

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 792 373**

51 Int. Cl.:

C02F 1/469	(2006.01)
C02F 1/44	(2006.01)
B01D 61/02	(2006.01)
B01D 61/14	(2006.01)
B01D 61/42	(2006.01)
B01D 61/48	(2006.01)
B01D 61/58	(2006.01)
C02F 1/42	(2006.01)
C02F 103/08	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.08.2007 PCT/US2007/018815**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **27.03.2008 WO08036163**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.08.2007 E 07837370 (1)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.04.2020 EP 2074067**

54 Título: **Método de desalinización**

30 Prioridad:

20.09.2006 US 524080

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.11.2020

73 Titular/es:

**EVOQUA WATER TECHNOLOGIES LLC (100.0%)
210 Sixth Avenue, Suite 3300
Pittsburgh, PA 15222, US**

72 Inventor/es:

**WILKINS, FREDERICK, C.;
JHA, ANIL, D. y
GANZI, GARY, C.**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 792 373 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

Método de desalinización

1. Campo de la invención

5 La invención se refiere a la purificación de agua y, en particular, a la desalinización de agua usando filtración y electrodesionización.

2. Antecedentes de la invención

10 La creciente necesidad mundial de agua dulce para uso potable, industrial y agrícola ha llevado a un aumento en la necesidad de métodos de purificación que usen agua de mar, agua salobre u otra agua de salinidad elevada como fuentes. La purificación de agua de alta salinidad mediante la eliminación de sólidos disueltos, tal como sales, se ha logrado de varias maneras, incluida destilación y ósmosis inversa (RO). Estos métodos comienzan con una alimentación pretratada de agua de mar u otra agua salobre y luego purifican (por ejemplo, desalinizan) el agua hasta un nivel adecuado para el consumo humano u otros fines. Si bien el agua de mar y, a menudo, el agua salobre, es un material de partida abundante, la energía requerida para convertirla en agua potable utilizando las actuales técnicas de RO o destilación es a menudo prohibitiva.

15 El océano proporciona una fuente ilimitada de agua si se pueden desarrollar técnicas de desalinización eficientes con bajo impacto ambiental. Si bien el costo del equipo puede ser alto, el mayor gasto continuo en desalinizar agua de alta salinidad es la energía. Una pequeña mejora en la eficiencia energética puede dar lugar a ahorros significativos de costos debido a los grandes volúmenes de agua que típicamente son procesados por los sistemas de desalinización.

20 Por ejemplo, la energía requerida para producir agua potable a partir del agua de mar por el proceso de RO está compuesta principalmente por la energía que se requiere para superar la presión osmótica del agua de mar, junto con las ineficiencias de pérdida de presión durante el procesamiento. Debido a que tanto el permeado de la RO como las aguas residuales de la RO (a menudo el 70% del agua total alimentada al sistema se pierde para desechar) deben presurizarse, el consumo de energía de RO es mucho mayor que el mínimo termodinámico teórico para la desalinización. Habitualmente son necesarios costosos dispositivos de recuperación de presión mecánica en un intento de recuperar parte de la energía perdida requerida para la presurización.

25 El agua de mar típicamente contiene alrededor de 20000-40000 ppm (mg/l) de sólidos disueltos totales (TDS), y las fuentes de agua salobre pueden contener desde 2000 ppm hasta 20000 ppm de TDS. Estos sólidos disueltos incluyen una diversidad de sales o especies monovalentes, divalentes, polivalentes y/o multivalentes, formando el cloruro de sodio de forma típica aproximadamente el 75% o más del contenido total de sólidos.

30 Si bien los métodos de evaporación, como la destilación, se han utilizado tradicionalmente para producir agua potable, estos métodos generalmente requieren cantidades aún mayores de energía que los sistemas que utilizan técnicas de ósmosis inversa. Además, estos sistemas utilizan típicamente complicadas técnicas de recuperación de calor para mejorar la eficiencia energética. Debido a que los procesos basados en RO o destilación operan a presiones o temperaturas elevadas, y debido a que el agua de alta salinidad es muy corrosiva, se necesitan metales y aleaciones exóticas para resistir las condiciones de operación, y por lo tanto la necesidad de añadir equipos complicados en estos procesos para ahorrar energía aumenta aún más el costo inicial del equipo y disminuye en gran medida la fiabilidad del equipo.

35 Las técnicas de ósmosis inversa pueden ser efectivas para eliminar compuestos iónicos del agua de mar. Sin embargo, un inconveniente grave de los sistemas de RO es que las membranas de RO rechazan selectivamente las sales no monovalentes o multivalentes en mayor medida que las sales monovalentes. Así, para fines de purificación en aplicaciones como la agricultura, donde la mayoría de los iones divalentes como calcio y magnesio son realmente beneficiosos para usos de riego, estos iones son rechazados selectivamente, dando lugar a presiones operativas más altas de lo necesario, un mayor potencial de ensuciamiento y formación de incrustaciones en la membrana, y/o pérdida de minerales valiosos para su uso en la producción de cultivos.

45 La diferencia en la presión osmótica entre el agua de mar que contiene más de 3,5% de sólidos y agua potable a menos de 1000 o menos de 500 ppm, los TDS dictan que se usen altas presiones para producir un filtrado de calidad potable simplemente para superar el potencial de energía libre termodinámica. En la práctica, dado que el agua de mar generalmente se procesa en recuperaciones de agua elevadas para reducir el costo de pretratamiento al reducir la cantidad de agua que debe prepararse eficazmente para el tratamiento, la presión osmótica requerida es incluso mayor que la necesaria para procesar agua de mar con un 3,5% de sólidos. Por ejemplo, las presiones utilizadas en los sistemas de RO son típicamente mayores de 5,5, 6,2 o incluso 6,9 MPa (800, 900, o incluso 1000 psi) y por consideraciones prácticas de operación a alta presión, la resistencia a la corrosión, evitación de pérdidas de energía y prevención de incrustaciones debida a la selectividad divalente y al rechazo de sílice, están limitados en recuperaciones de agua (la relación entre la producción de agua del producto y la producción total de agua) de aproximadamente 30% al 40%. Esta limitación da como resultado un costo creciente muy alto de pretratamiento y uso de agua para los sistemas de RO cuando se considera que un cambio en la recuperación de agua de aproximadamente 67% a aproximadamente 33% da lugar a una duplicación de los costos de los equipos de pretratamiento y una

duplicación del consumo total de agua para una determinada necesidad de agua pura. Los avances recientes en las membranas de RO y en las técnicas de reutilización de energía han reducido el consumo de energía de la producción de agua potable utilizando sistemas de RO a aproximadamente 7 a 14 kWh por 3785 l (1000 galones) (14 kWh/3,8 m³ = 3,68 kWh/m³; 14 kWh/kgal) de agua producida.

5 Las técnicas alternativas que utilizan una combinación de procesos también han proporcionado un menor consumo de energía en la conversión de agua de mar en agua dulce. Por ejemplo, se ha demostrado que los sistemas de nanofiltración de dos etapas son capaces de producir agua potable utilizando una presión de trabajo total de aproximadamente 5,2 MPa (750 psi); aproximadamente 3,4 MPa (500 psi) en una primera etapa y aproximadamente 1,7 MPa (250 psi) en una segunda etapa. Debido a que el uso de energía está relacionado con la presión de operación, una presión de trabajo total de aproximadamente 5,2 MPa (750 psi) proporciona un sistema más eficiente energéticamente en comparación con un sistema de RO típico que opera a una presión mayor de 5,5 MPa (800 psi). Véase, por ejemplo, la enseñanza de Vuong en la publicación de patente de Estados Unidos US2003/0205526.

10 En otro método utilizado para producir agua dulce a partir del agua de mar, se utilizan técnicas de nanofiltración junto con técnicas de RO o destilación instantánea. Véase, por ejemplo, la enseñanza de Hassan en el documento U.S. Patent No. 6,508,936.

Los siguientes documentos pueden ser útiles para comprender los antecedentes de la presente descripción.

20 El documento EP 1 075 868 A2 describe la producción de agua purificada de igual o más de 18,0 MΩ cm utilizando varios aparatos de electrodesionización conectados entre sí de manera que el agua de alimentación fluye a través del aparato de electrodesionización para obtener agua desionizada adecuada para entre otros la fabricación de semiconductores y LCD, y particularmente se dice que el aparato de electrodesionización elimina electrolitos de especies ionizadas, incluyendo sílice y boro a una velocidad elevada.

25 El documento US 2006/0091077 A1 se refiere a problemas asociados con agua altamente purificada requerida para la fabricación de microchips electrónicos, y describe la purificación del agua usando una unidad de electrodesionización (EDI) que produce una corriente de producto EDI y una corriente de efluente concentrado, siendo este último filtrado para eliminar contaminantes biológicos (como las bacterias) y proporcionado a un compartimento de concentración del EDI. La corriente de efluente concentrado filtrada puede separarse en una corriente de permealado lateral y una corriente de rechazo lateral usando una membrana de filtración de corriente lateral.

Compendio de la invención

30 Esta descripción se refiere a la desalinización de agua de mar y proporciona un método de acuerdo con la invención como se define en las reivindicaciones.

35 En esta descripción, se describe un método para tratar el agua de mar u otra fuente de agua de alta salinidad, para reducir el total de sólidos disueltos, en el que se hace pasar una fuente de agua a través de un aparato de tratamiento de agua mientras se aplica energía en una cantidad inferior a aproximadamente 7 kWh/3,8 m³ (7 kWh/kgal) de filtrado al aparato y se elimina el filtrado del aparato, donde el filtrado comprende menos de aproximadamente 1000 ppm de sólidos disueltos totales.

