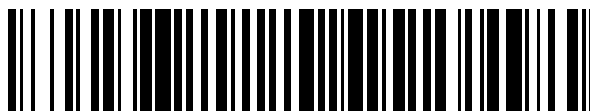


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 400 910**

51 Int. Cl.:

B01D 63/12

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.02.2005** **E 05723898 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.12.2012** **EP 1720639**

54 Título: **Aparato para tratar soluciones de resistencia osmótica alta**

30 Prioridad:

25.02.2004 US 547500 P

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

15.04.2013

73 Titular/es:

DOW GLOBAL TECHNOLOGIES LLC (100.0%)
2040 Dow Center
Midland, MI 48674 , US

72 Inventor/es:

MICKOLS, WILLIAM, E.;
MARSH, ALLYN, R.;
PEERY, MARTIN, H.;
BUSCH, MARKUS;
JONS, STEVEN, D. y
MCCLELLAN, STUART

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 400 910 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 para tratar soluciones de resistencia osmótica alta.

Campo de la invención

- 5 Esta invención es un aparato y un método para tratar soluciones de resistencia osmótica alta, especialmente agua de mar, haciendo pasar la solución a través de un recipiente que contiene unos elementos para ósmosis inversa o nanofiltración enrollados en espiral. La invención permite una distribución más regular del flujo en el interior del recipiente. Las propiedades ventajosas del rendimiento comparadas con los métodos convencionales incluyen una mayor productividad del recipiente, un aumento de la recuperación y una exigencia menor en la presión aplicada.

Antecedentes

- 10 La ósmosis es un procedimiento por el que un solvente pasa a través de una membrana semipermeable y se desplaza desde una solución de baja concentración de soluto a una solución de alta concentración de soluto, diluyéndose esta última. En la ósmosis inversa (OI), en el lado de la membrana de alta concentración de soluto se aplica presión y se invierte el gradiente de potencial químico que impulsa la ósmosis. El resultado es un flujo de solvente a través de la membrana, desde el lado de alta concentración de soluto hacia concentraciones de soluto
15 más bajas, lo que produce una solución de solvente purificada. En la actualidad, la ósmosis inversa se usa comúnmente para generar agua potable a partir de agua de mar.

- La nanofiltración (NF) es similar a la ósmosis inversa por que la presión aplicada en la membrana supera la diferencia de presión osmótica y obliga a que el agua pase a través de la membrana. Las membranas de nanofiltración se distinguen por el hecho de que algunas sales las atraviesan sustancialmente, mientras que otras
20 sales son retenidas selectivamente. La NF se aplica lo más comúnmente con corrientes de alimentación que tienen una baja concentración de sales, pero también se han usado para retirar selectivamente los componentes del agua de mar. Por ejemplo, la patente US-6.508.936 describe el uso de la NF como un pretratamiento que puede retirar ventajosamente los iones de dureza del agua de mar. La patente US-4.723.603 describe el uso de la NF como medio para reducir los iones sulfato en el agua de mar, antes de su inyección al fondo de pozo.

- 25 Típicamente, las membranas de OI y NF se configuran en una serie de elementos enrollados en espiral, ya que tales elementos permiten empaquetar una mayor cantidad de superficie de membrana en un volumen pequeño. En la técnica se ha descrito la construcción de elementos enrollados en espiral usados en la purificación de agua (véase las patentes de EE.UU. números 5.538.642 y 5.681.467). Los elementos enrollados en espiral y los recipientes correspondientes están disponibles comercialmente en varios diámetros estándar (p. ej. 4,5, 6,3, 10, 15, 20 cm),
30 pero actualmente lo normal para grandes sistemas son los elementos de un metro de longitud con un diámetro nominal de 20 cm. En aplicaciones para agua de mar, cada elemento de 20 cm de diámetro típicamente contiene entre 26,5 m² (285 ft²) y 35,3 m² (380 ft²) de superficie activa de membranas.

- La Fig. 1 representa un elemento enrollado en espiral típico. Una o más envolventes de membranas (2) y una lámina separadora (4) de alimentación se fijan por un extremo a un tubo central (6) de recogida de permeado. Las
35 envolventes (2) comprenden dos láminas de membranas (8), generalmente rectangulares, que rodean a una lámina soporte (10) del permeado. Esta estructura del tipo "sándwich" se mantiene conjuntamente a lo largo de tres aristas (14, 16, 18), mientras que la cuarta arista (20) de la envolvente (2) se apoya en el tubo (6) de recogida de permeado, de modo que la lámina soporte (10) del permeado esté en contacto fluido con las aberturas (22) del tubo (6) de recogida de permeado. Una lámina separadora (4) de alimentación separa cada envolvente (2). La lámina
40 separadora (4) de alimentación está en contacto fluido con ambos extremos del elemento (24, 26) y este actúa como un conducto para la solución de alimentación a través de la superficie frontal (28) de la membrana (8). Las láminas separadoras de alimentación y las envolventes se enrollan alrededor del tubo de recogida de permeado, de modo que la estructura adopta una forma cilíndrica, y se colocan en un alojamiento.

- 45 Durante la operación, la alimentación fluye sobre la superficie de la membrana desde un extremo al otro del alojamiento. Conforme el agua fluye a través de la película y adentro del tubo de permeado, el soluto se vuelve más concentrado en el agua de alimentación, lo que se puede referir como concentrado o fluido retenido; cuando la corriente de alimentación sale del recipiente a presión, la corriente de salida se refiere como concentrado, o fluido retenido.

- Con el fin de que el elemento enrollado en espiral funcione en ósmosis inversa, la corriente de alimentación debe estar bajo presión. Por lo tanto, los elementos enrollados en espiral operan en el interior de un recipiente a presión. Típicamente, el recipiente a presión contiene más de un elemento conectado en serie. En la técnica se conocen
50 tales recipientes a presión y se ejemplifican mediante la patente de EE.UU. nº 6.074.595 y la patente de EE.UU. nº 6.165.303. Los recipientes a presión se pueden combinar, además, con otros recipientes a presión en serie o en paralelo, para crear un sistema de filtración por membranas. En la aplicación comercial de la OI, un sistema grande de filtración se puede componer de más de 10.000 elementos, normalmente distribuidos en unos recipientes a
55 presión que contienen de 4 a 8 elementos cada uno.

Con referencia a la Fig. 3, el recipiente (40) a presión tiene unas aberturas (42, 44) en unos extremos opuestos (46, 48) para hacer pasar la solución de alimentación adentro del recipiente y retirar la solución de concentrado. La solución de alimentación fluye desde el elemento de cabeza (50) situado en el extremo (46) de entrada del recipiente (40), a través de los elementos intermedios (52), al elemento de cola (54) situado en el extremo (48) opuesto de salida del recipiente (40). Entre los elementos y el recipiente se puede usar unos cierres herméticos (56) a la salmuera, para evitar que este flujo de alimentación borde los elementos. Los interconectores (58) se usan para conectar los tubos (6) de permeado de elementos adyacentes, y el permeado combinado se retira por al menos una abertura (62) de permeado del recipiente (40). Como alternativa a los interconectores, en los elementos se puede usar unos casquillos de extremo que permitan la conexión directa con los elementos adyacentes; en la patente de EE.UU. nº 6.632.356 se describen unos casquillos de extremo tales.

Los fabricantes de elementos enrollados en espiral proporcionan diseñadores de sistemas de filtración con unos límites de operación como criterios de diseño de los sistemas. Típicamente, para un elemento se puede especificar un límite superior de la presión aplicada, un máximo caudal de alimentación, un mínimo caudal de concentrado y una máxima recuperación (volumen de permeado dividido por el volumen de alimentación). Véase, por ejemplo, "Membranes System Design Guidelines for 8-inch FILMTEC™ Elements", Form Nº 609-21010-702XQRP, FilmTec Corp., Edina, MN, 18/12/03. El fabricante sugiere unos límites de operación en un elemento para agua de mar FILMTEC™ SW30HR-380 que incluyen usar una presión aplicada a circuito abierto de aspiración <69 bar (<1.000 psi), un caudal de alimentación <338 m³/día (<62 gpm) y un caudal de concentrado >98 m³/día (>18 gpm). Otros fabricantes han establecido unos criterios similares, aunque a menudo la máxima recuperación en el elemento sustituye a las especificaciones de caudales de alimentación y de concentrado, y recientemente los esfuerzos se han encaminado a permitir mayores presiones aplicadas en los sistemas para agua de mar.

Típicamente, en un recipiente a presión dado los elementos se seleccionan de un mismo tipo, teniendo las mismas especificaciones para el flujo, el caudal, la recuperación y el tamaño físico. La alimentación presurizada fluye axialmente a través de cada elemento, mientras que los tubos de permeado se conectan entre sí y se cierran herméticamente a la alimentación. Conforme la alimentación fluye a través de los elementos sucesivos, la concentración de soluto en la alimentación aumenta y el flujo (caudal volumétrico de agua permeada por unidad de superficie de membranas) disminuye. La disminución del flujo da lugar a una disminución de la utilización de las membranas. El cambio del flujo desde la entrada a la salida del recipiente a presión también se refiere como desequilibrio de flujo. El desequilibrio de flujo contribuye al ensuciamiento y disminuye la calidad global del agua debido a la polarización en los elementos aguas arriba y al bajo flujo en los elementos aguas abajo. La Figura 2 representa la disminución del flujo en los elementos enrollados en espiral del interior de un recipiente a presión típico, en función del aumento de la distancia de la posición del elemento respecto a la entrada del recipiente a presión. El flujo disminuye desde el extremo de entrada del recipiente al extremo de salida, conforme se concentra el agua rechazada y aumenta la presión osmótica de la alimentación.

