

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 672 787**

21 Número de solicitud: 201890008

51 Int. Cl.:

B01D 61/02 (2006.01)

B01D 61/08 (2006.01)

C02F 1/44 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A2

22 Fecha de presentación:

19.10.2016

43 Fecha de publicación de la solicitud:

18.06.2018

71 Solicitantes:

**ISTANBUL TEKNİK UNIVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
(100.0%)**

**İtu Rektörlüğü Binasi İtu Ayazaga Kampus
Maslak
İstanbul TR**

72 Inventor/es:

**KRANTZ, William Bernard;
VELIOĞLU, Sadiye;
KURKLU, Suer;
AHUNBAY, Mehmet Goktug y
ERSOLMAZ, Serife Birgul**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

54 Título: **Procedimiento concurrente de desalinización y retirada de boro (CDBR)**

57 Resumen:

Procedimiento concurrente de desalinización y retirada de boro (CDBR).

La presente invención se refiere a una nueva tecnología de procedimiento de membrana multietapa que permite producir un producto de agua potable a partir de una entrada de agua salina con una alta recuperación de agua, diferencial de presión osmótica reducido y competitivo consumo específico de energía neto (SEC_{net}) reduciendo simultáneamente la concentración de boro al nivel recomendado tanto para consumo humano como para riego de cosechas.

ES 2 672 787 A2

DESCRIPCIÓN

Procedimiento concurrente de desalinización y retirada de boro (CDBR).

Campo técnico de la invención

5 La presente invención se refiere a una nueva tecnología de procedimiento de membrana multietapa que permite producir un producto de agua potable de alimentación de agua salina con una alta recuperación de agua, diferencial de presión osmótica reducido y consumo específico de energía neto (SEC_{net}) competitivo reduciendo simultáneamente la concentración de boro hasta el nivel recomendado tanto para consumo humano como para riego de cosechas.

10 **Técnica anterior de la invención**

15 Existe una necesidad continua de mejorar la eficiencia y reducir el coste del suministro de agua potable debido a las presiones de una población mundial en expansión, cambios demográficos y cambio climático global. Casi 700 millones de personas en el mundo carecen de acceso a agua potable segura. En enero de 2015, el Foro Económico Mundial anunció que la crisis del agua es el principal riesgo mundial basado en el impacto en la sociedad. El riego de cultivos asociado con el sector alimentario de la economía mundial usa el 70% del agua dulce del mundo. Se necesita aprovechar fuentes adicionales para satisfacer la creciente demanda de agua tanto para el consumo humano como para riego de cultivos.

20 Los océanos que contienen el 97% del agua en la tierra son un gran recurso. Sin embargo, el agua del océano puede contener tanto como 50.000 partes por millón (ppm) de sal (cloruro de sodio) y otros solutos de bajo peso molecular que lo hacen inapropiado para el consumo humano o el riego sin tratamiento. La ósmosis inversa (RO) se ha convertido en una tecnología importante para la producción de agua potable a partir de
25 agua de mar, así como de aguas salobres interiores que tienen un contenido de sal que va de 500 ppm a 30.000 ppm. La RO usa una membrana de rechazo de sal a alta presión para forzar que el agua penetre a través de la membrana mientras rechaza la sal y otros solutos. La tecnología de RO convencional requiere una presión muy alta, típicamente de 50 bares o más, lo que contribuye significativamente al coste de la desalinización del
30 agua. Además, la tecnología de RO convencional tiene una recuperación de agua potable limitada, típicamente del 50%, debido a las presiones muy altas requeridas para conseguir mayores recuperaciones de agua. Como resultado, el consumo específico de energía (SEC) para producir agua potable a partir de agua salina es bastante alto. Para

reducir una concentración de sal de 35.000 ppm en agua de mar a 350 ppm en el agua procesada, la ósmosis inversa convencional de una sola etapa (SSRO) funcionando a una presión de 55,5 bar y una recuperación de agua del 50% usando una membrana con un rechazo de sal de 0,990 requiere un SEC neto de 2,242 kWh/m³ (kilovatios hora de energía por metro cúbico de agua procesada). Por esta razón, el coste de agua obtenido
5 vía desalinización es más del doble del coste del agua obtenida de fuentes de agua dulce.

Un problema concurrente es que el agua de mar típica contiene 10 ppm o más de boro. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha recomendado que la concentración
10 máxima de boro en el agua para el consumo humano debe estar por debajo de 2,4 ppm y para el riego debe estar por debajo de 0,5 ppm, especialmente para los cítricos y los huertos de frutos de cáscara. El boro está presente en el agua de mar como ácido bórico, que es solo un poco más grande que los clústeres de moléculas de agua unidas por hidrógeno. Por consiguiente, las membranas de RO convencionales tienen relativamente
15 bajos rechazos de boro, típicamente menos del 90%, y por lo tanto no pueden reducir la concentración de boro vía tecnologías de desalinización convencionales a una concentración de 0,5 ppm. Son posibles rechazos más altos de boro con membranas de RO actuales si el pH (logaritmo de la concentración de iones hidrógeno) de la disolución de alimentación al procedimiento de membrana se incrementa por encima del pK
20 (logaritmo de la constante de disociación) de 9,14 para la ionización de ácido bórico a iones borato, que cuando se hidratan son suficientemente más grandes que las moléculas de agua enlazadas con hidrógeno para permitir el rechazo adecuado vía las membranas comerciales de RO. Sin embargo, este procedimiento es caro dado que requiere reducir el pH altamente alcalino después de la retirada de boro. La retirada de
25 boro del agua de mar usualmente se realiza como un procedimiento posterior al tratamiento después de la desalinización. Sin embargo, esto también es costoso dado que se deben procesar grandes volúmenes de agua dos veces, una para la desalinización y de nuevo para la retirada de boro. La concurrente desalinización y retirada de boro (CDBR) es atractiva pero desafiante debido a los pobres rechazos de las
30 membranas de RO comercialmente disponibles.

Las patentes de la técnica anterior relacionadas con la presente invención se enumeran a continuación;

. La Solicitud de Patente Provisional de EE.UU. No. 61/972.718 describe el procedimiento de ósmosis inversa eficiente en energía (EERO). Aunque la nueva invención de CDBR

descrita aquí incorpora las características de ahorro de energía del procedimiento de EERO, es sustantivamente diferente en que emplea una etapa de membrana de baja presión adicional (LPMS) para producir una corriente de filtrado con una concentración de boro muy baja que se mezcla con la corriente de filtrado de la CMCR para conseguir la
5 concentración de boro deseada.

. La patente de EE.UU. 9108865 describe un método de tratamiento para agua que contiene boro que implica dos procedimientos en serie: el primer procedimiento usa evaporación para concentrar el boro; el segundo usa diferentes hidróxidos inorgánicos para reducir adicionalmente el boro por adsorción. Este procedimiento se usa
10 principalmente para reducir muy altas concentraciones de boro acuoso (típicamente 1×10^6 ppm) a una concentración más baja (típicamente $\sim 1 \times 10^5$ ppm). Mientras que la retirada de boro es 85,7% para una concentración de alimentación de 1×10^6 ppm, disminuye a 68,3% para una concentración de alimentación de $2,5 \times 10^5$ ppm. Por consiguiente, este procedimiento tendría una retirada de boro muy baja para agua de mar
15 típica, cuya concentración de boro es de 10 ppm y, por consiguiente, no podría conseguir la concentración objetivo de producto de 0,5 ppm.

. La patente de EE.UU. 9090491 implica primero reducir la concentración de boro en agua de mar a menos de 0,2 ppm aumentando el pH entre 8,5 y 10 usando un producto alcalino en una etapa de membrana NF. El producto filtrado de esta etapa se mezcla con
20 el de una etapa de RO de alta presión (82 bar) que tanto desaliniza el agua como reduce la concentración de boro a menos de 1 ppm de modo que el boro en el producto filtrado mezclado tiene una concentración menor de 0,2 ppm. Este procedimiento implica series en lugar de desalinización y retirada de boro concurrente. Requiere añadir productos químicos alcalinos para aumentar el pH que se debe reducir de nuevo a un pH casi
25 neutro en el producto final. Además, la parte de RO de este procedimiento de dos etapas requiere una presión muy alta. La invención de CDBR retira concurrentemente sal y boro sin la adición de ningún producto químico y funciona a una presión considerablemente menor.

. Las patentes de EE. UU. 9073763 y 8617398 implican una serie de dos etapas, una
30 etapa de RO de alta presión y una etapa de intercambio iónico. Los productos químicos alcalinos se añaden a la alimentación para aumentar su pH a tan alto como 11 para mejorar el rechazo de boro de la membrana en la etapa de RO. La retirada adicional de boro se consigue vía una etapa de intercambio iónico. En contraste con la invención de CDBR descrita aquí, este procedimiento no consigue la desalinización y retirada de boro

concurrente, requiere la adición y posterior retirada de productos químicos para cambiar el pH, y requiere un funcionamiento a alta presión en la etapa de RO. Además, este procedimiento requiere la regeneración de la resina de intercambio iónico.

5 - La patente de EE. UU. 8999171 usa ultrafiltración, extracción con aire, nanofiltración y adición de productos químicos para obtener un pH entre 9,5 y 10 como pretratamiento para una alimentación de agua salina a RO de baja presión seguida de electrodiálisis para conseguir 0,5 ppm de boro en el agua procesada. Este procedimiento es mucho más complejo que la invención de CDBR. En particular, no implica desalinización y retirada de boro concurrente y también requiere ajustar el pH.

