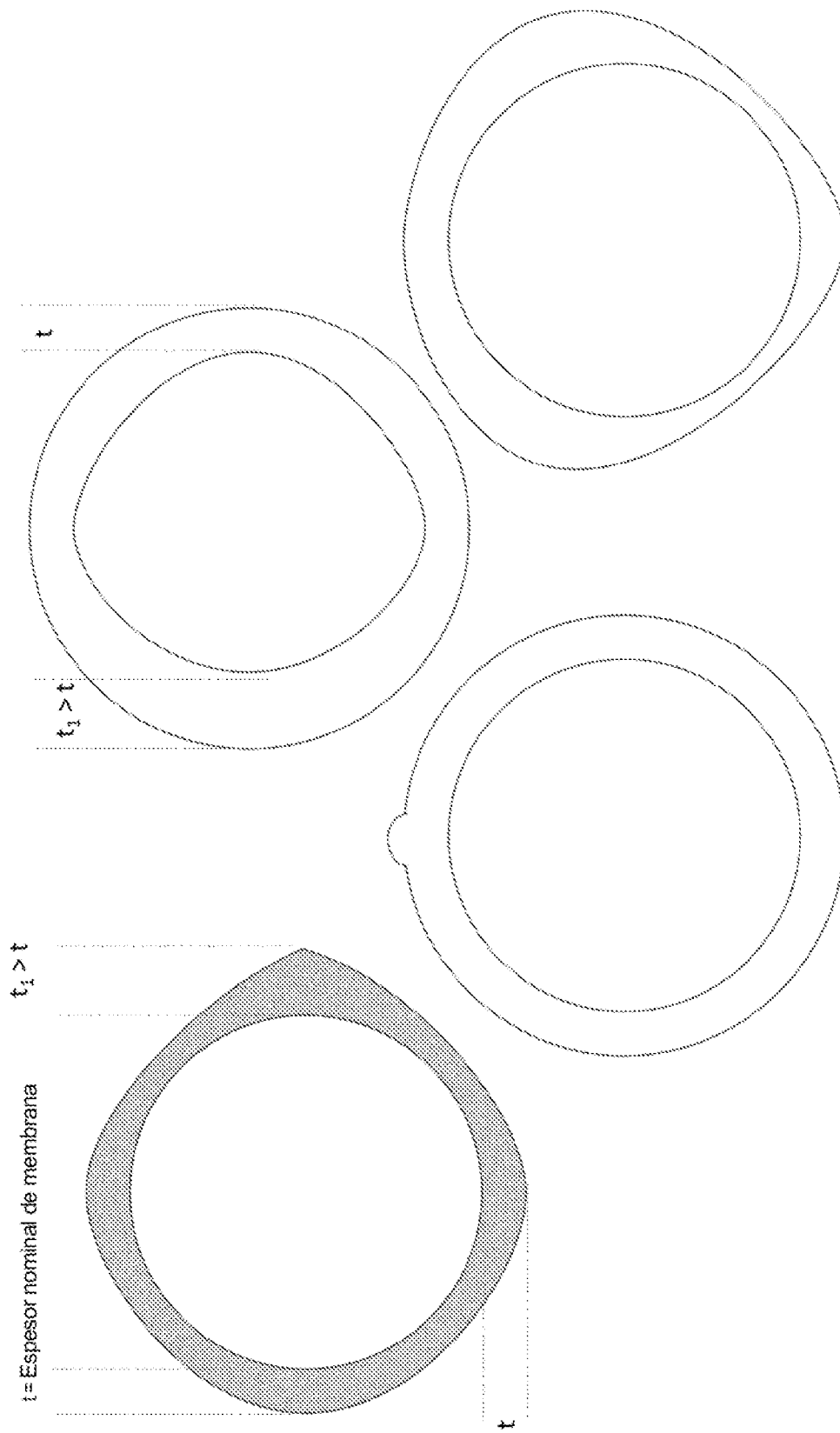


Figura 8

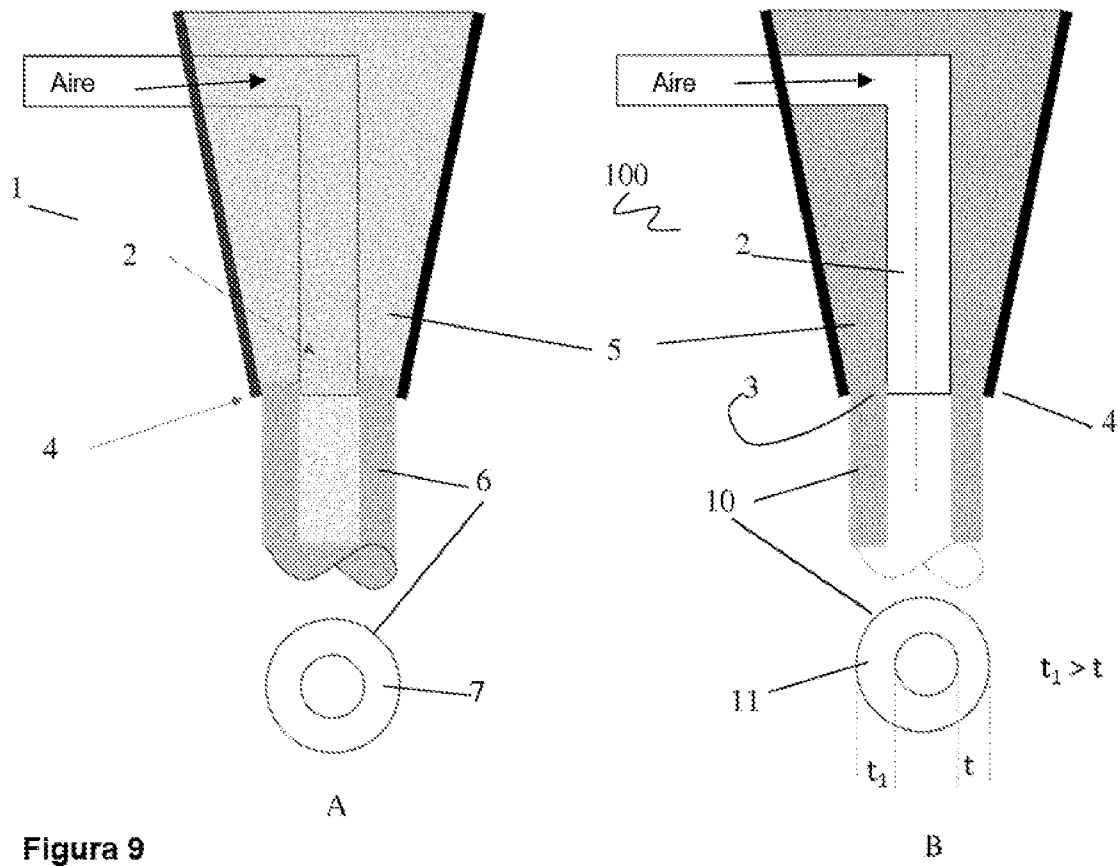