La disminución del flujo en el recipiente a presión es más pronunciada en las soluciones con una presión osmótica alta, tales como el agua de mar. En la ósmosis inversa, el flujo a través de la membrana es esencialmente proporcional a la presión motriz neta. La presión motriz neta se calcula restando a la presión aplicada, la presión del permeado y la diferencia de presión osmótica a través de la membrana. En ausencia de polarización, la diferencia de presión osmótica a través de membranas de rechazo elevado es aproximadamente igual a la presión osmótica de la solución de alimentación. Por ejemplo, en una solución con una salinidad típica de 3,5%, la presión osmótica en la abertura de entrada (antes del elemento de cabeza) es de aproximadamente 26 bar (aproximadamente 380 psi). Después de que esta solución típica pasa a través de un elemento enrollado en espiral con una recuperación de 40%, el concentrado tiene entonces una salinidad de aproximadamente 5,8% y la presión osmótica a la salida (después del último elemento) es de aproximadamente 44 bar (aproximadamente 630 psi). El aumento de la presión osmótica en las alimentaciones de los sucesivos elementos disminuye radicalmente la presión motriz neta y el flujo en los elementos aguas abajo. Este problema se agrava además por la resistencia hidráulica al flujo de alimentación en el interior de cada elemento, lo que da lugar a una pérdida de carga a través del recipiente. El aumento de la presión osmótica y de la pérdida de carga contribuye al desequilibrio de flujo; para soluciones de alta resistencia osmótica, como el agua de mar, la resistencia osmótica es especialmente importante.

Si los diseñadores de sistemas de filtración seleccionan unos módulos enrollados en espiral para maximizar el flujo en el último elemento del recipiente a presión, las unidades aguas arriba deben tener un flujo mayor que el recomendado por el fabricante. Un flujo inicial mayor puede acortar sustancialmente la vida del elemento enrollado en espiral, debido al ensuciamiento y la formación de incrustaciones. Un flujo alto también fomenta la polarización de concentración, disminuyendo el rechazo efectivo de la membrana. Sin embargo, en los elementos aguas abajo tampoco es deseable un flujo menor, debido a la disminución de la productividad; un flujo menor indica una concentración mayor de soluto en el permeado, y por lo tanto unas recuperaciones menores.

Los fabricantes de elementos proporcionan criterios de operación para los elementos enrollados en espiral a usar en el diseño de sistemas de filtración. Típicamente, los criterios incluyen un límite superior para la presión aplicada, un máximo caudal de alimentación, un mínimo caudal de concentrado, una máxima recuperación (volumen de permeado dividido por el volumen de alimentación), y un máximo flujo. Todos los elementos de la Tabla 2, siguiente, tienen unos caudales de aproximadamente 23 m³/día (6.000 gpd) durante un ensayo típico con agua de mar. Esto es congruente con el intervalo común de 55-69 bar (800-1.000 psi) para la operación con agua de mar. Para las

resistencias osmóticas típicas, se puede garantizar que un elemento para 23 m³/día de agua de mar, de 32,5 m² (350 ft²) de superficie activa, opera a 55 bar (800 psi) con menos de 34 l/m²/h (20 gfd), que a menudo se da como límite superior del flujo. El ensuciamiento con el tiempo y las diferencias en la temperatura y la resistencia osmótica pueden permitir que el mismo elemento permanezca potencialmente dentro de estos límites a incluso 68,9 bar (1.000 psi), o incluso a 82,7 bar (1.200 psi) para algunas condiciones.

Se ha estudiado la relación entre el flujo y el ensuciamiento, y los criterios para el flujo se basan frecuentemente en el ensuciamiento potencial de diferentes aguas. Una expresión común para caracterizar el ensuciamiento potencial es el índice de densidad de sedimentos (SDI, del inglés "Silt Density Index"), usado para establecer los límites de flujo en aplicaciones con agua de mar. Típicamente, los fabricantes o bien especifican el flujo máximo para un tipo particular de elemento, o bien pueden especificar el flujo medio para un sistema de purificación de agua donde se use ese elemento.

Además de reducir la producción de permeado, el desequilibrio de flujo contribuye al ensuciamiento y disminuye la calidad global del agua debido a la polarización en los elementos aguas arriba y al flujo bajo en los elementos aguas abajo. Típicamente, los diseñadores solucionan este problema mediante el uso de elementos con un flujo bajo en las aplicaciones con una resistencia osmótica alta. Mediante el uso de elementos con un flujo bajo, se puede aplicar una presión alta al primer elemento en serie, mientras que el flujo de ese elemento se mantiene por debajo del flujo máximo recomendado por el fabricante. La relativamente alta presión aplicada permite que el cambio de la presión osmótica, desde el extremo de cabeza del recipiente al extremo de cola, se mantenga en una fracción relativamente pequeña de la presión motriz neta inicial.

Otros medios para abordar los problemas del desequilibrio de flujo han sido el limitar la recuperación en los sistemas para agua de mar. Los sistemas convencionales para agua de mar operan con una recuperación de alrededor del 40-45%, de modo que no se superen las limitaciones del flujo. Si una recuperación mayor está disponible, se somete a pretratamiento menos cantidad de agua, lo que disminuye tanto los gastos de operación como de capital. Unas recuperaciones mayores en el recipiente pueden reducir los costes de la parte de OI del sistema, reduciendo tanto el número de recipientes a presión requeridos como los costes de las ayudas necesarias (p. ej. tuberías, electricidad, elementos y recipientes). Además, el aumento de la recuperación supone que se debe elevar a una presión alta menos cantidad de agua, y esto minimiza las pérdidas económicas debidas a las ineficiencias naturales en la recuperación de energía durante la operación. Finalmente, unas recuperaciones mayores pueden reducir el volumen de efluentes de la planta. Las recuperaciones que se pueden obtener en los recipientes, y los beneficios asociados, se han limitado convencionalmente por el riesgo de ensuciamiento en el extremo de cabeza y por el flujo bajo (tanto para el permeado como para el concentrado) en el extremo de cola.

El aumento del número de elementos en el interior de un recipiente proporciona un medio para maximizar la recuperación en ese recipiente, mientras que evita el desbordamiento del primer elemento. Sin embargo, el aumento del número de elementos da lugar generalmente a que los últimos elementos del recipiente operen con flujos muy bajos; la calidad del permeado resultante es menor ya que pasa menos agua a través de estos últimos elementos. El aumento del número de elementos aumenta la longitud del recipiente a presión, y por lo tanto es más adecuado para las instalaciones nuevas que para las instalaciones existentes, con recipientes a presión ya en su lugar. Adicionalmente, el coste de dichos sistemas aumenta debido al mayor número de elementos y a la necesidad de recipientes más largos.

Otro método para atenuar el impacto del desequilibrio de flujo sobre el rendimiento de un sistema aprovecha la variabilidad de los caudales en el interior del tipo de elementos enrollados en espiral. Los diseñadores o los fabricantes ensayan los caudales en los elementos, clasifican o etiquetan los elementos según el caudal, y proporcionan un plan de carga que especifica la posición de los elementos individuales específicos (por ejemplo, mediante un número de serie) en el interior de cada recipiente. Una desventaja de este enfoque es la mano de obra requerida para ensayar y clasificar los elementos, y la necesidad de un plan de carga para cada recipiente. La otra desventaja es que típicamente, durante un proyecto dado, sólo se usa un tipo de elemento, y el intervalo de caudales se limita a la variabilidad entre los elementos individuales.

Se han descrito otros métodos para mejorar los aspectos económicos con agua de mar, mientras que se controla el flujo en los elementos. La patente de EE.UU. nº 6.187.200 describe unos sistemas que comprenden múltiples etapas, con contrapresión en la primera etapa o una elevación de presión entre las etapas. Sin embargo, este método requiere un coste adicional en bombas, tuberías, y recipientes a presión adicionales. Además, estos sistemas de dos etapas a menudo se diseñan para operar con al menos una de las etapas a una presión muy alta, y esto hace que el equipo sea más caro; véase la patente de EE.UU. nº 6.277.282. Alternativamente, se puede usar un pretratamiento mejorado del agua de mar para adecuarse al criterio de un flujo medio más alto y una mayor tolerancia en el desequilibrio de flujo. Esto también requiere un coste adicional de capital (en esta ocasión, para el pretratamiento) y es difícil cuantificar a priori el impacto que tendrá el pretratamiento sobre el ensuciamiento. Finalmente, para hacer que unas recuperaciones sustancialmente menores sean más competitivas económicamente se han usado unos dispositivos de recuperación de energía muy eficaces. Las menores recuperaciones limitan el desequilibrio de flujo en el interior de un sistema para agua de mar. Sin embargo, este método implica un equipo adicional para la recuperación de energía y el aumento potencial de los costes debido al mayor volumen de agua pretratada.

Además de abordar el desequilibrio de flujo, otra mejora para tratar soluciones con una resistencia osmótica alta ha sido reducir la polarización de concentración a través de los elementos enrollados en espiral variando los separadores de alimentación. En los elementos enrollados en espiral, el separador de alimentación proporciona al flujo de alimentación una vía a través de la superficie de la membrana. Este también crea una mezcladura en la superficie de la membrana, lo que disminuye la polarización de concentración, mejorando la transferencia de masa a través de la membrana. El coste de esta mejora en la transferencia de masa es un aumento de la pérdida de carga a lo largo del elemento enrollado en espiral; la suma de pérdidas de carga para los elementos individuales en serie produce una pérdida de carga a través del recipiente. En la publicación de solicitud de patente de EE.UU. 2003-0205520 se describe un ejemplo reciente de un separador de alimentación.

La ósmosis inversa supone aproximadamente el 40 por ciento de la producción global actual de agua de mar desalinizada. Los aspectos económicos de la desalinización por ósmosis inversa, que incluyen las grandes instalaciones requeridas, pueden limitar el crecimiento de esta tecnología. La mejora de la eficacia de los recipientes a presión reduce el número de recipientes a presión requeridos y, por lo tanto, reduce los costes de capital del equipo. Adicionalmente, los recipientes a presión que operan a una presión aplicada inferior, con la misma capacidad de producción de agua, reducen los costes de operación. Un recipiente a presión mejorado para los sistemas de filtración de agua que opera con una distribución de flujo más uniforme, un mayor flujo de operación medio y una mayor recuperación, también opera con una mejor eficacia y una menor presión aplicada para mejorar los aspectos económicos de la ósmosis inversa en la desalinización de agua de mar.