10 - La patente de E.UU. 8357300 describe el montaje en serie de RO y ultrafiltración (UF) en la que la complejación del boro con micelas permite el rechazo apropiado para conseguir muy bajas concentraciones de boro. En contraste con la invención de CDBR descrita aquí, este procedimiento no implica la desalinización y la retirada de boro concurrente y también requiere un funcionamiento a mayor presión debido a la etapa de
15 RO. También requiere regeneración de las micelas.

- La patente de EE.UU. 7618538 describe un procedimiento de membrana de RO que usa uno o más metales junto con por lo menos un agente dispersante anti-incrustaciones para la desalinización y retirada de boro del agua de mar. Usa un agente alcalinizante para aumentar el pH a entre 8 y 9,5. Este procedimiento requiere reajustar el pH de
20 nuevo a niveles casi neutros para obtener agua procesada satisfactoria. Dado que implica RO convencional, necesariamente funcionará a presiones más altas. La invención de CDBR no requiere ninguna adición de productos químicos o ajuste de pH y puede funcionar a sustancialmente menores presiones que la RO convencional.

- La patente de EE.UU. 7442309 también usa RO para desalinización y retirada de boro
25 que se facilita por la adición de producto químico para aumentar el pH a tan alto como 9,5. El pH se debe reducir después de la retirada de boro para obtener un agua procesada satisfactoria. Dado que este procedimiento implica RO convencional, necesariamente funcionará a presiones más altas. La invención de CDBR no requiere la adición de ningún producto químico para el ajuste del pH y puede conseguir la
30 desalinización a presiones sustancialmente más bajas que la ósmosis inversa convencional.

- La patente de EE.UU. 7368058 describe un procedimiento que implica RO y etapas de adsorción para conseguir la desalinización y la retirada de boro. Requiere la regeneración

del adsorbente. Dado que implica RO convencional, necesariamente funcionará a altas presiones. La invención de CDBR consigue la desalinización y retirada de boro concurrente a sustancialmente más baja presión que la RO convencional y no requiere el uso de un adsorbente.

5 - La patente de EE.UU. 7264737 implica el montaje en serie de dos etapas de RO o una etapa de RO y una etapa de electrodiálisis para conseguir la desalinización y retirada de boro. Dado que implica RO convencional, necesariamente debe funcionar a alta presión. El montaje en serie de esta manera necesariamente reduce la recuperación total de agua dado que la alimentación a la segunda etapa es el filtrado de la primera etapa. La
 10 invención de CDBR descrita aquí consigue una recuperación de agua total más alta procesando tanto el filtrado como la fracción retenida de la primera etapa de RO. Además, la invención de CDBR funciona a una presión considerablemente más baja.

- La patente de EE.UU. 7097769 usa separación de RO multietapa para la desalinización y la retirada de boro concurrente. Los productos químicos alcalinos se añaden en la
 15 segunda etapa de RO para aumentar el pH por encima de 9. Como tal, el pH del agua procesada de este procedimiento multietapa se tiene que ajustar hacia abajo de nuevo hasta un pH casi neutro. Además, dado que emplea RO convencional, debe funcionar a alta presión. La invención de CDBR descrita aquí no requiere la adición de ningún producto químico para ajustar el pH y funciona a una presión considerablemente
 20 reducida.

- La patente de EE.UU. N° 5833846 describe un aparato de producción de agua de alta pureza que reduce la concentración de boro a menos de 10 ppt. Sin embargo, es un procedimiento complejo que implica una unidad de etapa de RO de doble paso y otra etapa que implica electrodiálisis o destilación individualmente o en combinación. Este
 25 procedimiento tiene un diseño complejo que no implica la simultánea desalinización y retirada de boro. Además, el uso de RO convencional necesariamente requiere el funcionamiento a mayor presión. La invención de CDBR descrita aquí implica un diseño de procedimiento relativamente simple que permite la concurrente desalinización y retirada de boro y permite el funcionamiento a presión sustancialmente más baja.

30 - La patente de EE.UU. 5250185 usa la adición de productos químicos alcalinos para elevar el pH con el fin de aumentar el rechazo de boro en una etapa de membrana de RO. Los productos químicos añadidos para aumentar el pH se deben retirar en el agua procesada de este procedimiento. Dado que este procedimiento emplea RO de etapa única convencional, necesariamente funciona a mayor presión. La invención de CDBR no

requiere la adición de ningún producto químico y permite el funcionamiento a presión sustancialmente más baja.

- La patente de EE.UU. 4755298 describe un procedimiento cíclico continuo para la retirada de iones boro de corrientes acuosas vía absorción y unión a un agente quelante.

5 Los polímeros que tienen N-alquilglucamina como ramificación o sus derivados sirven como agentes quelantes para unirse a boro que posteriormente se puede liberar por tratamiento con un ácido mineral acuoso diluido. Mientras que este procedimiento puede reducir efectivamente la concentración de boro, no aborda la desalinización concurrente. Para conseguir la desalinización y la retirada de boro, este procedimiento se tendría que
10 usar en serie con RO convencional o alguna otra tecnología de separación para reducir la concentración de sal. La invención de CDBR consigue la desalinización y retirada de boro concurrentemente.

Ninguna patente previa implica un procedimiento para efectuar concurrentemente la desalinización y retirada de boro para conseguir concentraciones de agua procesada de
15 menos de 350 ppm de sal y 0,5 ppm de boro y que requieren solo separaciones de membrana multietapa a una presión significativamente reducida mientras no requieren la adición de productos químicos para aumentar el pH.

Esta invención es una nueva tecnología de membrana denominada procedimiento concurrente de desalinización y retirada de boro (CDBR). La invención de CDBR permite
20 que la desalinización de agua y la retirada de boro se realicen al mismo tiempo usando tecnología de membrana para conseguir las concentraciones deseadas en el agua procesada. El SEC para la tecnología del procedimiento de RO convencional es alto debido al gran diferencial de presión osmótica (OPD) entre una disolución de sal concentrada y agua casi pura y porque la recuperación de agua es relativamente baja. Esta invención de CDBR aprovecha el procedimiento de ósmosis inversa eficiente en
25 energía (EERO) de reciente invención. El procedimiento de EERO reduce el OPD y aumenta la recuperación de agua mediante una combinación juiciosa de ósmosis inversa de una etapa (SSRO) y una cascada de membranas en contracorriente con reciclado (CMCR). Sin embargo, el procedimiento de EERO no puede reducir la concentración
30 típica de boro en el agua de mar a un nivel aceptable en el agua procesada.

Breve descripción y objetivos de la invención

La presente invención usa tecnología de membrana para concurrentemente desalinizar una alimentación de agua salina y reducir la concentración de boro a 0,5 ppm o menos a

presiones de funcionamiento más bajas, mayor recuperación de agua y menor consumo específico de energía. La técnica anterior implica la desalinización seguida de retirada de boro o requiere la adición de productos químicos para aumentar el pH (logaritmo de la concentración de iones de hidrógeno) para permitir la retirada apropiada del boro.

5 Cualquier producto químico añadido para aumentar el pH se debe retirar en el agua procesada. La técnica anterior que usa ósmosis inversa convencional funciona necesariamente a presiones más altas que esta nueva invención de CDBR.

De hecho; la presente invención hace uso de las características del procedimiento de EERO que le permite reducir el OPD y aumentar la recuperación de agua, pero también

10 hace una adición sustancial a la tecnología del procedimiento para permitir la concurrente retirada de boro a un nivel aceptable usando membranas de RO comercialmente disponibles actualmente. En una realización de esta nueva invención de CDBR, el producto de fracción retenida del lado de alta presión de una etapa de SSRO se introduce óptimamente en un punto entre dos etapas en una CMCR. El filtrado de la etapa de

15 SSRO se envía como alimentación a una etapa de membrana de baja presión (LPMS) para conseguir más retirada de boro. El producto filtrado de la CMCR se mezcla con el producto filtrado de la LPMS para conseguir la concentración de boro deseada en el producto de agua potable. Esta la nueva configuración del procedimiento consigue la concentración deseada de boro en una corriente de producto de agua potable a un OPD

20 significativamente reducido, alta recuperación de agua y SEC competitivo. Consigue esto (i) introduciendo la fracción retenida de la etapa de SSRO óptimamente como alimentación a la CMCR; (ii) el flujo a contracorriente de fracción retenida y filtrado en la CMCR; (iii) reciclar el filtrado al lado de la fracción retenida en la CMCR; (iv) auto-reciclar la fracción retenida en por lo menos una de las etapas de membrana en la CMCR; (v)

25 introducir el filtrado de la etapa de SSRO como alimentación a una LPMS; y (vi) mezclar las corrientes de filtrado de CMCR y LPMS para conseguir las concentraciones deseadas en el producto de agua. El reciclado de filtrado implica enviar la corriente de filtrado de una etapa al lado de la fracción retenida (alta presión) de la etapa inmediatamente aguas abajo de ella (es decir, en la dirección del flujo de filtrado). El autorreciclado de la fracción

30 retenida implica enviar parte de la fracción retenida al lado del filtrado de la misma etapa; esto se puede hacer usando una membrana de nanofiltración (NF) cuyo rechazo de sal es considerablemente menor que el de una membrana de RO. La configuración del procedimiento de CDBR es eficiente desde el punto de vista energético porque (i) la SSRO en combinación con la CMCR reduce el OPD; (ii) la LPMS funciona a muy baja

35 presión con relación a una etapa de RO; y (iii) la mezcla de los productos de filtrado de

LPMS y CMCR minimiza la cantidad de agua que debe pasar a través de la LPMS para reducir la concentración de boro.