40 En el método descrito para tratar el agua de mar, la concentración de una o más especies no monovalentes del agua de mar puede reducirse en una primera etapa y la concentración de una o más especies monovalentes del agua de mar puede reducirse en una segunda etapa para producir agua que tiene unos TDS de menos de aproximadamente 1000 ppm. La primera y segunda etapas se llevan a cabo a una proporción de consumo neto de energía de menos de aproximadamente 7 kWh/3,8 m³ (7 kWh/kgal) de agua producto.

Breve descripción de los dibujos

45 Otras ventajas, características y usos de la invención serán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada cuando se considere junto con los dibujos adjuntos, que son esquemáticos y no están dibujados a escala. Para fines de claridad, no todos los componentes están marcados, ni se muestran todos los componentes cuando la ilustración no es necesaria para permitir que los expertos en la materia entiendan la descripción.

En los dibujos:

La FIG. 1 es un diagrama esquemático que ilustra un sistema para obtener agua potable; y

La FIG. 2 es un diagrama esquemático que ilustra un sistema para reducir la concentración de sólidos disueltos en el agua de mar.

50 *Descripción detallada*

El agua potable generalmente tiene un contenido de TDS de menos de aproximadamente 1000; en algunos casos, el agua potable puede tener un contenido de TDS menor de aproximadamente 500 ppm. Ejemplos de agua no potable son agua de mar o agua salada, agua salobre, agua gris y algo de agua industrial. Las referencias al agua de mar en

este documento son generalmente aplicables a estas otras formas de agua no potable.

Algunos aspectos de la descripción se refieren a métodos y aparatos para purificar agua de mar y otras aguas no potables, que utilizan, entre otros, sistemas de electrodesalinización y electroquímicos, y técnicas que pueden combinarse con sistemas de membrana impulsados por presión y/o sistemas de tratamiento de agua. Las técnicas electroquímicas también pueden incluir procesos como la desionización continua, la electrodiálisis de células llenas, la electrodiarésis y la electrodiálisis con inversión de corriente. Tal como se usa en el presente documento, "purificar" se refiere a reducir el contenido total de sólidos disueltos y opcionalmente a reducir la concentración de sólidos suspendidos, contenido coloidal e impurezas ionizadas y no ionizadas en una fuente de agua hasta un nivel en el que el agua purificada se ha vuelto potable y puede usarse para fines de agua dulce, como, entre otros, consumo humano y animal, riego y aplicaciones industriales. La desalinización es un tipo de purificación en la que se elimina la sal del agua de mar. La descripción se refiere a la desalinización de agua de mar. El agua de alimentación o agua a tratar puede provenir de una diversidad de fuentes, incluidas las que tienen un contenido de TDS de entre aproximadamente 3000 ppm y aproximadamente 40000 ppm, o más. El agua de alimentación puede ser, por ejemplo, agua de mar, agua salobre, aguas grises, efluentes industriales y agua de recuperación de llenado de petróleo. El agua de alimentación puede contener altos niveles de sales monovalentes, sales divalentes y multivalentes y especies orgánicas.

La descripción está dirigida a un método de tratamiento de agua de mar o agua salobre donde el agua fuente comprende una mezcla de solutos donde los iones monovalentes están en una concentración más alta en comparación con las concentraciones de iones divalentes y otros iones multivalentes. Se dispone una etapa inicial opcional que comprende tratamiento de microfiltración o tratamiento de ultrafiltración para eliminar sólidos suspendidos, sustancias coloidales y/o solutos de elevado peso molecular. Después de la etapa opcional, se dispone una primera etapa de tratamiento de electrodesalinización especializada para eliminar selectivamente una fracción de los iones monovalentes y, después de cualquier etapa de tratamiento intermedio, le sigue una etapa que comprende una segunda etapa de tratamiento de membrana, como electrodesionización para proporcionar agua que tenga una pureza final deseada. El proceso general es capaz de operar con una recuperación de agua del 30% al 70% o más.

La electrodesionización (EDI) es un proceso que elimina, o al menos reduce, una o más especies ionizadas o ionizables del agua utilizando medios eléctricamente activos y un potencial eléctrico para influir en el transporte de iones. Los medios eléctricamente activos sirven típicamente para recolectar y descargar alternativamente especies iónicas y/o ionizables y, en algunos casos, facilitar el transporte de iones, que puede ser continuamente, por mecanismos de sustitución iónica o electrónica. Los dispositivos EDI pueden comprender medios electroquímicamente activos de carga permanente o temporal, y pueden estar operados por lotes, de forma intermitente, continua y/o incluso en modos de polaridad inversa. Los dispositivos EDI pueden ser operados para promover una o más reacciones electroquímicas específicamente diseñadas para lograr o mejorar el rendimiento. Además, tales dispositivos electroquímicos pueden comprender membranas eléctricamente activas, tales como membranas de intercambio iónico semipermeables o selectivamente permeables o membranas bipolares. Los dispositivos de electrodesionización continua (CEDI) son dispositivos EDI conocidos por los expertos en la técnica que operan de una manera en la que la purificación del agua puede producirse continuamente, mientras que el material de intercambio iónico es recargado continuamente. Véase, por ejemplo, las patentes de Estados Unidos números 6,824,662; 6,312,577; 6,284,124; 5,736,023; y 5,308,466. Las técnicas CEDI pueden incluir procesos como la desionización continua, la electrodiálisis de células llenas o la electrodiarésis. Bajo condiciones controladas de voltaje y salinidad, en los sistemas CEDI, las moléculas de agua se pueden dividir para generar iones o especies de hidrógeno o hidronio e iones o especies hidróxido o hidroxilo que pueden regenerar los medios de intercambio iónico en el dispositivo y así facilitar la liberación de las especies atrapadas en los mismos. De esta manera, una corriente de agua a tratar puede purificarse continuamente sin requerir la recarga química de la resina de intercambio iónico.

Los dispositivos de electrodiálisis (ED) operan según un principio similar al CEDI, excepto que los dispositivos de ED no contienen medios electroactivos entre las membranas. Debido a la falta de medios electroactivos, la operación de la ED puede verse obstaculizada en aguas de alimentación de baja salinidad debido a la elevada resistencia eléctrica. Además, debido a que la operación de la ED en aguas de alimentación de alta salinidad puede dar como resultado un consumo elevado de corriente eléctrica, los aparatos de ED hasta ahora se han utilizado de manera más efectiva en aguas fuente de salinidad intermedia. En sistemas basados en ED, debido a que no hay medios electroactivos, la división del agua es ineficiente y, en general, se evita su operación en dicho régimen.

En los dispositivos CEDI y ED, una pluralidad de celdas o compartimentos adyacentes están típicamente separados por membranas selectivamente permeables que permiten el paso de especies cargadas positiva o negativamente, pero típicamente no ambas. Los compartimentos de dilución o agotamiento están típicamente intercalados con compartimentos concentradores o de concentración en tales dispositivos. A medida que el agua fluye a través de los compartimentos de agotamiento, las especies iónicas y otras especies cargadas generalmente son arrastradas a compartimentos concentradores bajo la influencia de un campo eléctrico, tal como un campo de CC. Las especies con carga positiva son atraídas hacia un cátodo, típicamente ubicado en un extremo de una pila de compartimentos múltiples de agotamiento y de concentración, y las especies con carga negativa también son atraídas hacia un ánodo de tales dispositivos, típicamente ubicados en el extremo opuesto de la pila de compartimentos. Los electrodos están típicamente alojados en compartimentos de electrolitos que generalmente están parcialmente aislados de la comunicación de fluido con los compartimentos de agotamiento y/o de concentración. Una vez en un compartimento de concentración, las especies cargadas son atrapadas típicamente por una barrera de membrana selectivamente

permeable que define al menos parcialmente el compartimento de concentración. Por ejemplo, se evita que los aniones típicamente migren más hacia el cátodo, fuera del compartimento de concentración, por una membrana selectiva de cationes. Una vez capturados en el compartimento de concentración, las especies cargadas atrapadas pueden eliminarse en una corriente de concentrado.

5 En dispositivos CEDI y ED, el campo de CC se aplica típicamente a las celdas desde una fuente de voltaje y corriente eléctrica aplicada a los electrodos (ánodo o electrodo positivo, y cátodo o electrodo negativo). La fuente de voltaje y corriente (colectivamente "fuente de alimentación") puede ser alimentada por una diversidad de medios tales como una fuente de alimentación de CA o, por ejemplo, una fuente de energía derivada de la energía solar, eólica o de las olas. En las interfases electrodo/líquido, se producen reacciones electroquímicas de semi celda que inician y/o facilitan la transferencia de iones a través de las membranas y los compartimentos. Las reacciones electroquímicas específicas que se producen en los electrodos/interfases pueden controlarse en cierta medida mediante la concentración de sales en los compartimientos especializados que albergan los conjuntos de electrodos. Por ejemplo, una alimentación a los compartimentos de electrolitos del ánodo con alto contenido de cloruro de sodio tenderá a generar gas cloro e iones hidrógeno, mientras que dicha alimentación al compartimento de electrolitos del cátodo tenderá a generar gases hidrógeno e iones hidróxido. En general, el ion hidrógeno generado en el compartimento del ánodo se asociará con un anión libre, como ion cloruro, para preservar la neutralidad de la carga y crear una solución de ácido clorhídrico, y de forma análoga el ion hidróxido generado en el compartimento del cátodo se asociará con un catión libre, tal como sodio, para preservar la neutralidad de la carga y crear una solución de hidróxido de sodio. Los productos de reacción de los compartimentos de los electrodos, como el gas cloro generado y el hidróxido de sodio, se pueden utilizar en el proceso según sea necesario con fines de desinfección, para limpieza y desincrustación de la membrana, y con fines de ajuste de pH.