Compendio de la invención

Esta invención mejora los recipientes a presión, en los sistemas de filtración por membranas, para tratar soluciones con una resistencia osmótica alta con un aparato según la reivindicación 1, y es útil para los sistemas de desalinización de agua de mar. En un sistema de filtración por membranas, un recipiente a presión dado contiene al menos tres elementos enrollados en espiral con unos flujos específicos estándar sustancialmente diferentes, según se describe más adelante con más detalle, y, opcionalmente, unos gradientes de presión estándar en el separador de alimentación seleccionados. La disposición de los elementos enrollados en espiral en el interior del recipiente a presión permite una distribución más uniforme del flujo, un mayor flujo de operación medio y una mayor recuperación, que con el uso de elementos con un flujo específico estándar similar o unos separadores de alimentación similares. Entre los elementos, los flujos específicos estándar difieren en un factor de al menos 1,5, y preferiblemente 2,0.

La combinación de elementos que tienen unos flujos específicos estándar que difieren ampliamente en el interior del recipiente permite operar dentro de los criterios de los fabricantes, con unas recuperaciones mayores o unas energías menores comparadas con los sistemas convencionales. En una realización preferida, un recipiente a presión para uso en la desalinización de agua de mar tiene un elemento aguas abajo (preferiblemente el elemento de cola) que tiene un flujo específico estándar de al menos $1,5 \text{ l/m}^2/\text{h}/\text{bar}$. También es deseable que un elemento aguas arriba (preferiblemente el elemento de cabeza) tenga un flujo específico estándar menor que $1,0 \text{ l/m}^2/\text{h}/\text{bar}$.

Los elementos del interior del recipiente también pueden tener diferentes separadores de alimentación, siendo los mismos diseñados con diferentes gradientes de presión estándar. Preferiblemente, el gradiente de presión estándar del separador de alimentación del último elemento es al menos 50% mayor que el del primer elemento.

Además, esta invención puede incluir unos medios para retirar la corriente de permeado procedente de uno o más elementos enrollados en espiral aguas arriba del interior del recipiente a presión, independientemente de los elementos aguas abajo del interior del mismo recipiente.

Esta invención puede incluir además un sistema de filtración por membranas que tiene dos o más recipientes a presión conectados en paralelo. Cada uno de los recipientes a presión en paralelo tiene tres o más elementos con unos flujos específicos estándar, y opcionalmente unos gradientes de presión en el separador de alimentación, sustancialmente diferentes. Además, los elementos situados en posiciones correspondientes en el interior de los recipientes a presión en paralelo tienen unos flujos específicos estándar, y opcionalmente unos gradientes de presión estándar en el separador de alimentación, similares.

Breve descripción de los dibujos

Esta invención y sus realizaciones preferidas se pueden comprender mejor por medio de la referencia a la descripción detallada de la invención, acompañada por las figuras descritas a continuación. Dentro de estas secciones, las referencias numéricas similares se refieren a elementos similares.

La Fig. 1 es una vista en perspectiva, parcialmente en corte, de un elemento enrollado en espiral. El elemento se forma envolviendo alternativamente unas envolventes de filtración y unas láminas separadoras de alimentación alrededor de un tubo central de recogida de permeado. La envolvente de filtración comprende una lámina soporte de permeado intercalada entre dos láminas de membranas.

La Fig. 2 es una gráfica que muestra cómo puede disminuir sustancialmente el flujo de permeado desde el extremo de cabeza al extremo de cola del recipiente. La figura presenta el flujo calculado para un recipiente de seis elementos correspondiente a las condiciones de operación detalladas en el ejemplo comparativo 3.

La Fig. 3 es un esquema que muestra una configuración típica de un recipiente que contiene al menos tres elementos en serie.

La Fig. 4 es un esquema que muestra otra configuración típica de un recipiente que contiene al menos tres elementos en serie. En esta figura, hay una barrera para el flujo de permeado en el interior del tubo de permeado de uno de los elementos, y la solución de permeado se retira por ambos extremos del recipiente.

Descripción detallada de la invención

Se trata de un recipiente a presión para uso en un sistema de filtración donde el recipiente tiene al menos tres elementos enrollados en espiral de diferentes tipos, caracterizados por unos flujos específicos estándar diferentes y, opcionalmente, unas láminas separadoras de alimentación diferentes en los módulos.

Frecuentemente para las membranas se usa el flujo específico, que comúnmente se entiende como el flujo (caudal volumétrico de permeado por unidad de superficie activa de membranas) dividido por la presión motriz neta. La presión motriz neta, según se comentó anteriormente, se calcula restando a la presión aplicada, la presión del permeado y la diferencia de presión osmótica a través de la membrana. Aunque el flujo específico es una característica de la membrana, varía de manera previsible en función de la temperatura, la concentración y la presión aplicada. Adicionalmente, el flujo específico de una membrana en cualquier elemento que opera en este campo está sometido a cambios debidos al envejecimiento, el ensuciamiento y la compactación.

La asignación de un valor estándar a un elemento enrollado en espiral requiere especificar un punto específico en el tiempo dentro de la vida útil del elemento enrollado en espiral. Para el propósito de esta invención, el flujo específico estándar de un elemento enrollado en espiral se define en términos de un ensayo realizado después de 24 horas de la operación inicial, para permitir el equilibrio de la membrana, aunque los cambios posteriores a los resultados de este ensayo deben ser relativamente pequeños en ausencia de un ensuciamiento sustancial. El flujo específico estándar de un elemento enrollado en espiral se determina usando un ensayo con una alimentación con 32.000 ppm de NaCl, una recuperación de 8%, 25°C, y un flujo medio de 27 l/m²/h (16 gfd). Más específicamente, el flujo específico estándar de un elemento enrollado en espiral se define como el flujo medio (27 l/m²/h) dividido por un término de presión P , donde P se calcula a partir de unas cantidades medibles durante el ensayo:

$$P = (P_{\text{aliment.}} + P_{\text{conc.}})/2 - P_{\text{perm.}} - (\pi_{\text{alim. media}} - \pi_{\text{perm.}})$$

$P_{\text{aliment.}}$ es la presión aplicada en el lado de entrada del elemento. $P_{\text{conc.}}$ es la presión aplicada en el extremo opuesto (lado del concentrado) del elemento, y típicamente $P_{\text{conc.}}$ es menor que $P_{\text{aliment.}}$ debido a la resistencia al flujo en el interior del separador de alimentación. $P_{\text{perm.}}$ es la presión aplicada en el punto donde el permeado sale del elemento enrollado en espiral, y típicamente durante el ensayo esta contrapresión es muy pequeña. $\pi_{\text{alim. media}}$ es la presión osmótica de la solución formada mezclando volúmenes iguales de la solución de alimentación que entra en el elemento y la solución de concentrado que sale del elemento. $\pi_{\text{perm.}}$ es la presión osmótica de la solución de permeado. Advuértase que P se aproxima a la presión motriz neta media en un elemento enrollado en espiral. (Para calcular la presión motriz neta media, $\pi_{\text{alim. media}}$ se debe remplazar por la presión osmótica media en la superficie de la membrana). Esta definición del flujo específico estándar no incluye el impacto de la polarización sobre la presión osmótica, de modo que el término P estima ligeramente por exceso la presión motriz neta, pero es más sencillo de calcular.

Esta definición del flujo específico estándar de un elemento enrollado en espiral es congruente con las prácticas aceptadas en la industria, mientras que se especifique un parámetro único y fácil de determinar. El período de tiempo de 24 horas para alcanzar el equilibrio es habitual para especificar el rendimiento de un elemento. Las condiciones de ensayo (una recuperación de 8%, 25°C, y 32.000 ppm de NaCl) son congruentes con los ensayos usados para caracterizar productos para agua de mar, sin superar los criterios típicos del flujo máximo para los elementos con un alto flujo específico estándar.

Los flujos muy altos provocan una polarización excesiva y unas sustanciales resistencias internas al flujo, tal como en el interior de la lámina soporte de permeado. Estos efectos provocan una estimación por exceso de la presión aplicada requerida bajo unas condiciones de flujo más típicas (12-17 l/m²/h). Para esta invención, el flujo específico estándar de un elemento enrollado en espiral se define en términos de un ensayo que durante el proceso de medida estipula un flujo medio de 27 l/m²/h. El flujo específico estándar se puede estimar a partir de los resultados (flujo medio y término P) de un ensayo típico para agua de mar, con tal que el flujo del elemento enrollado en espiral no supere 34 l/m²/h (20 gfd).

Como ejemplo, para un elemento enrollado en espiral con un buen rechazo y con una mínima pérdida de carga a través del separador de alimentación, el término P anterior corresponde a aproximadamente 27,6 bar (400 psi) en un ensayo típico para agua de mar a 55,2 bar (800 psi). Un elemento de 32,5 m² (350 ft²) con 21,2 m³/día (5.600 gpd)

tiene un flujo de 27 l/m²/h (16 gfd) y corresponde a un flujo específico estándar de aproximadamente 1,0 l/m²/h/bar (0,04 gfd/psi).

En esta invención se requiere que al menos tres elementos individuales del interior del recipiente tengan unos valores sustancialmente diferentes del flujo específico estándar, pero es incluso más deseable que al menos dos elementos, y preferiblemente tres, del interior del recipiente pertenezcan a diferentes clases (o tipos) conocidas, de tal modo que varíe sustancialmente el flujo específico estándar de estos tipos de elementos diferentes. Los elementos del mismo tipo se construyen similarmente y son suministrados por el fabricante con una designación particular que corresponde al grupo de elementos de ese tipo.

Un flujo específico estándar de un tipo de elemento enrollado en espiral se puede definir como el valor medio del flujo específico estándar de una población representativa de unos elementos individuales (al menos 20) pertenecientes a ese tipo (o clase o modelo). En esta invención, se requiere que al menos tres elementos individuales del interior del recipiente tengan unos valores del flujo específico estándar sustancialmente diferentes; incluso es más deseable que estos tres elementos del interior del recipiente pertenezcan a diferentes clases (o tipos) conocidas, de tal modo que el flujo específico estándar de estos tipos diferentes de elementos varíe sustancialmente.

Los elementos del mismo tipo tienen una construcción similar y son suministrados por el fabricante, quien frecuentemente identifica el tipo mediante una marca o un nombre de producto o un número, que designa al grupo de elementos de ese tipo.

