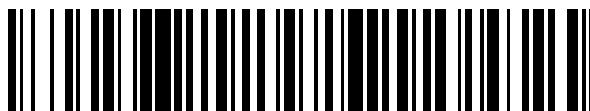


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 450 056**

51 Int. Cl.:

B01D 61/44 (2006.01)

B01D 61/52 (2006.01)

C02F 1/469 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.11.2008 E 08864474 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.01.2014 EP 2240261**

54 Título: **Proceso de electrodiálisis**

30 Prioridad:

25.12.2007 CN 200710301563

18.01.2008 US 16518

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

21.03.2014

73 Titular/es:

GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)

1 River Road

Schenectady, NY 12345, US

72 Inventor/es:

DU, YU;

LIU, YUNFENG;

MAO, SAIJUN;

YUAN, XIAOMING;

YANG, CHAO;

XIONG, RIHUA;

CAO, CHUN;

WANG, SHENGXIAN;

CAI, WEI;

WEI, CHANG y

XIA, JIYANG

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 450 056 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

Proceso de electrodiálisis

Campo técnico

La invención incluye realizaciones que se refieren a un proceso para la desalinización del agua.

5 Exposición de la técnica

Los procesos y dispositivos de electrodiálisis se han utilizado para la desalinización de agua. Un dispositivo de electrodiálisis puede incluir membranas de intercambio de iones entre un par de electrodos. Las membranas pueden ser de dos tipos: membranas de intercambio de cationes y membranas de intercambio de aniones. Las membranas de intercambio de cationes pueden ser relativamente permeables a los iones cargados positivamente ("cationes") con un peso molecular bajo y relativamente impermeables a los iones cargados negativamente ("aniones"), y las membranas de intercambio de aniones pueden ser relativamente permeables a los aniones con un peso molecular bajo. Las membranas de intercambio de cationes y las membranas de intercambio de aniones se alternan entre los pares de electrodos que se han mencionado más arriba, habiendo compartimentos entre las membranas. Cuando una corriente eléctrica continua se hace pasar entre los electrodos, los cationes pueden ser atraídos hacia el electrodo cargado negativamente y pasar a través de las membranas de intercambio de cationes, pero no a través de las membranas de intercambio de aniones. Al mismo tiempo, los aniones en las soluciones pueden ser atraídos hacia el electrodo cargado positivamente y pasar a través de las membranas de intercambio de aniones, pero no a través de la membrana de intercambio de cationes (en un lado del ánodo de la membrana de intercambio de cationes) pueden ser parcialmente desionizados por la corriente eléctrica continua, y pueden ser denominados compartimentos de "dilución". Los compartimentos en un lado del ánodo de las membranas de intercambio de aniones (en un lado del cátodo de la membrana de intercambio de cationes) acumulan los iones retirados de los espacios de dilución, y pueden ser denominados compartimentos de "concentración". El proceso de electrodiálisis se puede hacer continuo haciendo circular las soluciones entre las membranas.

La velocidad de desalinización se puede relacionar con la cantidad de la corriente eléctrica continua. La densidad de corriente es la corriente por unidad de área de membrana. Un aumento de la densidad de corriente puede resultar en un aumento de la velocidad de desalinización. Pero los efectos de polarización pueden proporcionar un límite superior de densidad de corriente útil. La polarización puede ser un cambio local de la concentración provocado por el agotamiento de la sal de la solución en la proximidad inmediata de las membranas, lo cual se produce por un fenómeno de transporte de iones y puede dar lugar a una resistencia óhmica indeseablemente alta. La corriente limitante puede ser alcanzada cuando la concentración de iones en la solución cerca de la superficie de la membrana se aproxima a cero. En la práctica, el agua puede ser electrolizada en hidrógeno e iones hidroxilo y participar en el transporte de iones, y una electrodiálisis de agua de este tipo puede disminuir la eficacia de la corriente. Un potencial electrolítico puede proporcionar un límite superior a la cantidad de corriente efectiva. Puede haber también cambios inducidos de pH que promueven la precipitación de diversas sustancias en las superficies de las membranas causando daños a las membranas. Una precipitación de este tipo puede ser referida como "ensuciamiento".

La tecnología de electrodiálisis reversible implica la inversión periódica de la polaridad de voltaje / corriente aplicada a los electrodos para prevenir o para eliminar el precipitado o la escamación. La inversión de polaridad destruye las escamas recién precipitadas para permitir el lavado y evitar daños a la membrana. Sin embargo, en la operación de eliminación de electrodiálisis, la función de los compartimentos de diluido puede cambiar a compartimentos de concentrado, y la función de los compartimentos de concentrado puede cambiar a compartimentos de diluido cuando la voltaje o polaridad de la corriente se invierte. Esta inversión puede requerir que el trayecto de flujo de diluido y de concentrado correspondientes cambie de manera correspondiente. Esto puede resultar en una necesidad de un trayecto de flujo hidráulico indebidamente complicado y control por válvulas. Y el proceso de inversión de electrodiálisis consume una cantidad considerable de energía.

Puede ser deseable tener un proceso que difiere de aquellos procesos que están disponibles actualmente. El documento US 3.029.196 se refiere a la electrodiálisis de soluciones acuosas de electrolitos utilizando ciclos de corriente continua directa e inversa. El documento WO 02/06163 A1 se refiere a un sistema de electrodesionización para eliminar iones de líquidos que pasan a su través.

50 Breve descripción

La presente invención proporciona un proceso de electrodiálisis de acuerdo con la reivindicación 1 de la presente memoria descriptiva.

Un dispositivo adecuado para realizar el proceso de la invención incluye un primer electrodo y un segundo electrodo separado del primer electrodo para definir un volumen. Una membrana de intercambio de aniones y una membrana de intercambio de cationes están dispuestas dentro del volumen. Un controlador controla el suministro de corriente

eléctrica desde una fuente de alimentación eléctrica al primer electrodo y al segundo electrodo. El suministro de corriente eléctrica es controlado para conmutar desde un primer modo de operación a un segundo modo de operación que proporciona corriente eléctrica que tiene una polaridad inversa durante cada ciclo. La corriente eléctrica se suministra a una velocidad de ciclos controlada y durante una duración controlada. La velocidad de ciclos es mayor que aproximadamente 100 hercios y menor que aproximadamente 10 kilohercios.