Definición de las figuras que describen la invención

Figura 1. El esquema de la realización de 4 etapas de la invención de CDBR por el que la fracción retenida a alta presión de la etapa 1, una etapa de RO, es la alimentación a una CMCR que consiste en etapa 2, una etapa de NF y etapa 3, una etapa de RO y el filtrado es la alimentación para la etapa 4, una LPMS. La CMCR emplea reciclado de filtrado de la etapa 2 hasta el lado de alta presión de la etapa 3 y el reciclado de la fracción retenida del lado de presión alta a baja de la etapa 2 vía una membrana de NF. Las corrientes de filtrado de la etapa 3 y la etapa 4 se mezclan para conseguir las concentraciones deseadas de sal y boro.

Figura 2. (a) Diferencia de presión osmótica y (b) Consumo específico de energía neto en la invención de CDBR como una función de valores de recuperación de agua total que varían de 50% a 75%. Estos resultados son para una alimentación que contiene 35.000 ppm de sal y 10 ppm de boro y un producto de agua potable que contiene no más de 350 ppm de sal y 0,5 ppm de boro. Los valores se comparan con los de la SSRO convencional para desalinización que no puede reducir la concentración de boro a 0,5 ppm.

Figura 3a. El esquema de una realización alternativa de la invención de CDBR: CDBR-B, en el que la corriente de filtrado de la Etapa 1 se divide en dos fracciones por medio de un divisor de flujo, y una fracción se alimenta a la Etapa 4, mientras que la otra fracción circunvala la Etapa 4 para mezclarse con las corrientes de filtrado que salen de la Etapa 4 y la Etapa 3.

Figura 3b. El esquema de una realización alternativa de la invención CDBR-B: CDBR-BR, en el que la fracción retenida de la Etapa 4 se recicla total o parcialmente como alimentación a la Etapa 1.

Figura 4. El esquema de una realización alternativa de la invención de CDBR con dos etapas de SSRO en el que la alimentación de agua salada se introduce en el lado de alta presión de la primera etapa de SSRO y la fracción retenida de la primera etapa de SSRO se introduce en el lado de alta presión de la segunda etapa de SSRO mientras que la fracción retenida de la segunda etapa de SSRO se introduce en la unidad de CMCR.

Descripción detallada de la invención

La presente invención implica una etapa de SSRO (etapa 1) cuya corriente de fracción retenida sirve como la alimentación a una CMCR de dos etapas (etapas 2 y 3) y cuya corriente de filtrado sirve como alimentación a una LPMS (etapa 4). La Figura 1 es un esquema que muestra la realización de 4 etapas de esta invención de CDBR. La etapa

5 de SSRO implica uno o más módulos de ósmosis inversa conectados en paralelo. En otra realización de la invención de CDBR, la etapa 1 podría consistir en dos o más módulos de RO o trenes paralelos de módulos de RO conectados en serie. Cada etapa en la CMCR podría implicar uno o más módulos de membrana conectados en paralelo. La dirección del flujo de fracción retenida en la CMCR se denomina dirección aguas arriba (a

10 la derecha en la Figura 1) y la dirección del flujo de filtrado en la CMCR se denomina dirección aguas abajo (a la izquierda en la Figura 1). En la Figura 1, la corriente de la fracción retenida (alta presión) de la etapa 1 se introduce entre las etapas 2 y 3 en la CMCR. En otra realización de la invención de CDBR, la CMCR podría implicar más de

15 dos etapas en cuyo caso la corriente de fracción retenida de la etapa 1 se introduciría óptimamente entre dos etapas en la CMCR. El punto óptimo es aquel en el que la concentración de la corriente de la fracción retenida de la etapa 1 que sirve como alimentación a la CMCR es la más cercana a la de la fracción retenida de la etapa

20 inmediatamente aguas abajo y la corriente de reciclado de filtrado inmediatamente aguas arriba del punto en el que se introduce la alimentación. En la realización de 4 etapas de esta invención mostrada en la Figura 1, la CMCR funciona a la misma presión que la corriente de fracción retenida de la etapa 1, lo que implica que no se requiere una bomba de elevación de la presión para la alimentación a la CMCR. Cuando se emplean más de

25 dos etapas en la CMCR, todas las etapas se pueden hacer funcionar a la misma presión, lo que implica que no se requiere bombeo entre etapas en el lado de alta presión de la CMCR. Alternativamente, la presión se puede reducir entre etapas sucesivas en la dirección del flujo de la fracción retenida en la CMCR para reducir el OPD a expensas de una recuperación de agua reducida. La corriente de filtrado de la etapa 1 se introduce

30 como la alimentación a una LPMS (etapa 4) con el fin de reducir su concentración de boro. La etapa 4 se puede efectuar a una presión solo ligeramente superior a la presión ambiente, dado que hay muy poca diferencia en la concentración de sal entre la alimentación y los lados de filtrado de la membrana en esta etapa. La concentración de boro en el filtrado de la etapa 4 estará muy por debajo de 0,5 ppm. Por consiguiente, para conseguir la deseada concentración de boro en la corriente de producto, el filtrado de la

35 etapa 4 se mezcla con el filtrado de la etapa 3 en la CMCR cuya concentración de boro es usualmente superior a 0,5 ppm para una alimentación de agua salina típica que contiene 10 ppm de boro.

La manera en que esta invención de CDBR reduce el SEC mientras reduce el OPD, incrementando la recuperación de agua, y consiguiendo las concentraciones deseadas de sal y boro primero se explicará en términos cualitativos, después de lo cual la realización de esta invención mostrada en la Figura 1 se analizará cuantitativamente.

5 Tenga en cuenta que el análisis realizado aquí es para el funcionamiento de la etapa 1 y las etapas de CMCR en el límite termodinámico. Sin embargo, el límite termodinámico no es relevante para la etapa 4 para la cual la diferencia de presión requerida se determina a partir del flujo volumétrico del filtrado y del coeficiente de permeabilidad para la membrana en esta etapa. El diseño en el límite termodinámico implica que la presión es
10 justo igual a la requerida para superar el OPD debido a la diferencia de concentración entre los lados de presión alta y baja de la membrana. No se tienen en cuenta las pequeñas pérdidas de presión en las conducciones que conducen a y desde las etapas de membrana o dentro de los módulos de membrana en el lado de alta presión o para provocar la filtración a través de las membranas. Esta es una práctica estándar para
15 determinar la eficiencia de un procedimiento de membrana y se usará para evaluar el rendimiento de esta invención de CDBR para la concurrente desalinización y retirada de boro, así como para determinar el rendimiento de la SSRO convencional para la desalinización en ausencia de retirada de boro, que se usa como base para la comparación.

20 Esta invención de CDBR combina SSRO con una CMCR enviando la corriente de la fracción retenida de la SSRO como la alimentación de la CMCR. En la Figura 1, la corriente de la fracción retenida de la etapa 1 se introduce como alimentación entre las etapas 2 y 3 de la CMCR. Al introducir la fracción retenida de la etapa 1 como alimentación de la CMCR, se puede recuperar más agua, lo que contribuye a disminuir el
25 SEC. Esto se puede hacer sin aumentar el OPD para minimizar los costes de bombeo que contribuyen al SEC. Por lo tanto, una realización de esta invención de CDBR implica hacer funcionar la CMCR a la misma presión que la corriente de la fracción retenida de la etapa 1 y no emplear bombeo entre etapas en el lado de alta presión (fracción retenida) de la CMCR. Dado que la fracción retenida de la SSRO tiene una concentración de sal
30 más alta que la de la alimentación de agua salina a la SSRO, el funcionamiento de la CMCR sin ningún bombeo entre etapas requiere la reducción de el OPD en la CMCR. Esto se hace mediante reciclado de filtrado desde la etapa 2 hasta el lado de alta presión de la etapa 3 en la CMCR, mientras que al mismo tiempo se usa una membrana en la etapa 2 que deja pasar más sal que la membrana altamente rechazante usada en la
35 etapa 3. La combinación de reciclado del filtrado de la etapa 2 al lado de alta presión de

la etapa 3 y algo de filtrado de sal del lado de alta presión al lado de filtrado de la membrana en la etapa 2 reduce la diferencia de concentración a través de las membranas en ambas etapas 2 y 3, permitiendo por ello una alta recuperación de agua potable sin la necesidad de aumentar la presión más allá de la de la corriente de la fracción retenida de la etapa 1. Otra realización de esta invención de CDBR permitiría una disminución o aumento de presión del punto en el que se introduce la alimentación en la dirección del flujo de la fracción retenida, que está a la derecha en la Figura 1. En particular, disminuir o aumentar la presión se puede usar para disminuir o aumentar la recuperación en la etapa 2 para compensar por no poder ser capaces de obtener una membrana de NF con el rechazo de sal óptimo. La concentración de boro en el filtrado de la CMCR usualmente será superior a 0,5 ppm dado que la CMCR está procesando la fracción retenida de la etapa 1, cuya concentración de boro será mucho más alta que la del agua salina alimentada a esta etapa. Por consiguiente, para conseguir la concentración de boro deseada, el filtrado de la etapa 1, cuya concentración de boro ya se reduce significativamente desde la alimentación a esta etapa, sirve como alimentación a la etapa 4, una LPMS. Esta última emplea una membrana con un rechazo de boro similar al de la membrana en la etapa 1 y, por lo tanto, reduce la concentración de boro muy por debajo de 0,5 ppm. El filtrado de la etapa 4 se mezcla en la proporción apropiada con el de la etapa 3 en la CMCR con el fin de alcanzar la concentración de boro deseada en la corriente de producto mezclado. Esta configuración en la CDBR consigue concurrentemente la desalinización y la retirada de boro, mientras minimiza la cantidad de agua que se envía a la etapa 4.

