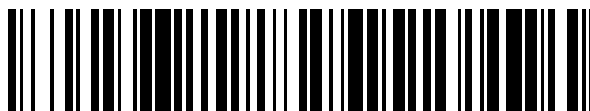


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 709 210**

51 Int. Cl.:

C02F 9/06 (2006.01)

C02F 1/469 (2006.01)

C02F 103/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.06.2014 PCT/US2014/044153**

87 Fecha y número de publicación internacional: **31.12.2014 WO14210198**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.06.2014 E 14818714 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.11.2018 EP 3013760**

54 Título: **Métodos y sistemas para el control de la polarización**

30 Prioridad:

26.06.2013 US 201361839495 P

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

15.04.2019

73 Titular/es:

**EVOQUA WATER TECHNOLOGIES LLC (50.0%)
210 Sixth Avenue, Suite 3300
Pittsburgh, PA 15222, US y
EVOQUA WATER TECHNOLOGIES PTE. LTD.
(50.0%)**

72 Inventor/es:

**LIANG, LI-SHIANG;
FU, RONGQIANG y
NG, KEE HOE**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 709 210 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

Métodos y sistemas para el control de la polarización

Campo de la tecnología

5 Uno o más aspectos de la divulgación se refieren en general al tratamiento de agua y más particularmente a sistemas y métodos para tratar el agua en un sistema electroquímico para controlar la polarización de la concentración.

Compendio

10 La presente invención se refiere a un método para operar un sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas que comprende las características establecidas en la reivindicación 1 y a un sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas para tratar un líquido de acuerdo con la reivindicación 4. Las realizaciones preferidas de la presente invención se establecen en las reivindicaciones dependientes. Dichas realizaciones preferidas así como las realizaciones para una mejor comprensión de la invención se describen en la siguiente descripción y Figuras.

15 La presente invención de acuerdo con la reivindicación 1 proporciona un método para operar un sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas. El sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas de acuerdo con la presente invención tiene una primera etapa con al menos un dispositivo de tratamiento electroquímico que comprende una primera pila de celdas y una segunda etapa con al menos un dispositivo de tratamiento electroquímico que comprende una segunda pila de celdas, estando la primera etapa en comunicación fluida corriente arriba de la segunda etapa y el sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas comprende además un dispositivo pulidor. El método comprende introducir un líquido para ser tratado en una entrada de la primera etapa. El método comprende medir una concentración de sólidos totales disueltos y una tasa de flujo del líquido a tratar en la entrada de la primera etapa.

20 El método comprende calcular una densidad de corriente límite para la primera etapa, en donde calcular una densidad de corriente límite para la primera etapa comprende calcular la densidad de corriente límite para la primera etapa en base en parte a la concentración de sólidos totales disueltos del líquido a tratar y la tasa de flujo del líquido a tratar.

25 El método comprende operar en la primera etapa en una primera densidad de corriente en la primera pila de celdas, estando la primera densidad de corriente por debajo de la densidad de corriente límite para la primera etapa. El método comprende retirar una primera cantidad de sólidos totales disueltos del líquido, en la primera etapa, para producir un líquido parcialmente tratado. El método comprende retirar el líquido parcialmente tratado de una salida de la primera etapa. El método comprende introducir el líquido parcialmente tratado a una entrada de la segunda etapa. El método comprende medir una concentración de sólidos totales disueltos y una tasa de flujo del líquido parcialmente tratado en la entrada de la segunda etapa.

30 El método comprende calcular una densidad de corriente límite para la segunda etapa en parte en una concentración de sólidos totales disueltos medidos del líquido parcialmente tratado y una tasa de flujo medida del líquido parcialmente tratado. El método comprende operar en la segunda etapa en una segunda densidad de corriente en la segunda pila de celdas, estando la segunda densidad de corriente por debajo de la densidad de corriente límite para la segunda etapa y más baja que la densidad de corriente de la primera etapa. El método comprende retirar una segunda cantidad de sólidos disueltos del líquido parcialmente tratado, en la segunda etapa, siendo la segunda cantidad de sólidos totales disueltos menor que la primera cantidad de sólidos totales disueltos para producir un líquido tratado, en donde la operación en la primera etapa comprende además operar en una primera velocidad de flujo líquido a través de la primera etapa y la operación en la segunda etapa comprende operar en una segunda velocidad de flujo líquido a través de la segunda etapa, siendo la segunda velocidad de flujo líquido mayor que la primera velocidad de flujo líquido. El método comprende proporcionar el líquido tratado en una salida de la segunda etapa y retirar mediante el pulidor una última fracción de sólidos disueltos del líquido tratado.

35 Una concentración de sólidos totales disueltos del líquido a tratar en la entrada de la primera etapa puede ser mayor que aproximadamente 30.000 ppm. Una concentración de sólidos totales disueltos del líquido tratado puede ser de menos de aproximadamente 500 ppm.

40 De acuerdo con la presente invención, se proporciona un sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas para tratar un líquido. El sistema comprende un primer tren electroquímico. El primer tren de tratamiento electroquímico comprende una primera etapa que comprende un dispositivo de tratamiento electroquímico que tiene una primera densidad de corriente límite. El primer tren de tratamiento electroquímico comprende una segunda etapa que comprende un dispositivo de tratamiento electroquímico que tiene una segunda densidad de corriente límite, estando la segunda etapa en comunicación fluida corriente abajo de la primera etapa. El sistema comprende un sistema de control configurado para proporcionar una primera densidad de corriente entre un primer conjunto de electrodos en la primera etapa que está por debajo de la primera densidad de corriente límite y para proporcionar una segunda densidad de corriente entre un segundo conjunto de electrodos en la segunda etapa que está por debajo de la segunda densidad de corriente límite, siendo la segunda densidad de corriente diferente a la primera densidad de corriente y menor que ésta.

La primera etapa del sistema comprende además un primer sensor de velocidad de flujo y un primer sensor de concentración de sólidos totales disueltos. La segunda etapa del sistema comprende además un segundo sensor de velocidad de flujo y un segundo sensor de concentración de sólidos totales disueltos. El sistema de control está configurado además para calcular la primera densidad de corriente límite en base en parte a una primera señal de entrada del primer sensor de velocidad de flujo y una segunda señal de entrada del primer sensor de concentración de sólidos totales disueltos. El sistema de control está configurado además para calcular la segunda densidad de corriente límite en base en parte a una primera señal de entrada del segundo sensor de velocidad de flujo y una segunda señal de entrada del segundo sensor de concentración de sólidos totales disueltos. El dispositivo de tratamiento electroquímico de la segunda etapa comprende además un espaciador de bloqueo configurado para promover múltiples pasadas de flujo del líquido a través del dispositivo de tratamiento electroquímico de la segunda etapa. El espaciador de bloqueo puede posicionarse entre una primera subunidad de pasada de flujo y una segunda subunidad de pasada de flujo.

La primera subunidad de pasada de flujo del sistema comprende un primer número total de pares de celdas y la segunda subunidad de pasada de flujo comprende un segundo número total de pares de celdas, siendo el segundo número total de pares de celdas menor que el primer número total de pares de celdas.

El controlador puede configurarse para proporcionar la eliminación de una primera cantidad de sólidos totales disueltos del líquido en la primera etapa y una segunda cantidad de sólidos totales disueltos del líquido en la segunda etapa, siendo la primera cantidad de sólidos totales disueltos mayor que la segunda cantidad de sólidos totales disueltos. El dispositivo de tratamiento electroquímico de la primera etapa puede comprender uno de un dispositivo de electrodiálisis y un dispositivo de electrodesionización. El dispositivo de tratamiento electroquímico de la segunda etapa puede comprender uno de un dispositivo de electrodiálisis y un dispositivo de electrodesionización. El sistema puede comprender además una etapa adicional que tiene una densidad de corriente límite correspondiente, comprendiendo dicha etapa adicional al menos un dispositivo de tratamiento electroquímico modular, estando la etapa adicional en comunicación fluida corriente abajo de la primera etapa y en comunicación fluida corriente arriba de la segunda etapa.

El sistema comprende un segundo tren de tratamiento electroquímico en comunicación fluida con el primer tren de tratamiento electroquímico. El segundo tren de tratamiento electroquímico comprende una tercera etapa que comprende un dispositivo de tratamiento electroquímico que tiene una tercera densidad de corriente límite. El segundo tren de tratamiento electroquímico comprende una cuarta etapa, comprendiendo la cuarta etapa al menos un dispositivo de tratamiento electroquímico que tiene una cuarta densidad de corriente límite diferente y menor que la tercera densidad de corriente, estando la cuarta etapa en comunicación fluida corriente abajo de la tercera etapa. El sistema de control está configurado para proporcionar una primera densidad de corriente entre un primer conjunto de electrodos en la primera etapa que está por debajo de la primera densidad de corriente límite, una segunda densidad de corriente, diferente y por debajo de la primera densidad de corriente, entre un segundo conjunto de electrodos en la segunda etapa que está por debajo de la segunda densidad de corriente límite, una tercera densidad de corriente entre un tercer conjunto de electrodos en la tercera etapa que está por debajo de la tercera densidad de corriente límite y una cuarta densidad de corriente, diferente de la tercera densidad de corriente y menor que ésta, entre un cuarto conjunto de electrodos en la cuarta etapa que está por debajo de la cuarta densidad de corriente límite.

El sistema comprende además un dispositivo pulidor fluidamente conectado corriente abajo del primer tren de tratamiento electroquímico y el segundo tren de tratamiento electroquímico. El dispositivo pulidor puede ser uno de un dispositivo de electrodiálisis y un dispositivo de electrodesionización. El primer tren de tratamiento electroquímico está dispuesto en paralelo con el segundo tren de tratamiento electroquímico.

Descripción de los dibujos

Los dibujos adjuntos no pretenden ser dibujados a escala. A los efectos de claridad, no todo componente puede etiquetarse en los dibujos, ni todo componente de cada realización de la divulgación se muestra cuando la ilustración no es necesaria para permitir que los expertos en la técnica comprendan la divulgación.

La FIG. 1 presenta un perfil de concentración en un par de celdas de un sistema de electrodiálisis (ED);

la FIG. 2 presenta un perfil de concentración de iones de Na^+ junto a una membrana de intercambio de cationes de un sistema electroquímico;

la FIG. 3 presenta un perfil de concentración de iones de Na^+ donde la polarización es inminente;

la FIG. 4 presenta un esquema de un sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas de acuerdo con una realización;

la FIG. 5 presenta una gráfica de retiro de sólidos totales disueltos (TDS) por etapa de un sistema de acuerdo con una realización;

la FIG. 6 presenta una gráfica de retiro de TDS por etapa de un sistema de acuerdo con una realización;

la FIG. 7 presenta una gráfica de retiro de TDS para varias concentraciones de alimentación por etapa de un sistema de acuerdo con una realización;

la FIG. 8 presenta una gráfica de corriente para varias concentraciones de alimentación por etapa de un sistema de acuerdo con una realización;

5 la FIG. 9 presenta un esquema de un sistema electroquímico de múltiples etapas con diversos pares de celdas por etapa o sub-etapa de acuerdo con una realización;

la FIG. 10 presenta una gráfica de retiro de TDS por etapa de un sistema de acuerdo con una realización;

la FIG. 11 presenta un esquema de un sistema electroquímico de múltiples etapas con múltiples trenes en paralelo de acuerdo con una realización;

10 la FIG. 12 presenta un esquema de un sistema electroquímico de múltiples etapas con múltiples trenes en paralelo de acuerdo con una realización;

la FIG. 13 presenta una gráfica que compara números de módulos de energía con consumo de energía para dos sistemas de acuerdo con una realización;

15 la FIG. 14 presenta un esquema de un sistema electroquímico de múltiples etapas con múltiples trenes en paralelo de acuerdo con una realización;

la FIG. 15 presenta un esquema de un sistema electroquímico de múltiples etapas con múltiples trenes en paralelo de acuerdo con una realización; y

la FIG. 16 presenta una gráfica que compara números de módulos de energía con consumo de energía para dos sistemas de acuerdo con una realización.

20 Descripción detallada

Los sistemas electroquímicos para purificar fluidos con campos eléctricos pueden usarse para tratar agua y otros líquidos que contengan especies iónicas disueltas. Dos tipos de dispositivos de tratamiento electroquímico que tratan el agua de esta manera son dispositivos de electrodesionización y electrodiálisis. El documento US2010/006438 A1 se refiere a un proceso de purificación de agua y un aparato que comprende múltiples células de desionización.

25 La electrodesionización (EDI) es un proceso que remueve, o al menos reduce la concentración de una o más especies ionizadas o ionizables de agua usando medios eléctricamente activos y un potencial eléctrico para influenciar el transporte de iones. Los medios eléctricamente activos se regeneran típicamente por iones derivados de la electrólisis (división) de moléculas de agua dentro de un dispositivo de EDI. Los dispositivos de electrodesionización continuos (CEDI) son dispositivos EDI que operan de una manera en la cual la purificación de agua puede avanzar
30 continuamente, mientras que el material de intercambio de iones se regenera continuamente.

Los dispositivos de electrodiálisis (ED) operan sobre un principio similar a CEDI, excepto que los dispositivos de ED típicamente no contienen medios electroactivos entre las membranas. En los sistemas en base a ED, debido a que no hay medios electroactivos, la división de las moléculas de agua consume innecesariamente energía, reduciendo la eficiencia de la operación del sistema. Operar un sistema en base a ED en un régimen en el cual ocurre la división de
35 las moléculas de agua se debe evitar de manera deseable.

Los dispositivos de tratamiento electroquímico incluyen típicamente pilas de celdas compuestas de membranas de intercambio de aniones y cationes semi-permeables electroactivos alternantes. Los espacios entre las membranas definen los compartimientos de flujo líquido con entradas y salidas. Un campo eléctrico aplicado impuesto a través de electrodos hace que cationes disueltos, atraídos a un cátodo de un dispositivo electroquímico, migren a través de membranas de intercambio de cationes del dispositivo electroquímico mientras los aniones disueltos, atraídos a un ánodo del dispositivo electroquímico, migran a través de las membranas de intercambio de aniones del dispositivo electroquímico. A medida que el agua fluye a través de los compartimientos de agotamiento, las especies iónicas y otras especies cargadas son atraídas típicamente hacia compartimientos concentradores bajo la influencia de un campo eléctrico, por ejemplo, un campo de corriente directa (CD). Las especies cargadas positivamente son atraídas hacia un cátodo, típicamente ubicado en un extremo de una pila de múltiples compartimientos de agotamiento y concentración y especies cargadas negativamente son atraídas de igual manera hacia un ánodo de dichos dispositivos, típicamente ubicados en el extremo opuesto de la pila de compartimientos.