Se puede utilizar una pluralidad de etapas en un sistema de tratamiento para purificar agua o al menos reducir la concentración de sólidos disueltos en el mismo. Por ejemplo, el agua a tratar puede purificarse en etapas de manera que cada etapa elimine selectivamente uno o más tipos de sólidos disueltos, produciendo así agua purificada, por ejemplo, desalinizada o incluso potable. En algunos casos, una o más etapas pueden comprender una o más operaciones unitarias que efectúan la retención selectiva de un tipo de especies disueltas, que pueden eliminarse seguidamente en una o más etapas subsiguientes o aguas abajo utilizando una o más operaciones unitarias. Por lo tanto, en un sistema de purificación, una primera etapa puede eliminar o al menos reducir la concentración de un tipo de especies disueltas. Alternativamente, la primera etapa puede eliminar o reducir la concentración de todas menos un tipo de especies disueltas. Toda especie retenida no eliminada del agua puede entonces eliminarse o reducirse su concentración en una o más etapas subsiguientes.

Las corrientes de subproductos de una o más etapas se pueden utilizar para efectuar la regeneración o recarga de una o más etapas. Una corriente descargable o corriente de subproductos de una o más etapas del sistema puede tener una alta concentración de una primera especie disuelta eliminada del agua a tratar. La presencia de la primera especie disuelta en dicha corriente puede facilitar la regeneración de otras operaciones unitarias en una o más etapas de purificación distintas. Por ejemplo, una etapa de electrodiálisis puede eliminar o reducir la concentración de especies monovalentes del agua de mar. Por ejemplo, la Tabla 1 proporciona concentraciones de solutos típicos primarios encontrados para formar las sales comprendidas en un agua de mar típica. Basándose en esos constituyentes y suponiendo la eliminación de aproximadamente el 80% de los TDS totales (sólidos disueltos totales) en una primera etapa que funciona a aproximadamente un 67% de recuperación de agua, que comprende membranas de intercambio de aniones y cationes monovalentes selectivas, puede determinarse la composición de solutos del efluente de la corriente de agotamiento y de concentración de la etapa como una función del coeficiente de selectividad de membrana. El coeficiente de selectividad de membrana se puede definir como

$$Selectividad = \frac{\frac{\Delta v_{Na}}{v_{Na}}}{2 \left[\frac{\Delta v_{Ca} + \Delta v_{Mg}}{v_{Ca} + v_{Mg}} \right]}$$

45 donde v es la molaridad de las especies iónicas i y Δv es el cambio en la molaridad de las especies iónicas. La Tabla 2 proporciona los valores calculados de los solutos que quedan en la corriente de agotamiento de iones y los efluentes de la corriente de concentración de iones de un aparato de separación de primera etapa que comprende membranas selectivas a aniones monovalentes y membranas con selectividades a cationes de 1 (no selectivo), 5 y 10. Los datos en la Tabla 2 se derivaron para un agua producto con aproximadamente 20000 ppm de TDS y una tasa de recuperación asumida de aproximadamente 67%.

ES 2 792 373 T3

Tabla 1. Composición típica del agua de mar.

Especies	Ppm de concentración
Cloruro	19000
Sulfato	2700
Bromuro	65
Silicato	3
Yoduro	0,06
Fosfato	0,07
Sodio	16500
Magnesio	1350
Calcio	400
Potasio	380
Litio	0,17
Boro	4,6
Estroncio	8
Molibdeno	0,01
Manganeso	0,002
Aluminio	0,01
Cadmio	0,00011
Cromo	0,00005
Cobalto	0,0004
Cobre	0,003
Hierro	0,06
Plomo	0,00003
Níquel	0,007
Selenio	0,00009
Plata	0,0003
Zinc	0,01

Tabla 2. Propiedades de la corriente de agotamiento y de concentración que usan agua de mar ablandada en dispositivos ED de 2 etapas.

ED selectiva monovalente		ED selectiva doble		ED no selectiva	
Concentración de Ca, mmol/l	LSI	Concentración de Ca, mmol/l	LSI	Concentración de Ca, mmol/l	LSI
5,1	1,08	2,63	0,79	17,78	1,62

5 Como se puede observarse en la Tabla 2, para dispositivos que comprenden membranas monoselectivas, las concentraciones de solutos como calcio, magnesio y sulfato, que tienden a causar incrustaciones y costras de los compartimentos de concentración del dispositivo, se mantienen a niveles de concentración relativamente bajos en la corriente de concentración en relación con dispositivos que utilizan membranas no selectivas. El resultado es que el uso de dispositivos de membrana selectiva monovalente permite una mayor recuperación de agua sin causar precipitación de sal y pérdida de rendimiento resultante, o taponamiento del dispositivo de desalinización. La selectividad monovalente puede no necesariamente reducir de manera desproporcionada los niveles de bicarbonato en la corriente de concentración, pero el potencial de precipitación de compuestos de bicarbonato como el bicarbonato de calcio se reduce debido a la disminución desproporcionada de los niveles de calcio (por ejemplo, en relación con el sodio) en la corriente de concentración. Además, como se discutirá con más detalle, productos de electrolitos ácidos procedentes del uso de cloruro de sodio de alta salinidad como electrolito se pueden usar como alimentación de reaccionante a la corriente de concentrado, para ajustar y reducir el pH de la corriente de concentrado y así inhibir la posibilidad de que cualquier bicarbonato de calcio residual en la corriente de concentrado forme incrustaciones, modificando el equilibrio del bicarbonato fuera de la forma de carbonato.

20 La corriente de subproductos (por ejemplo, la corriente de concentrado de una etapa ED monoselectiva) tendría una alta concentración de tales especies, por ejemplo, cloruro de sodio, que puede utilizarse seguidamente para facilitar la regeneración de una operación unitaria de intercambio iónico que a continuación puede utilizarse opcionalmente para eliminar o reducir selectivamente la concentración de especies divalentes disueltas del agua a tratar. Además, cuando se utilizan etapas adicionales que incluyen otros tipos de operaciones unitarias para eliminar o reducir aún más la concentración de especies que permanecen y/o impurezas en cantidades minoritarias de una fracción o de toda la corriente de agotamiento, de modo que los componentes problemáticos que permanecen en el efluente de la corriente de agotamiento de la primera etapa se eliminan selectivamente antes del uso final (por ejemplo, eliminación de boro mediante intercambio iónico selectivo antes de proporcionarse para agua de riego agrícola) o antes de ser alimentada a una segunda etapa de membrana del sistema general (por ejemplo, eliminación de calcio y magnesio mediante intercambio de cationes químicamente regenerable para evitar taponamientos e incrustaciones en la segunda etapa de membrana).

30 Al colocar la unidad de intercambio iónico opcional aguas abajo de la primera etapa de eliminación monoselectiva, hay una ventaja adicional del proceso con respecto al funcionamiento de la unidad de intercambio iónico. La operación de un intercambiador de iones, por ejemplo, un intercambiador de cationes para la eliminación de calcio y magnesio de una fuente de agua es mucho menos eficiente en su capacidad de eliminación si la fuente de agua es alta en salinidad general. Por lo tanto, al operar el intercambiador de iones aguas abajo de la primera etapa de eliminación de sal, mediante lo cual una gran fracción de las sales ya se han eliminado en comparación con la fuente de agua, el intercambiador de iones operará de manera más eficiente y producirá un efluente de mejor calidad con menos necesidad química de regeneración.

40 Además, cuando se utilizan etapas adicionales que incluyen tipos de operaciones unitarias para eliminar o reducir aún más la concentración de especies que permanecen de la corriente de agua, cualquier corriente de subproductos de las mismas también se puede utilizar para facilitar la regeneración de una o más operaciones unitarias en las otras etapas.

45 Se pueden considerar otras ventajas como la reducción del subproducto general o la descarga de residuos asociada con la purificación del agua a tratar. De hecho, una corriente de subproductos de una o más etapas u operaciones unitarias puede dirigirse a una o más etapas u operaciones unitarias aguas arriba o aguas abajo y combinarse con agua para ser tratada y/o utilizada para facilitar la operación de tales operaciones unitarias.

50 Los sistemas y técnicas EDI, incluidos los sistemas CEDI, se pueden combinar con una o más técnicas para purificar agua no potable, por ejemplo, agua que tiene más de aproximadamente 5000 ppm de TDS, para producir agua potable. Las técnicas de separación impulsadas por presión, como la filtración, se pueden usar para eliminar una porción de los TDS en el agua de una fuente de agua no potable, y una o más técnicas de separación impulsadas eléctricamente, tal como electrodesionización para eliminar una porción adicional de los TDS en el primer agua filtrada para producir finalmente agua potable. La técnica de separación impulsada por presión puede estar basada en sistemas y técnicas de nanofiltración (NF). Técnicas de separación impulsadas eléctricamente, como la electrodiálisis o la electrodiáresis, se pueden utilizar con, por ejemplo, sistemas y técnicas de filtración y/o EDI para purificar, por ejemplo, desalinizar, agua. Sistemas de electrodesionización pueden utilizarse con dos o más sistemas que, en combinación, eliminan

preferentemente uno o más tipos de sólidos disueltos. De hecho, se puede utilizar una etapa de electrodesionización con una etapa de electrodiálisis y/o una etapa de intercambio iónico.