Para demostrar cuantitativamente que esta invención de CDBR puede conseguir una retirada de boro de hasta 0,5 ppm concurrentemente con la desalinización de agua de mar para producir un producto de agua potable que tiene una concentración de sal de menos de 350 ppm con una alta recuperación de agua, OPD reducido y SEC competitivo, las ecuaciones matemáticas que describen la interrelación entre los flujos volumétricos denotados por Q_i en la Figura 1, y las concentraciones de sal y boro expresadas como masa por unidad de volumen y denotadas por C_{si} y C_{bi} , respectivamente, en la Figura 1, en las que el subíndice 'i' denota la ubicación de la particular corriente o concentración, se resolverá analíticamente. La solución a este sistema de ecuaciones algebraicas permitirá determinar la recuperación, OPD, SEC, y los rechazos de sal y boro inicialmente no especificados en cada etapa de la CDBR y LPMS.

El análisis de esta invención de CDBR de 4 etapas implica resolver los balances globales de material y soluto para cada una de las cuatro etapas y en los dos puntos de mezcla.

Los balances en la etapa 1 constituyen 3 ecuaciones que implican 9 incógnitas ($Q_f, C_{fs}, C_{fb}, Q_0, C_{0s}, C_{0b}, Q_1, C_{1s}, C_{1b}$). Los balances en la etapa 2 constituyen 3 ecuaciones que implican 9 incógnitas ($Q_2, C_{2s}, C_{2b}, Q_4, C_{4s}, C_{4b}, Q_6, C_{6s}, C_{6b}$). Los balances en la etapa 3 constituyen 3 ecuaciones que implican 6 incógnitas ($Q_3, C_{3s}, C_{3b}, Q_5, C_{5s}, C_{5b}$). Los balances en la etapa 4 constituyen 3 ecuaciones con 6 incógnitas ($Q_7, C_{7s}, C_{7b}, Q_8, C_{8s}, C_{8b}$). Los balances en el punto de mezcla entre las etapas 2 y 3 constituyen 3 ecuaciones y 0 incógnitas. Los balances en el punto de mezcla en el que se mezclan las corrientes de filtrado de las etapas 3 y 4 constituyen 3 ecuaciones con 3 incógnitas (Q_9, C_{9s}, C_{9b}). Esto suma 18 ecuaciones que implican 33 incógnitas. Esto implica 15 grados de libertad para resolver las ecuaciones para este procedimiento de CDBR de 4 etapas.

Los 15 grados de libertad se cumplieron especificando las siguientes cantidades que se muestran en la figura anterior:

1. Q_f , caudal de alimentación de agua salina a la etapa 1
2. C_{fs} , concentración de sal en la alimentación a la etapa 1
- 15 3. C_{fb} , concentración de boro en la alimentación a la etapa 1
4. C_{9b} , concentración de boro en las corrientes de filtrado mezcladas de las etapas 3 y 4
5. $C_{0s}=C_{3s}$ requerido para tener el OPD en la CMCR igual al OPD en la etapa 1
6. $\Delta_{\pi 1}$, OPD en la etapa 1
7. $\Delta_{\pi 1} = \Delta_{\pi 3}$, OPDs iguales en las etapas 2 y 3 de la CMCR
- 20 8. Y_2 , recuperación en la etapa 2
9. Y_3 , recuperación en la etapa 3
10. Y_4 , recuperación en la etapa 4
11. σ_{1s} , rechazo de sal en la etapa 1
12. σ_{1b} , rechazo de boro en la etapa 1 (en proporción al rechazo de sal en la etapa 1)
- 25 13. σ_{2b} , rechazo de boro en la etapa 2 (en proporción al rechazo de sal en la etapa 2)
14. σ_{3b} , rechazo de boro en la etapa 3 (en proporción al rechazo de sal en la etapa 3)

15. σ_{4s} , rechazo de sal en la etapa 4 (en proporción al rechazo de boro en la etapa 4)

La especificación de las 15 cantidades no es única. Se podrían especificar los valores de otros parámetros de entrada.

5 Los balances de masa totales y de soluto para la etapa 1 están dados por las siguientes:

$$Q_f = Q_0 + Q_1 \quad (1)$$

$$Q_f C_{fs} = Q_0 C_{0s} + Q_1 C_{1s} \quad (2)$$

$$Q_f C_{fb} = Q_0 C_{0b} + Q_1 C_{1b} \quad (3)$$

Los balances de masa totales y de soluto para la etapa 2 están dados por las siguientes:

10 $Q_6 = Q_2 + Q_4 \quad (4)$

$$Q_6 C_{6s} = Q_2 C_{2s} + Q_4 C_{4s} \quad (5)$$

$$Q_6 C_{6b} = Q_2 C_{2b} + Q_4 C_{4b} \quad (6)$$

Los balances de masa totales y de soluto para la etapa 3 están dados por las siguientes:

15 $Q_4 = Q_3 + Q_5 \quad (7)$

$$Q_4 C_{4s} = Q_3 C_{3s} + Q_5 C_{5s} \quad (8)$$

$$Q_4 C_{4b} = Q_3 C_{3b} + Q_5 C_{5b} \quad (9)$$

Los balances de masa totales y de soluto para la etapa 4 están dados por las siguientes:

20 $Q_0 = Q_7 + Q_8 \quad (10)$

$$Q_0 C_{0s} = Q_7 C_{7s} + Q_8 C_{8s} \quad (11)$$

$$Q_0 C_{0b} = Q_7 C_{7b} + Q_8 C_{8b} \quad (12)$$

Los balances de masa totales y de soluto en el punto de mezcla entre las etapas 2 y 3 están dados por las siguientes:

25 $Q_6 = Q_1 + Q_5 \quad (13)$

$$Q_6 C_{6s} = Q_1 C_{1s} + Q_5 C_{5s} \quad (14)$$

$$Q_6 C_{6b} = Q_1 C_{1b} + Q_5 C_{5b} \quad (15)$$

Los balances de masa totales y de soluto en el punto en el que se mezclan las corrientes de filtrado de las etapas 3 y 4 están dados por las siguientes:

30 $Q_9 = Q_3 + Q_7 \quad (16)$

$$Q_9 C_{9s} = Q_3 C_{3s} + Q_7 C_{7s} \quad (17)$$

$$Q_9 C_{9b} = Q_3 C_{3b} + Q_7 C_{7b} \quad (18)$$

Las ecuaciones adicionales que relacionan los flujos volumétricos y concentraciones están dadas por las siguientes:

$$\Delta\pi_1 = K (C_{1s} - C_{0s}) \text{ el OPD está especificado en la etapa 1} \quad (19)$$

$$\Delta\pi_1 = \Delta\pi_3 \Rightarrow C_{2s} - C_{4s} = C_{5s} - C_{3s} \text{ los OPDs establecidos igual en la CMCR} \quad (20)$$

$$Y_2 = \frac{Q_4}{Q_0} \quad (21)$$

$$Y_3 = \frac{Q_3}{Q_4} \quad (22)$$

$$Y_4 = \frac{Q_7}{Q_0} \quad (23)$$

$$\sigma_{1s} = \frac{C_{6s} - C_{0s}}{C_{1s}} \quad (24)$$

$$\sigma_{1b} = \frac{C_{1b} - C_{0b}}{C_{1b}} = \frac{0,90}{0,97} \sigma_{1s} \quad (25)$$

$$\sigma_{2b} = \frac{C_{6b} - C_{4b}}{C_{6b}} = \frac{\sigma_{1b}}{\sigma_{1s}} \sigma_{2s} \quad (26)$$

$$\sigma_{3b} = \frac{C_{4b} - C_{3b}}{C_{4b}} = \frac{\sigma_{1b}}{\sigma_{1s}} \sigma_{3s} \quad (27)$$

$$\sigma_{4s} = \frac{C_{0s} - C_{7s}}{C_{6s}} = \frac{\sigma_{1s}}{\sigma_{1b}} \sigma_{4b} \quad (28)$$

5

Resolver estas ecuaciones da lo siguiente para los flujos volumétricos:

$$Q_0 = \frac{Q_f (C_{1s} - C_{fs})}{C_{1s} - C_{0s}} \quad (29)$$

$$Q_1 = \frac{Q_f (C_{1s} - C_{0s})}{C_{1s} - C_{0s}} \quad (30)$$

$$Q_2 = Q_6 - Q_4 \quad (31)$$

$$Q_3 = Y_2 Y_3 Q_6 \quad (32)$$

$$Q_4 = Y_2 Q_6 \quad (33)$$

$$Q_5 = (1 - Y_3) Y_2 Q_6 \quad (34)$$

$$Q_6 = \frac{Q_1}{1 - (1 - Y_3) Y_2} \quad (35)$$

$$Q_7 = Y_4 Q_0 \quad (36)$$

$$Q_8 = Q_0 - Q_7 \quad (37)$$

$$Q_9 = Q_3 + Q_7 \quad (38)$$

Resolver para las concentraciones de sal da lo siguiente:

$$C_{0s} = (1 - \sigma_{1s}) C_{fs} \quad (39)$$

$$C_{1s} = \frac{\Delta \pi_1}{K} + C_{0s} \quad (40)$$

$$C_{2s} = \frac{Q_1 C_{1s} - Q_3 C_{3s}}{Q_2} \quad (41)$$

$$C_{3s} = C_{0s} \quad (42)$$

$$C_{4s} = \frac{Q_1 C_{1s} + Q_5 C_{5s} - Q_2 C_{2s}}{Q_4} \quad (43)$$

$$C_{5s} = \frac{(Q_4 - Q_2) Q_1 C_{1s} + Q_2^2 C_{2s} + (Q_2 - Q_3) Q_4 C_{3s}}{Q_2 (Q_4 + Q_5)} \quad (44)$$