Otro dispositivo de electrodiálisis adecuado incluye un primer electrodo y un segundo electrodo separado del primer electrodo para definir un volumen, una fuente de alimentación capaz de enviar una corriente eléctrica continua en impulsos al primer electrodo y al segundo electrodo, y un controlador capaz de controlar el dispositivo de manera que el dispositivo funcione a través de una pluralidad de ciclos. Al menos uno de la pluralidad de ciclos incluye una etapa de desionización, en la que una fuente de alimentación de corriente continua hace pasar una corriente eléctrica continua directa (I_f) a los electrodos primero y segundo durante una primera duración (t_1), con el fin de alimentar un primer electrodo positivo y un segundo electrodo negativo, y una etapa de recuperación, en la que la fuente de alimentación envía corriente eléctrica continua inversa (I_r) a cada uno de los electrodos primero y segundo en una dirección opuesta a la corriente eléctrica continua directa durante una segunda duración (t_2). La frecuencia de cada ciclo de las pluralidades de ciclos a lo largo de un período de operación se encuentra en un intervalo de alrededor de 100 hercios a alrededor de 10 kilohercios.

En una realización, un proceso de electrodiálisis utiliza un dispositivo de electrodiálisis. El proceso incluye una pluralidad de ciclos, y al menos uno de la pluralidad de ciclos incluye una etapa de desionización, en la que una fuente de alimentación de corriente continua hace pasar una corriente eléctrica continua directa (I_f) a los electrodos primero y segundo durante una primera duración (t_1), con el fin de alimentar a un primer electrodo positivo y a un segundo electrodo negativo; y una etapa de recuperación, en la que la fuente de alimentación envía una corriente eléctrica continua inversa (I_r) a cada uno de los electrodos primero y segundo en una dirección opuesta a la corriente eléctrica continua directa durante una segunda duración (t_2). La frecuencia de cada ciclo de las pluralidades de ciclos a lo largo de un período de operación se encuentra en un intervalo de aproximadamente 100 hercios a aproximadamente 10 kilohercios.

En una realización, un proceso de electrodiálisis utiliza un dispositivo de electrodiálisis que tiene un compartimento de diluido. El proceso incluye hacer circular agua de alimentación en el dispositivo de electrodiálisis; energizar un electrodo en el dispositivo de electrodiálisis con una primera corriente eléctrica continua directa; monitorizar una concentración de iones en el compartimento de diluido del dispositivo de electrodiálisis con relación a un incremento de la concentración de iones con respecto a una primera concentración de iones preestablecida; energizar el electrodo con una corriente eléctrica continua de polaridad inversa antes de que la concentración de iones monitorizada se haga menor que la primera concentración de iones preestablecida; monitorizar una concentración de iones en un compartimento de diluido del dispositivo de electrodiálisis con relación a una segunda concentración de iones preestablecida; y energizar el electrodo con una segunda corriente eléctrica continua directa en respuesta a la concentración de iones en el compartimento de diluido que alcanza la segunda concentración de iones preestablecida.

Dibujos

En los dibujos que se acompañan los mismos caracteres representan las mismas partes en todos los dibujos, en los que:

La figura 1 ilustra un dispositivo de electrodiálisis ejemplar (ED).

La figura 2 ilustra un problema de polarización adyacente a una membrana de intercambio de aniones en un compartimento de diluido.

La figura 3 ilustra una curva de voltaje - corriente para el dispositivo ejemplar ED.

La figura 4 muestra una señal en impulsos ejemplar de acuerdo con una primera realización de la invención.

La figura 5 ilustra unas curvas ejemplares primera, segunda y tercera de concentración de iones - corriente cuando una señal de corriente directa en impulsos se ejerce al dispositivo ED.

La figura 6 ilustra unas curvas ejemplares primera, segunda y tercera de concentración de iones - corriente cuando una señal de corriente inversa en impulsos se ejerce al dispositivo ED.

La figura 7 ilustra una señal en impulsos ejemplar de acuerdo con una realización que queda fuera del alcance de la invención reivindicada.

Descripción detallada

La invención incluye realizaciones que se refieren a un proceso para la desalinización del agua.

5 Para la realización del proceso de la invención, se proporciona un dispositivo que incluye un primer electrodo y un segundo electrodo separado del primer electrodo para definir un volumen, y un controlador. El controlador puede controlar un suministro de corriente eléctrica desde una fuente de alimentación eléctrica al primer electrodo y al segundo electrodo. El suministro de corriente eléctrica es controlado para conmutar desde un primer modo de operación a un segundo modo de operación durante cada ciclo. En el segundo modo de operación, el suministro de corriente eléctrica proporciona corriente eléctrica que tiene una polaridad que es inversa de la polaridad de la corriente proporcionada durante el primer modo de operación. La corriente eléctrica se suministra a una velocidad de ciclos controlada y durante una duración controlada.

10 El dispositivo de electrodiálisis puede incluir un compartimento de diluido. El controlador puede controlar adicionalmente válvulas que bloquean o permiten un flujo de agua de alimentación a través del dispositivo con el fin de proporcionar fuerza motriz a una corriente a través de una cámara de iones concentrados, y a una cámara de iones diluidos o salida.

15 El dispositivo puede incluir, además, una membrana de intercambio de iones dispuesta en contacto con un trayecto de flujo de agua de alimentación y próximo a uno o más de los electrodos. Una o ambas de entre una membrana de intercambio de aniones y una membrana de intercambio de cationes pueden estar dispuestas dentro de un volumen definido por los electrodos primero y segundo. Dos o más membranas de intercambio de cationes pueden ser colocadas entre los electrodos primero y segundo. Dos o más membranas de intercambio de aniones pueden estar colocadas entre los electrodos primero y segundo.