5 Pueden usarse técnicas de nanofiltración para eliminar especies más pequeñas que las que pueden eliminarse mediante técnicas de ultrafiltración (UF), pero típicamente no eliminan todas las especies que pueden eliminarse mediante técnicas de ósmosis inversa. Las membranas de nanofiltración pueden incorporar efectos tanto estéricos como eléctricos al rechazar o separar selectivamente especies disueltas. Así, por ejemplo, las membranas de nanofiltración también pueden eliminar o reducir la concentración de moléculas orgánicas no cargadas que incluyen, por ejemplo, moléculas orgánicas que tienen un peso molecular mayor de aproximadamente 150 Daltons o, en algunos casos, mayor de aproximadamente 300 Daltons. Los iones divalentes y/o multivalentes se eliminan típicamente en una proporción mayor de aproximadamente 90%. Sin embargo, en algunos casos, más de aproximadamente el 95%; y en algunas aplicaciones, más del 98% de las especies multivalentes pueden eliminarse mediante tales técnicas selectivas.

10 Sin embargo, los sistemas de nanofiltración son típicamente menos eficientes para eliminar iones monovalentes que los iones divalentes o no monovalentes y pueden eliminar, por ejemplo, menos de aproximadamente 10%, menos de aproximadamente 25%, menos de aproximadamente 50%, menos de aproximadamente 75%, o menos del 90% de los iones monovalentes presentes en el agua de alimentación a tratar. Las membranas de nanofiltración pueden estar hechas de una diversidad de materiales, que incluyen, por ejemplo, materiales de poliamida. Véase, por ejemplo, las patentes de Estados Unidos números 6,723,241 y 6,508,936, así como la publicación de patente de Estados Unidos número 2003/0205526.

20 Como se señaló, en algunos casos, los sistemas y técnicas de nanofiltración pueden no eliminar iones monovalentes de manera eficiente o al menos en un grado que sea deseable y/o económicamente práctico. Sin embargo, el agua de mar típicamente tiene un contenido de TDS de aproximadamente tres cuartos en forma de sales monovalentes. La Tabla 1 enumera la concentración típica de diversas especies, pero no necesariamente todas, en el agua de mar.

25 La presión de operación asociada requerida para tratar agua utilizando membranas de nanofiltración puede ser significativamente menor que la presión de operación requerida para hacer pasar agua a través de membranas de RO, donde las sales monovalentes contribuyen en gran medida a la diferencia en la presión osmótica entre la alimentación y el permeado. Dependiendo de la aplicación, puede purificarse agua de alimentación en un dispositivo de nanofiltración a una presión de operación de menos de aproximadamente 4,1 MPa (600 psi); en algunos casos, a una presión de operación de menos de aproximadamente 3,4 MPa (500 psi); o en otros casos, a una presión de operación menor o igual a aproximadamente 2,8 MPa (400 psi). En el permeado resultante del mismo típicamente se reduce la concentración de especies orgánicas y la concentración de iones divalentes y no monovalentes en más de aproximadamente 90%, mientras que retiene más de aproximadamente 10% de los componentes iónicos monovalentes. Dependiendo de la configuración específica y del agua de alimentación, más de aproximadamente 25% de los iones monovalentes son retenidos o recuperados; en algunas aplicaciones, se recupera más de aproximadamente 50% de los iones monovalentes; y en otras aplicaciones, se recupera más de aproximadamente 75% de los constituyentes iónicos monovalentes.

35 Por lo tanto, un dispositivo de nanofiltración que tiene agua de mar, agua salobre o agua de alimentación que tiene una composición similar, puede proporcionar un filtrado que está sustancialmente reducido en constituyentes iónicos divalentes y no monovalentes, y/o constituyentes orgánicos, pero puede retener una porción significativa de los constituyentes iónicos monovalentes iniciales, tales como el cloruro de sodio. El filtrado, cuando se compara con la alimentación, puede exhibir una reducción en TDS mayor o igual a aproximadamente 30% (en algunos casos, hasta e incluyendo aproximadamente 95%). Sin embargo, en la mayoría de los casos, un filtrado de nanofiltración de un pase procedente de agua de mar no es adecuado para el consumo humano o el uso en aplicaciones que requieren agua dulce y puede requerirse un tratamiento adicional para hacer que el agua sea adecuada.

45 El producto, tal como el filtrado de una etapa de nanofiltración, se alimenta a una etapa de electrodesionización (tal como un dispositivo CEDI). Los cationes divalentes y multivalentes, tales como el magnesio y el calcio, que típicamente contribuyen a la dureza pueden, en gran medida, ser eliminados en la etapa de nanofiltración o un dispositivo de intercambio iónico para quitar dureza al agua intermedio aguas abajo de una etapa de DE selectiva monovalente. Los dispositivos de electrodesionización pueden, a su vez, eliminar los cationes y/o aniones monovalentes, tales como el cloruro de sodio y, además, operan con un menor consumo de energía en aguas de alimentación sin iones divalentes. Por lo tanto, un agua de alimentación que contiene TDS de sales principalmente monovalentes puede purificarse eficientemente haciendo pasar el agua a través de uno o más dispositivos de electrodesionización y uno o más dispositivos de nanofiltración. Se pueden emplear uno o más pases en cada etapa y se pueden usar dos o más dispositivos de electrodesionización en serie o en cualquier disposición adecuada. Típicamente, pero no necesariamente, las etapas de nanofiltración preceden a las etapas de electrodesionización. Dichas configuraciones pueden conducir a una disminución, o incluso a la ausencia de, ensuciamiento de las operaciones unitarias y/o componentes aguas abajo, como en los compartimentos de concentración y conjuntos de carcasa asociados de un dispositivo de electrodesionización, así como accesorios y conductos. Por lo tanto, pueden usarse ventajosamente uno o más dispositivos de nanofiltración para eliminar iones divalentes y/o multivalentes, tales como especies que causan dureza, y pueden usarse ventajosamente uno o más dispositivos de electrodesionización para eliminar iones monovalentes, reduciendo o eliminando así las tendencias de ensuciamiento. De hecho, la descripción contempla

sistemas y técnicas que proporcionan una o más etapas u operaciones unitarias que pueden eliminar, o al menos reducir la concentración, de una o más especies divalentes y/o multivalentes de una corriente de agua; y una o más etapas u operaciones unitarias que pueden eliminar, o al menos reducir la concentración, de una o más especies monovalentes de la corriente de agua. El agua resultante del producto puede por lo tanto hacerse potable.

- 5 Los sistemas y técnicas descritos para purificar una corriente de agua pueden incluir reducir, o incluso minimizar, una tendencia de una o más especies en una corriente de agua a formar incrustaciones o ensuciar los dispositivos de membrana, en una primera etapa o etapas preliminares, y mediante la eliminación, o al menos reducción de una concentración de especies monovalentes, en una segunda etapa o etapas posteriores.

10 La primera etapa, por ejemplo, filtración tal como nanofiltración, se puede operar con un requerimiento de energía menor o igual a aproximadamente 4,7 kWh/3,8 m³ (4,7 kWh/kgal). La segunda etapa, por ejemplo, mediante electroquímica, tal como electrodesionización, se puede operar a menos de o igual a aproximadamente 2,3 kWh/3,8 m³ (2,3 kwh/kgal). Por lo tanto, puede esperarse un uso total de energía de aproximadamente 7 kWh/3,8 m³ (7 kwh/kgal), lo que proporciona una disminución significativa en el consumo de energía en comparación con otras técnicas de desalinización, como evaporación, RO, nanofiltración de dos etapas o nanofiltración/RO híbrida y técnicas de nanofiltración/evaporación.

15 Los fluidos que contienen retenido (rechazado) y concentrado que resultan del proceso, que típicamente contienen mayores cantidades de TDS que sus respectivas aguas de alimentación, se pueden descargar a la fuente de agua de alimentación o a instalaciones convencionales de tratamiento de aguas residuales. El efluente concentrado de, por ejemplo, un dispositivo CEDI, puede reciclarse como alimentación a, o combinarse con agua de alimentación a un dispositivo de nanofiltración. En algunos casos, por ejemplo, cuando se produce una salmuera concentrada a partir de los compartimentos de concentrado de un dispositivo CEDI, la salmuera, que puede estar sustancialmente o esencialmente libre de iones divalentes y multivalentes, o tener un nivel reducido de especies formadoras de incrustaciones, puede utilizarse como fuente de salmuera para la producción de un desinfectante, como, entre otros, hipoclorito de sodio. La solución de salmuera ablandada puede proporcionar una fuente de especies de cloro electrolizable para su uso en un sistema de formación de desinfectante que puede utilizar, por ejemplo, un dispositivo electrolítico. Por lo tanto, si el agua purificada producida utilizando algunos aspectos del método reivindicado puede beneficiarse de la desinfección posterior, puede estar disponible a bajo costo una fuente lista de salmuera concentrada y/o desinfectante con menor dureza. Antes del tratamiento del agua de alimentación, se pueden emplear una diversidad de procedimientos de pretratamiento. Por ejemplo, pueden utilizarse técnicas de pretratamiento en un agua de alimentación que puede contener sólidos u otros materiales que pueden interferir o reducir la eficiencia de cualquier etapa o dispositivo, tal como el dispositivo de nanofiltración o el dispositivo EDI. Los procesos de pretratamiento pueden realizarse aguas arriba del dispositivo de nanofiltración y/o el dispositivo EDI y pueden incluir, por ejemplo, filtración con partículas, filtración con arena, filtración con carbono, microfiltración, como microfiltración de flujo cruzado (CMF), combinaciones de los mismos y otros métodos dirigidos a la reducción de partículas. Los ajustes al pH y/o la alcalinidad del agua de alimentación también se pueden realizar, por ejemplo, mediante la adición de un ácido, base o tampón, o mediante aireación.