$$C_{6s} = \frac{Q_1 C_{1s} + Q_5 C_{5s}}{Q_6} \quad (45)$$

$$C_{7s} = (1 - \sigma_{4s}) C_{0s} \quad (46)$$

$$C_{8s} = \frac{Q_0 C_{0s} - Q_7 C_{7s}}{Q_8} \quad (47)$$

$$C_{9s} = \frac{Q_3 C_{3s} + Q_7 C_{7s}}{Q_9} \quad (48)$$

Resolver para las concentraciones de boro da lo siguiente:

$$C_{0b} = (1 - \sigma_{1b}) C_{1b} \quad (49)$$

$$C_{1b} = \frac{Q_7 C_{7b} - Q_0 C_{0b}}{Q_1} \quad (50)$$

$$C_{2b} = \frac{Q_1 C_{1b} - Q_3 C_{3b}}{Q_2} \quad (51)$$

$$C_{3b} = \frac{(1 - \sigma_{3b})(1 - \sigma_{2b}) Q_1 C_{1b}}{Q_6 - (1 - \sigma_{3b})(1 - \sigma_{2b}) \left(\frac{Q_4}{1 - \sigma_{3b}} - Q_3 \right)} \quad (52)$$

$$C_{4b} = (1 - \sigma_{2b}) C_{6b} \quad (53)$$

$$C_{5b} = \frac{Q_4 C_{4b} - Q_3 C_{3b}}{Q_5} \quad (54)$$

$$C_{6b} = \frac{Q_1 C_{1b} + \left(\frac{Q_4}{1 - \sigma_{3b}} - Q_3 \right) C_{3b}}{Q_6} \quad (55)$$

$$C_{7b} = \frac{Q_9 C_{9b} - Q_3 C_{3b}}{Q_7} \quad (56)$$

$$C_{8b} = \frac{Q_0 C_{0b} - Q_7 C_{7b}}{Q_8} \quad (57)$$

La presión requerida en la etapa 4 está dada por la siguiente:

$$\Delta P_4 = \frac{Q_0}{P_4} \quad (58)$$

en la que P_4 es el coeficiente de permeabilidad de la membrana en la etapa 4. La recuperación de agua total de ese procedimiento de CDBR de 4 etapas está dada por la siguiente:

$$Y = Q_9 \quad (59)$$

El consumo específico de energía neto $(SEC)_{net}$, que es la energía requerida por unidad de agua producida permitiendo la recuperación de la energía de presión en la fracción retenida vía un dispositivo de recuperación de energía (ERD), está dado por la siguiente:

$$SEC_{net} = \frac{Q_f \Delta \pi_1 + Q_4 \Delta \pi_3 + Q_0 \Delta \pi_4}{\eta_p Q_9} - \frac{\eta_{ERD} Q_2 \Delta \pi_1}{Q_9} \quad (60)$$

en la que η_p es la eficiencia de las bombas y η_{ERD} es la eficiencia del ERD.

Las predicciones de las ecuaciones (29) - (60) se usarán para establecer la prueba de concepto para esta invención de CDBR. El rendimiento de la invención de CDBR se evaluará en términos de OPD y SEC_{net} requeridos para producir un producto de agua potable que contenga 0,5 ppm de boro y no más de 350 ppm de sal a partir de una alimentación de agua salina que contenga 35.000 ppm de sal y 10 ppm de boro. Los valores fraccionarios de recuperación de agua para las etapas 2 y 3 son parámetros de entrada para resolver las ecuaciones del modelo, que se escogió que fueran 0,3 y 0,7, respectivamente.

La ejecución de la etapa 2 a una recuperación más baja aumenta el factor de seguridad (relación de flujo de fracción retenida a filtrado) en esta etapa, ayudando por ello a mitigar la polarización por concentración y colmatación en esta etapa que tiene una alimentación que contiene una alta concentración de sales divalentes. Es posible ejecutar la etapa 3 a una mayor recuperación dado que la alimentación a esta etapa ha pasado tanto por la etapa 1 como por la etapa 2, retirando por ello todas las sales divalentes que podrían provocar incrustaciones. La alimentación a la etapa 4 es agua casi pura dado que ha pasado por la etapa 1, una etapa de RO; por consiguiente, el OPD en la etapa 4 es insignificante. Además, los colmatantes se han retirado en la alimentación a la etapa 4.

Por consiguiente, la etapa 4 se puede ejecutar a una recuperación de agua muy alta o equivalentemente a un factor de seguridad muy bajo. El único requisito es que haya suficiente flujo de fracción retenida para retirar la pequeña cantidad de boro rechazado por la membrana en la etapa 4. Por consiguiente, se supone que la etapa 4 tiene una recuperación de agua del 95%. Se suponen eficiencias de bombeo y ERD de 85% y 90%, respectivamente, que son consistentes con los dispositivos disponibles comercialmente. El rendimiento de la invención de CDBR se evaluará en términos de OPD y SEC_{net} requeridos para conseguir las concentraciones de boro y sal especificadas en el agua procesada para una variedad de recuperaciones totales de agua. También se evaluarán las implicaciones en la invención de CDBR de usar membranas que tienen un intervalo de rechazos de sal y un intervalo de rechazos de boro. Mientras que los rechazos de sal y boro son parámetros de entrada especificados para la etapa 1, los rechazos de sal son cantidades predichas en las etapas 2 y 3, y el rechazo de boro es una cantidad predicha en la etapa 4. Para las etapas 2 y 3 el rechazo de boro se proporciona al rechazo de sal predicho, mientras que en la etapa 4 el rechazo de sal se proporciona al rechazo de boro predicho; es decir, se supone que la relación entre el rechazo de boro y el rechazo de sal es la misma que la que se puede conseguir por medio de membranas comerciales actualmente disponibles que pueden conseguir rechazos de 90,0% y 99,7% para boro y sal, respectivamente.

El OPD es un parámetro de entrada especificado usado para resolver las ecuaciones (1) a (28) para los flujos volumétricos y concentraciones en la invención de CDBR. La recuperación total de agua se determina a partir de la ecuación (59) usando los flujos volumétricos determinados a partir de las ecuaciones (29) a (38). La Figura 2 muestra un gráfico de OPD y SEC_{net} como una función de la recuperación total de agua que varía de 50% a 75%; estas predicciones son para conseguir un agua procesada con una concentración de sal igual o inferior a 350 ppm y una concentración de boro de 0,5 ppm, que cumplen ambas las recomendaciones de la OMS para agua potable y de riego. Los rechazos de sal y boro de las membranas para las etapas 1 a 4 y la recuperación en la etapa 2 se resumen en la Tabla 1. La Figura 2 también muestra el OPD y el SEC_{net} para SSRO que no puede conseguir 0,5 ppm de concentración de boro en el agua procesada.

Tabla 1. Rechazos requeridos de sal y boro y recuperación en la etapa 2 en la invención de CDBR tanto para la desalinización como para la retirada de boro que produce un producto de agua con una concentración de sal igual a 350 ppm y una concentración de boro de 0,5 ppm.

Recuperación	σ_{1s}	σ_{2s}	σ_{3s}	σ_{4s}	σ_{1b}	σ_{2b}	σ_{3b}	σ_{4b}	Y_2
50%	0,997	0,833	0,990	0,545	0,900	0,752	0,894	0,492	0,165
65%	0,997	0,660	0,996	0,645	0,900	0,596	0,899	0,582	0,339
75%	0,996	0,543	0,997	0,731	0,899	0,490	0,900	0,660	0,456

Es de interés determinar el valor mínimo del rechazo de boro requerido para la invención de CDBR para producir agua procesada que contiene no más de 350 ppm de sal y una concentración de boro especificada de 0,5 ppm y determinar las implicaciones para la invención de CDBR si se pudieran obtener membranas con rechazos de boro superiores al 90%. La Figura 3 muestra un gráfico del rechazo de boro de la membrana en la etapa 4 como función del rechazo de boro especificado de la membrana en la Etapa 1 requerida para conseguir un agua procesada que contenga no más de 350 ppm de sal y una concentración de boro especificada de 0,5 ppm para valores totales de recuperación de agua del 50%, 65% y 75%. La Tabla 2 indica que las concentraciones de producto de agua especificadas se pueden conseguir incluso con una membrana que tiene un rechazo de boro tan bajo como 0,804, 0,834 y 0,851 para valores de recuperación de agua totales de 50%, 65% y 75%, respectivamente. Estos rechazos de boro están muy por debajo del rechazo de boro de 0.90 alcanzable vía las membranas de RO comerciales actualmente disponibles.

Tabla 2. Rechazos mínimos de boro en la invención de CDBR para valores totales de recuperación de agua de 50%, 65% y 75% requeridos para producir un producto de agua que tiene una concentración de sal igual o menor de 350 ppm y una concentración de boro especificada de 0,5 ppm.

Recuperación	σ_{1b}	σ_{2b}	σ_{3b}	σ_{4b}
50%	0,804	0,672	0,798	0,803
65%	0,834	0,552	0,833	0,833
75%	0,850	0,464	0,851	0,851

La Tabla 3 compara el OPD y el SEC_{net} para SSRO convencional para solo la desalinización y la nueva invención de CDBR para conseguir un producto de agua que

tiene una concentración de sal de 350 ppm y una concentración de boro de 0,5 ppm para recuperaciones totales de agua del 50%, 65% y 75%. Tenga en cuenta que la SSRO convencional no puede reducir la concentración de boro a 0,5 ppm para una alimentación típica de agua salina que contiene 10 ppm de boro usando membranas de RO

5 comercialmente disponibles. La invención de CDBR puede conseguir la misma recuperación total de agua que la SSRO convencional a un OPD sustancialmente reducido. La invención de CDBR reduce el OPD requerido para solo la desalinización vía SSRO en 10%, 18% y 20% a valores totales de recuperación de agua de 50%, 65% y 75%, respectivamente. La invención de CDBR da como resultado un aumento en el

10 SEC_{net} del 8%, 4% y 2% para los valores totales de recuperación de agua de 50%, 65% y 75%, respectivamente, en relación con el uso de SSRO convencional para solo la desalinización. Dado que la invención de CDBR puede desalinizar y reducir la concentración de boro a 0,5 ppm a un OPD sustancialmente reducido, se traducirá en una reducción significativa en los costes fijos para las bombas, tuberías y recipientes a

15 presión en relación con el uso de SSRO para solo desalinización. Además, el funcionamiento a presión más baja vía la invención de CDBR reducirá los costes de mantenimiento para la desalinización y la retirada de boro.