20 La velocidad o velocidades de ciclos seleccionadas afectan el rendimiento y la vida útil del dispositivo. En ciertas realizaciones, se mantiene la velocidad de ciclos para que sea uniforme durante un período de servicio. Mientras que en otras realizaciones la velocidad de ciclos es controlada por el controlador para variar a lo largo del período de servicio. Los sensores pueden trabajar en conjunto con el controlador de manera que la retroalimentación de los sensores permita que el controlador responda a las condiciones cambiantes. Tales condiciones pueden incluir el contenido y la composición del agua de alimentación, la salinidad o la concentración de iones del agua de salida, la demanda de agua de salida, o el costo o la disponibilidad de corriente eléctrica. En ciertas realizaciones, una o más de entre la velocidad de ciclo, la duración, o la cantidad de corriente están relacionadas con un mecanismo de retroalimentación que monitoriza las propiedades del agua de alimentación.

25 Durante un ciclo hay modos de operación que incluyen una etapa de desionización y una etapa de recuperación. Durante la etapa de desionización, una fuente de alimentación de corriente continua hace pasar una corriente eléctrica continua directa (I_f) a los electrodos primero y segundo durante una primera duración (t_1), para alimentar un primer electrodo positivo y el segundo electrodo negativo. Durante la etapa de recuperación, la fuente de alimentación envía una corriente eléctrica continua inversa (I_r) a cada uno de los electrodos primero y segundo en una dirección opuesta a la corriente eléctrica continua directa durante una segunda duración (t_2). La frecuencia de cada ciclo de los varios ciclos a lo largo de un período de operación puede ser como se ha explicado más arriba en la presente memoria descriptiva.

30 La velocidad de ciclos es mayor que aproximadamente 100 hercios y menor que aproximadamente 10 kilohercios. En una realización, la velocidad de ciclos se encuentra en un intervalo de aproximadamente 100 hercios a aproximadamente 500 hercios, de aproximadamente 500 hercios a aproximadamente 1 kilohercios, de aproximadamente 1 kilohercios a aproximadamente 2 kilohercios, de aproximadamente 2 kilohercios a aproximadamente 5 kilohercios, o de aproximadamente 5 kilohercios a aproximadamente 10 kilohercios. La selección de la velocidad de ciclos puede afectar al rendimiento y la longevidad del dispositivo, y se explicará adicionalmente en la presente memoria descriptiva.

35 Como se ha hecho notar más arriba, los ciclos que se han mencionado más arriba incluyen al menos los modos de operación primero y segundo. La duración de cada ciclo puede ser menor que aproximadamente 10 segundos. En una realización, la duración puede estar en un intervalo de aproximadamente 10 segundos a aproximadamente 5 segundos, de aproximadamente 5 segundos a aproximadamente 1 segundo, de aproximadamente 1 segundo a aproximadamente 0,5 segundos, de aproximadamente 0,5 segundos a aproximadamente 0,005 segundos, de aproximadamente 0,005 segundos a aproximadamente 0,00005 segundos, de aproximadamente 0,00005 segundos a aproximadamente 0,000005 segundos, o menos de aproximadamente 0,000005 segundos.

40 La relación de la duración del tiempo en el primer modo de operación con respecto a la duración del tiempo en el segundo modo de operación en cada ciclo puede ser mayor que aproximadamente 0,001. En ciertas realizaciones, una relación de la duración del tiempo en el primer modo de operación con respecto a la duración del tiempo en el segundo modo de operación se encuentra en un intervalo de aproximadamente 0,01 a aproximadamente 0,02, de aproximadamente 0,02 a aproximadamente 0,05, de aproximadamente 0,05 a aproximadamente 0,1, de aproximadamente 0,1 a aproximadamente 0,12, de aproximadamente 0,12 a aproximadamente 0,13, de aproximadamente 0,31 a aproximadamente 0,15, de aproximadamente 0,15 a aproximadamente 0,17, de aproximadamente 0,17 a aproximadamente 0,2.

El controlador puede controlar el suministro de corriente eléctrica desde la fuente de energía eléctrica a uno o más electrodos, y no puede suministrar energía eléctrica durante un período determinado. En una realización, el controlador define un tercer modo de operación en la que no se suministra corriente eléctrica desde la fuente eléctrica. El tercer modo de operación se puede producir entre el primer modo de operación y el segundo modo de operación. Por lo tanto, el tercer modo puede ser un período de inactividad, permitir un tiempo de permanencia definido, o puede permitir una acumulación de carga de capacitancia. La velocidad de acumulación de carga en los electrodos puede verse afectada entonces por factores tales como la duración del tercer modo de operación.

Una etapa inversa activa es implementada entre dos de los ciclos. La fuente de alimentación hace pasar una corriente eléctrica continua (I_a) al menos a un electrodo en una dirección contraria a la corriente eléctrica continua directa (I_r) durante una duración (t_4).

Una relación de la duración (t_1) con respecto a una suma de la duración (t_1) y (t_2), se encuentra en un intervalo de aproximadamente 1:10 a aproximadamente 1:100. En ciertas realizaciones, una relación de la corriente inversa, que es una relación de la corriente eléctrica continua inversa (I_r) con respecto a la corriente eléctrica continua directa (I_f), se encuentra en un intervalo de aproximadamente 1:10 a aproximadamente 1:100. En ciertas realizaciones, el ciclo puede incluir una etapa de inactividad. La etapa de inactividad puede durar un tiempo determinado (t_3). Durante la etapa de inactividad, la fuente de alimentación no puede proporcionar la corriente eléctrica continua a uno o ambos de los electrodos. En ciertas realizaciones, la etapa de inactividad se encuentra entre la etapa de desionización y la etapa de recuperación.

Durante el proceso, el agua de alimentación puede fluir al interior del dispositivo de electrodiálisis. Energizar un electrodo en el dispositivo de electrodiálisis con una primera corriente eléctrica directa. Monitorizar una concentración de iones en el compartimento de diluido del dispositivo de electrodiálisis con relación a un incremento de la concentración de iones con respecto a una primera concentración de iones preestablecida. Energizar el electrodo con una corriente eléctrica continua de polaridad inversa, antes de que la concentración de iones monitorizada se haga menor que la primera concentración de iones preestablecida. Monitorizar una concentración de iones en un compartimento de diluido del dispositivo de electrodiálisis con relación a una segunda concentración de iones preestablecida. Energizar el electrodo con una segunda corriente eléctrica continua directa en respuesta a la concentración de iones en el compartimento de diluido que alcanza la segunda concentración de iones preestablecida.