Con la invención se ha descubierto que el uso de más de un tipo de elementos en el interior del recipiente permite la selección de los elementos con un intervalo más amplio de flujos específicos estándar, lo que da lugar a una mejora sustancial en el rendimiento del recipiente a presión. Como se emplea en esta invención, un tipo de elemento enrollado en espiral se puede caracterizar por una única población de elementos con una distribución de valores del flujo específico estándar que tiene una media y un coeficiente de relación de variación, es decir una desviación típica de la población dividida por la media de la población, menor o igual que 1,1. Es preferible que los elementos individuales usados en esta invención tengan un flujo específico estándar que se desvíe del flujo específico estándar medio, para el tipo de elemento correspondiente, en menos de 20%. Incluso es más preferible que esta desviación sea menor que 15%.

Con la invención también se ha determinado que la especificación del tipo de elemento en cada posición del interior del recipiente permite un procedimiento de carga sustancialmente simplificado en sistemas grandes con varios recipientes en paralelo, especialmente comparado con los sistemas que dependen de ensayar y clasificar los elementos dentro de un tipo particular. Con la invención se ha descubierto que entre los recipientes hay menos variación del flujo específico estándar de los elementos para cualquier posición de los recipientes.

Como ejemplo, la Tabla 1 muestra los valores del flujo específico estándar en cuatro tipos de elementos FilmTec para agua de mar calculados a partir del flujo, la superficie y las condiciones de ensayo especificados por el fabricante.

Tabla 1. Flujo específico estándar de unos elementos FilmTec para agua de mar

Elemento FILMTEC™	Caudal m ³ /día (gpd)		Rechazo (%)	Superficie m ² (ft ²)		Flujo específico estándar l/m ² /h/bar (gfd/psi)	
SW30HR-380	22,7	(6.000)	99,7	35,3	(380)	0,097	(0,039)
SW30HR-320	22,7	(6.000)	99,75	29,7	(320)	1,15	(0,047)
SW30HR LE-380	28,4	(7.500)	99,75	35,3	(380)	1,22	(0,049)
SW30-380	34,0	(9.000)	99,4	35,3	(380)	1,46	(0,059)

La Tabla 2 enumera los valores de la bibliografía del fabricante para el flujo y el paso de sal de varios elementos comerciales para agua de mar de un metro de longitud y 20 cm de diámetro. Es digno de mención que los flujos asociados con las propuestas comerciales para agua de mar son bastante congruentes entre los fabricantes. Con el uso de una superficie activa de membranas de 32,5 m² (350 ft²), todos los flujos específicos estándar de los elementos de la Tabla 2 se sitúan entre 0,74 l/m²/h/bar (0,03 gfd/psi) y 1,23 l/m²/h/bar (0,05 gfd/psi).

Desde la introducción comercial de las membranas de poliamida aromática en la mitad de los años 80 (M. Wilf & K. Klinko, "Improving performance and economics of RO seawater desalting using capillary membrane pretreatment", Hydranautics, Inc., Junio 1998), se puede usar los datos de la publicación de Hydranautics para calcular qué elementos para agua de mar han tenido un flujo específico estándar de aproximadamente 1,0 l/m²/h/bar (0,04 gfd/psi). El valor 1,0 l/m²/h/bar (0,04 gfd/psi) evita sustancialmente el desbordamiento del elemento de cabeza ya que los elementos para la desalinización de agua de mar operan comúnmente con una presión aplicada entre

aproximadamente 55 bar (800 psi) y 69 bar (1.000 psi), con una resistencia osmótica de la alimentación normalmente entre 24 bar (350 psi) y 31 bar (450) psi.

Tabla 2. Caudal y rechazo de algunos elementos comerciales para agua de mar

Fabricante	Elemento	Caudal m ³ /día (gpd)	Rechazo (%)
TORAY Industries, Inc.	TM820-370	23,0 (6.076)	99,75
TORAY Industries, Inc.	TM820-400	25,0 (6.604)	99,75
TORAY Industries, Inc.	SU-820	16,0 (4.227)	99,8
TORAY Industries, Inc.	SU-820L	20,0 (5.283)	99,7
TORAY Industries, Inc.	SU-820FA	19,0 (5.019)	99,75
TORAY Industries, Inc.	TM820H-370	21,0 (5.548)	99,8
Hydranautics	SWC1	18,9 (5.000)	99,6
Hydranautics	SWC3	22,3 (5.900)	99,7
Hydranautics	SWC3+	26,5 (7.000)	99,8
Hydranautics	SWC4	20,8 (5.500)	99,8
Hydranautics	SWC4+	24,6 (6.500)	99,8
Koch Membrane Systems, Inc.	TFC®2822 SS-300	18,9 (5.000)	99,6
Koch Membrane Systems, Inc.	TFC®2822 SS-360	22,7 (6.000)	99,6
Koch Membrane Systems, Inc.	TFC®2822 SS-300 Premium	17,0 (4.500)	99,75
Koch Membrane Systems, Inc.	TFC®2822 SS-360 Premium	20,8 (5.500)	99,75
TriSep Corporation	8040-ACMS-SSA	22,7 (6.000)	99,5

- 5 Típicamente, las membranas que tienen 1,0 l/m²/h/bar (0,04 gfd/psi) se usan en aplicaciones de agua de mar para ajustar el desequilibrio de flujo que tiene lugar en el interior de un recipiente de múltiples elementos. La operación de recipientes a presión con elementos enrollados en espiral que tienen un flujo específico estándar alto en soluciones de alimentación con una resistencia osmótica alta, tal como el agua de mar, típicamente crea un mayor desequilibrio de flujo. Un flujo alto en un elemento de cabeza da lugar a una mayor concentración de soluto en el concentrado, el cual alimenta los elementos posteriores del recipiente. El aumento de la resistencia osmótica de la alimentación provoca que los elementos posteriores del recipiente operen con un flujo sustancialmente inferior. Esto se demuestra en los ejemplos comparativos 3 y 4, siguientes. Un recipiente con unos elementos que tienen un flujo específico estándar de 0,98 l/m²/h/bar (0,04 gfd/psi) mostró unos valores extremos de flujos de operación que variaban entre 5 y 34 l/m²/h. Sin embargo, en una simulación similar con elementos de flujo específico estándar de 1,19 l/m²/h/bar (0,07 gfd/psi), cerca del extremo de salida del recipiente tuvo lugar un flujo incluso inferior de 3,3 l/m²/h/bar (1,9 gfd), y cerca del extremo de entrada del recipiente tuvo lugar un flujo mucho más alto de 44 l/m²/h (26 gfd).

Esta invención permite un uso aceptable de los elementos para agua de mar de dimensiones estándar con flujos incluso mayores. La invención necesita que haya más de un tipo de elemento en el interior del recipiente. En particular, el flujo específico estándar de un elemento aguas abajo del recipiente es al menos 50% mayor, y más preferiblemente al menos 100% mayor, que el flujo específico estándar de un elemento aguas arriba del mismo recipiente. Lo más preferido es que este elemento aguas abajo tenga un flujo específico estándar mayor que 1,5 l/m²/h/bar (0,061 gfd/psi).

Es deseable que los elementos que tienen un flujo específico estándar alto también mantengan un coeficiente de permeabilidad de soluto relativamente bajo. El coeficiente de permeabilidad de soluto, referido a menudo como valor B, determina la velocidad a la que la sal se difunde a través de una membrana. (Véase, por ejemplo, Osada & Nakagawa, *Membrane Science and Technology*, capítulo 9, "Reverse Osmosis", Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1992). El coeficiente de permeabilidad de soluto es uno de los parámetros fundamentales de una membrana osmótica, pero se sabe que su valor varía con la composición del soluto y, particularmente, con la temperatura. Para un conjunto específico de condiciones de operación, el coeficiente de permeabilidad de soluto de una membrana B_{mem} se puede calcular a partir del flujo J y el paso intrínseco de soluto C_p/C_m , según la siguiente fórmula:

$$B_{mem} = (J \cdot C_p/C_m) / (1 - C_p/C_m)$$

en esta ecuación, C_p y C_m representan, respectivamente, las concentraciones de soluto en el permeado y en la superficie de la membrana en el lado de la alimentación. Debido a la polarización de concentración, la concentración en la superficie de la membrana puede ser mayor que la concentración en la alimentación.

Para esta invención, la permeabilidad de soluto estándar de un elemento enrollado en espiral se define similarmente, pero con la exigencia adicional de que los parámetros se obtengan bajo las condiciones de ensayo especificadas para el flujo específico estándar. Específicamente, se hicieron medidas después de 24 horas de operación, usando 25°C, una alimentación con 32.000 ppm de NaCl, una recuperación de 8% y un flujo de 27 l/m²/h. Adicionalmente, la permeabilidad de soluto estándar B_{ele} se define en términos de la concentración media de la alimentación, C_f , que corresponde a la concentración de NaCl obtenida mezclando volúmenes iguales de la solución de alimentación que entra en el elemento y la solución de concentrado que sale del elemento. Aunque la fórmula simplificada no tiene en cuenta el impacto de la polarización de concentración, permite una medida más sencilla de los parámetros requeridos.

$$B_{ele} = (J \cdot C_p / C_f) / (1 - C_p / C_f)$$

En esta invención, se usa la permeabilidad de soluto estándar para comparar elementos diferentes mediante la relación anterior. Aunque la permeabilidad de soluto estándar de un elemento enrollado en espiral se define en base a las condiciones específicas de ensayo, es posible aproximar esta relación para dos elementos a condición de que para los dos ensayos sean similares la temperatura, las concentraciones y la recuperación, y a condición de que el flujo medido en los ensayos sea menor que 34 l/m²/h (20 gfd).

El último elemento en serie del interior del recipiente opera con concentraciones más altas de sales en la alimentación que los demás elementos, luego un rechazo escaso puede influir considerablemente en el rendimiento del sistema y es importante que el rechazo de sales del elemento de cola sea alto. Es preferible que el elemento de cola tenga al menos un rechazo de sales lo suficientemente bueno para producir agua potable (<500 ppm) cuando opera por separado durante un ensayo estándar con 25°C, una alimentación con 32.000 ppm de NaCl, una recuperación de 8% y un flujo de 27 l/m²/h. Más preferiblemente, en este ensayo el rechazo debe ser de la calidad del agua embotellada (<300 ppm). En el caso de aplicaciones de NF, para todos los elementos del interior del recipiente es deseable el paso sustancial de NaCl (paso de NaCl mayor que 20%, con las condiciones de ensayo anteriores), pero también se desea que los elementos tengan un rechazo alto para otros componentes. Para las aplicaciones de NF con agua de mar que usan unos elementos de diferentes flujos específicos estándar en el interior de un recipiente, es preferible que para cualquier elemento del recipiente el paso de sulfato sea menor que 1% cuando los elementos se ensayan individualmente con una alimentación que consiste en 32.000 ppm de NaCl y 2.000 ppm de MgSO₄, usando las condiciones de 25°C, una recuperación de 8% y un flujo de 27 l/m²/h.