Tabla 3. Comparación del OPD y el SEC_{net} para la desalinización usando SSRO y la invención de CDBR tanto para la desalinización como para la retirada de boro

20 produciendo un producto de agua con una concentración de sal igual o menor de 350 ppm y una concentración de boro de 0,5 ppm.

Procedimiento	50% de recuperación		65% de recuperación		75% de recuperación	
	OPD (bar)	SEC_{net} (kWh/m ³)	OPD (bar)	SEC_{net} (kWh/m ³)	OPD (bar)	SEC_{net} (kWh/m ³)
SSRO	55,5	2,242	79,3	2,922	111	3,915
CDBR	50,2	2,420	64,9	3,033	88,9	3,990

La prueba del concepto para la invención de CDBR se ha mostrado en detalle para la realización de cuatro etapas que implica enviar la fracción retenida desde una etapa de

25 SSRO a una CMCR de 2 etapas y enviar el filtrado de la etapa de SSRO a una LPMS después de lo cual las corrientes de filtrado de CMCR y LPMS se mezclan para conseguir las concentraciones deseadas de sal y boro. Se ha mostrado que la invención de CDBR

es capaz de producir un producto de agua que tiene una concentración de sal igual o inferior a 350 ppm y una concentración de boro especificada de 0,5 ppm, que cumple las recomendaciones de la OMS para agua potable y de riego. Se ha mostrado que la invención de CDBR consigue las concentraciones de producto de agua especificadas a sustancialmente menores presiones que las requeridas para la desalinización sola vía SSRO convencional para la misma recuperación total de agua. Además, la invención de CDBR puede conseguir las concentraciones de producto de agua especificadas a un SEC_{net} solo ligeramente más alto que para la desalinización sola vía SSRO convencional a recuperaciones moderadas del 50% y a casi los mismos valores que la SSRO convencional para recuperaciones del 65% y 75%. Dado que la invención de CDBR reduce sustancialmente la presión requerida para la desalinización y la retirada concurrente de boro, reducirá los costes fijos de construcción asociados a las bombas, tuberías y recipientes a presión y reducirá los costes de mantenimiento asociados al funcionamiento continuo a alta presión. Estas reducciones de costes adicionales no están incluidas en el análisis de prueba del concepto.

La prueba del concepto para esta invención de CDBR se ha mostrado en base al mantenimiento del mismo OPD en las etapas 1, 2 y 3. Esta realización de la invención de EERO es ventajosa dado que evita cualquier bombeo entre etapas en el lado de alta presión de la CMCR. Sin embargo, otra realización de esta invención de CDBR es para permitir un OPD reducido en una o más de las etapas en la CMCR mientras que al mismo tiempo se evita cualquier bombeo entre etapas en el lado de alta presión de la cascada de membranas de CMCR. Esto reducirá los costes de bombeo a expensas de una recuperación reducida de agua potable. Para algunas aplicaciones, esta realización de la invención de CDBR podría ser deseable. La invención de CDBR también se puede implementar en dos realizaciones adicionales que se ilustran en la Figura 3:

a) La corriente de filtrado de la Etapa 1 se puede dividir en dos fracciones por medio de un divisor de flujo, en la que una fracción se alimenta a la Etapa 4 como en el caso de la invención original, mientras que la otra fracción circunvala la Etapa 4 para mezclarse con las corrientes de filtrado que salen de la Etapa 4 y la Etapa 3. Esta realización se denomina CDBR-B e introduce un nuevo parámetro de entrada, la relación de división (S) que se define como la relación del caudal de la corriente que circunvala la Etapa 4 al caudal de la corriente de filtrado que sale de la Etapa 1. Cuando $S = 0$, se recupera la invención original de CDBR. Tener un divisor de flujo que afecte a las concentraciones en el producto final también podría ser una ventaja, dado que proporciona una forma simple de compensar cualquier cambio en el sistema en otro lugar, tal como cambios en la

permeabilidad debido a la colmatación o polarización por concentración, envejecimiento de la membrana, etc.

b) La fracción retenida de la Etapa 4 se puede reciclar total o parcialmente como alimentación a la Etapa 1. Esta realización se denomina CDBR-BR. Dado que la concentración de sal de la fracción retenida de la Etapa 4 es menor que la de la alimentación de agua de mar a la Etapa 1, que bien podría ser, diluirá la alimentación y, por ello debería rebajar el OPD requerido en las Etapas 1, 2 y 3. El aumento del flujo de alimentación a la Etapa 1 mediante el reciclado de la fracción retenida de la Etapa 4 también aumentaría el factor de seguridad (es decir, la relación de caudal de fracción retenida a caudal de filtrado) y permitiría efectuar la Etapa 1 a una recuperación mayor.

Las condiciones del procedimiento para la invención de CDBR-B para producir un agua procesada que contiene no más de 350 ppm de sal y una concentración de boro especificada de 0,5 ppm se resumen en la Tabla 4. Produce OPD y SEC_{net} más bajos que la SSRO para todas las recuperaciones.

15

Tabla 4. Comparación del OPD y el SEC_{net} para desalinización usando la SSRO y la invención de CDBR-B tanto para la desalinización como para la retirada de boro que produce un producto de agua con una concentración de sal igual o menor de 350 ppm y una concentración de boro de 0,5 ppm.

Recuperación	Y_2	S	σ_{1s}	σ_{4s}	σ_{1b}	σ_{4b}	OPD (bar)	SEC_{net} (kWh/m ³)
50%	0,392	0,30	0,996	0,997	0,899	0,900	88,7	3,81
65%	0,295	0,37	0,997	0,997	0,900	0,900	65,0	2,92
75%	0,150	0,44	0,997	0,997	0,900	0,900	49,8	2,35

20

También es de interés determinar el rendimiento de la invención propuesta solo para desalinización. Sería posible obtener un producto de agua con 0,350 ppm de concentración de sal a valores más bajos de OPD y SEC_{net} cuando se usa la invención de CDBR-BR. En la tabla 5, el rendimiento de la invención de CDBR-BR con una relación de división de 0,95 y un reciclado completo de la fracción retenida de la Etapa 4 se compara con el de la SSRO para desalinización para recuperaciones de agua de 65% y 75%.

25

Tabla 5. Comparación del OPD y el SEC_{net} para desalinización usando la SSRO y la

invención de CDBR-BR que produce un producto de agua con una concentración de sal igual a 350 ppm.

Procedimiento	65% de recuperación		75% de recuperación	
	OPD (bar)	SEC _{net} (kWh/m ³)	OPD (bar)	SEC _{net} (kWh/m ³)
SSRO	79,3	2,922	111	3,915
CDBR-BR	61,0	2,718	79,3	3,387

Además, en lugar de la etapa de SSRO en las realizaciones descritas en las Figuras 1, 3a y 3b, se pueden usar dos o más etapas de SSRO, en las que la alimentación de agua salada se introduce en el lado de alta presión de la etapa de SSRO y la fracción retenida de cada etapa de SSRO se introduce en el lado de alta presión de la etapa de SSRO subsecuente mientras que la fracción retenida de la última etapa de SSRO se introduce en la unidad de CMCR. El filtrado de todas las etapas de SSRO se introduce en la LMPS.

En esta realización, el OPD se puede incrementar gradualmente entre la primera y última etapa de SSRO, y la última etapa de SSRO funciona al mismo OPD que la unidad de CMCR, que da como resultado un SEC_{net} más bajo comparado con la realización original. Como ejemplo, en una realización de la invención de CDBR con dos etapas de SSRO, descrita en la Figura 4; para el 75% de recuperación de agua, la primera etapa de SSRO puede funcionar a un OPD de 52,8 bar mientras que la segunda etapa de SSRO y el resto de la unidad de CDBR funciona a un OPD de 100 bar, dando como resultado un SEC_{net} de 3,117 kWh/m³, mientras que para la recuperación de 65% de agua, la primera etapa de SSRO puede funcionar a un OPD de 43,1 bar mientras que la segunda etapa de SSRO y el resto de la unidad de CDBR funciona a un OPD de 66,8 bar, dando como resultado un SEC_{net} de 2,606 kWh/m³ para producir un producto de agua con una concentración de sal igual o menor de 350 ppm y una concentración de boro de 0,5 ppm.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema para el procedimiento concurrente de desalinización y retirada de boro (CDBR), caracterizado porque el sistema combina uno o más módulos de ósmosis inversa (RO) conectados en serie, que se denomina ósmosis inversa de una sola etapa (SSRO), o dos o más de estas etapas de SSRO en serie, con una cascada de membranas en contracorriente con reciclado (CMCR) que tiene por lo menos dos etapas y una etapa de membrana de baja presión (LPMS) donde la fracción retenida de la etapa de SSRO es la alimentación a la CMCR y el filtrado de la etapa de SSRO es la alimentación a la LPMS y donde las corrientes de filtrado de la CMCR y LPMS se mezclan para conseguir las concentraciones de boro y/o sal especificadas en el agua procesada.
5
2. Un sistema según la reivindicación 1, donde cada etapa en la SSRO, CMCR y LPMS consiste en uno o más módulos de membrana conectados en paralelo.
- 15 3. Un sistema según la reivindicación 1, donde el sistema suministra un producto de agua que tiene una concentración de sal igual o menor de 350 ppm.
4. Un sistema según la reivindicación 1, donde el sistema suministra un producto de agua que tiene una concentración de boro igual o menor de 0,5 ppm.
- 20 5. Un sistema según la reivindicación 1, donde la etapa de SSRO y la etapa de CMCR funcionan al mismo diferencial de presión osmótica (OPD), pasando por alto pequeñas pérdidas debidas a la caída de presión requerida para el flujo a través de las conducciones y los módulos de membrana o para provocar la filtración en los módulos de membrana.
- 25 6. Un sistema según la reivindicación 1, donde el sistema suministra la retirada de boro deseada con una mayor recuperación de agua a un menor OPD y a un consumo específico de energía (SEC) reducido con respecto a la SSRO convencional para un agua salina o una alimentación acuosa que contiene solutos de peso molecular relativamente bajo.
- 30 7. Un sistema según la reivindicación 1, donde el sistema suministra la retirada de sal deseada con una mayor recuperación de agua a un OPD menor y a un SEC reducido con relación a la SSRO convencional para un agua salina o una alimentación acuosa que contiene solutos de peso molecular relativamente bajo.