Figura 9

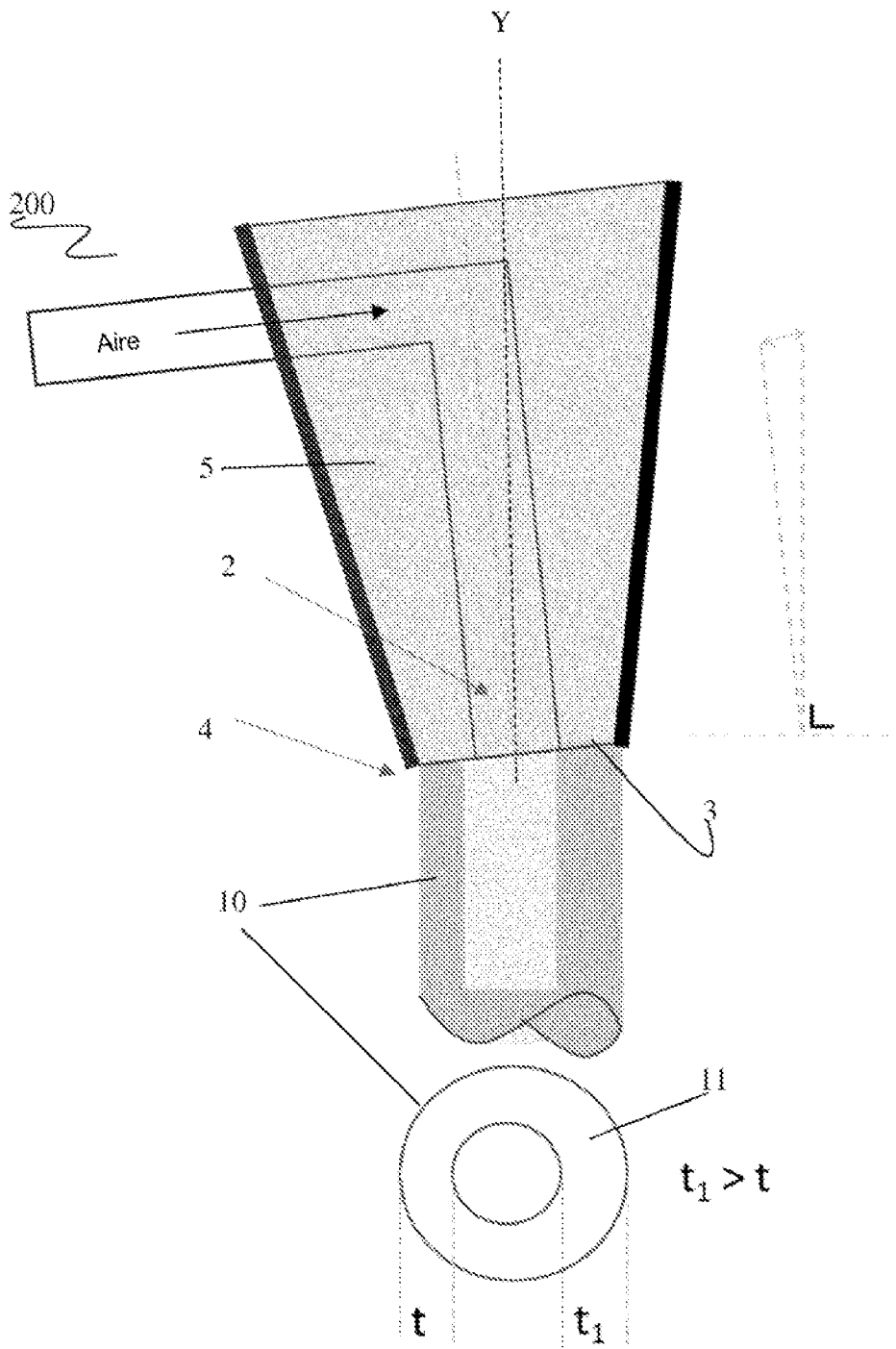


Figura 10