Un aspecto adicional de esta invención es tener unos elementos enrollados en espiral en el interior de un recipiente a presión que tienen separadores de alimentación diferentes. Los separadores de alimentación se describen en varias patentes y solicitudes, que incluyen la publicación de solicitud de patente de EE.UU. 2003-0205520 que se incorpora aquí como referencia. El separador de alimentación de un elemento enrollado en espiral proporciona al flujo de alimentación una vía a través de la superficie de la membrana. Este también crea una mezclado en la superficie de la membrana, lo que disminuye la polarización de concentración. El coste de esta mejora en la transferencia de masa es un aumento de la pérdida de carga a lo largo del elemento, y la suma de pérdidas de carga para los elementos individuales en serie produce una pérdida de carga a través del recipiente.

La mezclado en la superficie de la membrana es particularmente importante en el caso de soluciones con una resistencia osmótica alta. Se ha descubierto que el rendimiento del recipiente mejora con la selección de unos separadores de alimentación para que la mezclado sea mayor en los elementos aguas abajo, y particularmente en el último elemento en serie, donde la resistencia osmótica es más grande y la pérdida de carga tiene un impacto mínimo sobre el rendimiento del recipiente. Está dentro del alcance de esta invención que el elemento de cabeza y el elemento de cola del interior del recipiente puedan usar diferentes materiales en el separador de alimentación, y lo más preferido es que el gradiente de presión estándar en el separador de alimentación del último elemento sea al menos 50% mayor que el gradiente de presión estándar en el separador de alimentación del primer elemento.

Para esta invención, el gradiente de presión estándar en el separador de alimentación se define como el gradiente de presión (pérdida de carga por unidad de distancia) en la dirección del flujo de alimentación medido haciendo pasar a través del elemento agua a 25°C, mientras que se bloquea el flujo de permeado. Este ensayo especifica que el caudal volumétrico de agua es proporcional a la superficie activa de membranas del interior del elemento; el caudal volumétrico es, y ha de ser, inversamente proporcional a la longitud del elemento. Por ejemplo, en un elemento de un metro de longitud, de 35,3 m² (380 ft²), el caudal usado para medir el gradiente de presión estándar es 190 m³/día. Lo más preferible es que el gradiente de presión estándar sea al menos 0,4 bar/m, que corresponde a una pérdida de carga a través del elemento de un metro de longitud de aproximadamente 0,4 bar (6 psi).

Típicamente, las altas recuperaciones permitidas por esta invención pueden reducir el volumen de solución de alimentación que fluye a través de la superficie de la membrana. Tal disminución de la velocidad de la alimentación aumenta la polarización, disminuye el flujo y fomenta el ensuciamiento; esto puede dar lugar a que el elemento enrollado en espiral opere fuera de las especificaciones del fabricante para una recuperación máxima. Por estas razones, en el interior del recipiente se deben escalonar los elementos de modo que la velocidad del flujo de alimentación a través de la superficie de la membrana se mantenga en un valor relativamente alto. La velocidad del flujo de alimentación se puede controlar variando el área de la sección transversal de los separadores de alimentación en cada elemento del recipiente a presión. El área de la sección transversal de un separador de

alimentación se calcula multiplicando el espesor del separador de alimentación por la mitad de la superficie activa de membranas y dividiendo por la longitud del elemento.

En una realización preferida, un elemento aguas abajo del interior del recipiente puede tener un área de la sección transversal del separador de alimentación que es al menos 15% más pequeña que la del elemento de cabeza, y más preferiblemente 30% más pequeña. Cuando el elemento opera según un criterio de recuperación <15%, la velocidad de la alimentación a través del último elemento en serie es más grande que la velocidad en el interior de uno o dos de los elementos en serie previos. Adicionalmente, cuando un elemento enrollado en espiral tal tiene un diámetro exterior que es sustancialmente más pequeño que el diámetro interior del recipiente, unos cierres herméticos a la salmuera, situados entre la superficie exterior del elemento y la superficie interior del recipiente a presión, evitan que la corriente de alimentación borde el elemento.

En otro aspecto de la invención, el permeado procedente de la corriente de al menos un elemento se retira del recipiente a presión, en lugar de hacerlo fluir a través del recipiente a presión adyacente. Esto mantiene la presión motriz igual a la del elemento adyacente conservando la presión del permeado baja. El permeado se puede retirar del recipiente a presión por medio de una nueva abertura de salida o por medio del conducto de permeado en el extremo de cabeza del recipiente a presión. La patente de EE.UU. nº 4.046.685 enseña la retirada del flujo de permeado, tanto por el extremo de cabeza como por el de cola del recipiente, y la segregación del permeado generado en los elementos situados en extremos opuestos. Como se representa en la Fig. 4, en este caso el recipiente (40) tiene en sus dos extremos unas aberturas (62, 64) de permeado para proporcionar unos medios para que el fluido pase entre las tuberías exteriores y los tubos (6) de permeado de los elementos extremos (50, 54). Una barrera (66) para el flujo de permeado segrega las dos corrientes de permeado que salen de los elementos situados en extremos opuestos del recipiente. La barrera (66) se sitúa entre los elementos o en el interior del tubo (6) de permeado de uno de los elementos, y ello evita la mezcla sustancial de las dos corrientes de permeado. No se requiere que la barrera del flujo sea impenetrable para evitar sustancialmente la mezcla. Sin embargo, cuando para el permeado se usan interconectores, la barrera debe tener una resistencia al flujo que supere en al menos un factor de cinco la resistencia al flujo de los interconectores (58) de permeado usados en el interior del recipiente (40) para conectar los tubos de permeado de los elementos adyacentes. En el diseño convencional, esta segregación de las corrientes de permeado permite que se retire el permeado de la mejor calidad de los elementos aguas arriba del interior del recipiente (40). Al mismo tiempo, el uso de elementos aguas abajo de flujo específico estándar más alto puede permitir un flujo alto de permeado procedente del extremo de cola (48) del recipiente (40) con una buena calidad de permeado. Dependiendo de las condiciones de operación, el agua procedente de los elementos aguas abajo puede ser adecuada para agua industrial, potable o embotellada. También es posible someter esta corriente de permeado a unas etapas de tratamiento adicionales o usarla en mezcla.

Cuando la barrera para el flujo de permeado es esencialmente impenetrable, las dos corrientes de permeado también se pueden mantener a presiones diferentes. En este caso, el uso de contrapresión en el permeado puede proporcionar una distribución de flujo relativamente uniforme, con independencia de si los elementos de mayor flujo específico estándar se sitúan cerca del extremo aguas arriba o del extremo aguas abajo del recipiente. En una realización preferida, en el permeado tiene lugar contrapresión cuando la corriente de permeado combinada procedente de los elementos de flujo específico estándar alto se vuelve la corriente de alimentación para un segundo paso por un recipiente a presión. Lo más preferiblemente, los elementos de mayor flujo específico estándar se sitúan cerca del extremo de entrada del primer recipiente, ya que esta disposición proporciona una presión motriz neta mayor para provocar el flujo de permeado en ambos elementos del primer y segundo paso.

Una ventaja particular de la invención es su utilidad en el mejoramiento de sistemas existentes para mejorar la recuperación con un coste de capital mínimo. El coste de los elementos enrollados en espiral comerciales es pequeño comparado con el coste del sistema de filtración para agua de mar. Esta invención permite que aumente la eficacia del recipiente a presión mediante la retirada del recipiente de uno o más de los elementos existentes y la carga de nuevos elementos, de los que al menos uno tiene un flujo específico estándar mayor que 1,5 l/m²/h/bar (0,061 gfd/psi). La sustitución selectiva de elementos para proporcionar una distribución de flujo más uniforme permite operar el recipiente con un mayor flujo medio y con una mayor recuperación, superando el flujo máximo de cualquiera de los elementos del recipiente a presión. Esto se evidencia como una opción particularmente ventajosa cuando se reconoce que, típicamente, los elementos sólo representan el 5% del coste de capital en las instalaciones para agua de mar. Alternativamente, un recipiente se puede mejorar para obtener la misma recuperación, mientras que opera con un menor flujo medio máximo en los elementos.

Ejemplos

Los siguientes ejemplos de unas realizaciones, que no pretenden limitar la invención, ilustran aún más la invención:

Ejemplo comparativo 1

Se fabricaron cuatro elementos con 2,6 m² de membrana activa que tenían las especificaciones usadas en los elementos FILMTEC SW30HR-380. Los elementos tenían un flujo específico estándar medio de 98 l/m²/h/bar (0,04 gfd/psi) y una permeabilidad de soluto estándar media de 0,066 l/m²/h (0,039 gfd). Los elementos se conectaron en serie en el interior de un recipiente a presión. El recipiente se ensayó con una alimentación con 3,2% de NaCl a

21°C, y una presión aplicada de 55 bar (798 psi). La recuperación combinada del recipiente a presión fue 19,6%. La concentración de permeado combinado fue 245 ppm.

Se calculó el flujo específico estándar del primer elemento que fue aproximadamente 27 l/m²/h. El flujo medio de los tres primeros elementos fue 22,6 l/m²/h (13,3 gfd); el flujo medio del cuarto elemento en serie fue 15,6 l/m²/h (9,2 gfd). El cuarto elemento operó con una recuperación de menos de 20% y con un flujo de aproximadamente 60% del flujo del primer elemento.

Ejemplo 1

Se construyó un elemento de membranas usando una membrana FILMTEC SW30HR. Se construyeron cuatro elementos que tenían 2,6 m² de membrana activa, usando una membrana FILMTEC SW30SXLE. Se trataron tres de los elementos SW30SXLE sumergiendo las membranas en una solución acuosa de 2.000 ppm de NaOCl durante 30 minutos, a un pH de 10,5. La Tabla 3 muestra el flujo específico estándar y la permeabilidad de soluto estándar medidos para estos elementos.