La migración de iones a través de las membranas de un dispositivo electroquímico bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado resulta en que el líquido del compartimiento de dilución sea privado de iones, y en que el líquido en el compartimiento concentrador se enriquezca con los iones transferidos, tal como se describe en la solicitud de patente número PCT/US2012/044937 titulada "Electrodesalination System and Method" presentada el 29 de junio de 2012 que se incorpora a la presente a modo de referencia en su totalidad a todos los efectos. En dispositivos electroquímicos, el campo de CD se aplica típicamente a las celdas desde una fuente de voltaje y corriente eléctrica aplicada a un conjunto de electrodos que comprenden un ánodo (o electrodo positivo) y un cátodo (o electrodo
50

negativo). El voltaje y fuente de corriente (colectivamente "fuente de alimentación") pueden en sí funcionar con una variedad de medios tales como una fuente de energía de CA o, por ejemplo, una fuente de energía derivada de energía solar, eólica o de olas.

5 La corriente máxima alcanzable en un sistema electroquímico antes de que ocurra la división de agua se denomina la corriente límite. La limitación de corriente ocurre en sistemas de electrodiálisis cuando la tasa de transferencia de iones de la solución de dilución total a las superficies de membrana es más baja que la tasa de transferencia de iones a través de las membranas. Las concentraciones de iones en las superficies de membrana se acercan a cero. El resultado es un aumento rápido en el voltaje requerido para impulsar la corriente, división del agua en las superficies de las membranas y operación inestable. Se han desarrollado ecuaciones empíricas para la corriente límite en función de la concentración total y la velocidad de flujo. A menudo es deseable evitar exceder la corriente límite durante la operación de un sistema electroquímico.

15 Durante la operación electroquímica las concentraciones de iones en las soluciones junto a las superficies de membrana son diferentes de las concentraciones en el volumen de los compartimientos de flujo. Este proceso se denomina polarización de la concentración Strathmann, H. 2004. Ion exchange membrane separation processes; Membrane Science and Technology Series, 9. Elsevier. En el caso extremo de polarización, la concentración iónica en el diluido se acerca a cero en las superficies de membrana y ocurre la limitación de corriente. La experiencia con operaciones de laboratorio y piloto indican que la estabilidad puede restaurarse únicamente con dificultad una vez que se alcanza la corriente límite. Las medidas correctivas pueden requerir, por ejemplo, cortar la energía y permitir que el agua de alimentación fluya no desionizada a través de los compartimientos de dilución o enjuagar el módulo con agua de alta salinidad.

20 En una planta de desalinización comercial, no es deseable poner a los módulos fuera de línea para restaurar la estabilidad. A menudo la prevención de la limitación de corriente es por lo tanto una prioridad en el diseño y operación de los sistemas electroquímicos, junto con el consumo de energía y coste de capital.

25 La FIG. 1 muestra perfiles de concentración idealizados de iones en una solución en celdas de un dispositivo electroquímico para ilustrar la polarización de la concentración. Para simplificar, la solución se asume que contiene únicamente NaCl. La concentración de un ión se asume que es uniforme en el volumen de las corrientes de dilución y concentradora. Dentro de las capas de límite adyacentes a las membranas, el flujo de solución a través de las celdas es laminar y paralelo a las superficies de membrana para que haya mezclado convectivo. El espesor de la capa límite depende de la velocidad en la solución total.

30 La FIG. 2 muestra el perfil de la concentración de Na⁺ junto a la membrana de intercambio de cationes (CEM). Asumiendo que la membrana es perfectamente selectiva, solo los iones de Na⁺ se transfieren a través de la membrana de intercambio de cationes (CEM) debido al campo eléctrico de CD. En la capa límite, los iones de Na⁺ se transfieren desde la solución total a la superficie de membrana mediante "migración" debido al campo eléctrico y mediante difusión debido al gradiente de concentración. Las tasas de transferencia de Na⁺ a través de la membrana y la capa límite adyacente son las mismas. Debido a la electroneutralidad, la concentración de los iones de Cl⁻ tiene el mismo perfil que los iones de Na⁺.

35 De manera similar, la concentración de Cl⁻ disminuye en la capa límite adyacente a la membrana de intercambio de aniones (AEM) y nuevamente debido a la electroneutralidad, el perfil de concentración de los iones de Na⁺ es el mismo que el de los iones de Cl⁻. Se asume que los perfiles de concentración de los iones de Na⁺ y Cl⁻ por lo tanto son los mismos y por lo tanto se representan por un perfil para NaCl como en la Fig. 1.

40 La FIG. 3 muestra los perfiles de concentración mientras que la corriente de dilución se desala adicionalmente y la limitación de la corriente es inminente. La concentración iónica en el volumen de la corriente de dilución ha disminuido al punto que la concentración correspondiente en las superficies de membrana se acerca a cero. La conductividad de corriente de dilución, que es aproximadamente dependiente linealmente de la concentración, también disminuye a cero. El potencial eléctrico necesario para impulsar la corriente a través de la interfaz corriente de dilución-membrana aumenta por lo tanto rápidamente. La transferencia de corriente adicional es posible únicamente si la división de agua ocurre para suministrar iones de H⁺ y OH⁻ para proporcionar conductividad.

45 La polarización de la concentración en una operación electroquímica real es típicamente más compleja que la ilustrada en las FIGS. 1-3. Por ejemplo, las redes en los compartimientos de flujo, que pueden utilizarse para mantener las membranas separadas, pueden promover el mezclado de fluido. Dependiendo de la geometría de las redes y el número de Reynolds, las redes también pueden crear zonas sin agitación corriente abajo de las hebras de las redes (denominadas "efecto sombra"). La capa límite simple como se muestra en la FIG. 1 puede, por lo tanto, no ser completamente precisa para dispositivos electroquímicos. Además, las membranas de intercambio de iones no son perfectamente selectivas y el agua también se transporta a través de las membranas debido a electro-ósmosis y ósmosis. Ambos fenómenos afectan los perfiles iónicos en la solución inmediatamente adyacente a las superficies de membrana.

50 Un análisis matemático riguroso de polarización y limitación actual puede requerir un abordaje de elementos finitos que incorporan mecánica de fluidos, transferencia de masa, electroquímica y equilibrio químico. Puede requerirse un

superordenador.

Los investigadores, por lo tanto, se han basado en ecuaciones empíricas para la corriente límite cuando modelan la polarización, por ejemplo:

$$i_{lim} = a C u^b \quad (1)$$

5 Donde:

i_{lim} = densidad de corriente límite

C = concentración total

u = velocidad total

a, b = constantes determinadas a partir de datos experimentales

10 La ecuación 1 puede reemplazarse con algoritmos más complejos para calcular la densidad de corriente límite necesaria. Los algoritmos pueden tomar en cuenta las propiedades de membrana, redes, diseño, espacio entre las membranas u otras propiedades en el dispositivo electroquímico particular de interés.

15 Para evitar la polarización, la densidad de corriente aplicada debe ser menor que la densidad de corriente límite en cualquier punto en la corriente de dilución. La ecuación muestra que i_{lim} disminuye a un valor mínimo a medida que la concentración total se acerca a cero. Por lo tanto, se espera que el riesgo de polarización sea el más alto en la salida de la corriente de dilución.

Debido a que se aumenta la densidad de corriente límite al aumentar la velocidad total y la concentración total del fluido siendo tratado, el control apropiado de estas variables puede ayudar a crear un sistema en el cual no se exceda la densidad de corriente límite.

20 La densidad de corriente puede comprenderse como la corriente dividida entre el área a través de la cual pasa la corriente. En el contexto de un sistema de tratamiento electroquímico, el área a través de la cual pasa la corriente puede ser la superficie de una membrana en contacto con el líquido siendo tratado.

25 En la presente se divulgan sistemas de tratamiento electroquímico de múltiples etapas y métodos para operar esos sistemas de manera eficiente mientras se evita operar en corrientes que producen una densidad de corriente aplicada que excede la densidad de corriente límite. Los métodos divulgados pueden ayudar además a predecir la ocurrencia de polarización y el diseño y operación de sistemas electroquímicos para mantener la corriente por debajo de la densidad de corriente límite y evitar la inestabilidad. Los sistemas y métodos divulgados pueden reducir el número de dispositivos electroquímicos requeridos (y por lo tanto el coste de capital) para una tasa de flujo de producto dada.

30 Pueden considerarse una cantidad de factores al desarrollar y operar un sistema de tratamiento electroquímico que evita de manera eficiente la densidad de corriente límite. Al crear y operar un sistema electroquímico que trata el agua sin exceder la densidad de corriente límite, puede desearse que el consumo de energía y costes de capital se minimicen. De igual manera, puede desearse que se maximice la recuperación de agua y tasa de flujo del producto. El diseño y operación del sistema puede involucrar algunas compensaciones. Por ejemplo, aumentar la tasa de flujo del producto en algunos sistemas también puede requerir un aumento en el consumo de energía. La operación del sistema también puede tener en cuenta variables de entrada, tales como composición y temperatura del agua de alimentación.

35 Las variables de control disponibles para los operadores de un sistema de desalinización electroquímica incluyen corriente aplicada, voltaje aplicado, temperatura de la corriente, concentración iónica o de TDS de la corriente, tasa de flujo y velocidad de flujo. Por ejemplo, para prevenir la polarización en operaciones electroquímicas para desalinizar agua marina, la velocidad del líquido en el compartimiento de dilución puede aumentarse en las etapas posteriores del proceso de desalinización de acuerdo con una o más realizaciones. Evitar la densidad de corriente límite puede resultar en menos resistencia del módulo (es decir, menos consumo de energía), menos riesgo de formación de sarro (es decir generación de iones de OH⁻ reducida) y eficiencia de corriente mejorada (es decir resistencia del módulo reducida y riesgo de cortocircuito o fuga eléctrica reducido).

45 El consumo de energía podría verse afectado por el tipo de dispositivo electroquímico elegido en una etapa particular de tratamiento y para un perfil de alimentación particular. Por ejemplo, la resina de intercambio de iones contenida en un módulo EDI ayuda a reducir el voltaje aplicado cuando el agua es baja en conductividad. Si se usa un módulo EDI en agua marina, el impacto de la resina de intercambio de iones en el compartimiento de dilución es pequeño. Por el contrario, si el agua en un módulo ED es demasiado pura, resultará en una alta resistencia eléctrica que contribuye al consumo de energía en exceso.

50 Los sistemas de tratamiento y métodos divulgados pueden usarse para una variedad de propósitos. Por ejemplo, un efluente o líquido a tratar por el dispositivo electroquímico puede comprender una solución salina. Una solución salina puede contener una especie de sal única o una mezcla de especies de sal, por ejemplo, como puede haber presentes

en el agua marina. En al menos una realización, el líquido tratado resultante puede comprender agua potable. El agua potable típicamente tiene un contenido de sólidos totales disueltos (TDS) de menos de aproximadamente 1500 ppm. En algunas realizaciones, el agua potable procesada puede tener un TDS de menos de aproximadamente 1000 ppm. En algunas realizaciones, el agua potable procesada puede tener un contenido de TDS de menos de aproximadamente 500 ppm. En algunas realizaciones no limitantes, el agua potable procesada puede tener un contenido de TDS de menos de aproximadamente 250 ppm.

Ejemplos de agua no potable, que pueden tratarse de acuerdo con realizaciones divulgadas en la presente, pueden incluir agua marina o agua salina, agua salobre, aguas grises y algún tipo de agua industrial. Un efluente o líquido a tratar puede incluir especies objetivo tales como cloruro, sulfato, bromuro, silicato, yoduro, fosfato, sodio, magnesio, calcio, potasio, nitrato, arsénico, litio, boro, estroncio, molibdeno, manganeso, aluminio, cadmio, cromo, cobalto, cobre, hierro, plomo, níquel, selenio, plata y/o zinc. De acuerdo con una o más realizaciones, un método incluye tratar el agua marina o agua salobre cuando el líquido a tratar comprende una mezcla de solutos. En algunas realizaciones, los iones monovalentes en un líquido a tratar pueden estar en una concentración más alta en comparación con las concentraciones de iones divalentes y otros multivalentes. Las referencias al agua marina en la presente en general son aplicables a otras formas de agua no potable.

Tal como se usa en la presente, "tratar" se refiere a reducir el contenido de TDS o reducir la concentración de sólidos suspendidos, contenido coloidal e impurezas ionizadas y no ionizadas en un agua fuente a un nivel en el cual el agua purificada se ha vuelto potable y puede usarse como agua dulce para, a modo no taxativo, consumo humano y animal, irrigación y aplicaciones industriales. La desalinización es un tipo de purificación en la cual la sal se retira del agua, por ejemplo, agua salobre o agua marina. Una o más realizaciones pueden referirse a la desalinización de agua marina. El líquido a tratar puede ser de una variedad de fuentes incluyendo las que tienen un contenido de TDS de entre aproximadamente 3.000 ppm y aproximadamente 40.000 ppm o más. El líquido a tratar puede ser, por ejemplo, agua marina del océano, agua salobre, aguas grises, efluente industrial y agua de recuperación de petróleo. El líquido a tratar puede contener altos niveles de sales monovalentes, sales divalentes y multivalentes y especies orgánicas. En algunas realizaciones, los aspectos notables pueden involucrar métodos para tratar o desalinizar un líquido a tratar que comprende agua marina. El líquido a tratar puede procesarse a un nivel deseado o requerido de pureza.

De acuerdo con una o más realizaciones, un dispositivo de tratamiento electroquímico puede ser modular. Cada unidad modular puede en general funcionar como un sub-bloque o subunidad de un sistema de separación electroquímica general. Una unidad modular puede incluir cualquier número deseado de pares de celdas. En algunas realizaciones, el número de pares de celdas por unidad modular puede depender del número total de pares de celdas y pasadas en el dispositivo de separación. Una pluralidad de unidades modulares puede ensamblarse entonces juntas para proporcionar un número pretendido general de pares de celdas en un sistema de separación electroquímica. La modularidad también puede facilitar el mantenimiento del sistema al permitir el diagnóstico, aislamiento, retiro y reemplazo de unidades modulares individuales. Las unidades modulares individuales pueden incluir colectores y sistemas de distribución de flujo para facilitar un proceso de separación electroquímica. Las unidades modulares individuales pueden estar en comunicación fluida entre sí, así como con el colector central y otros sistemas asociados con un proceso de separación electroquímico general.

De acuerdo con la invención un dispositivo electroquímico se modifica para que haya múltiples pasadas a través de un único dispositivo. Las configuraciones de flujo de múltiples pasadas son posibles con la ubicación de espaciadores de bloqueo o membranas dentro del dispositivo de tratamiento electroquímico, entre unidades modulares o dentro de unidades modulares. La porción del dispositivo de tratamiento electroquímico a través del cual se realiza una pasada de flujo se denomina una subunidad de pasada de flujo. El espaciador de bloqueo está posicionado entre dos subunidades de pasada de flujo en una configuración de flujo de múltiples pasadas. De acuerdo con una o más realizaciones de la presente invención, la velocidad se aumenta en el mismo módulo electroquímico al reducir el número de pares de celdas por subunidad de pasada de flujo en el dispositivo electroquímico. Un dispositivo configurado para un flujo de múltiples pasadas también se denomina un dispositivo de senda quebrada.

Uno o más módulos pueden comprender una subunidad de pasada de flujo. Uno o más módulos o subunidades de pasada de flujo pueden comprender una etapa del sistema de separación electroquímica. Uno o más dispositivos de tratamiento electroquímico pueden comprender una etapa.