Haciendo referencia a la figura 1, un dispositivo electrodiálisis ilustrativo (ED) 10 incluye un primer electrodo 12 y un segundo electrodo 14 separado del primer electrodo 12 para definir un volumen. Además, el dispositivo de ED 10 incluye dos membranas de intercambio de cationes 16, una membrana de intercambio de aniones 18 entre las dos membranas de intercambio de cationes 16, y una fuente de alimentación de corriente continua (CC) 20. Las membranas alternadas de intercambio de aniones y cationes 16, 18 también son denominadas como pila de membranas. La pila de membranas puede incluir más membranas. Una corriente de alimentación 22 circula al interior del dispositivo de ED 10 en una dirección paralela a las membranas. La corriente de alimentación 22 puede incluir algunos cationes disueltos (M^+) tales como Na^+ , Ca^{2+} , y algunos aniones (X^-) tales como Cl^- , y CO_3^{2-} .

Después del cierre del circuito que incluye la fuente de CC 20 y el primer electrodo 12 y el segundo electrodo 14, uno de entre el primer electrodo 12 y el segundo electrodo 14 puede ser energizado como un electrodo positivo y el otro puede ser un electrodo negativo. Los cationes M^+ migran hacia el electrodo negativo, mientras que los aniones X^- migran hacia el electrodo positivo. Esta migración conduce a una separación de los cationes y aniones disueltos en la corriente de alimentación 22. Un compartimento adyacente a un lado positivo de la membrana de intercambio de aniones 18, que puede estar más cerca del electrodo positivo, puede ser un compartimento de diluido 24. Mientras que un compartimento adyacente a un lado negativo de la membrana de intercambio de aniones 18, que puede estar más cerca del electrodo negativo, puede ser un compartimento de concentrado 26. Las corrientes que salen del compartimento de diluido 24 y del compartimento de concentrado 26 son respectivamente las corrientes de diluido y de concentrado.

La migración de los aniones y cationes puede conducir a la polarización en una capa límite en el compartimento de diluido 24 adyacente a las membranas. Haciendo referencia a la figura 2, la polarización de la membrana de intercambio de aniones 18 se muestra como un ejemplo. Para un proceso de ED convencional usando una fuente de CC con una densidad corriente de operación (I) sustancialmente constante al principio, las concentraciones de iones en el dispositivo de ED 10 son todas las mismas que la de la corriente de alimentación 22. Una vez que la fuente de CC comienza a enviar la corriente de CC al primer electrodo 12 y al segundo electrodo 14, los cationes M^+ son impulsados por una fuerza eléctrica para migrar hacia el electrodo negativo y a través de la membrana de intercambio de aniones 18, y los aniones X^- son accionados para migrar hacia el electrodo positivo y a través de la membrana de intercambio de aniones 18. Como resultado, la concentración de cationes en la proximidad de la membrana de intercambio de aniones 18 puede disminuir. Por otro lado, la membrana de intercambio de aniones 18 obstaculiza o impide que los cationes en la corriente de concentrado 26 migren al interior de la corriente de diluido 24. Por lo tanto, la concentración de cationes adyacentes a la membrana de intercambio de aniones 18 disminuye aún más. Un gradiente de concentración 28 se puede formar adyacente a la membrana de intercambio de aniones 18. Una capa de

Nernst o capa límite 30, que tiene una baja concentración de iones, se pueden formar adyacente a la membrana de intercambio de aniones 18 en la corriente de diluido 24. La capa límite 30 tiene un grosor (D).

Al menos dos factores pueden afectar a la concentración de cationes en la capa límite 30 con respecto a una disminución adicional. En primer lugar, la turbulencia en la corriente de alimentación 22 puede mantener la concentración de iones uniforme en la corriente de alimentación 22. Una vez que la tendencia a la disminución de la concentración alcanza la corriente de alimentación 22, una fuerza de convección de la turbulencia puede dominar la zona y puede impedir la tendencia a la disminución de la concentración. La presencia y la cantidad de turbulencia pueden determinar el grosor (D) de la capa límite 30, además de otros factores. Otros factores de este tipo pueden incluir la turbidez, la viscosidad, la temperatura, y el caudal. En segundo lugar, durante la disminución de iones, una fuerza de la difusión impulsa a los cationes M^+ así como a los aniones X^- a moverse hacia la membrana de intercambio de aniones 18. Esta fuerza de difusión mejora el movimiento de los aniones en la capa límite, pero debilita el movimiento de los cationes debido a que la fuerza de difusión es inversa a la fuerza de propulsión eléctrica. Si la fuerza de difusión es igual a la fuerza eléctrica, entonces el gradiente de concentración puede ser estable en la capa límite 30. Un estado de este tipo se denomina "estado estacionario" en la presente memoria descriptiva y a continuación.

Si la densidad de corriente de operación (I) aumenta adicionalmente, la concentración de iones en la superficie de la membrana de intercambio de aniones 18 disminuye. Esta relación inversa puede ser debida a que el aumento de la fuerza de propulsión eléctrica mejora la fuerza de difusión. Cuando la concentración de cationes en la superficie de la membrana de intercambio de aniones 18 puede ser próxima a cero, esta densidad de corriente correspondiente es la corriente de limitación (I_{lim}). Si la densidad de corriente de operación (I) es aumentada aún más y se encuentra más allá de la densidad de corriente límite (I_{lim}), la capacidad portadora de la corriente de iones de sal puede ser insuficiente. Si la capacidad portadora de la corriente es insuficiente y la densidad de corriente de operación es demasiado alta, entonces las moléculas de agua se pueden dividir en iones componentes (H^+ y OH^-). Con referencia a la figura 3, en ella se representa la curva de voltaje - corriente de la pila de membranas. Cuando la densidad de corriente de operación (I) está por debajo de la corriente de limitación (I_{lim}), el voltaje aumenta linealmente con la densidad de corriente de operación (I). Cuando la densidad de corriente de operación (I) se encuentra más allá de la corriente de limitación (I_{lim}), el agua se divide y el voltaje de la pila de membrana aumenta mucho más rápido con la corriente que antes, puesto que se produce una elevada caída de voltaje en la superficie de la membrana de intercambio de aniones 18. Una cantidad no deseable de la energía puede ser consumida para disociar el agua y no para eliminar la sal del compartimento de diluido 24. Esto puede reducir la eficiencia de la desalinización del agua. La eficiencia de la corriente puede disminuir debido a que la corriente eléctrica puede ser transportada por iones H^+ u OH^- .