Tabla 3. Elementos descritos en el Ejemplo 1

Elemento	Membrana	Flujo específico estándar l/m ² /h/bar (gfd/psi)		Permeabilidad de soluto estándar l/m ² /h (gfd)	
A	SW30HR	1,07	(0,043)	0,29	(0,17)
B	SW30XLE	1,43	(0,058)	0,45	(0,26)
C	SW30XLE (tratada)	2,12	(0,086)	0,33	(0,19)
D	SW30XLE (tratada)	1,85	(0,075)	0,32	((0,19)
E	SW30XLE (tratada)	1,99	(0,082)	0,20	(0,12)

Se cargaron en un recipiente los elementos A, B y C, de modo que el elemento A estaba en la posición de cabeza y el elemento C en la posición de cola. Se bloqueó el flujo de permeado entre los elementos B y C, para permitir recoger separadamente la solución de permeado del elemento C. El recipiente se ensayó con una alimentación con 3,2% de NaCl a 21°C, y una presión aplicada de 55 bar (798 psi). La recuperación combinada fue 25,8%. El flujo de los elementos A y B promedió 29 l/m²/h (17 gfd). El flujo del elemento de cola C fue 36,2 l/m²/h (21,3 gfd). La concentración de NaCl en el permeado combinado fue 428 ppm.

El elemento C de la Tabla 3 tenía una concentración de permeado de 357 ppm, bajo las condiciones usadas para medir la permeabilidad de soluto estándar. El recipiente de tres elementos que incluía ese elemento dio lugar a una distribución de flujo relativamente uniforme y produjo agua potable. El elemento E de la Tabla 3 tenía un flujo específico estándar similar al del elemento C, pero su permeabilidad de soluto estándar correspondía a aproximadamente 237 ppm en el ensayo a 25°C, con una alimentación con 32.000 ppm de NaCl, una recuperación de 8% y un flujo de 27 l/m²/h. Este elemento permitió producir agua potable con unas presiones incluso menores o unas recuperaciones incluso más altas.

Ejemplo 2

Se trataron dos elementos FILMTEC SW30XLE-380 sumergiéndolos durante 30 minutos en una solución acuosa de 1.500 ppm y 2.000 ppm, respectivamente, de NaOCl a un pH de 10,5. Los elementos tenían los valores del flujo específico estándar y la permeabilidad de soluto estándar mostrados en las filas H e I de la Tabla 4. Además, en las filas F y G se muestran, respectivamente, los valores del flujo específico estándar y la permeabilidad de soluto estándar de los elementos FILMTEC SW30HR-380 y SW30XLE-380 que no se pusieron en contacto con NaOCl. La relación entre la permeabilidad de soluto estándar y el flujo específico estándar en el elemento de cola (0,064), dividida por la relación entre la permeabilidad de soluto estándar y el flujo específico estándar en el elemento de cabeza (0,071), es menor que 1. Para todos los elementos de la Tabla 4, el gradiente de presión estándar fue aproximadamente 0,2 bar/m, y el área de la sección transversal del separador de alimentación fue aproximadamente 230 cm².

Tabla 4. Elementos descritos en el Ejemplo 2

Elemento	NaOCl	Flujo específico estándar l/m ² /h/bar (gfd/psi)		Permeabilidad de soluto estándar l/m ² /h (gfd)	
F	0 ppm	0,96	(0,039)	0,068	(0,040)
G	0 ppm	1,43	(0,058)	0,042	(0,025)
H	1.500 ppm	2,09	(0,085)	0,13	(0,076)
I	2.000 ppm	2,66	(0,108)	0,08	((0,100)

Los flujos de los elementos F, G, H e I se simularon usando un programa de simulación (ROSA, versión 5.4) de FilmTec. La simulación se realizó variando el factor de ensuciamiento de los elementos SW30-380 para los valores 0,64, 1,05, 1,44 y 2,0. Se simuló un recipiente compuesto por tres elementos del tipo F, un elemento del tipo G y tres elementos del tipo I, simulando por separado cada elemento y dejando que el concentrado de cada elemento fuera la alimentación del elemento siguiente. Después de cada elemento se hizo una corrección en las concentraciones de permeado para las diferentes permeabilidades de soluto en estos elementos, en comparación con el elemento SW30-380. En esta simulación, la alimentación con 3,5% de agua de mar se componía de 19.479 ppm de Cl, 10.460 ppm de Na, 1.450 ppm de Mg, 2.760 ppm de SO₄, 450 ppm de Ca y 400 ppm de K.

En esta simulación se consiguió una recuperación de 60%, usando una presión aplicada de 66,6 bar (967 psi) y un caudal de alimentación de agua en bruto de 196 m³/día (36 gpm) a 25°C. Los cálculos mostraron que el elemento de cabeza tenía el mayor flujo, de 33,6 l/m²/h (19,8 gfd). La recuperación máxima por elemento fue 15%. La concentración de permeado se calculó en 295 ppm, por debajo de lo aceptado en la técnica para el agua potable.

Ejemplo Comparativo 2

Se realizó una simulación en la que se obtuvo una recuperación de 60% con siete elementos FILMTEC SW30HR-380 en serie. El primer elemento tenía un flujo medio de 39,6 l/m²/h (23,3 gfd), una recuperación de 17%, y la presión aplicada fue 74,2 bar (1.076 psi).

Para realizar la simulación, se simuló un recipiente que contenía unos elementos de un metro de longitud y 20 cm de diámetro, sin el uso del software ROSA, realizando cálculos del flujo en la dirección axial, desde la alimentación a la cola del recipiente a presión, en incrementos de 2,54 cm (1 inch). En cada caso, se proporcionó la presión aplicada, la concentración de la alimentación y el flujo en el primer elemento, y se calculó el rendimiento (pérdida de carga, flujo y paso de sales) para cada incremento. Los resultados se reprodujeron en las sucesivas secciones de 2,54 cm (1 inch) de longitud a lo largo del recipiente.

Los cálculos asumieron un flujo específico y una permeabilidad de soluto para las membranas del interior de cada elemento; se calculó el flujo y el paso de sales para cada incremento según unas fórmulas estándar (Osada & Nakagawa, *Membrane Science and Technology*, capítulo 9, "Reverse Osmosis", Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1992). Se estimó la polarización en la superficie a partir de la velocidad y el flujo de la alimentación según las ecuaciones proporcionadas para los elementos FilmTec en G. Schock & A. Miquel, "Mass transfer and pressure loss in spiral wound modules", *Desalination*, 65, (1987), 339-352). Para la polarización se escogieron los valores necesarios para igualar los valores del flujo específico estándar y la permeabilidad de soluto estándar indicados anteriormente.

Ejemplo 3 y Ejemplos Comparativos 3 y 4

Se realizaron unas simulaciones usando los métodos del Ejemplo Comparativo 2.

Las Tablas 5-7 siguientes proporcionan los resultados de tres simulaciones, en donde cada una tenía un caudal de alimentación de 174 m³/día (46.000 gpd) y una recuperación de 50% para 3,8% de agua de mar. El Ejemplo 3 y los Ejemplos Comparativos 3 y 4, simularon un recipiente a presión que contenía seis elementos de 35,3 m² (380 ft²), y el flujo medio en el recipiente fue 17 l/m²/h (10 gfd). Todos los flujos específicos de las membranas (valores A) asumidos para los elementos corresponden a intervalos fácilmente disponibles. Se asumió que los valores de la permeabilidad de soluto de las membranas (valores B) eran los mismos (0,068 l/m²/h) para todos los elementos del interior del recipiente, ya que se juzgó que este valor tenía un impacto mínimo sobre el flujo en los intervalos de operación que se estaban examinando. El paso de sales para el permeado de cada elemento fue aproximadamente proporcional al valor B asumido. Las concentraciones de permeado combinado calculadas en el Ejemplo 3, el Ejemplo Comparativo 3 y el Ejemplo Comparativo 4, fueron 369 ppm, 315 ppm y 369 ppm. Las presiones aplicadas requeridas fueron 68,8 bar (998 psi), 72,5 bar (1.051 psi) y 66,9 bar (971 psi), respectivamente. El Ejemplo 3 demuestra que los elementos del recipiente pueden funcionar con valores bajos del flujo máximo, el flujo medio y la recuperación máxima en los elementos.

Tabla 5. Distribución de flujo para el Ejemplo 3

Elemento	Superficie (m ²)	Valor A (lmh/bar)	Valor B (lmh)	Flujo medio (lmh)	Flujo máximo (lmh)	Recuperación
1	35,3	0,739	0,068	23,1	24,8	11,5%
2	35,3	0,862	0,068	21,6	23,8	11,9%
3	35,3	1,231	0,068	21,1	24,4	13,1%
4	35,3	1,970	0,068	18,0	22,6	12,9%
5	35,3	2,462	0,068	11,7	15,1	9,7%
6	35,3	2,462	0,068	6,8	8,7	6,2%

Tabla 6. Distribución de flujo para el Ejemplo Comparativo 3

Elemento	Superficie (m ²)	Valor A (lmh/bar)	Valor B (lmh)	Flujo medio (lmh)	Flujo máximo (lmh)	Recuperación
1	35,3	0,985	0,068	30,7	34,0	15,3%
2	35,3	0,985	0,068	24,1	27,2	13,8%
3	35,3	0,985	0,068	18,2	20,9	12,1%
4	35,3	0,985	0,068	13,2	15,4	10,0%
5	35,3	0,985	0,068	9,3	11,0	7,9%
6	35,3	0,985	0,068	6,5	7,6	5,9%

5

Tabla 7. Distribución de flujo para el Ejemplo Comparativo 4

Elemento	Superficie (m ²)	Valor A (lmh/bar)	Valor B (lmh)	Flujo medio (lmh)	Flujo máximo (lmh)	Recuperación
1	35,3	1,724	0,068	37,7	44,3	18,8%
2	35,3	1,724	0,068	25,6	30,9	15,4%
3	35,3	1,724	0,068	16,8	20,7	11,9%
4	35,3	1,724	0,068	10,7	13,2	8,6%
5	35,3	1,724	0,068	6,8	8,5	5,9%
6	35,3	1,724	0,068	4,2	5,3	3,9%