20 Una ventaja opcional particularmente importante de usar una primera etapa selectiva monovalente es que debido a que la recuperación de agua de dicho sistema es mayor que la posible usando la tecnología actual, el grado de pretratamiento requerido para procesar la fuente de agua disminuye considerablemente. Por lo tanto, el tamaño de los equipos de pretratamiento necesarios se reduce proporcionalmente. El resultado es un menor costo y tamaño del equipo de pretratamiento, y/o alternativamente, permite la implementación de sistemas de pretratamiento que normalmente no se considerarían económicamente factibles. Por ejemplo, la microfiltración de membrana, una técnica que elimina no solo partículas a granel, sino también contaminantes microbianos y otros constituyentes coloidales nocivos en una fuente de agua, puede usarse de manera más rentable como un sustituto de los sistemas de filtración de arena tradicionales y menos efectivos. Esto mejora la calidad del agua de uso final al tiempo que aumenta la fiabilidad de los componentes del tratamiento aguas abajo.

25 Una forma de realización de un sistema para obtener agua potable se ilustra en la FIG. 1. El sistema 100 incluye uno o más dispositivos 110 de nanofiltración, así como uno o más dispositivos 120 de electrodesionización. El dispositivo 110 de nanofiltración comprende una membrana de nanofiltración dispuesta en una carcasa. El dispositivo 120 de electrodesionización comprende uno o más compartimentos de ánodo, cátodo, de concentración y de agotamiento. Se proporcionan fuentes de agua para los compartimentos de agotamiento, concentración y de electrodos del dispositivo 120 de electrodesionización. Una fuente de agua 140 de alimentación puede ser, por ejemplo, el océano. El agua de alimentación puede bombearse a través del conducto 150 y ser presurizada por la bomba 130 para pasar a través de la membrana de nanofiltración en el dispositivo 110 de nanofiltración. Típicamente, la bomba 130 presuriza la alimentación hasta una presión de funcionamiento de aproximadamente 4,1 MPa (600 psi) o menor. El permeado del dispositivo 110 de nanofiltración, reducido en contenido de iones multivalentes, pasa a través del conducto 160 como una corriente de alimentación al dispositivo 120 de electrodesionización. El líquido rechazado del dispositivo 110 pasa a través del conducto 170 y puede dirigirse, por ejemplo, de regreso a la fuente de agua 140 de alimentación.

30 La energía puede recuperarse de la corriente retenida y usarse, por ejemplo, para calentar agua de alimentación, proporcionar electricidad y/o proporcionar energía para otros procesos u operaciones unitarias, que no necesitan estar directamente asociadas con el sistema 100. El agua en el conducto 160 puede alimentarse a cualquiera de los

compartimientos de agotamiento, concentración y/o de electrodos del dispositivo 120 de electrodesionización. El dispositivo 120 de electrodesionización es actuado típicamente por una fuente de corriente eléctrica (no mostrada), que puede configurarse para proporcionar un campo eléctrico reversible. El diluyente purificado se recibe en el conducto 180 donde puede enviarse para su uso o almacenamiento como agua potable. El agua potable puede conservarse o desinfectarse posteriormente, si se desea. Una corriente de concentrado del dispositivo 120 de electrodesionización puede descargarse a los residuos a través del conducto 190, puede reciclarse a través del sistema a través del conducto 192, o puede usarse como fuente de salmuera a través del conducto 194. La corriente de concentrado puede tener un contenido de cloruro de sodio similar al del agua de mar y puede ser una fuente de agua de alimentación para el dispositivo 110 de nanofiltración.

- 5
- 10 Los sistemas y técnicas descritos pueden operarse de manera continua o por lotes, y pueden operarse en una ubicación fija o en una plataforma móvil, como a bordo de un buque o en un vehículo. También se pueden emplear sistemas CEDI de múltiples pasos en los que la alimentación se hace pasar típicamente a través del dispositivo dos o más veces, o se puede hacer pasar a través de un segundo dispositivo opcional. En algunos casos, el dispositivo de electrodesionización puede calentarse para, por ejemplo, aumentar la velocidad de transporte de especies iónicas en el mismo. Por lo tanto, el dispositivo de electrodesionización puede funcionar a temperatura ambiente; alternativamente, el dispositivo de electrodesionización puede funcionar a una temperatura mayor de aproximadamente 30°C, mayor de aproximadamente 40°C o incluso mayor de aproximadamente 50°C.

20 En algunos casos, puede ser deseable reducir la resistencia eléctrica interna del dispositivo de electrodesionización para minimizar el uso de energía. Por lo tanto, se pueden usar membranas de baja resistencia eléctrica para separar o definir compartimientos de agotamiento y/o de concentración de las mismas. Por ejemplo, los compartimientos individuales, o celdas del dispositivo de electrodesionización, pueden estar contruidos para que tengan una anchura menor de aproximadamente 10 milímetros. El uso de membranas de baja resistencia eléctrica y/o compartimientos delgados puede ayudar a reducir la resistencia eléctrica o la carga y, por lo tanto, servir para disminuir los requisitos de energía eléctrica. Las membranas de baja resistencia eléctrica que pueden utilizarse incluyen, por ejemplo, las disponibles comercialmente como membranas NEOSEPTA®, de ASTOM Corporation, Tokio, Japón. El espaciado intermembrana puede ser, por ejemplo, menor de aproximadamente 2,54 mm (0,1 pulgada), menor o igual a aproximadamente 1,5 mm (0,06 pulgada), o menor o igual a aproximadamente 1,27 mm (0,05 pulgada).

30 En algunas aplicaciones, puede ser importante o deseable reducir la concentración de especies de boro en el agua hasta un nivel que se considere adecuado para el servicio agrícola y/o el consumo humano. Por ejemplo, la concentración deseada de especies de boro puede ser deseablemente menor de aproximadamente 1 ppm. En algunos casos, la concentración de especies de boro es deseablemente aproximadamente o incluso menor que el nivel sugerido por el gobierno y/o las organizaciones sanitarias. Por ejemplo, la concentración de boro puede ser aproximadamente o menor que el nivel sugerido por la Organización Mundial de la Salud, a aproximadamente 0,5 ppm. De hecho, en algunas aplicaciones, la concentración de boro en el agua tratada es preferiblemente menor de aproximadamente 0,4 ppm.

40 Debido a que el agua de mar a menudo contiene altos niveles de boro, por ejemplo, de aproximadamente 1 a aproximadamente 4 ppm, este objetivo, nivel de boro recomendado o sugerido puede ser difícil de lograr utilizando procesos de desalinización convencionales. Ventajosamente, los sistemas y técnicas descritos pueden utilizarse para reducir la concentración de especies de boro en el agua de alimentación a un nivel aceptable, por ejemplo, aproximadamente 4,6 ppm a menos de aproximadamente 0,5 ppm.

Además de reducir los costos de energía, los sistemas y técnicas descritos pueden proporcionar menores costos de capital, operación y/o mantenimiento. Por ejemplo, debido a la capacidad de operar a presiones de operación más bajas, se pueden emplear en los sistemas materiales de menor costo, como tuberías de plástico, en lugar de aleaciones de titanio y/o acero inoxidable a alta presión que generalmente son necesarias en los sistemas de RO.

45 Para purificar el agua de mar, el agua debe separarse de sus componentes disueltos.

La energía requerida para realizar esta separación es la cantidad de energía requerida para superar la diferencia en la presión osmótica entre el agua de alimentación (agua de mar) y el producto (agua dulce).

50 La presión osmótica del agua de mar, P_{sw} se puede determinar a partir de la ecuación de van't Hoff: $P_{sw} = c \cdot R \cdot T$, donde c es la concentración molar iónica, R es la constante de los gases, 0,082 litros-bar/grado-mol, y T es la temperatura absoluta en Kelvin, $T = 300$ K (aproximadamente 27°C).

La concentración de sal iónica en el agua de mar es de aproximadamente 1,12 moles/litro, suponiendo una solución de cloruro de sodio puro. Por lo tanto, se determina que la presión osmótica es de aproximadamente 2,76 MPa (400 psi) ($1,12 \cdot 0,082 \cdot 300 = 27,6$ bar).

55 Los requisitos de energía de desalinización generalmente se proporcionan por 3785 l (1000 galones) de agua purificada por hora. Una estimación de la energía mínima teórica requerida para desalinizar el agua de mar es de aproximadamente 0,77 kWh/m³ (o aproximadamente 2,9 kWh/kgal, determinado de la siguiente manera, suponiendo aproximadamente 400 psi (27,6 bar o 2,76 MPa) de presión transmembrana (para la membrana de NF) y 100% de eficiencia de la bomba:

ES 2 792 373 T3

$$\text{Potencia al freno} = \frac{(gmp = 3,8 \text{ l/min (psi)})}{(1715) (e f f)} = \frac{(16,67)(400)}{(1715)(1)} = 3,89 \text{ bph (2,9 kw)}$$

Se cree que el método utilizado (térmico o impulsado por presión) para desalinizar el agua de mar es independiente de la energía mínima requerida.