Una corriente de limitación (I_{lim}) puede ser determinada experimentalmente en al menos algunos casos por el trazado de la resistencia eléctrica a través de la pila de membranas en relación con la corriente eléctrica, que es una función del caudal de alimentación y de la concentración de sal para una cierta pila de membranas. La densidad de corriente de operación (I) puede ser determinada sobre la base de la corriente de limitación; $I = I_{lim} * f$, en la que f puede estar en un intervalo de aproximadamente 0,3 a aproximadamente 0,7.

Durante la operación, un controlador (no mostrado) puede dirigir la fuente de corriente 20 para proporcionar una señal de corriente de CC en impulsos al primer electrodo 12 y al segundo electrodo 14. Una señal de corriente de CC en impulsos ejemplar se muestra en la figura 4. La señal de corriente de CC en impulsos incluye varios ciclos. Cada ciclo incluye una señal de corriente directa para la desalinización de agua y una señal de corriente inversa para la recuperación de la polarización. La señal de corriente directa tiene una densidad de corriente (I_f) con una duración (T_f) de la corriente directa. La señal de corriente inversa tiene una densidad de corriente inversa (I_r) con una duración (T_r) de la corriente inversa. Cada ciclo tiene un tiempo de ciclos (T) que incluye la duración (T_f) de la corriente directa y la duración (T_r) de la corriente inversa. Durante la duración (T_f) de la corriente directa, el primer electrodo 12 y el segundo electrodo 14 pueden ser energizados como un electrodo positivo y un electrodo negativo, respectivamente. Durante la duración (T_r) de la corriente inversa, las polaridades del primer electrodo 12 y del segundo electrodo 14 se invierten. Una relación de la densidad de corriente (I_f) con la corriente de limitación (I_{lim}) puede estar comprendida en un intervalo de aproximadamente 0,315 a aproximadamente 0,91, que puede ser más alta que la densidad de corriente de operación (I) de los dispositivos de ED convencionales. Puede ser posible controlar la densidad de corriente directa (I_f) tan alta como la densidad de corriente de operación convencional (I) para gestionar los dispositivos de electrodiálisis. Una corriente media (I_a) se puede determinar por:

$$I_a = \frac{I_f \times T_f - I_r \times T_r}{T_f + T_r} \quad \text{(ecuación 1-1)}$$

La eficiencia de la desalinización del agua puede ser proporcional a la corriente media (I_a). Mediante el uso de una densidad de corriente directa más elevada I_f , la corriente media (I_a) puede ser más alta que la densidad de corriente de operación I, y por lo tanto mejorar la eficiencia de desalinización.

Durante cada ciclo, la fuente de CC 20 envía en primer lugar la corriente CC directa al primer electrodo 12 y al segundo electrodo 14 para la desalinización. Antes de que la concentración de iones en la capa límite sea menor que un primer valor preestablecido (C1), las polaridades del primer electrodo 12 y del segundo electrodo 14 se invierten, es decir, la fuente de CC 20 envía una señal de corriente inversa con una densidad de corriente inversa (I_r) durante una duración de corriente inversa (T_r) para recuperar la polarización.

Antes de que la concentración de iones alcance el estado estacionario, la fuente de CC 20 puede enviar la corriente inversa para detener la disminución de la concentración de iones. Una vez que la concentración de iones aumenta y alcanza un segundo valor preestablecido C2, las polaridades de los electrodos primero y segundo se invierten de nuevo, y de esta manera comienza un segundo ciclo. Por lo tanto, la densidad de corriente directa (I_d) se puede establecer de aproximadamente el 5 por ciento a aproximadamente el 30 por ciento mayor que la densidad de corriente de operación I de un dispositivo de ED tradicional. La densidad de corriente media (I_a) puede ser mayor que la corriente de operación de la densidad de corriente tradicional (I), con el fin de aumentar la productividad de la desalinización.

En ciertas realizaciones, la duración de la corriente directa (T_d) y la duración de la corriente inversa (T_r) se calculan de acuerdo con la ecuación de Nernst - Planck:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i - z_i u_m i F c_i \nabla \phi + c_i \vec{u}) = R_i \quad \text{(ecuación 1-2)}$$

en la que $\partial c_i / \partial t$ refleja el cambio de la concentración de iones con respecto al tiempo, el término $-D_i \nabla c_i$ refleja el flujo de difusión causado por el gradiente de concentración, el término $-z_i u_m i F c_i \nabla \phi$ refleja el flujo de migración causado por el campo eléctrico, y el término $c_i \vec{u}$ es el flujo de convección causado por la turbulencia del flujo; y (R_i) se refiere a un término de reacción.

Durante al menos un periodo de cada ciclo del proceso de ED, no se produce ninguna reacción y R_i en la ecuación de Nernst - Planck no tiene ninguna contribución a la concentración de iones. En un período del ciclo de proceso, la señal de corriente de la fuente de corriente es aplicada al primer electrodo y al segundo electrodo en una dirección opuesta a la dirección de flujo de la corriente de alimentación 22. En tal caso, la ecuación de Nernst - Planck se simplifica cuando se considera el fenómeno de transferencia de masa en la capa límite en un caso unidimensional. El flujo de convección en la dirección de migración de iones puede ser despreciado. Por lo tanto, el término $c_i \vec{u}$ en la ecuación de Nernst - Planck se omite. Sólo el flujo de difusión producido por el gradiente de concentración, y el flujo de migración producido por el campo eléctrico son considerados. La ecuación 1 - 2 es simplificada a:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \nabla \cdot (D_i \nabla c_i + z_i u_m i F c_i \nabla \phi) \quad \text{(ecuación 1-3)}$$

La duración de corriente directa e inversa (T_d), (T_r) puede ser simulada de acuerdo con la ecuación 1 - 3, con software de análisis multifísico disponible comercialmente. El software adecuado se puede obtener, por ejemplo, en COMSOL Ltd (Berna, Suiza).