De acuerdo con una o más realizaciones de la presente invención, el sistema comprende un dispositivo pulidor al final del proceso de tratamiento para retirar una última fracción de sólidos disueltos del líquido sometido a tratamiento. El dispositivo o módulo pulidor puede ser un dispositivo de electrodiálisis o electrodesionización. En dicha realización, el número de dispositivos electroquímicos requeridos puede reducirse para una tasa de flujo de producto dada. El paso de pulido también puede usarse para el retiro aumentado de componentes disueltos específicos tales como boro, particularmente en implementaciones donde se realiza una inyección de productos químicos.

El uso de un dispositivo pulidor tiene otros posibles beneficios además de la reducción en el coste de capital del módulo. Por ejemplo, de acuerdo con una realización, el retiro de boro puede llevarse a cabo en la etapa de pulido, después de que se retira la mayoría de TDS del agua que se somete a tratamiento. Si el pH de la corriente de dilución se aumenta a ~11 a medida que la conductividad cae por debajo de 2 mS/cm (correspondiente a aproximadamente 1.150 ppm de TDS), el boro puede retirarse de un valor inicial de aproximadamente 2,28 ppm en el agua marina a

aproximadamente 0,95 ppm a una conductividad del producto de aproximadamente 0,51 mS/cm (~ 250 ppm de TDS). De acuerdo con otra realización, el dispositivo pulidor puede contener membranas con menos pérdida de agua osmótica a cambio de mayor resistencia eléctrica que las membranas alternativas. Los beneficios de las membranas con menor pérdida de agua osmótica pueden sopesar los costes de energía asociados con una mayor resistencia eléctrica.

De acuerdo con una o más realizaciones de la presente invención, los sensores se posicionan para detectar una o más características, condiciones, propiedades o estados de cualquier corriente, componente o subsistema asociado en general con el sistema. De acuerdo con la invención los sensores están configurados para detectar una concentración de una especie objetivo en una corriente que ingresa y opcionalmente además en una corriente que sale del dispositivo. En una realización, los sensores están posicionados para detectar una concentración en una entrada y opcionalmente adicionalmente en una salida de uno o más compartimientos del dispositivo y en varias etapas del sistema. Los sensores pueden estar posicionados para detectar un nivel de pH en una entrada o una salida de uno o más compartimientos del dispositivo. Un sensor de presión puede estar asociado con uno o más compartimientos del dispositivo. Los sensores para detectar TDS están implementados. Los sensores para detectar la tasa de flujo o velocidad de flujo están implementados.

Uno o más sensores pueden proporcionar una representación de una propiedad o característica de una corriente en, desde o dentro del dispositivo, o una propiedad o característica de una corriente aplicada a través del dispositivo o a través de una pila de celdas. Por ejemplo, dicho o dichos sensores pueden configurarse para medir y proporcionar una representación, por ejemplo, una señal medida, de una condición del proceso tal como el pH de cualquier corriente que sale de cualquiera de los compartimientos. Dicho o dichos sensores también pueden proporcionar conductividad medida o valores de resistividad de cualquiera de las corrientes en, desde o dentro del sistema.

Se emplea un controlador para ajustar o regular al menos un parámetro operativo del dispositivo o un componente del sistema, tal como, a modo no taxativo, válvulas de accionamiento y bombas, así como ajustar una propiedad o característica de una corriente o un campo eléctrico aplicado a través del dispositivo de tratamiento electroquímico. El controlador está en comunicación electrónica con al menos un sensor configurado para detectar al menos un parámetro operativo del sistema. El controlador está configurado en general para generar una señal de control para ajustar uno o más parámetros operativos en respuesta a una señal generada por un sensor. Por ejemplo, el controlador puede configurarse para recibir una representación de una condición, propiedad o estado de cualquier corriente, componente o subsistema del dispositivo o desde el dispositivo. El controlador puede incluir un algoritmo que facilita la generación de al menos una señal de salida para controlar la operación del sistema que puede basarse en uno o más valores objetivos o deseados tales como un punto de ajuste.

Antes del tratamiento del agua de alimentación en el sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas, pueden emplearse una variedad de procedimientos pretratamiento. Por ejemplo, las técnicas de pretratamiento pueden utilizarse en un agua de alimentación que podría contener sólidos u otros materiales que podrían interferir con o reducir la eficacia de cualquier etapa o dispositivo, tal como mediante formación de sarro e contaminación. Un tratamiento inicial opcional puede proporcionarse para retirar al menos una porción de sólidos suspendidos, sustancias coloidales y/o solutos de peso molecular elevado. Los procesos pretratamiento pueden realizarse corriente arriba de un dispositivo de tratamiento electroquímico y pueden incluir, por ejemplo, filtración particulada, filtración de arena, filtración de carbón, ultrafiltración, nanofiltración, microfiltración, tal como microfiltración de flujo cruzado, combinaciones de las mismas y otros métodos de separación dirigidos a la reducción de particulados. Además pueden realizarse ajustes al pH o alcalinidad de agua de alimentación mediante, por ejemplo, la adición de un ácido, base o solución amortiguadora o a través de aireación. La separación electroquímica puede seguir cualquier operación pretratamiento para proporcionar agua que tiene una pureza final deseada.

Los componentes y/o subsistemas auxiliares pueden incluir tubos, bombas, tanques, fuente de alimentación y subsistemas de distribución que permiten cooperativamente la operación del sistema.

De acuerdo con una o más realizaciones, el sistema de tratamiento electroquímico puede usarse para la desalinización de agua marina. El sistema de tratamiento electroquímico puede comprender un número de sub-bloques modulares que podrían estar entubados en paralelo o en serie.

La senda de flujo dentro de cada dispositivo de tratamiento electroquímico puede incluir múltiples pasadas del fluido tratado a través de las subunidades de pasada de flujo internas.

El número de pares de celdas por subunidad de pasada de flujo varía dentro del sistema. Por ejemplo, el número de pares de celdas por pasada se reduce en las últimas pasadas a través de una etapa para aumentar la velocidad de flujo en la corriente de dilución y aumentar así la densidad de corriente límite, de acuerdo con la Ecuación 1.

La FIG. 4 muestra, por ejemplo, un sistema electroquímico de múltiples etapas 400 con tres etapas (cada etapa 410 comprende un dispositivo de tratamiento electroquímico 450, por ejemplo un dispositivo de electrodiálisis) en serie y pared de celdas decrecientes por subunidad de pasada de flujo 415 en la última etapa 410. En la realización divulgada en la FIG. 4, hay cinco pasadas 415 en cada una de las primeras dos etapas 410, cada pasada contiene 540 pares de celdas en paralelo. En la última etapa, el número de pares de celdas por subunidad de pasada de flujo 415 se

5 reduce en la penúltima pasada a 360 pares de celdas y finalmente 180 pares de celdas para la subunidad de pasada de flujo final 415. Un líquido a tratar 405 puede introducirse a una entrada de una primera etapa 410 del sistema 400. La senda de flujo de múltiples pasadas del líquido 405 puede facilitarse mediante un espaciador de bloqueo 460 que dirige el flujo de vuelta a través del dispositivo de tratamiento electroquímico 450. Otros espaciadores de bloqueo (no se muestran) pueden estar posicionados entre otras subunidades de pasada de flujo 415 de una etapa 410.

10 El dispositivo de tratamiento electroquímico 450 puede comprender una o más pilas de celdas compuestas de membranas de intercambio de aniones y cationes alternativas, con espacios entre las membranas que definen compartimientos de flujo líquido con entradas y salidas. Un conjunto de electrodos que comprende un cátodo y un ánodo puede posicionarse en cualquier extremo de una o más pilas de celdas para producir una corriente a través de la pila de celdas. El dispositivo de tratamiento electroquímico 450 de la primera etapa 410 puede operarse para tratar líquido 405. Una primera cantidad de sólidos totales disueltos pueden retirarse del líquido 405 para producir un líquido parcialmente tratado 435. El líquido parcialmente tratado 435 puede retirarse de una salida de la primera etapa 410.

15 La realización que se muestra en la FIG. 4 incluye tres etapas. Sin embargo, un sistema 400 puede tener dos o más etapas. En una etapa final del sistema 410, uno o más dispositivos de tratamiento electroquímico 450 pueden operarse mediante la aplicación de una corriente a través de la pila de celdas para retirar una segunda cantidad de sólidos totales disueltos del líquido parcialmente tratado 435 para producir un líquido tratado 445. El líquido tratado 445 puede proporcionarse en una salida de la etapa final 410.

20 En realizaciones adicionales descritas a continuación, tales como la realización que se muestra en la FIG. 11, una pluralidad de etapas 610 pueden formar un tren 660. El sistema electroquímico 600 puede comprender una pluralidad de trenes 660, en serie, en paralelo o ambos. Un sistema electroquímico municipal o industrial grande puede requerir un número de trenes electroquímicos en paralelo, cada tren teniendo un número de etapas 610 en serie. Para una tasa de flujo de producto dado del sistema, el retiro de TDS no uniforme puede aumentar el número total de dispositivos electroquímicos 650 y de esta manera el coste de capital asociado.

25 De acuerdo con una o más realizaciones, se proporcionan métodos para controlar un sistema electroquímico. Los métodos de control propuestos previamente han involucrado bucles de retroalimentación directos. Por ejemplo, la conductividad del producto se mide con un sensor y se transmite a un controlador del proceso. El controlador entonces varía la corriente aplicada usando algoritmos tales como PID (proporcional-integral-derivativo) para minimizar cualquier desviación del punto de ajuste de conductividad.

30 De acuerdo con una o más realizaciones de acuerdo con la invención, el consumo de energía y la polarización de la concentración del sistema de electrodesalinización que comprende módulos de electrodiálisis y electrodesionización se reducen al aplicar diferentes voltajes a cada etapa de un sistema de múltiples etapas. El agua de la primera etapa puede transferirse a la segunda etapa y entonces a la tercera etapa y más allá. Se usa un voltaje más alto y/o mayor densidad de corriente en etapas donde la cantidad de contenido iónico en el agua a desalinizar es mayor y entonces se disminuye a medida que el agua se vuelve más pura de manera que las etapas posteriores tienen una densidad de corriente más baja. En un sistema de electrodesalinización con una pluralidad de etapas, los módulos de electrodiálisis pueden usarse hacia la entrada de agua marina y pueden usarse los módulos de electrodesionización más adelante en el proceso después de que el agua haya sido parcialmente purificada.

35 De acuerdo con una o más realizaciones, la cantidad de TDS retirados por etapa puede ser intencionalmente variada. Por ejemplo, el sistema puede configurarse para que el retiro de TDS sea mayor al principio para que una cantidad más pequeña de TDS se retire en una o más etapas posteriores o corriente abajo más que en una o más etapas anteriores o corriente arriba. Dicha configuración puede ser ventajosa para alcanzar un retiro de TDS objetivo sin exceder la densidad de corriente límite, debido a que, en ciertas circunstancias, si la reducción de TDS es la misma por etapa, la densidad de corriente aplicada puede exceder la densidad de corriente límite en la salida de una etapa. Por ejemplo, la FIG. 5 presenta una gráfica de retiro de TDS por etapa donde la tasa de retiro es constante en todo un sistema como el que se muestra en la FIG. 4. La Tabla 1, a continuación, indica la densidad de corriente límite y densidad de corriente aplicada para este sistema. La corriente límite se calcula en este ejemplo usando la ecuación:

$$i_{\text{lim}} = 0,02264 C u^{0,6933}$$

donde:

i_{lim} = densidad de corriente límite en unidades de A/m²

40 C = concentración total en ppm

u = velocidad total en cm/s

En las etapas 3-2 y 3-3 la densidad de corriente aplicada excedería la densidad de corriente límite, causando así la polarización, una condición no deseada.

ES 2 709 210 T3

Tabla 1 Datos asociados con la FIG. 5.

Etapa 3-1	Velocidad de dilución	2,46 cm/s
	Densidad de corriente límite	118,16 A/m ²
	Densidad de corriente aplicada	102,94 A/m ²
	Relación de densidad de corriente límite con densidad de corriente operativa	1,15
Etapa 3-2	Velocidad de dilución	3,67 cm/s
	Densidad de corriente límite	72,84 A/m ²
	Densidad de corriente aplicada	102,94 A/m ²
	Relación de densidad de corriente límite con densidad de corriente operativa	0,71
Etapa 3-3	Velocidad de dilución	7,3 cm/s
	Densidad de corriente límite	48,22 A/m ²
	Densidad de corriente aplicada	102,94 A/m ²
	Relación de densidad de corriente límite con densidad de corriente operativa	0,47

5 En una realización, un método para prevenir la polarización en la salida del efluente de dilución es reducir el retiro de TDS en la última etapa, como se muestra en la FIG. 6. La FIG. 6 presenta una gráfica de retiro de TDS por etapa donde la tasa de retiro de TDS se reduce en una etapa final, en un sistema como el que se muestra en la FIG. 4. La Tabla 2, a continuación, indica la densidad de corriente límite y densidad de corriente aplicada para este sistema. A diferencia de la realización en la que el retiro de TDS es uniforme durante todas las etapas, la Tabla 2 indica que la densidad de corriente aplicada en las Etapas 3-2 y 3-3 del sistema permanecería por debajo de la densidad de corriente límite y se evitaría la polarización.

10 Tabla 2 Datos asociados con la FIG. 6

Etapa 3-1	Velocidad de dilución	2,17 cm/s
	Densidad de corriente límite	57,31 A/m ²
	Densidad de corriente aplicada	38,78 A/m ²
	Relación de densidad de corriente límite con densidad de corriente operativa	1,48
Etapa 3-2	Velocidad de dilución	3,23 cm/s
	Densidad de corriente límite	43,11 A/m ²
	Densidad de corriente aplicada	38,78 A/m ²
	Relación de densidad de corriente límite con densidad de corriente operativa	1,11
Etapa 3-3	Velocidad de dilución	6,44 cm/s
	Densidad de corriente límite	42,48 A/m ²
	Densidad de corriente aplicada	38,78 A/m ²
	Relación de densidad de corriente límite con densidad de corriente operativa	1,10

15 El perfil de TDS puede ajustarse para prevenir la polarización como los TDS del líquido a tratar, por ejemplo, agua marina. La FIG. 7 muestra, por ejemplo, los perfiles de TDS de varios líquidos alimentados a una entrada de un sistema dispuesto como el sistema que se muestra en la FIG. 4. La tasa de flujo del producto que resulta de cada una de las alimentaciones se mantiene a 3,40 m³/h a medida que los TDS de alimentación varían de 30.000 ppm a 34.000 ppm. Sin embargo en una compensación, el consumo de energía aumenta a medida que los TDS de alimentación aumentan.