Ejemplo 4

Se realizaron unos cálculos como en el Ejemplo 3, usando una alimentación de 167 m³/día (44.000 gpd) con 3,5% de agua de mar. Para este recipiente, una presión aplicada de 79,3 bar (1.150 psi) dio lugar a una recuperación simulada de 60,8%. En este caso, los siete elementos del interior del recipiente difirieron potencialmente en los valores A, los valores B y la superficie activa, como se indica en la tabla. La concentración de permeado combinado se estimó en 448 ppm. Las simulaciones mostraron que cada elemento del interior de este recipiente tenía unos valores bajos del flujo máximo, el flujo medio y la recuperación en los elementos. La división entre el flujo total de permeado y la superficie activa de membranas proporcionó un flujo medio en el recipiente de 18,8 l/m²/h (11,1 gfd),

10

15

Tabla 8. Distribución de flujo para el Ejemplo 4

Elemento	Superficie (m ²)	Valor A (lmh/bar)	Valor B (lmh)	Flujo medio (lmh)	Flujo máximo (lmh)	Recuperación
1	35,3	0,616	0,068	26,5	28,2	13,8%
2	33,0	0,739	0,068	26,1	28,7	14,4%
3	33,0	0,862	0,068	23,3	26,3	14,9%
4	30,7	1,231	0,170	21,2	25,5	14,9%
5	30,7	2,462	0,170	17,3	22,7	14,3%
6	30,7	2,462	0,170	9,5	12,6	9,2%
7	30,7	2,462	0,170	5,3	7,0	5,6%

REIVINDICACIONES

1.- Un aparato para purificar agua, que comprende:

- 5 un recipiente (40) de filtración a presión que tiene unos extremos opuestos de entrada (46) y salida (48), unas aberturas (42, 44) para hacer pasar una solución de alimentación y retirar una solución de concentrado, al menos una abertura (62) de permeado, y que contiene al menos tres elementos enrollados en espiral (50, 52, 54), teniendo cada elemento enrollado en espiral al menos una envolvente de membranas (2), una lámina separadora (4) de alimentación y un tubo (6) de recogida de permeado, donde los elementos enrollados en espiral se conectan coaxialmente en serie en el interior del recipiente (40) de filtración a presión; en donde los elementos enrollados en espiral en serie comprenden:
- 10 a. un elemento de cabeza (50) con una entrada en comunicación con el extremo (46) de entrada del recipiente (40) de filtración a presión;
- b. un elemento intermedio (52) conectado a un elemento aguas arriba y a un elemento aguas abajo, de modo que el elemento intermedio (52) está soportado y alineado axialmente en el interior del recipiente (40) de filtración a presión; y
- 15 c. un elemento de cola (54) con una abertura de salida en comunicación con el extremo (48) de salida del recipiente (40) de filtración a presión;

caracterizado por que:

- 20 - los elementos enrollados en espiral tienen diferentes flujos específicos estándar, y comprenden un elemento enrollado en espiral que tiene un flujo específico estándar de valor máximo, un elemento enrollado en espiral que tiene un flujo específico estándar de valor mínimo, y un elemento enrollado en espiral que tiene un flujo específico estándar de valor intermedio;
- el flujo específico estándar de valor máximo dividido por el flujo específico estándar de valor mínimo es mayor que 2; y el elemento intermedio tiene un flujo específico estándar cuyo valor es intermedio entre 1,25 por el valor mínimo y 0,85 por el máximo, y por que
- 25 - el flujo específico estándar del elemento de cola (54) dividido por el flujo específico estándar del elemento de cabeza (50) es mayor que 2.

2.- El aparato de la reivindicación 1, donde el elemento de cabeza, el elemento intermedio y el elemento de cola son, cada uno, de un tipo diferente de elemento.

30 3.- El aparato de la reivindicación 1, en donde el flujo específico estándar del elemento de cola (54) es mayor que 1,5 l/m²/h/bar.

4.- El aparato de la reivindicación 1, en donde la lámina separadora (4) de alimentación del elemento de cola (54) tiene un gradiente de presión estándar que es 50% mayor que el gradiente de presión estándar de la lámina separadora (4) de alimentación del elemento de cabeza (50).

5.- Un procedimiento para purificar agua, que comprende las etapas de:

- 35 a. hacer fluir una solución de alimentación a través de un recipiente (40) de filtración a presión que tiene unos extremos opuestos (46, 48) y que contiene al menos tres elementos enrollados en espiral (50, 52, 54) en serie, incluyendo los elementos en serie:
- un elemento de cabeza (50) con una entrada en comunicación con el extremo (46) de entrada del recipiente (40) de filtración a presión;
- 40 - un elemento intermedio (52) conectado a un elemento aguas arriba y a un elemento aguas abajo, de modo que el elemento intermedio (52) está soportado y alineado axialmente en el interior del recipiente (40) de filtración a presión; y
- un elemento de cola (54) con una abertura de salida en comunicación con el extremo (48) de salida del recipiente (40) de filtración a presión.
- 45 b. aplicar filtración a presión a la solución de alimentación para provocar que el permeado pase a través de cada elemento del interior del recipiente (40) de filtración a presión, y
- c. retirar las soluciones de permeado y concentrado del recipiente (40) de filtración a presión,

caracterizado por que:

- los elementos enrollados en espiral tienen diferentes flujos específicos estándar, y comprenden un elemento enrollado en espiral que tiene un flujo específico estándar de valor máximo, un elemento enrollado en espiral que tiene un flujo específico estándar de valor mínimo, y un elemento enrollado en espiral que tiene un flujo específico estándar de valor intermedio;
 - 5 - el flujo específico estándar de valor máximo dividido por el flujo específico estándar de valor mínimo es mayor que 2; y el elemento intermedio tiene un flujo específico estándar cuyo valor es intermedio entre 1,25 por el valor mínimo y 0,85 por el máximo,
 - el flujo específico estándar del elemento de cola (54) dividido por el flujo específico estándar del elemento de cabeza (50) es mayor que 2; y
 - 10 - la solución de alimentación tiene una presión osmótica mayor que 20 bar en el extremo (46) de entrada del recipiente (40) de filtración a presión.
- 6.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde el flujo específico estándar en el elemento aguas abajo dividido por el flujo específico estándar en el elemento de cabeza (50) es mayor que 1,5.
- 7.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde el elemento aguas abajo tiene un flujo específico estándar que es mayor que 1,5 l/m²/h/bar.
- 15 8.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde la presión motriz neta media en el elemento de cabeza (50) dividida por la presión de filtración motriz neta media en el elemento aguas abajo es mayor que 2.
- 9.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde el recipiente (40) contiene al menos cinco elementos enrollados en espiral en serie, el volumen de la solución de concentrado producida no es mayor que dos veces el volumen de la solución de permeado producida, el flujo medio en el recipiente (40) es al menos 70% del flujo medio en el elemento de cabeza (50), y el elemento de cabeza (50) tiene un flujo medio entre 10 y 27 l/m²/h.
- 20 10.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde el elemento de cabeza (50) opera con un flujo medio menor que 34 l/m²/h y el recipiente opera con un flujo medio mayor que 24 l/m²/h.
- 11.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde la solución de concentrado tiene una presión osmótica que es mayor que dos veces la presión osmótica a la entrada.
- 25 12.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde el área de la sección transversal del separador de alimentación del elemento aguas abajo es al menos 15% menor que el área de la sección transversal del separador de alimentación del elemento de cabeza.
- 13.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde el elemento aguas abajo tiene un paso de NaCl mayor que 20% cuando el elemento se ensaya individualmente usando un flujo de 27 l/m²/h, una recuperación de 8%, y una solución de alimentación a 25°C que consiste en 32.000 ppm de NaCl en agua, y en donde el elemento aguas abajo tiene un paso de sulfato menor que 1% cuando se ensaya individualmente usando un flujo de 27 l/m²/h, una recuperación de 8%, y una solución de alimentación a 25°C que consiste en 32.000 ppm de NaCl y 2.000 ppm de MgSO₄ en agua.
- 30 14.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde la lámina separadora (4) de alimentación del elemento de cola (54) tiene un gradiente de presión estándar que es 50% mayor que el gradiente de presión estándar de la lámina separadora (4) de alimentación del elemento de cabeza (50).
- 15.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde el recipiente (40) de filtración a presión es un recipiente de dos o más recipientes de filtración a presión en paralelo de un sistema de filtración.
- 40 16.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde el elemento de cabeza, el elemento intermedio y el elemento de cola son, cada uno, de un tipo de elemento diferente.
- 17.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde el recipiente (40) de filtración a presión comprende además una barrera (66) posicionada, o bien en el interior del tubo (6) de recogida de permeado de un elemento enrollado en espiral, o bien entre los tubos (6) de recogida de permeado de dos elementos adyacentes; donde la barrera (66) define unas corrientes de permeado combinadas primera y segunda; donde la corriente de permeado combinada primera comprende el permeado procedente del elemento de cabeza (50) y la corriente de permeado combinada segunda comprende el permeado procedente del elemento (54) aguas abajo; donde la barrera (66) evita además la mezclado del permeado entre las corrientes de permeado combinadas; y en donde la corriente de permeado combinada primera tiene una presión mayor que la presión de la corriente de permeado combinada segunda de al menos 1,5 bar; donde la corriente de permeado combinada primera comprende la totalidad del permeado del elemento que tiene el flujo específico estándar de valor máximo, donde la corriente de permeado combinada primera es la corriente de alimentación a un recipiente de filtración segundo.
- 50

18.- El procedimiento de la reivindicación 5, en donde la etapa de retirada del permeado del recipiente (40) de filtración a presión comprende retirar una corriente de permeado por ambos extremos (46, 48) del recipiente (40) de filtración a presión.

- 5 19.- El procedimiento de la reivindicación 16, en donde la corriente de permeado procedente del extremo (46) de entrada del recipiente (40) de filtración a presión es de una calidad mayor que la corriente de permeado procedente del extremo (48) aguas abajo, y en donde la corriente de permeado del extremo (48) aguas abajo del recipiente (40) de filtración a presión se somete a unas etapas de tratamiento adicionales.