Ejemplos

Ejemplo 1 - Simulación y modelización

Se proporciona una solución de NaCl con una concentración de alimentación de 1000 ppm, un coeficiente de difusión $D = 2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, y una densidad de corriente eléctrica de 25 A / m^2 , el decaimiento de la concentración con respecto al tiempo se muestra en la figura 5 cuando el potencial eléctrico está cargado positivamente. El resultado de la simulación muestra que la concentración en la pared de la membrana disminuye a 400 partes por millón después de aproximadamente 1 microsegundo (ms).

Tomando la distribución de concentraciones de 1 microsegundo en la figura 5 como valores iniciales, la generación de un impulso inverso con una corriente eléctrica que es 1,2 veces mayor que la corriente positiva cargada (es decir, $1,2 \cdot 25 \text{ A / m}^2$), entonces la recuperación de la concentración cerca de la membrana se muestra en la figura 6. El resultado muestra que se necesitarían 0,03 ms para que la concentración se recuperase de 400 partes por millón a 600 partes por millón.

Después de que se haya realizado la simulación, los experimentos pueden verificar y seleccionar un conjunto de parámetros deseables para cada uno de (I_d), (I_r), (T_d), y (T_r). En el experimento, el tiempo de desionización (T_1), la relación de la corriente inversa con la corriente directa $K_i = I_r / I_d$, y la relación de tiempo inverso con el tiempo directo $K_t = T_2 / T_1$, son controladas de forma independiente.

5 Para cada ciclo, la duración (T_d) de la corriente directa debe ser mayor que aproximadamente el 80 por ciento. En una realización, la duración de la corriente directa se encuentra en un intervalo de aproximadamente el 80 por ciento a aproximadamente el 85 por ciento, de aproximadamente el 85 por ciento a aproximadamente el 90 por ciento, de aproximadamente el 90 por ciento a aproximadamente el 95 por ciento, o de aproximadamente el 95 por ciento a aproximadamente el 99 por ciento del tiempo de ciclo T . El control de la duración de la corriente directa optimiza la productividad de la desalinización.

10 Haciendo referencia a la figura 4, la señal de corriente en impulsos incluye una segunda señal de corriente inversa con una segunda densidad de corriente inversa (I_p) y una segunda duración de la corriente inversa (T_p) entre las señales de corriente directa de los dos ciclos adyacentes. La segunda duración de la corriente inversa (T_p) es más larga que la duración de la corriente inversa (T_r). La segunda densidad de corriente inversa (I_p) es más grande que la densidad de corriente inversa. Por lo tanto, la escamación o ensuciamiento formado sobre las membranas se puede eliminar.

15 Haciendo referencia a la figura 7, en la que se muestra una realización de la señal de la corriente en impulsos que queda fuera del alcance de la invención reivindicada. La segunda realización de la señal de corriente en impulsos incluye una señal de corriente directa para cargar positivamente los electrodos primero y segundo 12, 14, una señal de corriente inversa en una dirección contraria a la señal de corriente directa, y una inactividad sin ninguna señal de corriente entre las señales de corriente directa e inversa.

20 Las formas singulares "un", "una" y "el", "ella" incluyen referentes plurales a no ser que el contexto indique claramente lo contrario. La aproximación del idioma, tal como se usa en el presente documento a lo largo de la memoria descriptiva y de las reivindicaciones, se puede aplicar para modificar cualquier representación cuantitativa que podría variar permisiblemente sin producir un cambio en la función básica con la que está relacionada. En consecuencia, un valor modificado por un término o términos, tales como "aproximadamente", no se limita al valor exacto especificado. En algunos casos, el idioma de aproximación puede corresponder a la precisión de un instrumento para medir el valor. Del mismo modo, "libre" se puede utilizar en combinación con un término, y puede incluir un número insustancial, o pequeñas cantidades, sin dejar de ser considerada libre del término modificado.

25

REIVINDICACIONES

1. Un proceso de electrodiálisis que usa un dispositivo de electrodiálisis (10), comprendiendo el proceso una pluralidad de ciclos, comprendiendo al menos uno de la pluralidad de ciclos:
 - 5 una etapa de desionización, en la que una fuente de alimentación de corriente continua (20) hace pasar una señal eléctrica de corriente continua directa con una primera densidad de corriente directa (I_r) a un primer electrodo positivo y a un segundo electrodo negativo durante una duración de la corriente directa (T_r), con el fin de alimentar el primer electrodo positivo y el segundo electrodo negativo; y
 - 10 una etapa de recuperación, en la que la fuente de alimentación (20) envía una señal eléctrica de corriente continua inversa con una primera densidad de corriente inversa (I_r) a cada uno de los electrodos primero y segundo en una dirección opuesta a la señal eléctrica de corriente continua directa durante una duración de corriente inversa (T_r), **que se caracteriza porque**
 - 15 la frecuencia de cada ciclo de la pluralidad de ciclos durante un período de operación se encuentra en un intervalo desde aproximadamente 100 hercios a aproximadamente 10 kilohercios, en el que el proceso comprende, además, al menos una etapa de inversión entre dos ciclos, haciendo pasar la fuente de alimentación (20) una segunda señal eléctrica de corriente continua inversa con una segunda densidad de corriente inversa (I_p) a los electrodos primero y segundo en una dirección contraria a la señal eléctrica de corriente continua directa durante una segunda duración (T_p) de la corriente inversa, siendo mayor la segunda densidad de corriente inversa (I_p) que la primera densidad de corriente inversa (I_r), siendo mayor la segunda duración de la corriente inversa (T_p) que la duración de la corriente inversa (T_r).
- 20 2. El proceso de electrodiálisis como se ha definido en la reivindicación 1, en el que una relación de duración de la duración de la corriente directa (T_r) con respecto a una suma de la duración de la corriente directa (T_r) y la duración de la corriente inversa (T_r), se encuentra en un intervalo de aproximadamente 1:10 a aproximadamente 1:100.