Los TDS objetivo por etapa pueden alcanzarse al controlar la corriente aplicada, tal como se muestra en la FIG. 8. En ciertas condiciones operativas, aumentar la velocidad de flujo en la última pasada puede no ser suficiente para evitar la densidad de corriente límite. Reducir el retiro de TDS en la última etapa además de aumentar la velocidad puede ser un método para evitar la densidad de corriente límite. Por ejemplo, se calculó una densidad de corriente al final de la Etapa 3 de un sistema ejemplar, asumiendo TDS de agua marina de 45.000 ppm y temperatura de 20°C y dos perfiles diferentes de TDS objetivo por etapa, tal como se muestra en la FIG. 10. La Tabla 3 a continuación, muestra que la densidad de corriente en la tercera etapa excede la densidad de corriente límite cuando el retiro de TDS es el mismo por etapa, pero que la densidad de corriente está por debajo de la densidad de corriente límite cuando la tercera etapa solo debe reducir el TDS de 3.930 ppm a 500 ppm.

10 Tabla 3 Datos asociados con la FIG. 10.

Consumo de energía = 3,5 kWh/m ³	Retiro de TDS uniforme por etapa	Retiro de TDS no uniforme por etapa
Recuperación de agua general = 40%		
Tasa de flujo del producto por tren:	4,40 m ³ /h	3,30 m ³ /h
Densidad de corriente límite de la tercera etapa:	33,16 A/m ²	23,50 A/m ²
Densidad de corriente aplicada de la tercera etapa:	126,25 A/m ²	21,35 A/m ²

De acuerdo con una o más realizaciones, puede proporcionarse un modo de control predictivo. Un modo de control predictivo puede anticipar condiciones corriente abajo en respuesta a los parámetros medidos en, por ejemplo, una entrada de alimentación. Con múltiples pasadas, el tiempo de residencia total en las tres etapas de un sistema, como en el que se muestra en la FIG. 4 es aproximadamente 200 segundos. Cualquier cambio en TDS y temperatura del agua de alimentación, por ejemplo, no afectaría los TDS del producto y densidad de corriente límite en la salida de efluente de dilución hasta varios minutos más tarde. En un sistema que carece de un modo de control predictivo, pero que en su lugar emplea controles de retroalimentación en base a sensores en la última etapa, podría ocurrir la polarización antes de que las corrientes aplicadas puedan ajustarse y el sistema pueda responder en consecuencia. Como se describió antes, una vez que ocurre la polarización, el sistema podría volverse inestable rápidamente y no responder a ajustes adicionales en la corriente.

De acuerdo con una o más realizaciones que usan un modo de control predictivo, la respuesta del controlador del proceso inicial se basa en la conductividad del agua de alimentación, mediciones de temperatura y tasa de flujo. La corriente a aplicar por etapa puede calcularse usando un modelo de proceso y los parámetros operativos ajustados del sistema electroquímico. El controlador podría configurarse para que "se exceda" inicialmente para asegurarse de que la polimerización no ocurra en la salida del efluente de dilución. Después de un retraso de tiempo para permitir que el sistema responda, las salidas de control pueden ser ajustadas más finamente en base a mediciones de la conductividad de la salida del efluente de dilución y velocidad de flujo.

El modo de control predictivo también puede configurarse para tener en cuenta patrones en valores de parámetro observados con el transcurso del tiempo. Por ejemplo, los patrones de variaciones en TDS y temperatura del agua de alimentación, mes a mes, día a día e incluso durante un día pueden usarse para ajustar los parámetros operativos del sistema electroquímico. Los patrones pueden predecirse en base a datos históricos, datos meteorológicos, etc. En otra realización, los patrones de variaciones en demanda de agua del producto, por temporada, por día o por hora pueden usarse para justar los parámetros operativos del sistema electroquímico. Las tasas de flujo pueden ajustarse en consecuencia. La corriente aplicada puede controlarse para prevenir la polarización. En otra realización, los patrones de variaciones en coste de electricidad pueden usarse para ajustar los parámetros operativos del sistema electroquímico. Las tasas de flujo y corrientes pueden ajustarse para minimizar el coste operativo mientras se aseguran de que no ocurra la polarización.

Ejemplos

40 Ejemplo 1

Se diseñó un sistema de tratamiento de agua para desalinizar agua marina para su reinyección en un depósito de aceite para aumentar la recuperación de aceite. La tasa de flujo del producto requerida fue 16.000 m³/día con TDS final de 900 ppm. La recuperación de agua general se mantuvo al 50%. Los TDS de agua marina promedio son 36.520 ppm a una temperatura de 20°C, con una composición que se muestra en la Tabla 4.

45

Tabla 4 Concentración de iones principales en el Ejemplo 1.

ión	Mg/l
Na	11.150
K	420
Ca	428
Mg	1.410
Cl	20.310
SO4	2.800

5 Se compararon dos configuraciones alternativas para los trenes electroquímico y CEDI y etapas. La primera configuración se muestra en la FIG. 11 para una mejor comprensión de la presente invención y no incluye un dispositivo pulidor corriente abajo de los trenes cada uno de los cuales comprende tres etapas. La segunda configuración se muestra en la FIG. 12 e incluye un dispositivo pulidor corriente abajo de los trenes, cada uno de los cuales comprende solo dos etapas. Como se describirá a continuación, la segunda configuración con el dispositivo pulidor permite un retiro de mayor ahorro de energía de TDS de una corriente de alimentación líquida.

10 Usando un modelo de proceso informático, el consumo de energía por producto unitario (kWh/m³) se calculó para diferentes tasas de flujo de producto por tren. La Tabla 5 proporciona propiedades de membrana clave usadas en el modelo y la Tabla 6 las especificaciones para los dispositivos de tratamiento electroquímico.

Tabla 5 Propiedades de membrana clave usadas en el modelo de proceso.

Resistencia del área de membrana promedio en 0,5 NaCl at 20°C (ohm cm ²)	1,30
Coefficiente de pérdida de agua electro-osmótica (moles de H2O por mol de NaCl transferido a través de las membranas)	9,20
Coefficiente de pérdida de agua osmótica (mL m ⁻² h ⁻¹ bar ⁻¹)	4,50

Tabla 6 Especificaciones clave de los dispositivos de tratamiento electroquímicos

Diseño	Configuración de flujo cruzado
Espesor de compartimientos de flujo (mm)	0,25
Área activa por membrana (m ²)	0,0783
Número total de pares de celdas por dispositivo	3.600

15 En todos los casos el retiro de TDS por etapa se ajustó para que la densidad de corriente operativa fuera de menos de 90,9% de la densidad de corriente límite en la salida de cada etapa. Entonces se calculó el número total de trenes y dispositivos de tratamiento electroquímico para el sistema.

$N = \text{número de trenes} = Q_p/q_p$, redondeado para el número entero más cercano

20 $n = \text{dispositivos de tratamiento electroquímico} = SN$

Donde:

$Q_p = \text{tasa de flujo del producto total para el sistema}$

$q_p = \text{tasa de flujo del producto por tren}$

$S = \text{número de dispositivos de tratamiento electroquímico en serie en cada tren. Por ejemplo, en la FIG. 11, } S = 3.$

25 La FIG. 11 representa un esquema de la primera de las configuraciones comparadas. La FIG. 11 muestra un sistema con múltiples trenes de 3 etapas 660 en paralelo. Cada tren 660 recibe líquido 605 a tratar. A medida que el líquido

605 pasa a través de cada etapa 610 de un tren respectivo 660 se retiran los sólidos totales disueltos para proporcionar un líquido parcialmente tratado 635. Una vez que el líquido parcialmente tratado 635 ha pasado a través de todas las etapas 610 de un tren para producir un líquido tratado 645, el líquido tratado 645 puede recogerse de los diversos trenes 660 y entregarse, por ejemplo, a un punto de uso. Mientras tanto el flujo de la corriente concentrada 670 puede dirigirse a, por ejemplo, un drenaje. El líquido 605 a tratar puede ser agua marina. El líquido tratado 645 puede ser agua potable.

La senda de flujo de dilución en cada tren fue como se muestra en la FIG. 9. El sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas 500 que se muestra en la FIG. 9 comprende tres etapas 510. La primera etapa 510 comprende cinco subunidades de pasadas de flujo 515 separadas por separadores de bloqueo 560. Cada subunidad de pasada de flujo 515 de los dispositivos de tratamiento electroquímico 550 de la primera y segunda etapa 510 comprende 720 pares de celdas. Cada una de las primeras tres subunidades 515 de la tercera etapa 510 comprende 720 pares de celdas. Cada una de las tres subunidades finales 515 de la etapa final 510 comprende 480 pares de celdas.

La FIG. 12 representa un esquema de la segunda de las configuraciones comparadas del Ejemplo 1. La FIG. 12 muestra una configuración posible para dispositivos electroquímicos de acuerdo con la presente invención. En esta configuración el sistema electroquímico 700 consiste en múltiples sub-sistemas (unidades de repetición) en paralelo. En cada unidad de repetición, el líquido 705 a tratar ingresa a los trenes 760 y los productos de cuatro trenes 760, consistiendo cada uno en dos etapas 710 en serie, se combinan como alimentación a un dispositivo pulidor 780 para producir un líquido tratado 745. Usando el modelo de proceso, el número de unidades de repetición para el sistema se calculó para diferente consumo de energía general. El retiro de TDS por etapa 710, incluyendo la etapa de pulido 780, se ajusta nuevamente para evitar la densidad de corriente límite. El número de dispositivos de tratamiento electroquímico 750, n, se calculó de la siguiente manera:

$$n = U (ST + T/R)$$

donde:

U = Número total de unidades de repetición

25 S = Número de dispositivos de tratamiento electroquímico 750 en serie en cada tren

760 (S = 2 en el ejemplo en la FIG. 12)

T = Número de trenes 760 en cada unidad de repetición (T = 4 en el ejemplo en la FIG. 7)

R = número de trenes 760 que alimentan el dispositivo pulidor 780 (R = 4 en el ejemplo en la FIG. 12)

La FIG. 13 muestra el número total de módulos electroquímicos necesarios con respecto al consumo de energía para las configuraciones de módulos diferentes. Para un consumo de energía dado, el número total de módulos electroquímicos necesarios es en realidad inferior con una etapa pulidora presente debido a que la tasa de flujo del producto por tren puede aumentarse. Los diseños de dos etapas más pulidor, como el que se muestra en la FIG. 12, resultan en una disminución del 5% aproximadamente en el número total de módulos necesarios, con disminución correspondiente de bienes de equipos asociados tales como estructuras de soporte, tuberías, válvulas, instrumentación y fuentes de energía.

Ejemplo 2

Se diseñó un sistema de tratamiento de agua para desalinizar el agua marina a agua potable para su uso en una municipalidad. La tasa de flujo del producto requerido fue 140.000 m³/d con TDS final de 500 ppm y una recuperación de agua general de 40%. El TDS de agua marina es de 45.000 ppm a una temperatura de 30°C.

40 La primera configuración evaluada fue la configuración representada en la FIG. 11, con múltiples trenes de tres módulos en paralelo, ya descritos anteriormente. La configuración de flujo en cada tren fue como se muestra en la FIG. 9. La segunda configuración evaluada fue la configuración representada en la FIG. 14. La FIG. 14 muestra una unidad de repetición 800 por múltiples trenes 860 en paralelo seguido por un dispositivo pulidor 880. Nuevamente, como en el Ejemplo 1, el sistema que implementa un dispositivo pulidor 880 corriente abajo del tren 860 fue capaz de alcanzar un tratamiento de agua de mayor ahorro de energía, tal como se muestra en la FIG. 16.

En cada unidad del sistema 800 que se muestra en la FIG. 14, un líquido a tratar 805 se introduce en los trenes 860 y los productos de tres trenes 860, consistiendo cada uno en tres etapas 810 en serie, se combinaron como alimentación a un módulo pulidor 880, que produjo el líquido tratado final 845. La adición de la etapa pulidora 880 permitió que la tasa de flujo del producto por tren aumente mientras mantiene un consumo de energía general dado. El retiro de TDS por etapa 810 se ajustó para que la densidad de corriente operativa fuera de menos de 90,9% de la densidad de corriente límite en la salida de cada etapa.

La realización de acuerdo con la invención que se muestra en la FIG. 15 es similar a la de la FIG. 14 y muestra la senda de flujo de dilución a través de una unidad de repetición. En la realización que se muestra en la FIG. 15, un líquido a tratar 905 se introduce a la primera etapa 910 de cada tren 960. Cada subunidad de pasada de flujo de la

primera etapa 910 de un tren 960 comprende 720 pares de celdas. En la tercera etapa 910 de cada tren 960, las tres subunidades de pasada de flujo finales del dispositivo de tratamiento electroquímico 950 comprenden cada una 480 pares de celdas. El dispositivo pulidor 980 comprende tres subunidades de pasada de flujo comprendiendo cada una 1.200 pares de celdas. El número de trenes paralelos 960 del sistema 900 se seleccionó para que la velocidad en la entrada a la etapa pulidora 980 fuera igual o mayor que la velocidad en la salida del último dispositivo 950 en cada tren 960. El dispositivo pulidor 980 produce un líquido tratado 945.

La FIG. 16 muestra el número total de módulos electroquímicos necesarios con respecto al consumo de energía para las configuraciones de módulos diferentes usados en este ejemplo. El modelo del proceso es el mismo que en el EJEMPLO 1. El número total de módulos necesarios fue aproximadamente 8-11% más bajo para el diseño de tres etapas más pulidora representado en la FIG. 14 con respecto al diseño de tres etapas representado en la FIG. 11, lo que demuestra nuevamente la utilidad de un dispositivo pulidor corriente abajo del tren.

Los expertos en la técnica apreciarán fácilmente que las diversas configuraciones descritas en la presente pretenden ser ejemplares y que las configuraciones en la práctica dependerán de la aplicación específica para la cual se use el sistema de tratamiento de agua y los métodos de la presente divulgación. Los expertos en la técnica reconocerán, o serán capaces de determinar usando simplemente experimentación de rutina, muchos equivalentes a las realizaciones específicas descritas en la presente. Por ejemplo, los expertos en la técnica pueden reconocer que el sistema y componentes de los mismos, de acuerdo con la presente divulgación pueden comprender además una red de sistemas o ser un componente de un sistema de tratamiento de agua. Por lo tanto, se debe comprender que las realizaciones anteriores se presentan a modo de ejemplo solamente y que, dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas y equivalentes de las mismas, el sistema y los métodos divulgados pueden ponerse en práctica de otro modo que no sea el descrito específicamente. El sistema y los métodos de la presente están dirigidos a cada característica y método individual descrito en la presente. Además, cualquier combinación de dos o más de dichas características, sistema o métodos, si dichas características, sistema o métodos no son mutuamente inconsistentes, se incluyen dentro del alcance de la presente divulgación.

Además, se debe apreciar que varias alteraciones, modificaciones y mejoras serán inmediatamente evidentes para los expertos en la técnica. Dichas alteraciones, modificaciones y mejoras pretenden ser parte de esta divulgación y se pretende que estén dentro del espíritu y alcance de la divulgación. Por ejemplo, instalaciones existentes pueden modificarse para utilizar o incorporar cualquiera de uno o más aspectos de la divulgación. Por lo tanto, en algunos casos, el sistema y los métodos pueden involucrar conectar o configurar una instalación existente a un sistema de tratamiento. Por consiguiente, la descripción y dibujos anteriores son solo a modo de ejemplo. Además, las representaciones en los dibujos no limitan las divulgaciones a las representaciones ilustradas particularmente.