Ejemplo 1

5 Una comparación de los sistemas basados en RO del estado de la técnica con los sistemas y métodos de la invención ilustra los ahorros de energía que se pueden lograr. Un sistema convencional basado en RO requiere aproximadamente 19,2 kWh/3,8 m³ (19,2 kwh/kgal) para desalinizar el agua de mar como se muestra en los siguientes cálculos. En los cálculos, la presión asumida transmembrana es de aproximadamente 6,2 MPa (900 psi), la eficiencia asumida de la bomba es de aproximadamente 85% y la recuperación de agua supuesta es de aproximadamente 40%.
10 Además, para un caudal de entrada de aproximadamente 155 l/min (41,67 gpm), se producen aproximadamente 63 l/min (16,67 gpm) de permeado y aproximadamente 95 l/min (25 gpm) de rechazo. No se supone que se utilicen técnicas de recuperación de energía.

$$\text{Potencia al freno} = \frac{(gmp = 3,8 \text{ l/min (psi)})}{(1715) (e f f)} = \frac{(41,67)(900)}{(1715)(0,85)} = 25,73 \text{ bph (19,2 kw)}$$

15 Sin embargo, si se utilizan técnicas de recuperación de energía, el requerimiento de energía calculado puede reducirse. Ejemplos de conjuntos o técnicas de recuperación de energía incluyen, por ejemplo, una turbina, como una turbina tipo Pelton, o un dispositivo de intercambio de presión. Ambos tipos de dispositivos pueden recuperar la energía de la corriente de rechazo de alta presión y transferir la energía a la corriente de alimentación del dispositivo de RO. Un conjunto de turbinas tipo Pelton tiene una eficiencia típicamente de aproximadamente 80% en recuperación y los sistemas de desplazamiento positivo típicamente demandan eficiencias de recuperación de aproximadamente 90% a aproximadamente 95%.

20 Para calcular el efecto de la recuperación de energía en el consumo general de energía, se supone que aproximadamente el 40% de la energía se consume en la corriente de permeado (0,4*19,2 kwh/kgal = 7,68 kwh/kgal = 7,68 kWh/3,8 m³), y se supone que aproximadamente el 60% de la potencia se consume en la secuencia de rechazo (0,6*19,2 = 11,52 kWh/3,8 m³ (11,52 kwh/kgal)). Suponiendo que, por ejemplo, se pueda recuperar aproximadamente el 93% de la energía en la corriente de rechazo, se consume aproximadamente el 7% (0,07*11,52= 0,81 kWh/3,8 m³ (0,81 kwh/kgal)). Por lo tanto, el consumo total de energía de un dispositivo de RO, utilizando técnicas de recuperación de energía, es de aproximadamente 7,68 + 0,81 = 8,49 kWh/3,8 m³ (8,49 kWh/kgal).
25

Ejemplo 2

Para estimar la cantidad de energía total requerida para desalinizar el agua de mar utilizando un sistema que comprende una combinación de dispositivos de nanofiltración y electrodesionización, los requisitos de energía para cada uno se determinan independientemente y luego se combinan.

30 Los requerimientos de energía asociados con el dispositivo de NF se aproximan a aproximadamente 10,7 kwh/kgal (aproximadamente 2,8 kwh/m³) como se muestra en el siguiente cálculo.

$$\text{Potencia al freno} = \frac{(gmp = 3,8 \text{ l/min (psi)})}{(1715) (e f f)} = \frac{(41,67)(500)}{(1715)(0,85)} = 14,3 \text{ bph (10,7 kw)}$$

35 Esta estimación se obtuvo suponiendo que la presión transmembrana era de aproximadamente 3,4 MPa (500 psi), la eficiencia de la bomba era de aproximadamente el 85% de eficiencia de la bomba y la recuperación de agua era de aproximadamente el 40%. Esta estimación se basó adicionalmente en un caudal de entrada de aproximadamente 155 l/min (41,67 gpm), que produce aproximadamente 63 l/min (16,67 gpm) de permeado y aproximadamente 95 l/min (25 gpm) de rechazo. No se utilizaron técnicas de recuperación de energía.

40 Las técnicas de energía también se pueden utilizar en dispositivos de nanofiltración de una manera similar a la descrita anteriormente con respecto a los dispositivos basados en RO. Además, se utilizan supuestos similares con respecto a las eficiencias de recuperación: se supone que aproximadamente el 40% de la energía es consumida por la corriente de permeado (0,4*10,7 kwh/kgal = 4,28 kWh/3,8 m³ (428 kwh/kgal)), y se supone que aproximadamente el 60% de la potencia es consumida por la secuencia de rechazo (0,6*10,7 = 6,42 kWh/3,8 m³ (6,42 kwh/kgal)). Si se recupera aproximadamente el 93% de la energía en el rechazo, se supone que aproximadamente el 7% se consume (0,07*6,42 = 0,45 kWh/3,8 m³ (0,45 kwh/kgal)). Por lo tanto, la energía consumida asociada con el dispositivo de nanofiltración sería de aproximadamente 4,73 kWh/3,8 m³ (4,28 + 0,45 = 4,73 kWh/3,8 m³ = 4,73 kwh/kgal).

45 Para consumir menos energía que un sistema de RO, un sistema de desalinización que comprenda etapas de nanofiltración y CEDI necesitaría, en conjunto, consumir menos energía que el sistema de RO solo. Como se muestra arriba, la etapa de nanofiltración consume aproximadamente 4,7 kWh/3,8 m³ (4,7 kwh/kgal) mientras que el consumo

total de energía del sistema RO es de aproximadamente 8,5 kWh/3,8 m³ (85 kwh/kgal). Por lo tanto, para presentar un consumo de energía total inferior al del sistema de RO, el consumo de energía de la etapa CEDI es preferiblemente menor o igual a aproximadamente 1 kWh/m³ (3,8 kWh/kgal).

- 5 Si el sistema de nanofiltración rechaza aproximadamente el 91% de los sólidos disueltos totales de entrada contenidos en la alimentación de agua de mar, el módulo CEDI aguas abajo eliminaría preferiblemente aproximadamente el 90% de los TDS restantes para que el agua cumpla con los estándares de agua potable de menos de 500 ppm de TDS. Para ser competitivo con los sistemas de RO, por lo tanto, el módulo CEDI puede necesitar eliminar esta cantidad de sólidos usando menos de aproximadamente 1 kWh/m³ (3,8 kwh/kgal) de agua producida.

Ejemplo 3

- 10 Se operó un sistema para determinar si el agua de mar se puede purificar (desalinizar) hasta un nivel menor de aproximadamente 500 ppm de TDS. El sistema estaba compuesto por un dispositivo de nanofiltración y dispositivos CEDI que cumplen con los requisitos de energía mencionados anteriormente (menos de aproximadamente 1 kWh/m³ (3,8 kwh/kgal)). Se preparó agua de mar artificial a partir de la mezcla de sal marina sintética INSTANT OCEAN®, disponible en Aquarium Systems, Mentor, Ohio.

- 15 Los dispositivos de nanofiltración y CEDI se operaron bajo las siguientes condiciones:

Se utilizaron bucles cerrados para dispositivos de nanofiltración y CEDI. El agua de alimentación del compartimento de electrodos para el dispositivo CEDI, que estaba separada del agua del producto de nanofiltración, estaba compuesta de agua de RO, con H₂SO₄ añadido para lograr un pH de aproximadamente 2. El contenido de calcio en el agua de alimentación fue de aproximadamente 50 mg/l, medido como CaCO₃.

- 20 El dispositivo de nanofiltración utilizó una membrana FILMTEC® NF90 (4x40), disponible de The Dow Chemical Company, Midland, Michigan. La corriente de agua de entrada al dispositivo de nanofiltración se presurizó hasta aproximadamente 3,4 MPa (500 psi) y tenía una conductividad de aproximadamente 45,5 mS/cm. El permeado del dispositivo de nanofiltración tenía una conductividad de aproximadamente 4,2 mS/cm a un caudal de aproximadamente 3,25 l/m. El caudal de rechazo fue de aproximadamente 36 l/m. La temperatura de funcionamiento nominal del dispositivo fue de aproximadamente 23°C.

- 25 Se evaluaron dos dispositivos CEDI diferentes, designados como Pila A (resistencia eléctrica más baja) y Pila B (estándar). Cada una de las pilas A y B estaba compuesta por 20 pares de células en un trayecto plegado de 2 etapas, con 10 pares de células en cada etapa. La longitud del trayecto de flujo fue aproximadamente 71 cm (28 pulgadas). Ambas pilas también utilizaron un ánodo a base de óxido de iridio, un cátodo de acero inoxidable y una mezcla de aproximadamente 50/50 de resinas de anión base fuerte/catión ácido fuerte DOWEX™ MARATHON, ambas de The Dow Chemical Company, Midland, Michigan. La separación intermembrana de cada una de las pilas A y B fue de aproximadamente 1,5 mm (0,06 pulgadas). La pila A incluía membranas de intercambio iónico alternantes.

- 30 Las condiciones de operación y el rendimiento de ambos módulos se resumen en la Tabla 2, a continuación. Los datos de demanda de energía enumerados en la Tabla 2 no consideran la eficiencia del suministro de energía.

- 35 Los datos muestran que se prefiere la pila A sobre la pila B porque la primera produce un producto de calidad similar a una proporción similar mientras usa aproximadamente un 40% menos de energía.

Por lo tanto, suponiendo que el dispositivo de nanofiltración requiera aproximadamente 4,7 kWh/3,8 m³ (4,7 kwh/kgal) para lograr el rendimiento deseado de menos de aproximadamente 90% de eliminación, el sistema que comprende dispositivos de nanofiltración y CEDI daría un consumo de energía de aproximadamente 7 kWh/3,8 m³ (7 kwh/kgal).

- 40 Este requerimiento de energía general es aproximadamente un 15% menor que el requerimiento de energía de un sistema convencional basado en RO.

Tabla 3. Parámetros de operación y medidos de las pilas CEDI A y B.