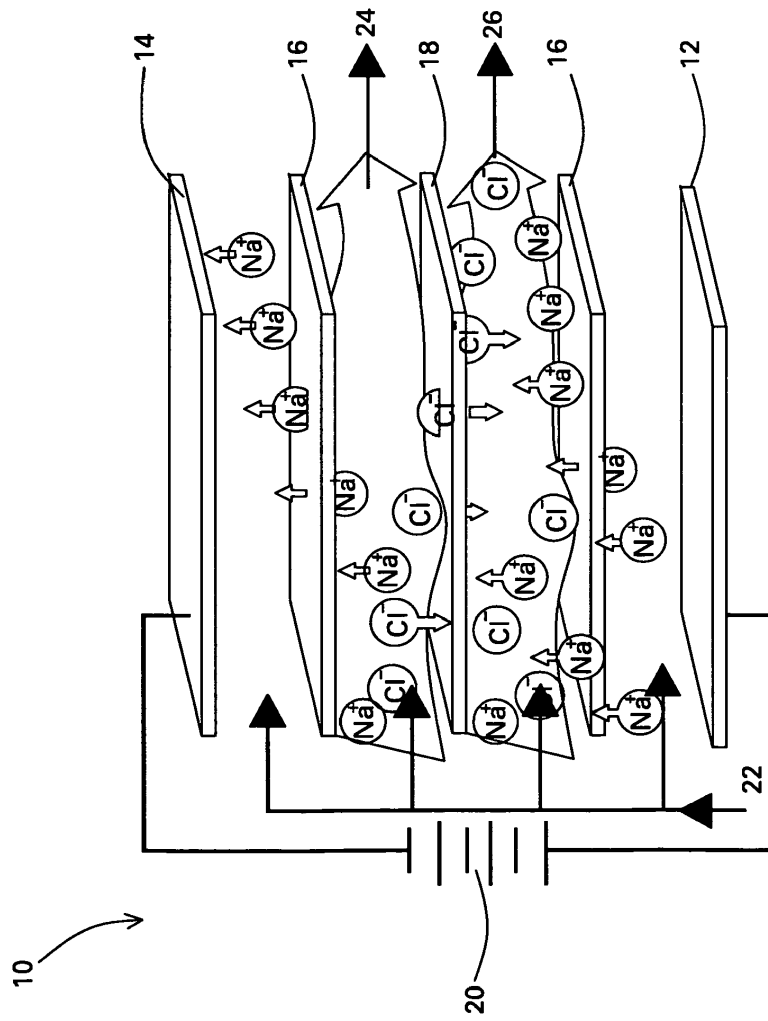


FIG. 1

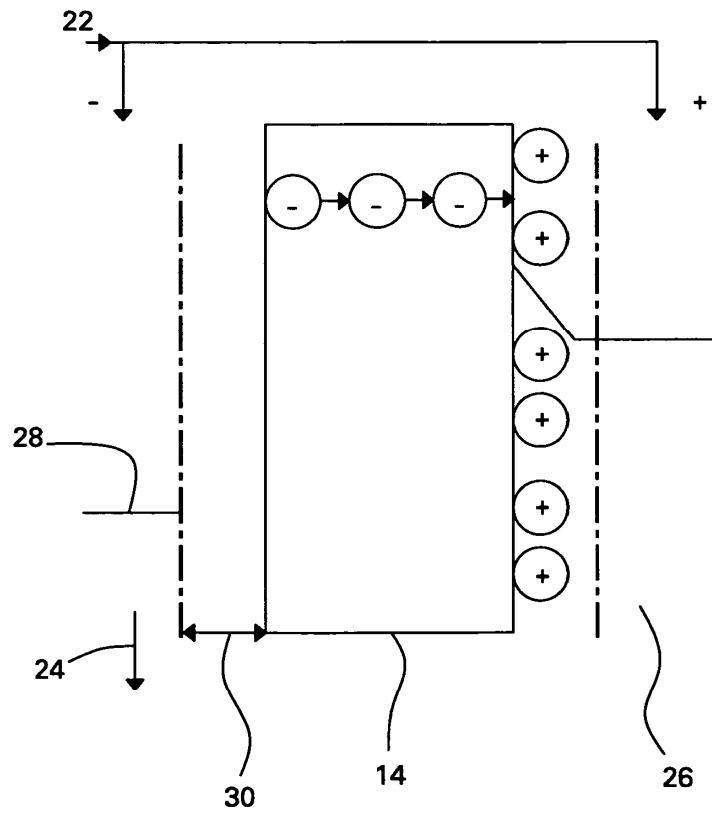


FIG. 2

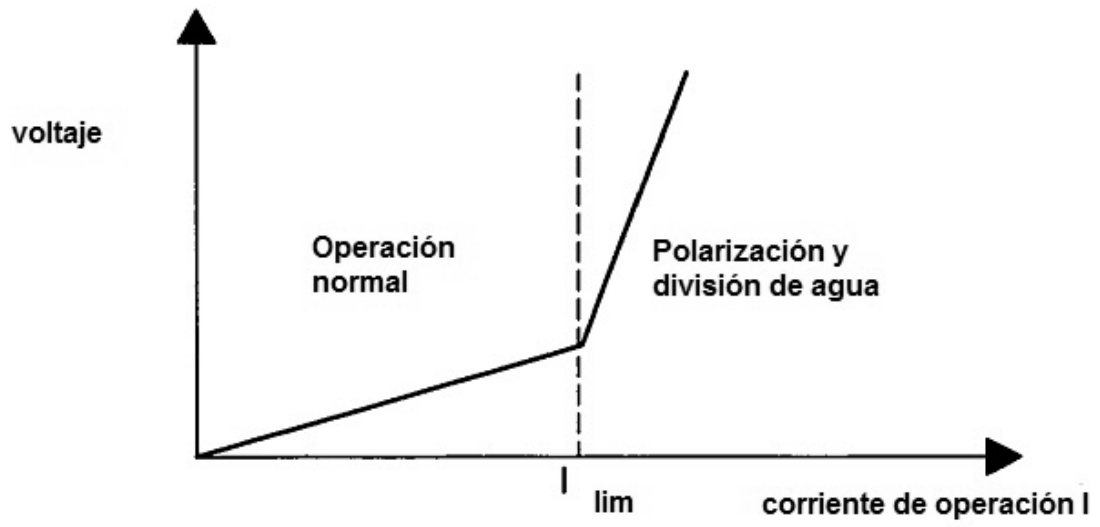


FIG. 3