Tal como se usa en la presente, el término "pluralidad" se refiere a dos o más artículos o componentes. Las expresiones "que comprende", "que incluye", "que porta", "que tiene", "que contiene" y "que involucra", ya sea en la descripción escrita o las reivindicaciones y similares, son términos abiertos, es decir, que significan "que incluye a modo no taxativo". Por lo tanto, el uso de dichos términos pretende abarcar los artículos enumerados posteriormente y los equivalentes de los mismos, así como artículos adicionales. Solo las frases transicionales "que consiste en" y "que consiste básicamente en" son frases transicionales cerradas o semicerradas, respectivamente, con respecto a las reivindicaciones. Debería entenderse que el uso de la expresión "comunicación fluida" incluye dispositivos que están configurados en un arreglo paralelo o en una serie. El uso de términos ordinales, tales como "primero", "segundo", "tercero" y similares, en las reivindicaciones para modificar un elemento de una reivindicación no connota en sí ninguna prioridad, precedencia u orden de un elemento de la reivindicación sobre otro ni el orden temporal en el cual se realizan los actos de un método, sino que se usan meramente como etiquetas para distinguir un elemento de la reivindicación que tiene cierto nombre de otro elemento que tiene el mismo nombre (salvo por el uso del término ordinal) para distinguir los elementos de la reivindicación.

Aunque se han divulgado las realizaciones ejemplares de la divulgación, pueden realizarse muchas modificaciones, adiciones y eliminaciones en la presente sin alejarse del espíritu y alcance de la divulgación y sus equivalentes, como se establece en las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un método para operar un sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas (500, 700, 800, 900) que tiene una primera etapa (510, 710, 810, 910) con al menos un dispositivo de tratamiento electroquímico (550) que comprende una primera pila de celdas y una segunda etapa (510, 710, 810, 910) con al menos un dispositivo de tratamiento electroquímico (550, 750, 850, 950) que comprende una segunda pila de celdas, estando la primera etapa en comunicación fluida corriente arriba de la segunda etapa y el sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas comprende además un dispositivo pulidor (780, 880, 980) al final del proceso de tratamiento, comprendiendo el método:
- 5 introducir un líquido a tratar en una entrada (505, 705, 805, 905) de la primera etapa (510, 710, 810, 910);
- 10 medir una concentración de sólidos totales disueltos y una tasa de flujo del líquido a tratar en la entrada de la primera etapa;
- 15 calcular una densidad de corriente límite para la primera etapa (510, 710, 810, 910), en donde calcular una densidad de corriente límite para la primera etapa (510, 710, 810, 910) comprende calcular la densidad de corriente límite para la primera etapa (510, 710, 810, 910) en base en parte a la concentración de sólidos totales disueltos del líquido a tratar y la tasa de flujo del líquido a tratar;
- operar en la primera etapa (510, 710, 810, 910) en una primera densidad de corriente en la primera pila de celdas, estando la primera densidad de corriente por debajo de la densidad de corriente límite para la primera etapa;
- retirar una primera cantidad de sólidos totales disueltos del líquido, en la primera etapa (510, 710, 810, 910), para producir un líquido parcialmente tratado (535);
- 20 retirar el líquido parcialmente tratado (535) de una salida de la primera etapa (510, 710, 810, 910);
- introducir el líquido parcialmente tratado a una entrada de la segunda etapa;
- medir una concentración de sólidos totales disueltos y una tasa de flujo del líquido parcialmente tratado (535) en la entrada de la segunda etapa (510, 710, 810, 910);
- 25 calcular una densidad de corriente límite para la segunda etapa basada en parte en una concentración de sólidos totales disueltos medidos del líquido parcialmente tratado (535) y una tasa de flujo medida del líquido parcialmente tratado (535);
- operar en la segunda etapa (510, 710, 810, 910) en una segunda densidad de corriente en la segunda pila de celdas, estando la segunda densidad de corriente por debajo de la densidad de corriente límite para la segunda etapa (510, 710, 810, 910) y más baja que la densidad de corriente de la primera etapa (510, 710, 810, 910);
- 30 retirar una segunda cantidad de sólidos disueltos del líquido parcialmente tratado (535), en la segunda etapa (510, 710, 810, 910), siendo la segunda cantidad de sólidos totales disueltos menor que la primera cantidad de sólidos totales disueltos para producir un líquido tratado;
- en donde la operación en la primera etapa (510, 710, 810, 910) comprende además operar en una primera velocidad de flujo líquido a través de la primera etapa (510, 710, 810, 910) y la operación en la segunda etapa (510, 710, 810, 910) comprende operar en una segunda velocidad de flujo líquido a través de la segunda etapa (510, 710, 810, 910), siendo la segunda velocidad de flujo líquido mayor que la primera velocidad de flujo líquido;
- 35 proporcionar el líquido tratado (545) en una salida de la segunda etapa (510, 710, 810, 910); y
- retirar mediante el pulidor (780, 880, 980) una última fracción de sólidos disueltos del líquido tratado (545).
- 40 2. El método de la reivindicación 1 que comprende además controlar mediante un controlador para proporcionar la eliminación de una primera cantidad de sólidos totales disueltos del líquido en la primera etapa (510, 710, 810, 910) y una segunda cantidad de sólidos totales disueltos del líquido en la segunda etapa (510, 710, 810, 910), siendo la primera cantidad de sólidos totales disueltos mayor que la segunda cantidad de sólidos totales disueltos.
3. El método de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, usando un modo de control predictivo en respuesta a los parámetros medidos en la entrada de alimentación.
- 45 4. Un sistema de tratamiento electroquímico de múltiples etapas para tratar un líquido, comprendiendo el sistema;
- un primer tren de tratamiento electroquímico (760, 860, 960) que comprende: una primera etapa (510, 710, 810, 910) que comprende un dispositivo de tratamiento electroquímico (550, 750, 850, 950) que tiene una primera densidad de corriente límite, en donde la primera etapa (510, 710, 810, 910) comprende además un primer sensor de velocidad de flujo y un primer sensor de concentración de sólidos totales disueltos en la entrada de la primera etapa;
- 50 una segunda etapa (510, 710, 810, 910) que comprende un dispositivo de tratamiento electroquímico (550, 750, 850,

950) que tiene una segunda densidad de corriente límite, estando la segunda etapa (510, 710, 810, 910) en comunicación fluida corriente abajo de la primera etapa (510, 710, 810, 910), en donde la segunda etapa (510, 710, 810, 910) comprende además un segundo sensor de velocidad de flujo y un segundo sensor de concentración de sólidos totales disueltos en la entrada de la segunda etapa:

- 5 un segundo tren de tratamiento electroquímico (760, 860, 960) en comunicación fluida con el primer tren de tratamiento electroquímico (760, 860, 960), comprendiendo el segundo tren de tratamiento electroquímico (760, 860, 960): una tercera etapa (510, 710, 810, 910) que comprende un dispositivo de tratamiento electroquímico (550, 750, 850, 950) que tiene una tercera densidad de corriente límite; y una cuarta etapa (510, 710, 810, 910) que comprende un dispositivo de tratamiento electroquímico (550, 750, 850, 950) que tiene una cuarta densidad de corriente límite, estando la cuarta etapa (510, 710, 810, 910) en comunicación fluida corriente abajo de la tercera etapa (510, 710, 810, 910); en donde la tercera (510, 710, 810, 910) y cuarta etapa (510, 710, 810, 910) comprenden cada una un sensor de velocidad de flujo y un sensor de concentración de sólidos totales disueltos en la entrada de cada etapa:

15 en donde el primer tren de tratamiento electroquímico (760, 860, 960) está dispuesto en paralelo con el segundo tren de tratamiento electroquímico (760, 860, 960); un sistema de control configurado para proporcionar una primera densidad de corriente entre un primer conjunto de electrodos en la primera etapa (510, 710, 810, 910) que está por debajo de la primera densidad de corriente límite, para proporcionar una segunda densidad de corriente entre un segundo conjunto de electrodos en la segunda etapa (510, 710, 810, 910) que está por debajo de la segunda densidad de corriente límite; estando la segunda densidad de corriente por debajo de la primera densidad de corriente, configurada además para proporcionar una tercera densidad de corriente entre un tercer conjunto de electrodos en la tercera etapa (510, 510, 710, 810, 910) que está por debajo de la tercera densidad de corriente límite, y para proporcionar una cuarta densidad de corriente, estando la cuarta densidad de corriente entre un cuarto conjunto de electrodos en la cuarta etapa (510, 510, 710, 810, 910) que está por debajo de la cuarta densidad de corriente límite y estando la cuarta densidad de corriente más abajo que la tercera densidad de corriente; en donde los dispositivos de tratamiento electroquímico (550, 750, 850, 950) de la segunda etapa y cuarta etapa comprenden además un espaciador de bloqueo (560), cada uno configurado para promover las múltiples pasadas de flujo del líquido a través de cada dispositivo de tratamiento electroquímico (550, 750, 850, 950) de la segunda etapa y cuarta etapa, estando cada espaciador de bloqueo (560) posicionado entre una primera subunidad de pasada de flujo y una segunda subunidad de pasada de flujo, en donde la primera subunidad de pasada de flujo comprende una primera cantidad total de pares de celdas, y la segunda subunidad de pasada de flujo comprende una segunda cantidad total de pares de celdas, siendo la segunda cantidad total de pares de celdas menor que la primera cantidad total de pares de celdas; y

que comprende además un dispositivo pulidor (780, 880, 980) fluidamente conectado corriente abajo del primer tren de tratamiento electroquímico y el segundo tren de tratamiento electroquímico.

35 5. El sistema de la reivindicación 4, en donde el dispositivo de tratamiento electroquímico (550, 750, 850, 950) de la primera etapa (510, 510, 710, 810, 910) comprende una primera cantidad total de pares de celdas y el dispositivo de tratamiento electroquímico (550, 750, 850, 950) de la segunda etapa (510, 510, 710, 810, 910) comprende una segunda cantidad total de pares de celdas, siendo la segunda cantidad total de pares de celdas menor que la primera cantidad total de pares de celdas.

40 6. El sistema de la reivindicación 4, en donde el dispositivo de tratamiento electroquímico (550, 750, 850, 950) de la primera etapa (510, 510, 710, 810, 910) comprende uno de un dispositivo de electrodiálisis y un dispositivo de electrodesionización.

7. El sistema de la reivindicación 4, en donde el dispositivo de tratamiento electroquímico de la segunda etapa comprende uno de un dispositivo de electrodiálisis y un dispositivo de electrodesionización.

45 8. El sistema de la reivindicación 4, en donde el dispositivo pulidor es uno de un dispositivo de electrodiálisis y un dispositivo de electrodesionización.