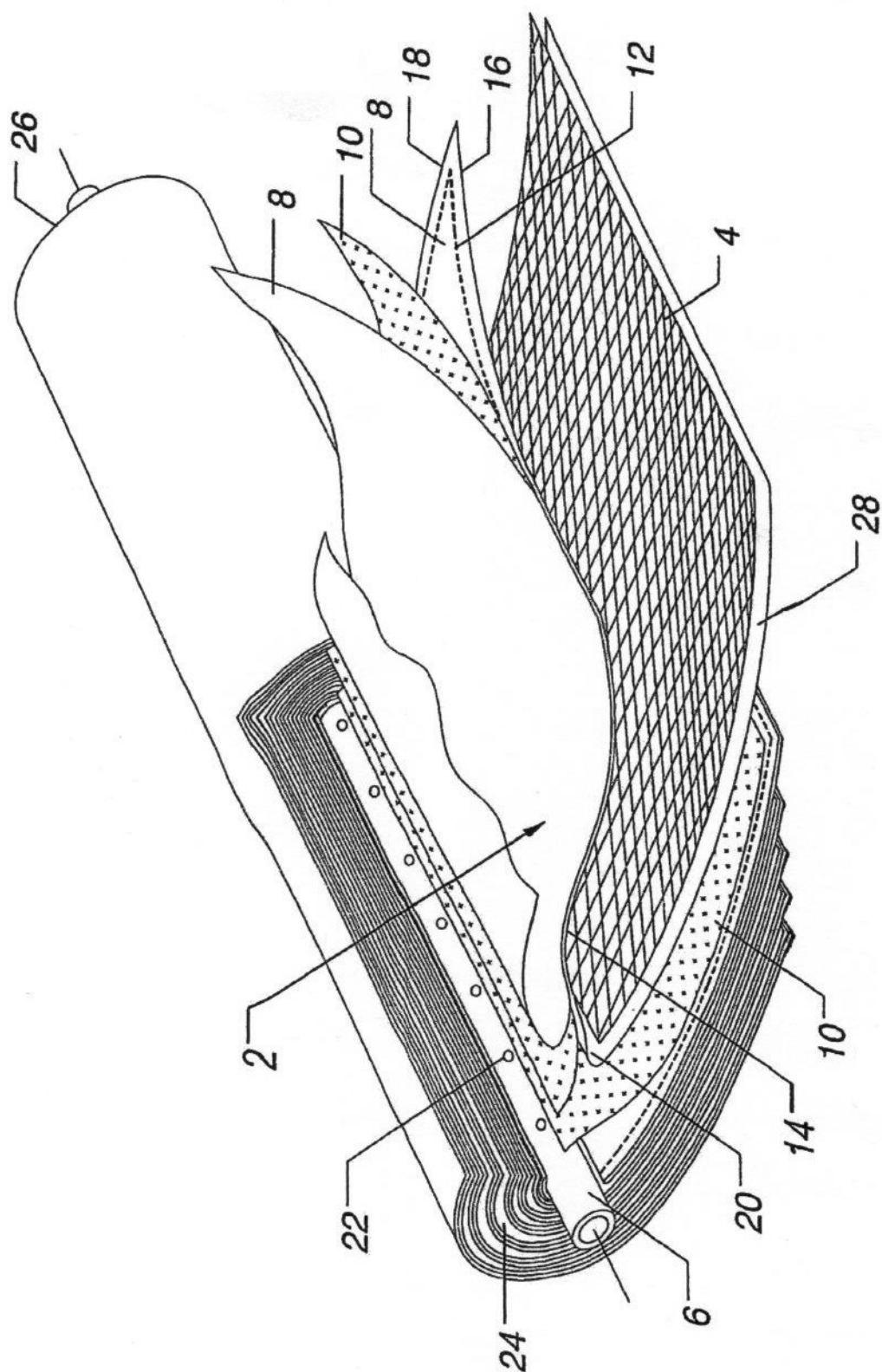


Fig. 1

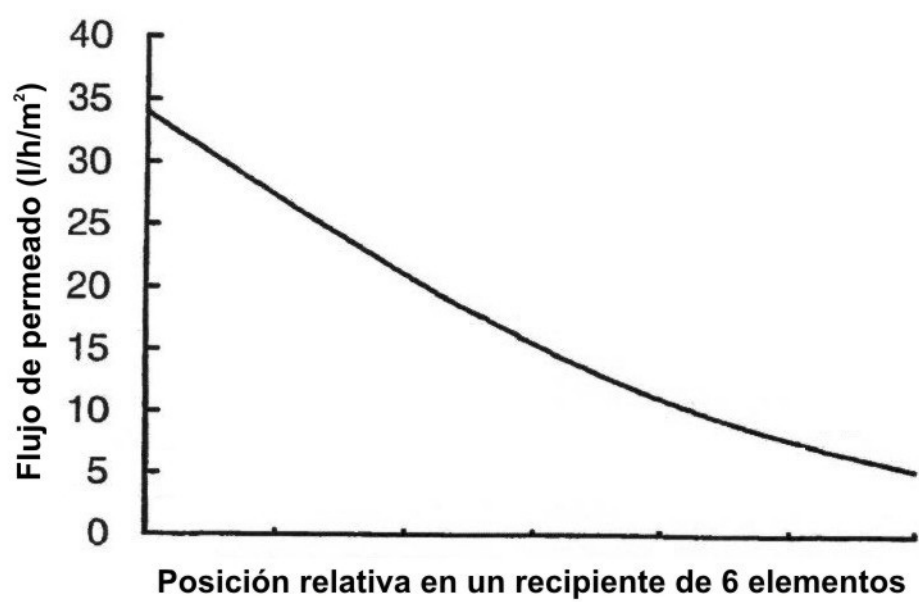


Fig. 2

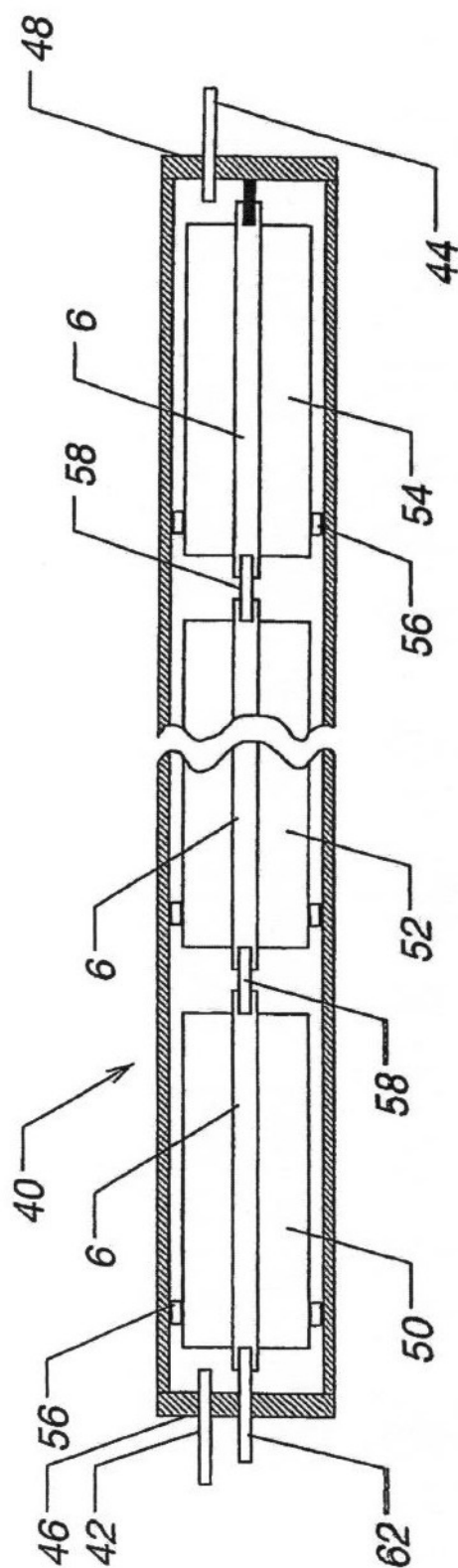


Fig. 3

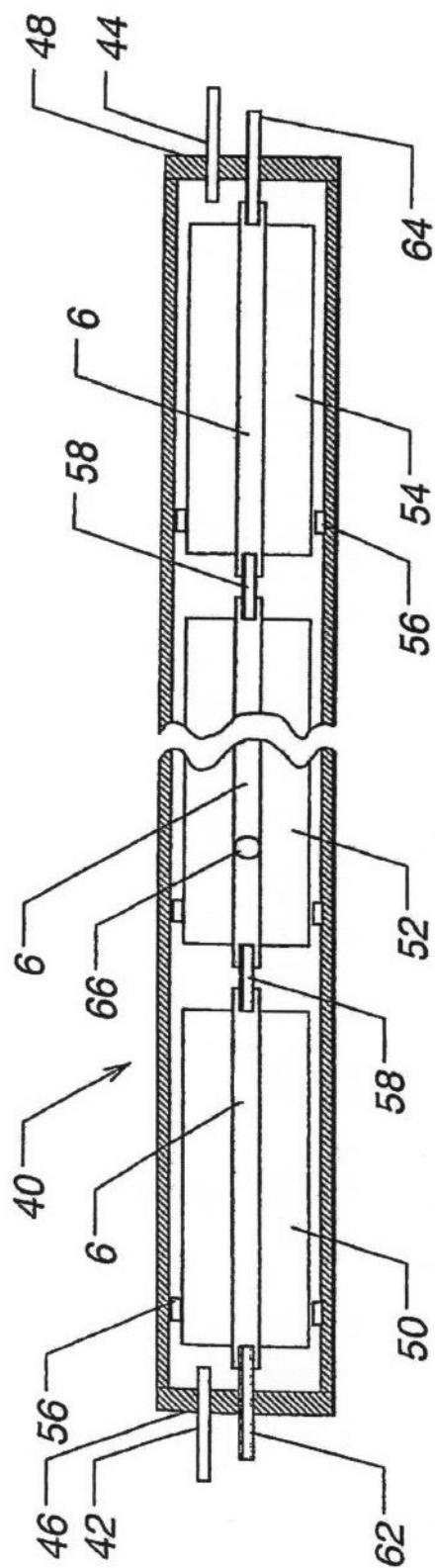


Fig. 4