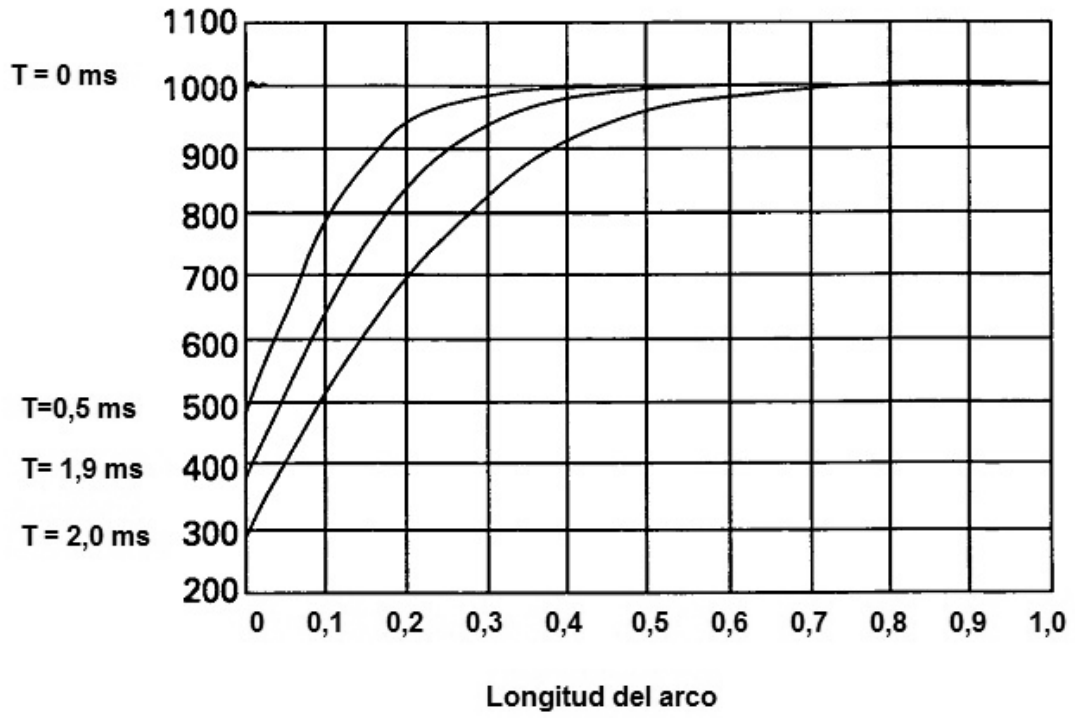


FIG. 5

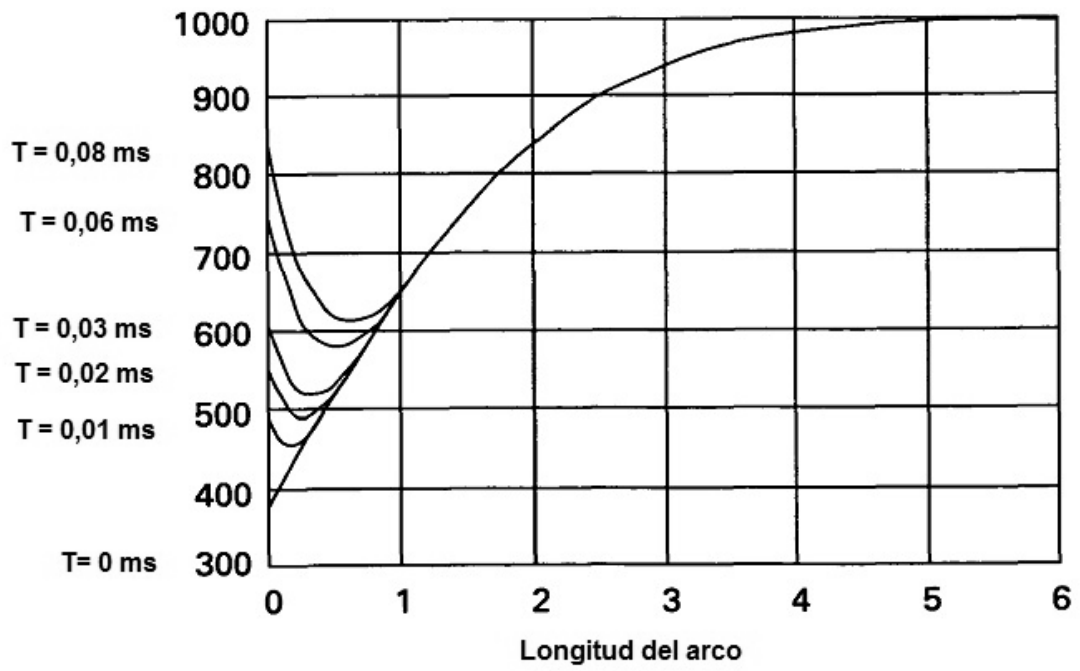


FIG. 6

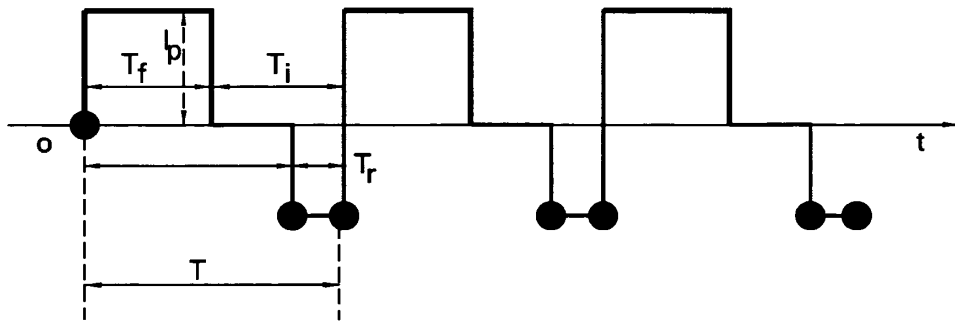


FIG. 7