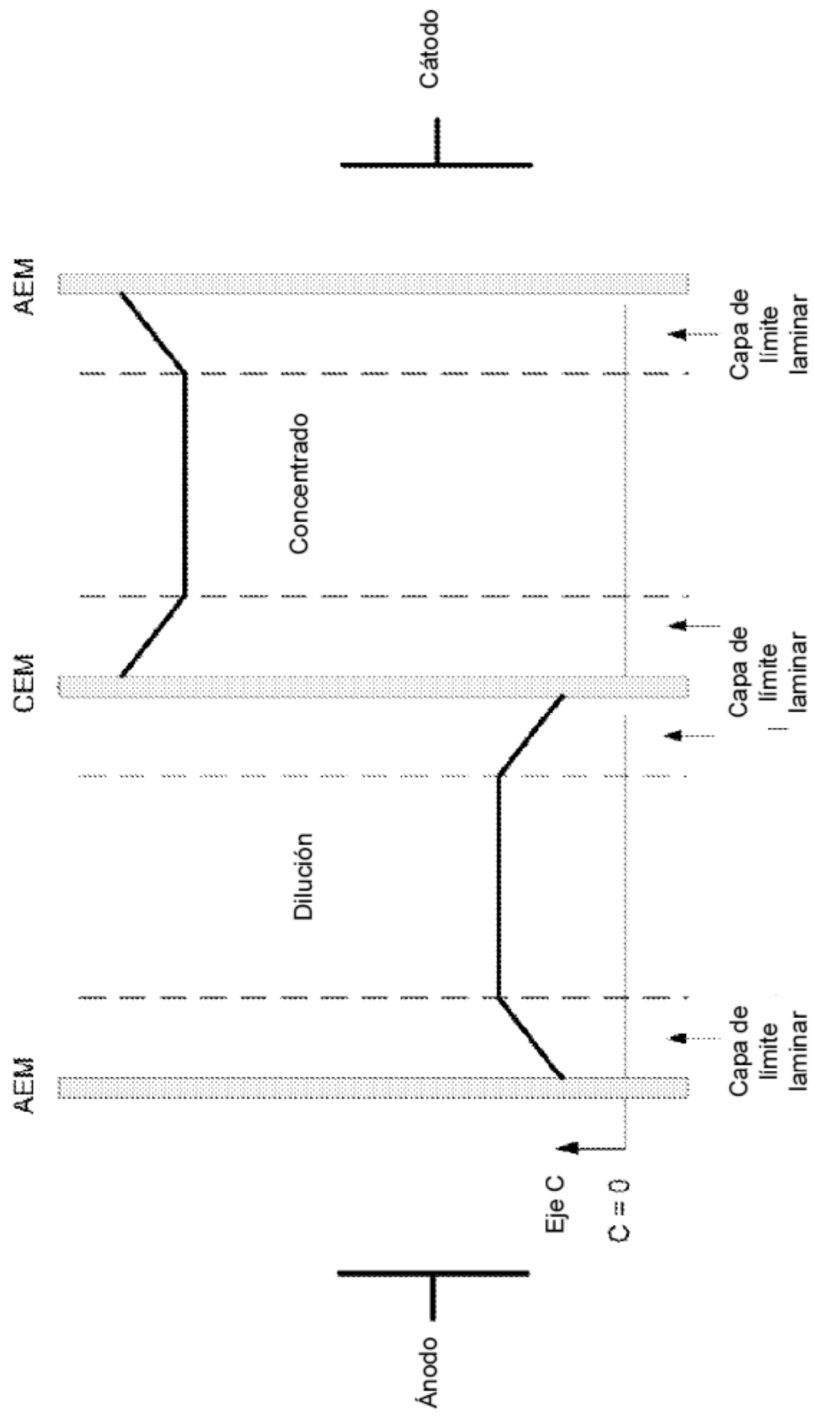


FIG. 1

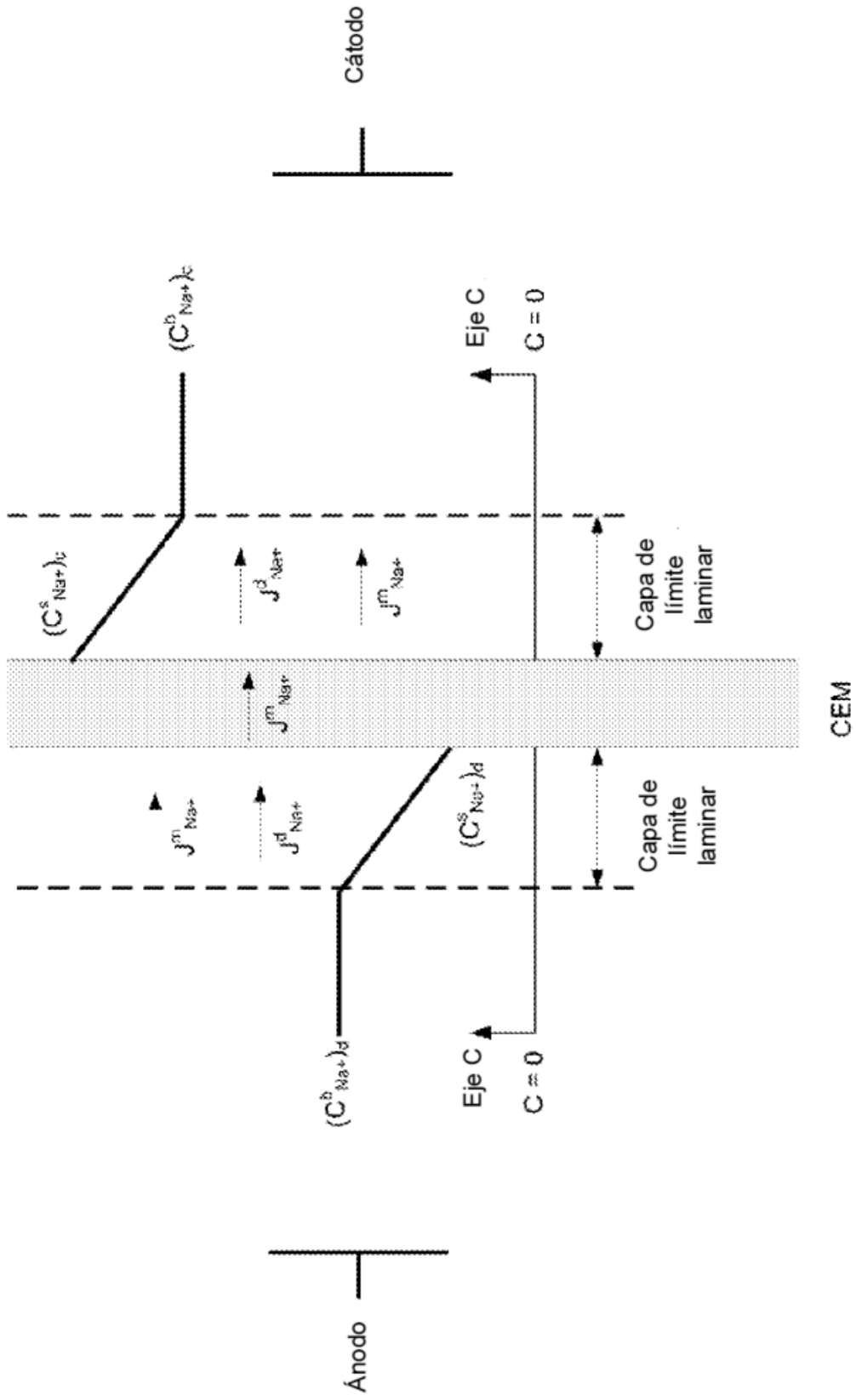


FIG. 2

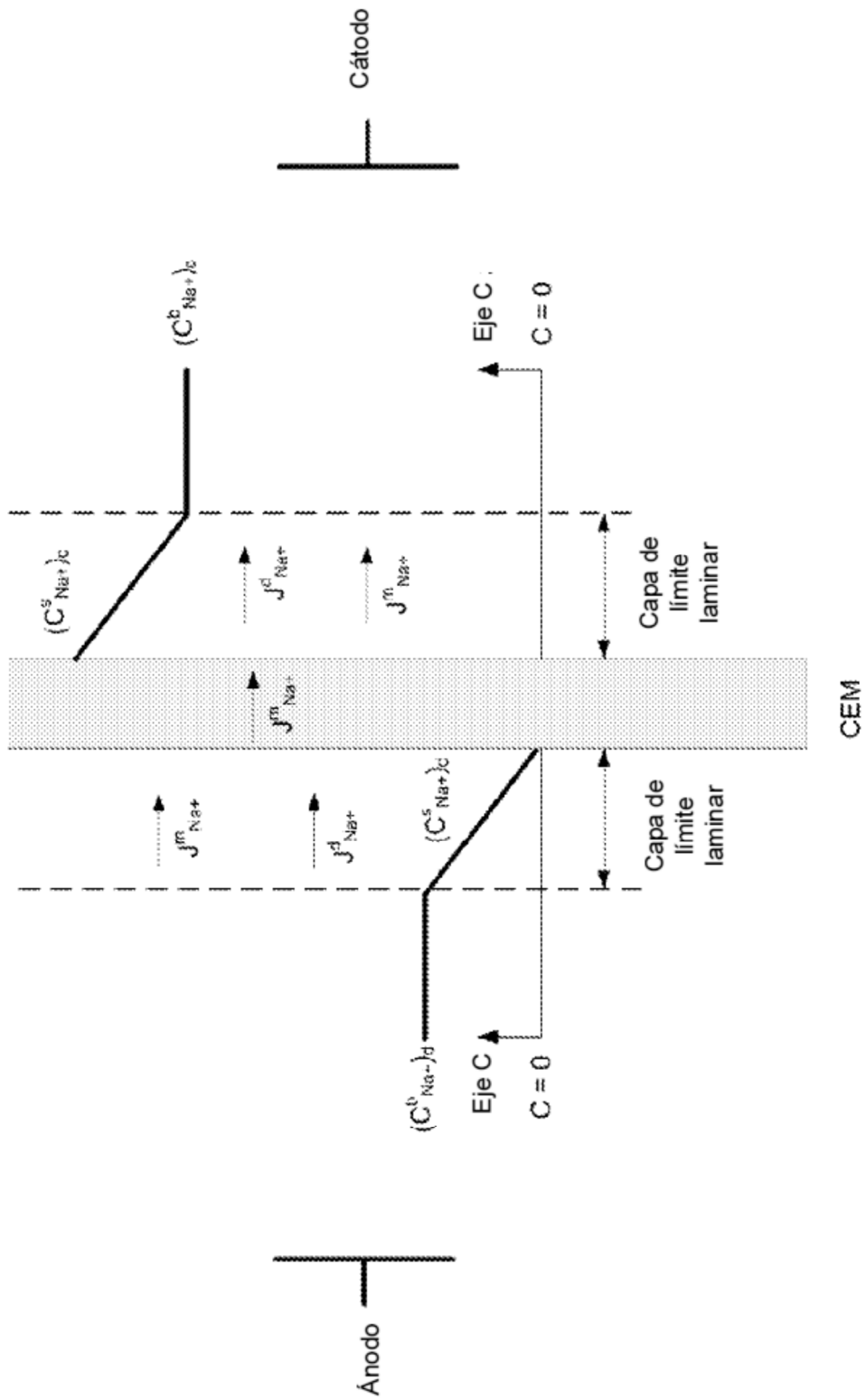


FIG. 3

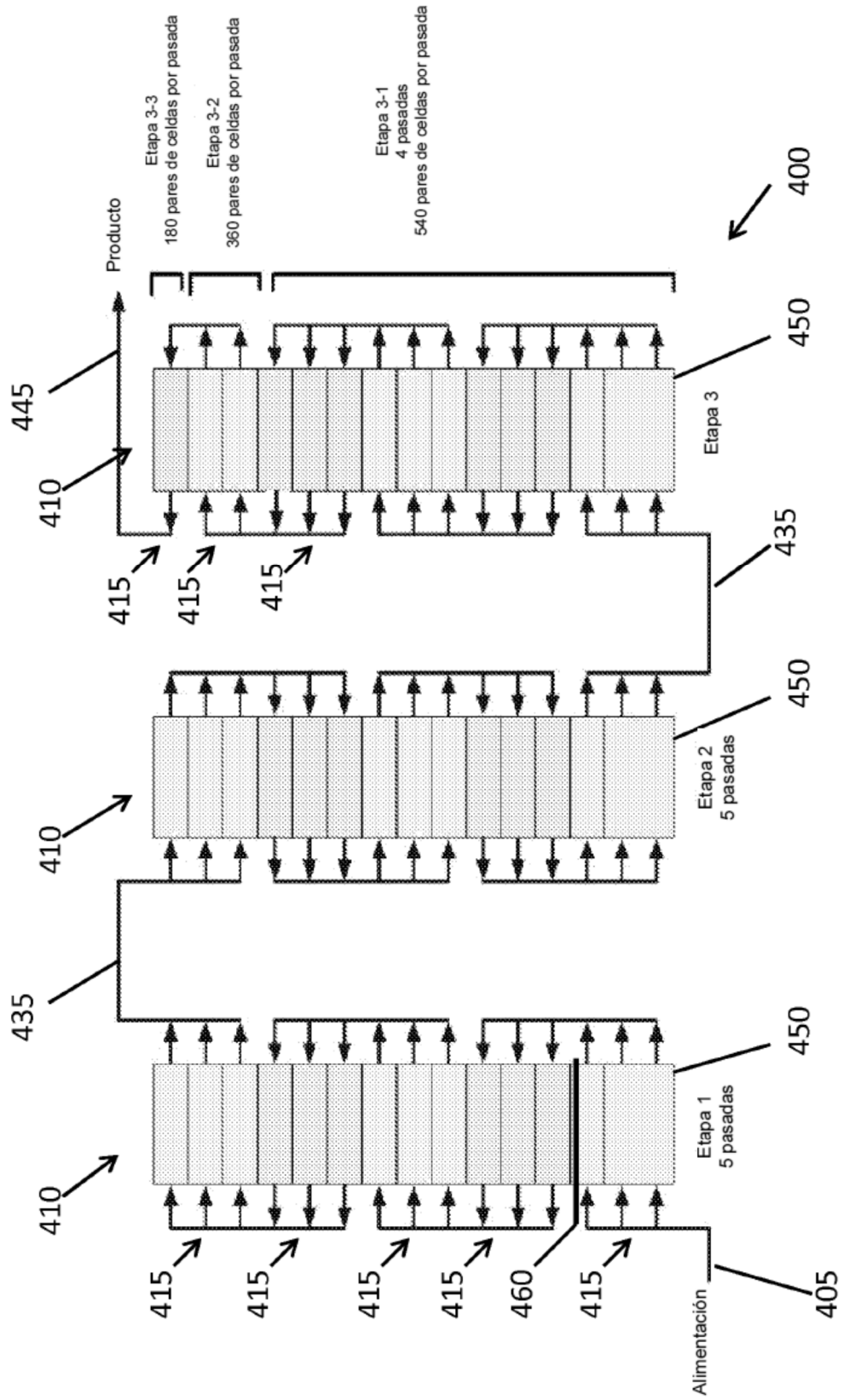


FIG. 4