8. Un sistema según la reivindicación 1, caracterizado por comprender una o más etapas de CMCR, donde el OPD se reduce en una o más de dichas etapas de CMCR con relación al OPD en la etapa de SSRO.
9. Un sistema según la reivindicación 1, caracterizado por comprender una o más etapas de CMCR, donde el OPD se incrementa en una o más de dichas etapas de CMCR con relación al OPD en la etapa de SSRO.
10. Procedimiento concurrente de desalinización y retirada de boro (CDBR) para la producción de agua potable y de riego, caracterizado por comprender las siguientes etapas:
- 10 - introducir la fracción retenida de una etapa de SSRO o una serie de etapas de SSRO óptimamente como alimentación a la CMCR;
 - contracorriente de fracción retenida y flujo de filtrado en la CMCR;
 - reciclado de filtrado del lado de la fracción retenida en la CMCR;
 - autoreciclado de la fracción retenida en al menos una de las etapas de membrana en la CMCR;
 - 15 - introducir el filtrado de la(s) etapa(s) de la SSRO como alimentación en una LPMS; y
 - mezclar las corrientes de filtrado de la CMCR y LPMS para conseguir las concentraciones deseadas en el producto de agua.
11. Un procedimiento según la reivindicación 10, donde la fracción retenida de la etapa de SSRO es la alimentación a la etapa en la CMCR en la que su concentración es más cercana a la de las otras corrientes que entran en esta etapa.
12. Un procedimiento según la reivindicación 10, donde el rechazo de sal de las etapas de membrana en la CMCR disminuye en la dirección del producto de la fracción retenida para permitir algo de filtración de sal u otros solutos de bajo peso molecular desde el lado de presión alta a baja de las membranas para reducir el OPD.
- 25
13. Un procedimiento según la reivindicación 10, donde el rechazo efectivo en cada etapa de la CMCR se consigue disminuyendo o aumentando la presión de esta etapa.
14. Un procedimiento según la reivindicación 10, donde una parte de la fracción retenida de una o más etapas se recicla de nuevo a la alimentación de la misma etapa para aumentar la recuperación.
- 30

15. Un procedimiento según la reivindicación 10, donde el factor de seguridad en una etapa, que es la relación de flujo de fracción retenida a filtrado en la etapa, se permite que sea menor que uno debido a la retirada de agentes de colmatación escasamente solubles en una o más etapas que preceden a esta etapa en la dirección del flujo de la fracción retenida.
- 5
16. Un procedimiento según la reivindicación 10, donde la recuperación de agua en la LPMS se optimiza para reducir el consumo específico de energía.
17. Un procedimiento según la reivindicación 10, donde las concentraciones de boro y/o sal se pueden reducir en agua de mar o agua salobre para producir agua potable y/o de riego usando membranas de RO y NF convencionales y membranas de alto flujo del última generación.
- 10
18. Uso de un sistema según la reivindicación 1 para la producción de agua potable.
19. Uso de un sistema según la reivindicación 1 para la producción de agua de riego.

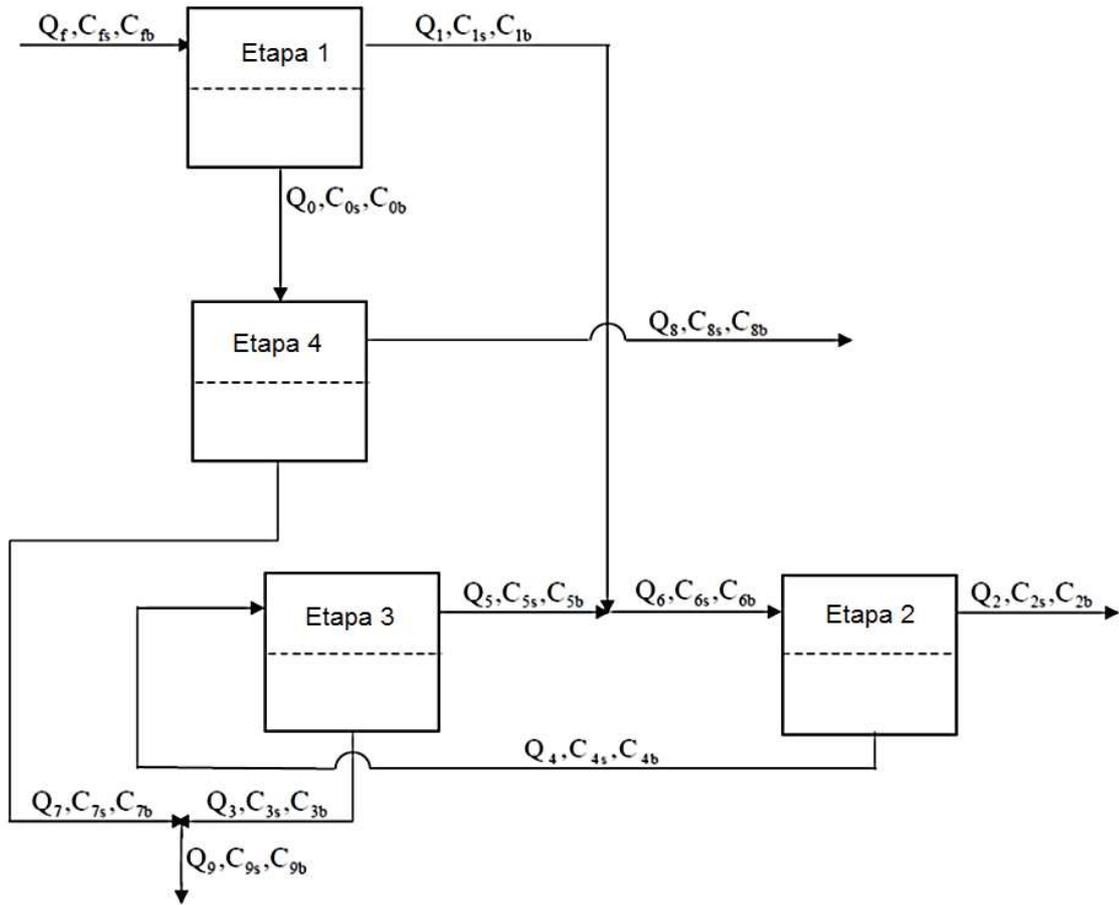


Figura 1

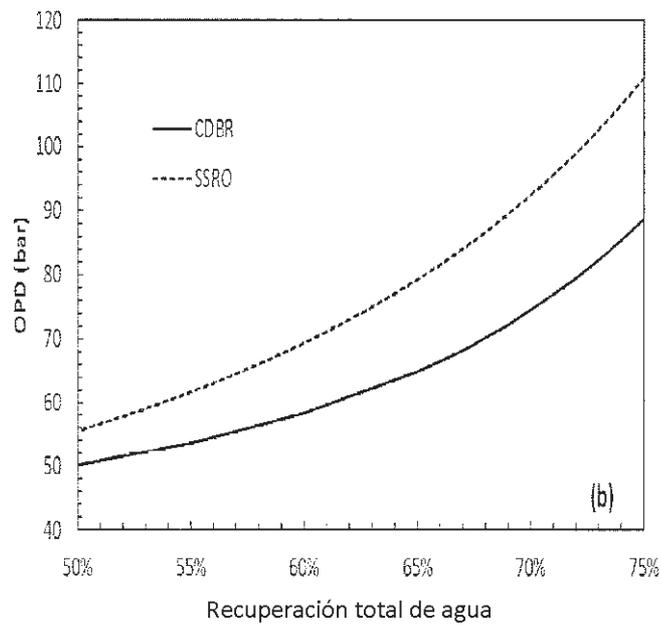
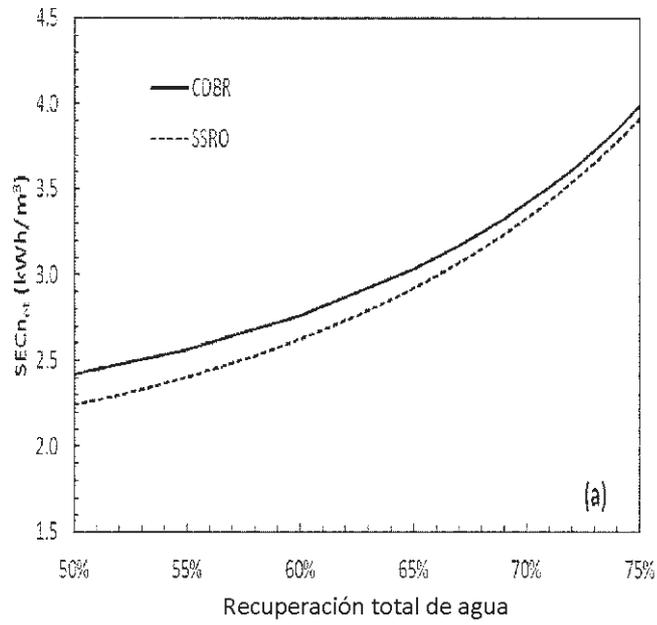