Parámetro de operación o medido	Pila A	Pila B
Caudal a través del compartimento de dilución (ml/min)	280	280
Caudal a través del compartimento de concentración (ml/min)	72	73
Caudal a través del compartimento de electrodos (ml/min)	250	200
Conductividad de la corriente de alimentación (mS/cm)	4,2	4,2
Conductividad del producto (µS/cm)	570	550
Caída de presión del compartimento de dilución (MPa) (psi)	0,039 (5,6)	0,052(7,5)

ES 2 792 373 T3

Parámetro de operación o medido	Pila A	Pila B
Caída de presión del compartimento de concentración (MPa) (psi)	0,015(2,2)	0,024(3,6)
Caída de presión del compartimento de electrodos (MPa) (psi)	0,044 (6,4)	0,061(8,9)
Potencial de electrodo aplicado (VDC)	17,15	26,6
Voltaje de par de celdas (VDC)	13,5	22,0
Voltaje por par de celdas (VDC)	0,675	1,1
Consumo de corriente (A)	0,84	0,83
Consumo de energía (kWh/3,8 m ³) (kwh/kgal)	2,5	4,2
Duración de la operación (horas)	175	274
Producto TDS (ppm)	240	232

Ejemplo 4

Este ejemplo describe un sistema que puede utilizarse para reducir la concentración de sólidos disueltos en el agua de mar.

- 5 Como se ilustra en la FIG. 2, el sistema puede comprender al menos una etapa de electrodesionización dispuesta aguas abajo de una o más etapas de reducción de especies monovalentes y una o más etapas de reducción de especies divalentes.

La etapa de reducción monovalente puede comprender cualquier operación unitaria que reduzca la concentración de especies monovalentes tales como, pero no limitado a, cloruro de sodio. Ejemplos de operaciones unitarias que pueden servir para reducir la concentración de sólidos disueltos monovalentes incluyen, entre otros, dispositivos de electrodiálisis y electrodiaresis.

Esta etapa de reducción de especies monovalentes puede operar a una recuperación de agua elevada, por ejemplo, de aproximadamente 60% a 70% o más, dependiendo del coeficiente de selectividad de la membrana con respecto a las especies monovalentes frente a las especies no monovalentes. Esto se debe a que se evita la posibilidad de que especies no monovalentes o multivalentes se incrusten o ensucien los dispositivos de membrana, ya que su concentración no aumenta en la misma proporción que las especies monovalentes. Tal dispositivo es mucho menos propenso al ensuciamiento y la incrustación en relación con otros procesos como la DE no selectiva, o la destilación, y mucho menos propenso a ensuciamiento e incrustaciones en relación con procesos como NF y RO, que concentran selectivamente especies y agentes de ensuciamiento multivalentes respecto a especies monovalentes. Al operar a una recuperación de agua elevada, no solo el proceso es más eficiente, por ejemplo, reduciendo los requisitos de volumen para equipos y materiales de pretratamiento, sino que también se reduce la cantidad total de agua requerida para el proceso general, lo cual es de particular importancia en regiones con escasos recursos hídricos. Además, al operar a una alta recuperación de agua, se incrementa la concentración de sal en la corriente de concentrado del dispositivo, haciéndolo más útil en ciertas circunstancias. Por ejemplo, al operar con una salinidad de alimentación de aproximadamente 3,33% a una recuperación de aproximadamente 67%, se puede obtener una corriente de concentrado con una concentración de aproximadamente 10% de sal. En el caso en el que se transfieren iones predominantemente monovalentes selectivamente a dicha corriente de concentrado, la corriente resultante puede ser una corriente monovalente predominantemente pura (por ejemplo, cloruro de sodio) a una concentración de aproximadamente 10%. Tal corriente se puede usar en parte para regenerar columnas de intercambio iónico que se han agotado, para usar como agentes de limpieza de salmuera, para alimentar a los cristalizadores para producir eficientemente sales cristalinas, y/o en procesos electroquímicos adicionales para producir, por ejemplo, cloro y productos cáusticos para desinfección o ajuste de pH. Además, la sal concentrada se puede reciclar a los compartimentos de electrolitos del propio dispositivo ED, y el cloro y productos cáusticos se pueden producir sin la necesidad de un sistema separado de generación de productos cáusticos/cloro, y evitar la necesidad de proporcionar productos químicos añadidos distintos de las sales que ya están en el agua de alimentación a desalinizar.

La etapa de eliminación de especies monovalentes puede utilizar membranas que eliminan selectivamente cationes monovalentes, aniones monovalentes o ambos aniones y cationes monovalentes. Si se desea producir cloruro de sodio puro a partir de una alimentación que comprende sales de calcio y sulfato, entonces el sistema puede comprender membranas a aniones y cationes monovalentes selectivas. Alternativamente, si el objetivo es solo producir un concentrado que contenga iones de sodio puro sin preocuparse por los niveles de sulfato, entonces el sistema puede comprender solo membranas a cationes monovalentes selectivas.

El producto parcialmente desalinizado de la etapa de eliminación selectiva monovalente puede enviarse luego a una etapa de reducción divalente que puede comprender cualquier operación unitaria que reduzca la concentración de especies divalentes tales como, pero sin limitación, sales de calcio y magnesio. Ejemplos de operaciones unitarias que pueden servir para reducir la concentración de tales especies que causan dureza incluyen, entre otros, dispositivos de intercambio iónico, en particular, columnas de intercambio catiónico que utilizan medios de intercambio catiónico. Además, los medios de intercambio iónico que incorporan absorbentes selectivos y medios selectivos de aniones pueden usarse para eliminar selectivamente iones en cantidades minoritarias problemáticos del agua, como boro residual y bicarbonato, así como aniones divalentes, como sulfato. Para absorbentes selectivos que requieren no solo etapas de regeneración de salmuera, sino también etapas de regeneración de ácidos y sustancias cáusticas, el ácido y la sustancia cáustica también pueden fabricarse opcionalmente a partir de la solución de sal pura concentrada a partir de un efluente concentrado de primera etapa de una primera etapa de membrana monoselectiva.

Los sistemas representados por la FIG. 2 ilustran adicionalmente la utilización de una corriente de subproductos de una etapa en otra etapa para facilitar su operación. Como se muestra a modo de ejemplo, la etapa de reducción monovalente puede reducir la concentración de cloruro de sodio del agua a tratar y recoger tales especies en una corriente de subproductos concentrados que típicamente se descargaría como una corriente de desechos rica en cloruro de sodio. Esta corriente de subproductos se puede utilizar para regenerar los medios de intercambio catiónico en la etapa de reducción divalente. La etapa final puede considerarse como una etapa de clarificación que reduce aún más la concentración de cualquier especie indeseable y hace que el agua sea potable. La corriente de subproductos de esta etapa puede reintroducirse o mezclarse con agua para ser tratada o descargada. Por lo tanto, el sistema ilustrado puede reducir ventajosamente la carga de descarga global. En algunos casos, no sería práctico utilizar una corriente de concentrado de este tipo para regenerar la etapa de eliminación divalente, sino que debido a que los dispositivos selectivos monovalentes funcionan típicamente a una concentración elevada, es posible la posibilidad de una regeneración eficiente de los intercambiadores de iones. También es posible la producción de ácido, sustancia cáustica y cloro para la limpieza; higienización, desinfección y para ayudar a la regeneración de intercambiadores de iones especialmente selectivos, como los medios de intercambio iónico selectivo de boro.

El agua producto del dispositivo de membrana monoselectiva se puede usar para ciertos fines directamente sin necesidad de tratamiento adicional, como el agua para uso agrícola que mantiene beneficiosamente un cierto nivel de iones divalentes en relación con los iones monovalentes. Alternativamente, el agua producto de la segunda etapa se puede usar directamente, por ejemplo, donde el agua producto es desalinizada aproximadamente un 90% y donde el agua es libre o tiene un nivel reducido de oligoelementos y especies divalentes. Sin embargo, alternativamente, el producto de la segunda etapa puede enviarse a un tercer dispositivo de separación de membrana que comprende, por ejemplo, membranas ED o EDI no selectivas, donde en el agua se desaliniza adicionalmente hasta altos niveles de pureza. En tal caso, la solución concentrada de la tercera etapa generalmente contiene esencialmente solo un tipo de iones monovalentes y, por lo tanto, hay un bajo potencial de incrustación o ensuciamiento en la tercera etapa, y, el concentrado, puede reciclarse a alta recuperación a, por ejemplo, una concentración similar a la fuente de agua, para alimentar la corriente de concentrado de la primera etapa del dispositivo selectivo monovalente. El resultado final es un proceso general que puede proporcionar diversos tipos de aguas para diferentes usos finales, mientras que el sistema es operado en condiciones altamente eficientes que no son propensas a ensuciamiento o incrustaciones, donde la recuperación de agua es mucho mayor que en las técnicas de desalinización tradicionales, y donde los productos químicos auxiliares necesarios para la regeneración, para la eliminación de oligoelementos, para la desinfección, para el ajuste del pH y para la limpieza son proporcionados a partir de la composición iónica del agua de origen.