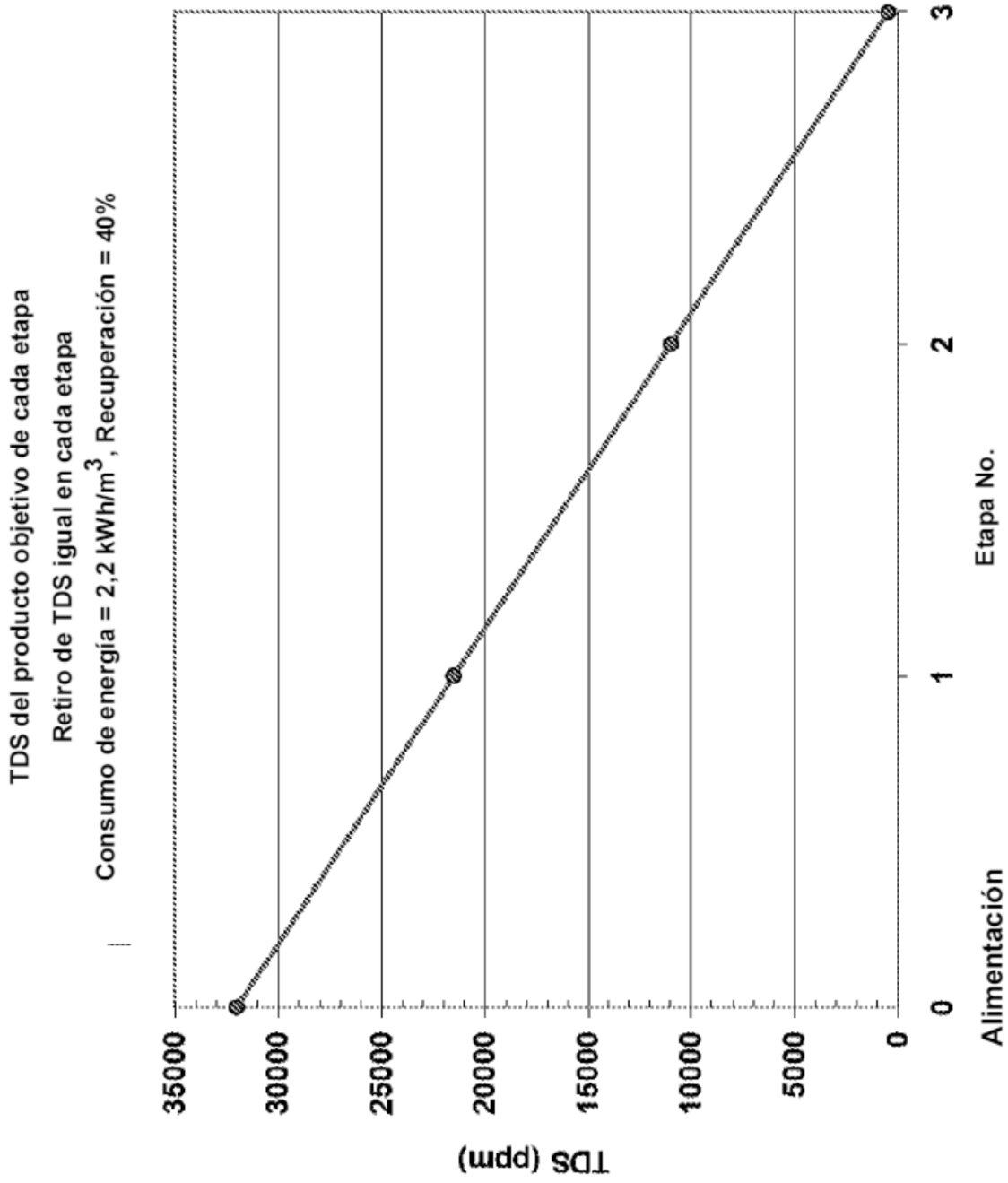


FIG. 5

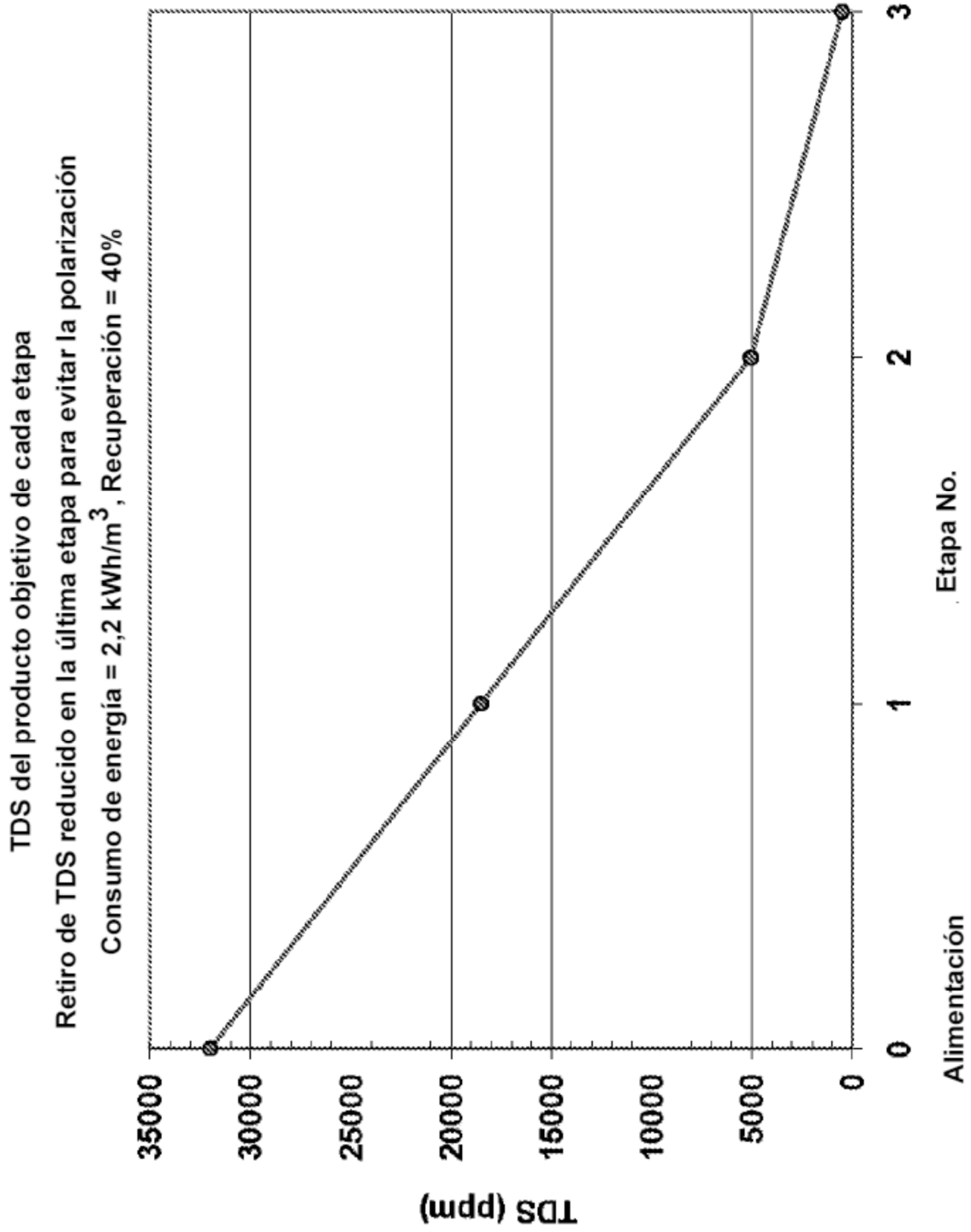


FIG. 6

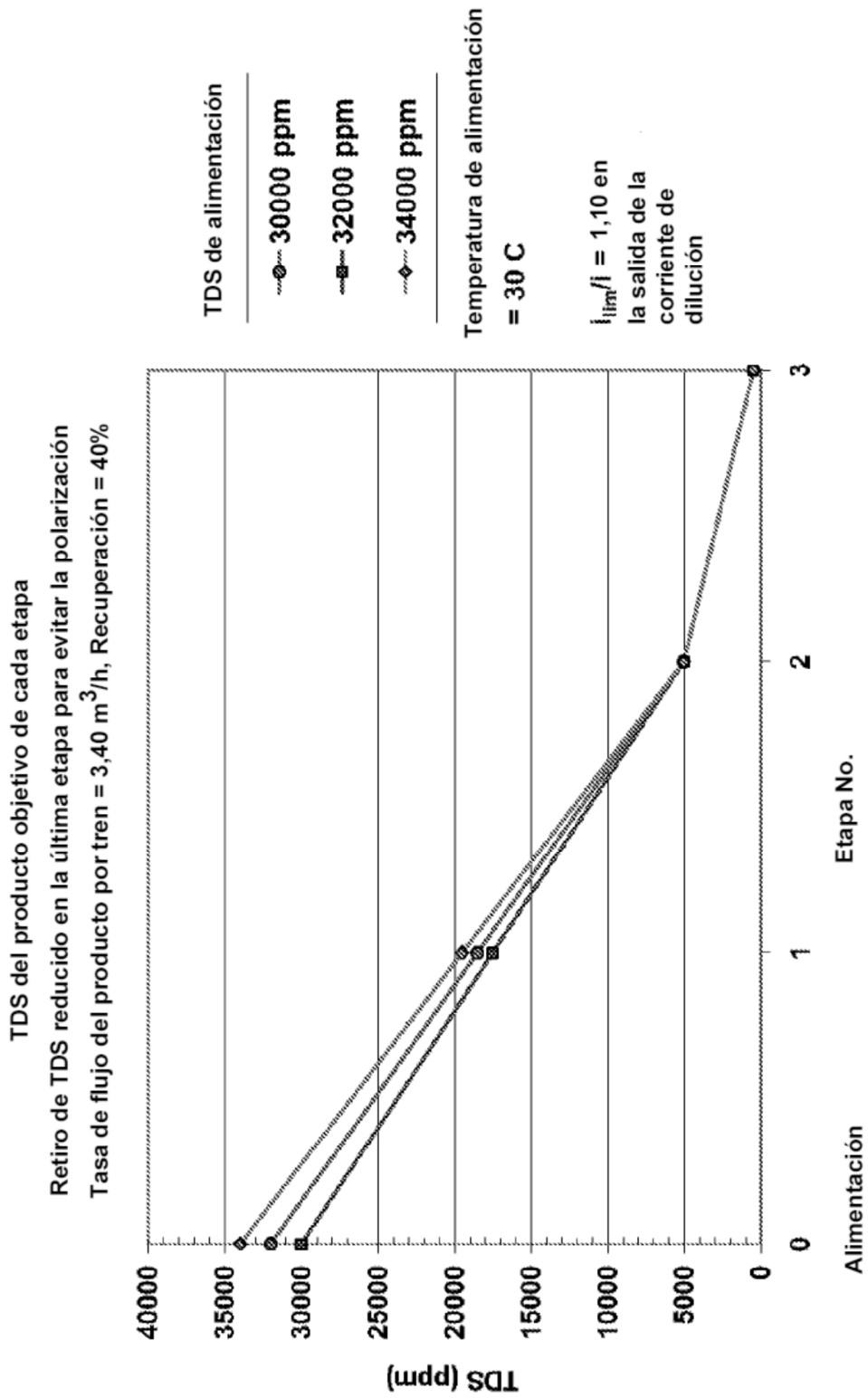


FIG. 7

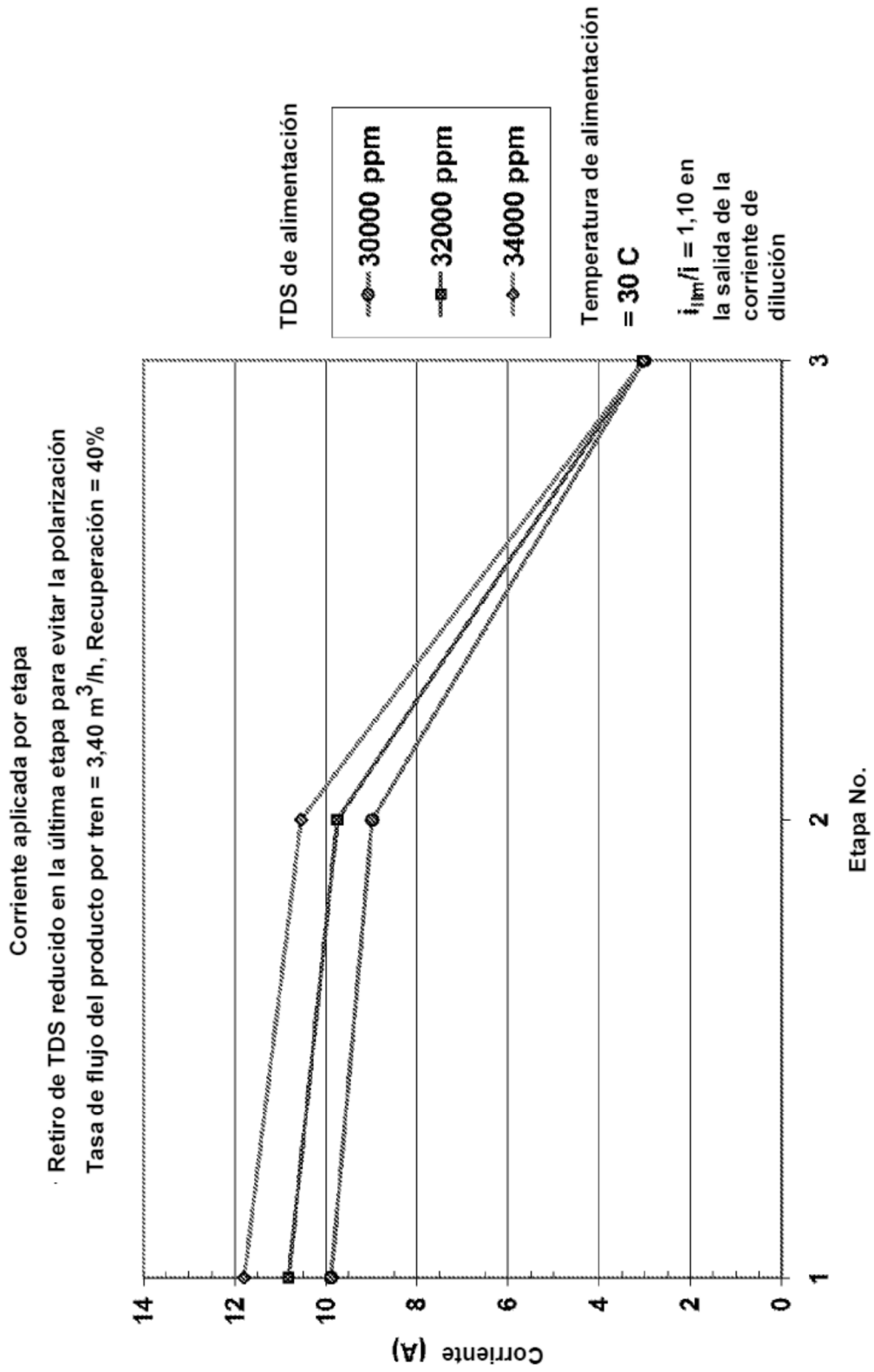


FIG. 8

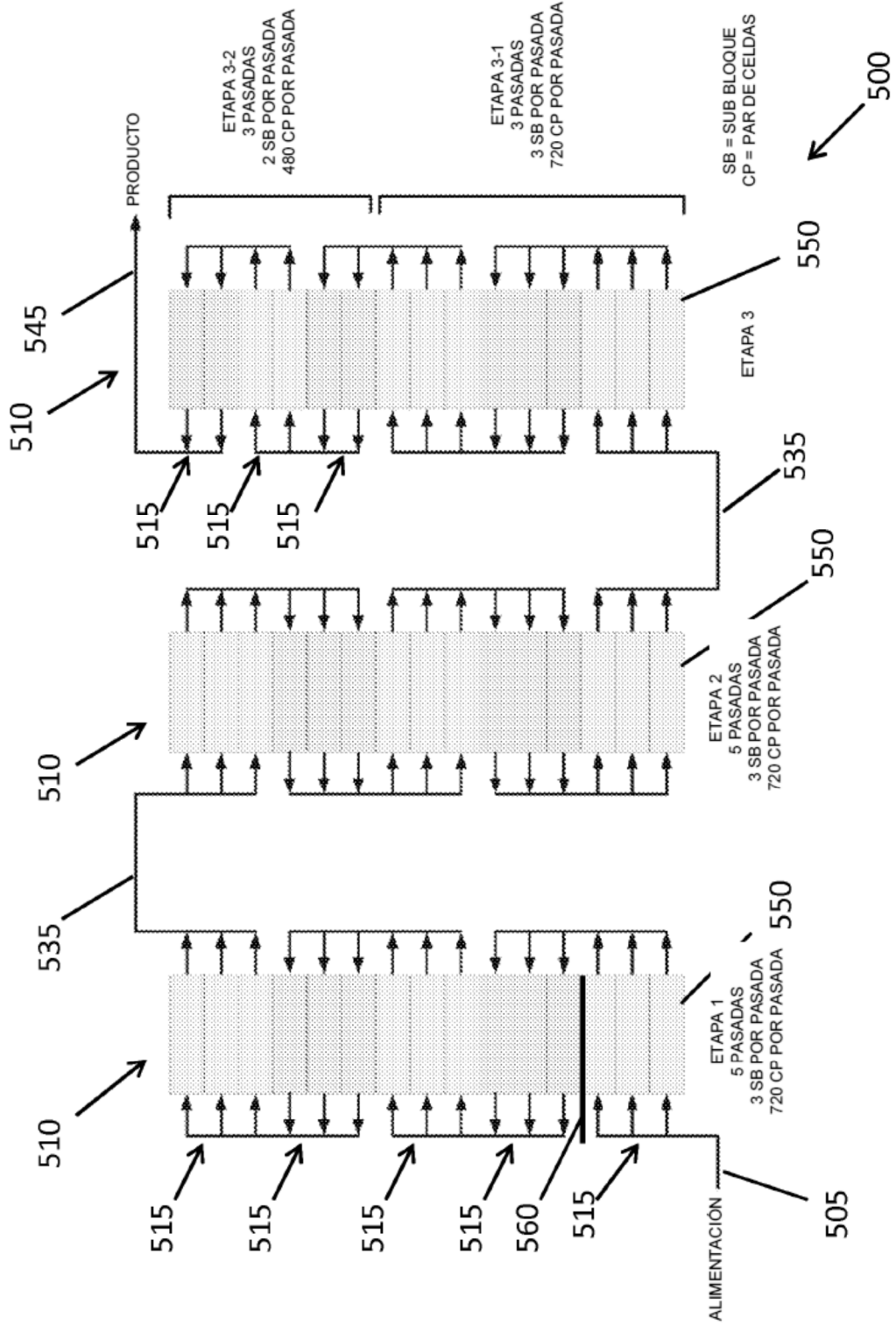