Figura 2

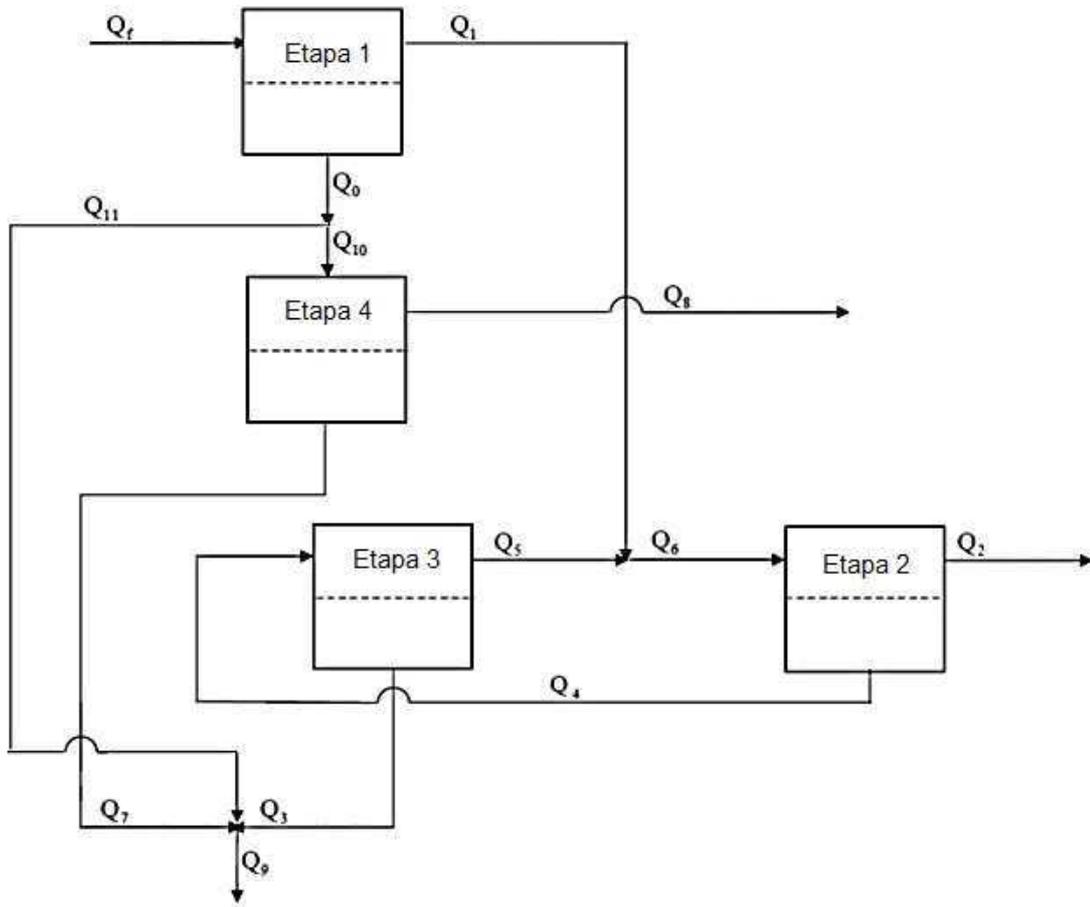


Figura 3a

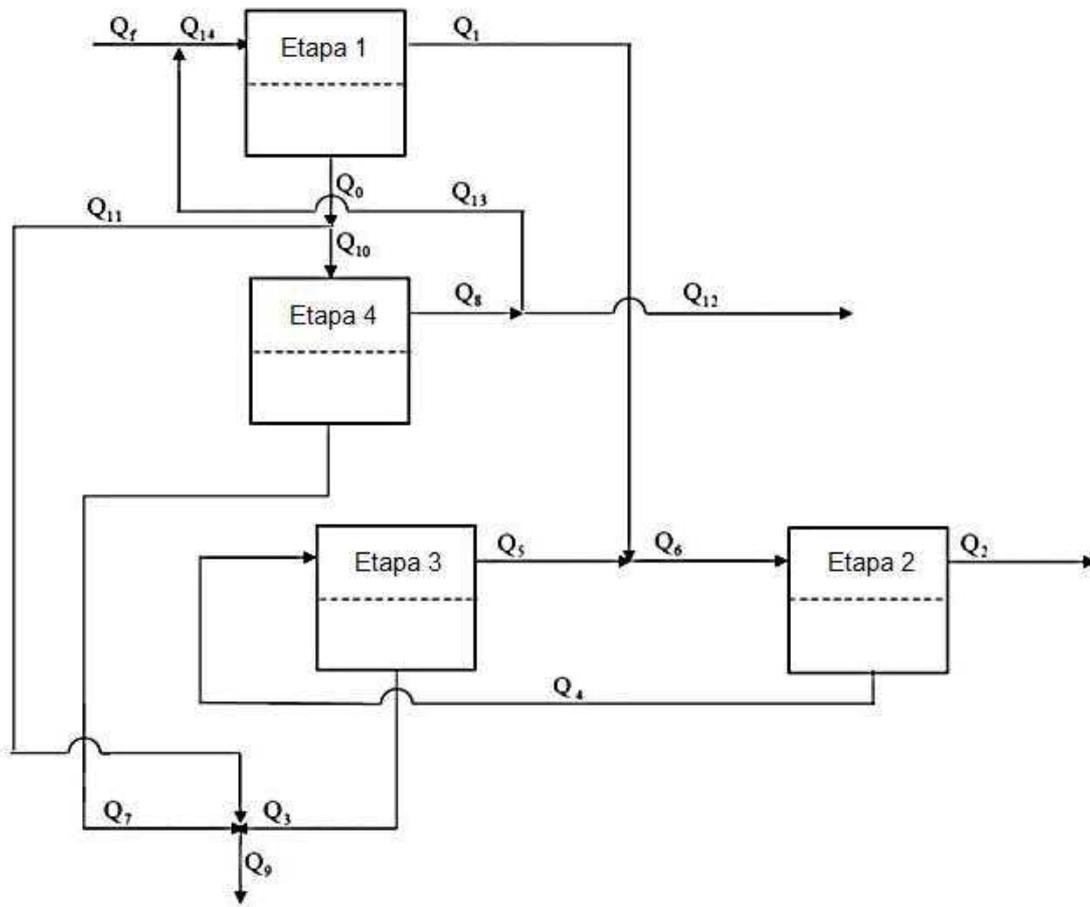


Figura 3b

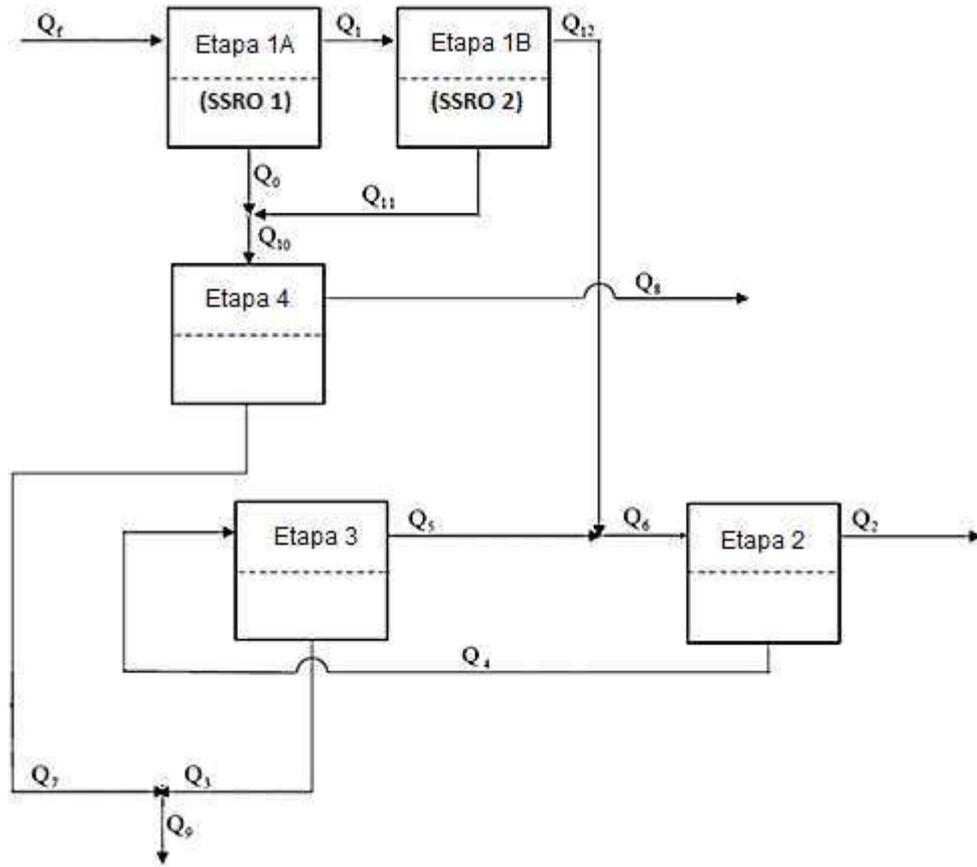


Figura 4