REIVINDICACIONES

1. Un método para reducir los sólidos disueltos totales en agua de mar que contiene más de 1000 ppm de sólidos disueltos totales, comprendiendo el método:
- 5 proporcionar una alimentación del agua de mar (140) a un dispositivo (110) de nanofiltración y operar el dispositivo (110) de nanofiltración a una presión de alimentación bombeada a una membrana de nanofiltración menor de aproximadamente 4,1 MPa (600 psi) y aplicar una energía menor o igual a 4,7 kWh/3,8 m³ (4,7 kWh/kgal) de agua de mar con sólidos disueltos totales reducidos para producir un primer filtrado con contenido reducido en sólidos disueltos totales; y alimentar el primer filtrado a un dispositivo (120) de electrodesionización, ajustar el pH del agua de alimentación al dispositivo de electrodesionización añadiendo ácido, teniendo el dispositivo (120) de electrodesionización compartimentos de concentración y compartimentos de agotamiento, donde cada compartimento
- 10 tiene una anchura menor de aproximadamente 10 milímetros, y operar el dispositivo (120) de electrodesionización mientras se aplica energía menor o igual de 2,3 kWh/3,8 m³ (2,3 kWh/kgal) de agua de mar con sólidos disueltos totales reducidos para producir un segundo filtrado que comprende menos de aproximadamente 1000 ppm de sólidos disueltos totales.
- 15 2. El método de la reivindicación 1, que comprende además reducir el contenido de boro en el agua de alimentación a menos de aproximadamente 0,5 ppm.
3. El método de la reivindicación 1, donde el dispositivo de nanofiltración produce el primer filtrado con contenido reducido en sólidos disueltos totales en el que la concentración de especies no monovalentes en el agua de mar es reducida.
- 20 4. El método de la reivindicación 1, donde el segundo filtrado comprende menos de o igual a aproximadamente 500 ppm de sólidos disueltos totales.
5. Un método según la reivindicación 1, que comprende: reducir una concentración de una o más especies no monovalentes del agua de mar en una primera etapa que comprende el dispositivo (110) de nanofiltración; y reducir una concentración de una o más especies monovalentes del agua de mar en una segunda etapa que comprende el dispositivo
- 25 (120) de electrodesionización para producir agua que tiene unos TDS menores de aproximadamente 1000 ppm.
6. El método de la reivindicación 5, donde una corriente de concentrado del dispositivo (120) de electrodesionización se mezcla con el agua de mar aguas arriba de la primera etapa.

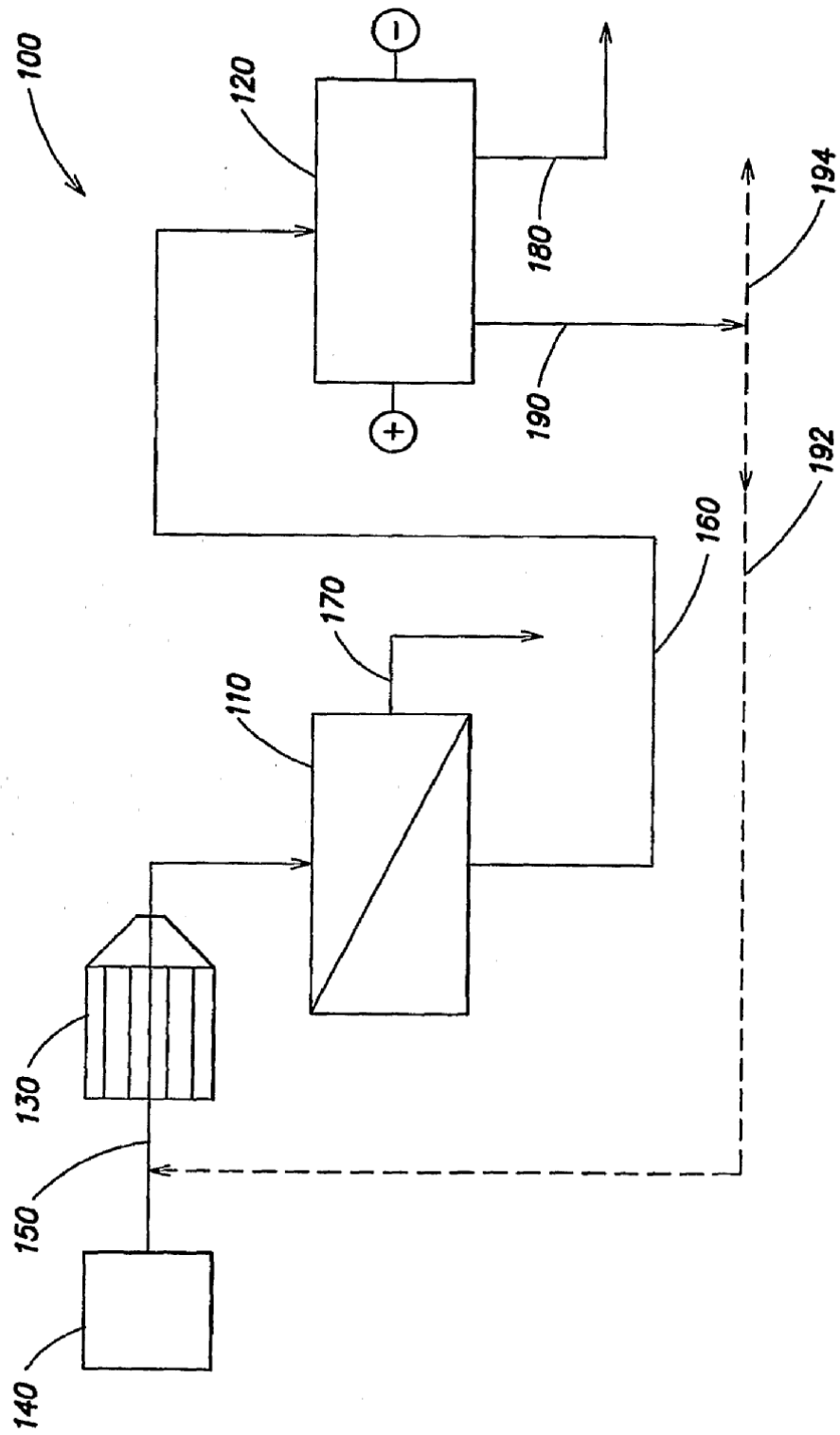


FIG. 1

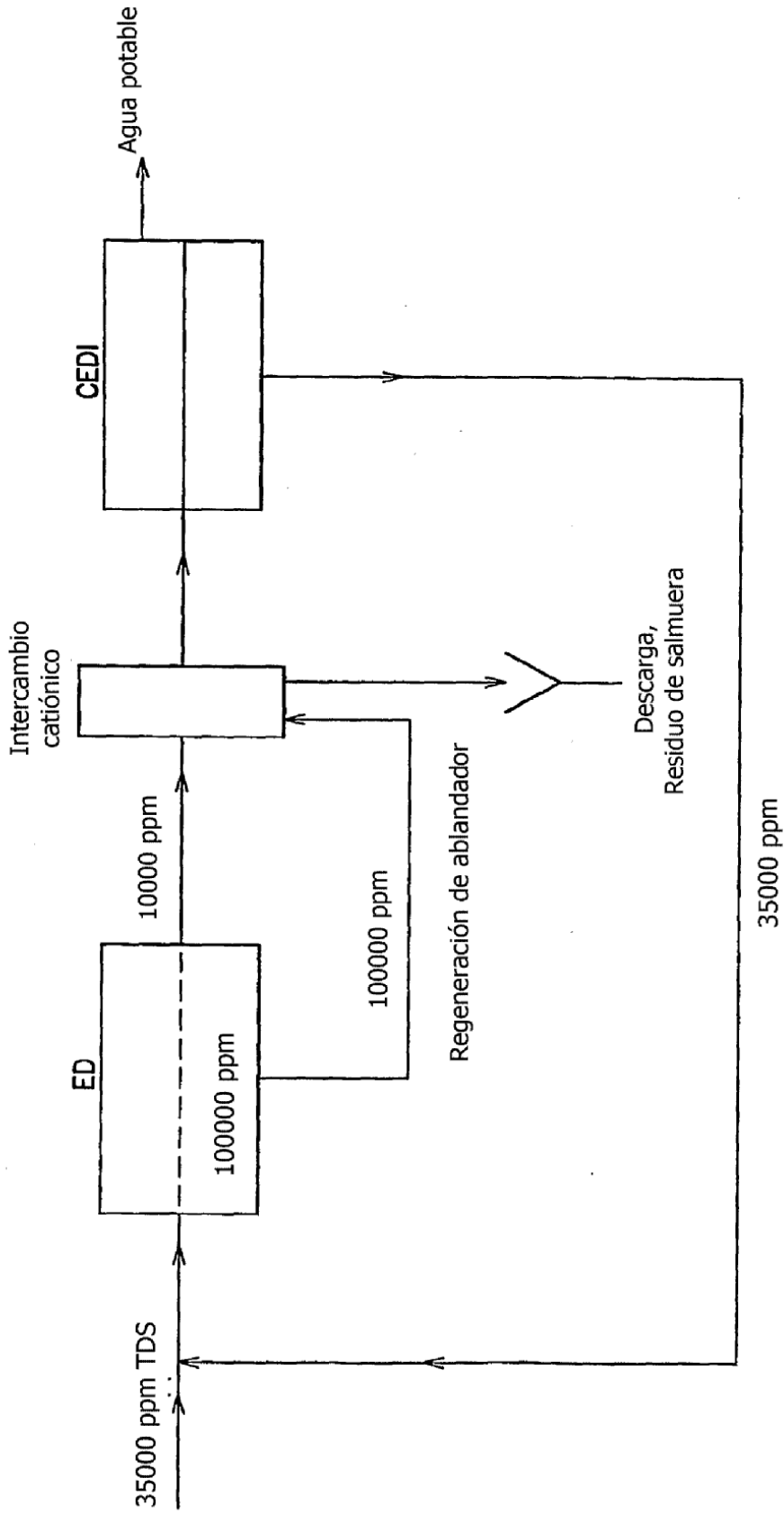


FIG. 2