FIG. 9

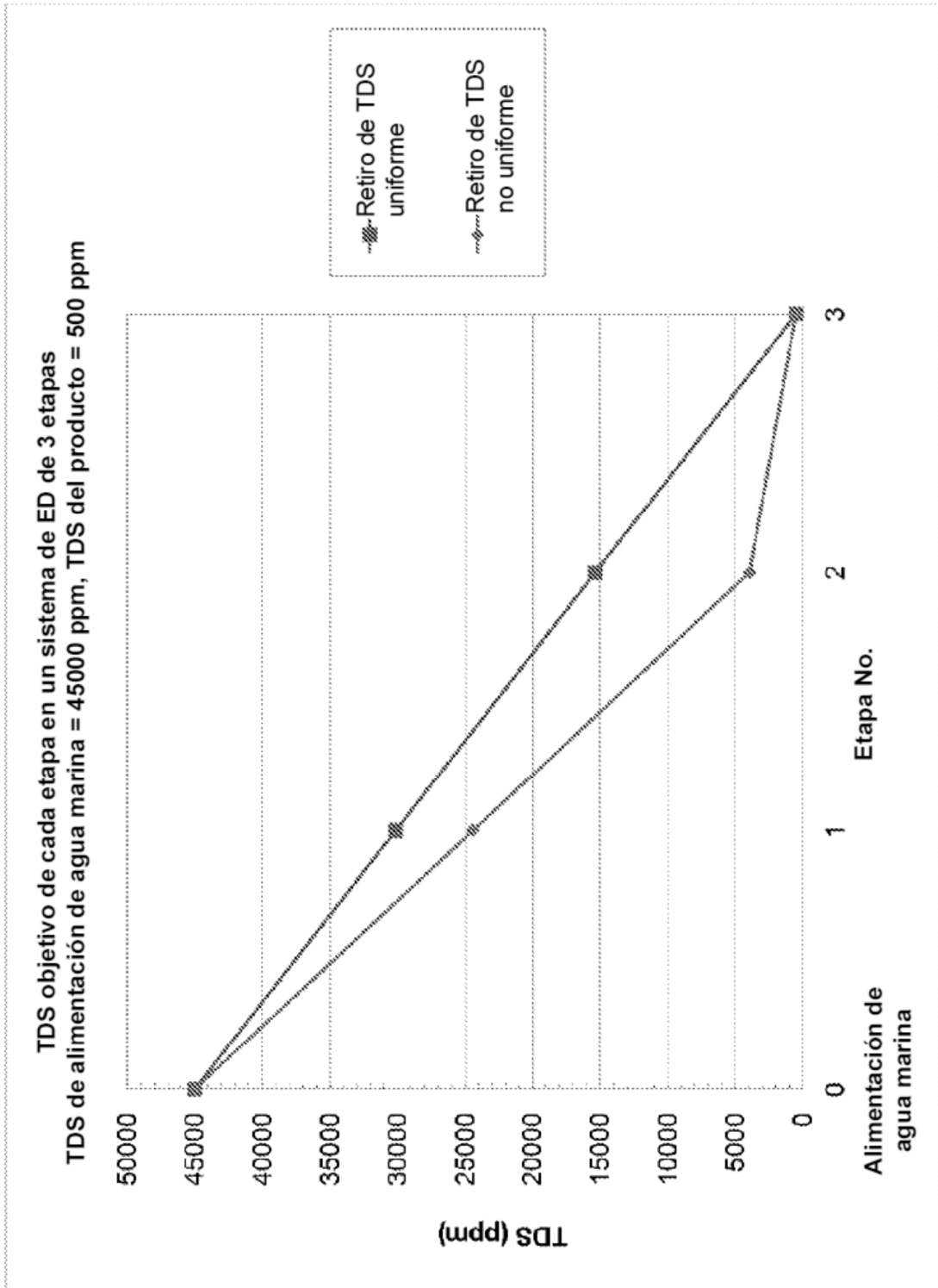


FIG. 10

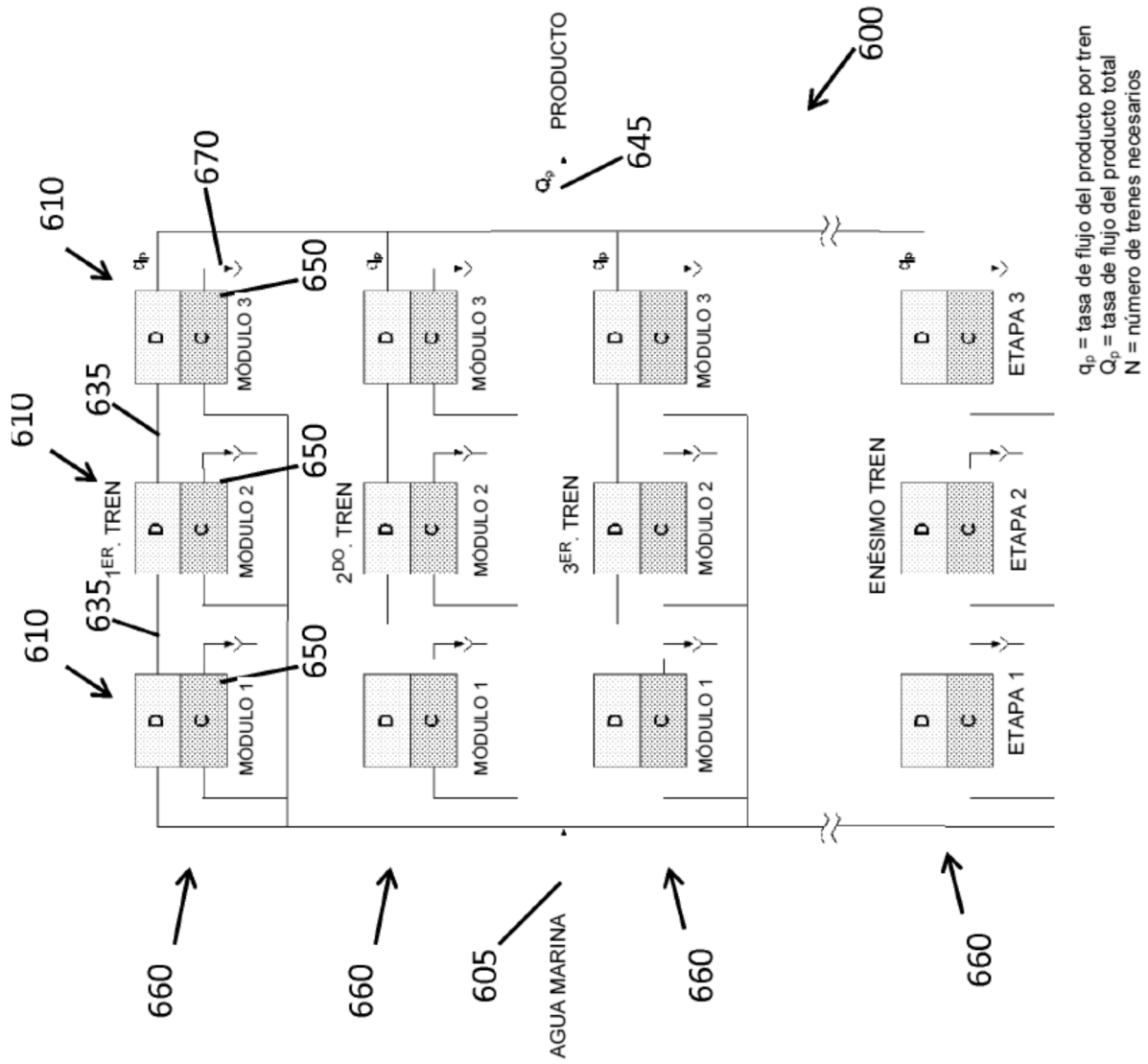


FIG. 11

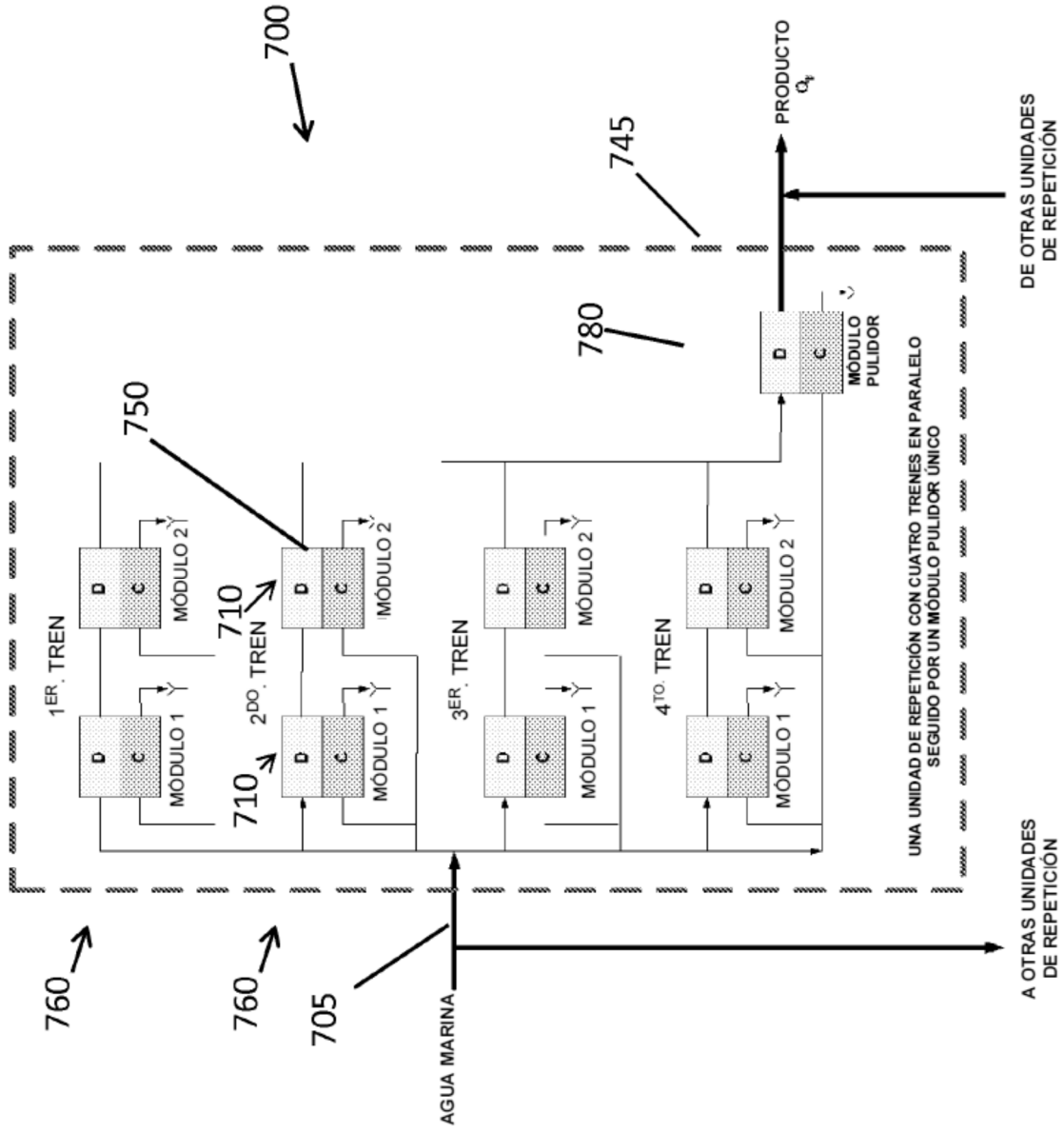


FIG. 12

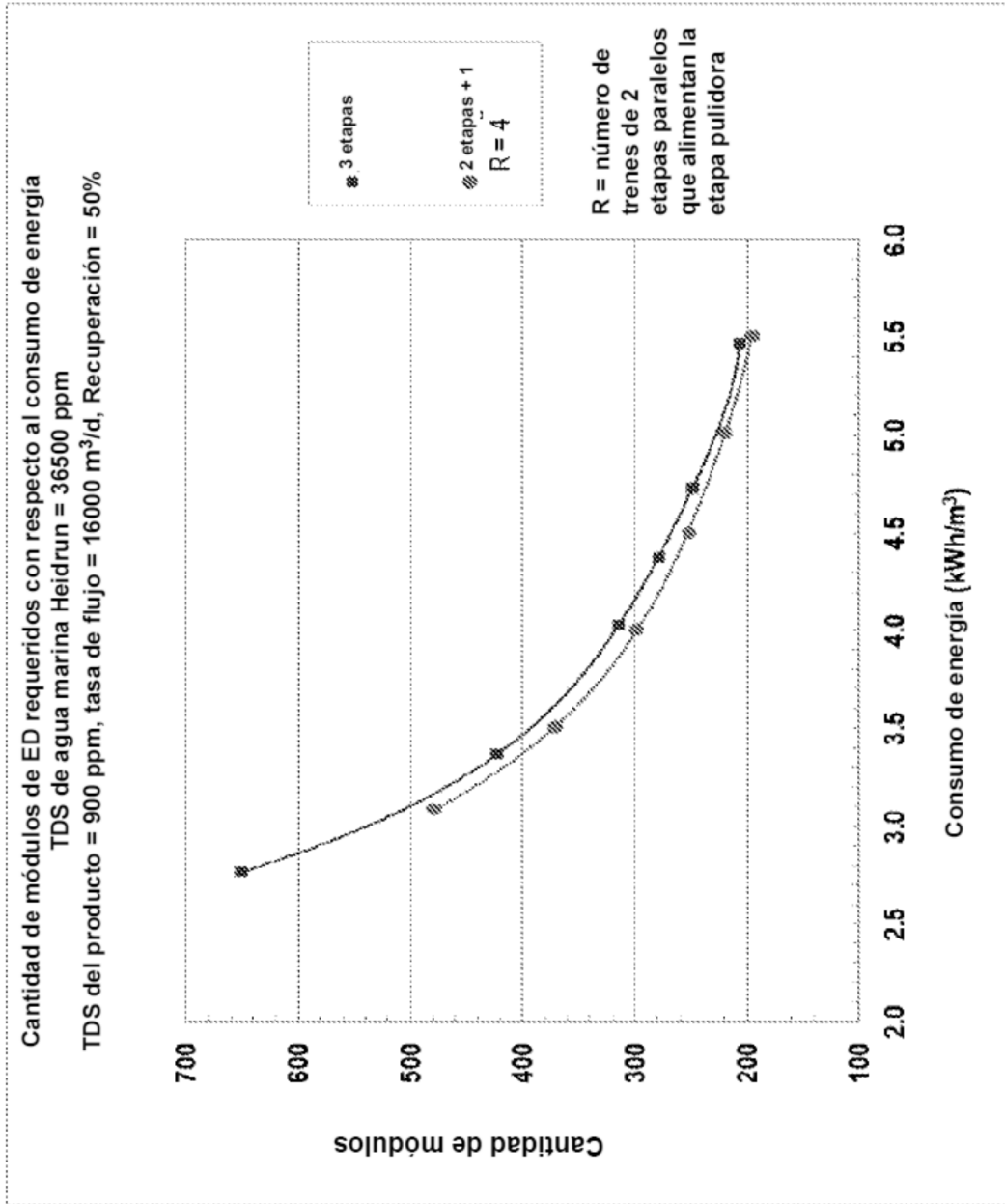


FIG. 13

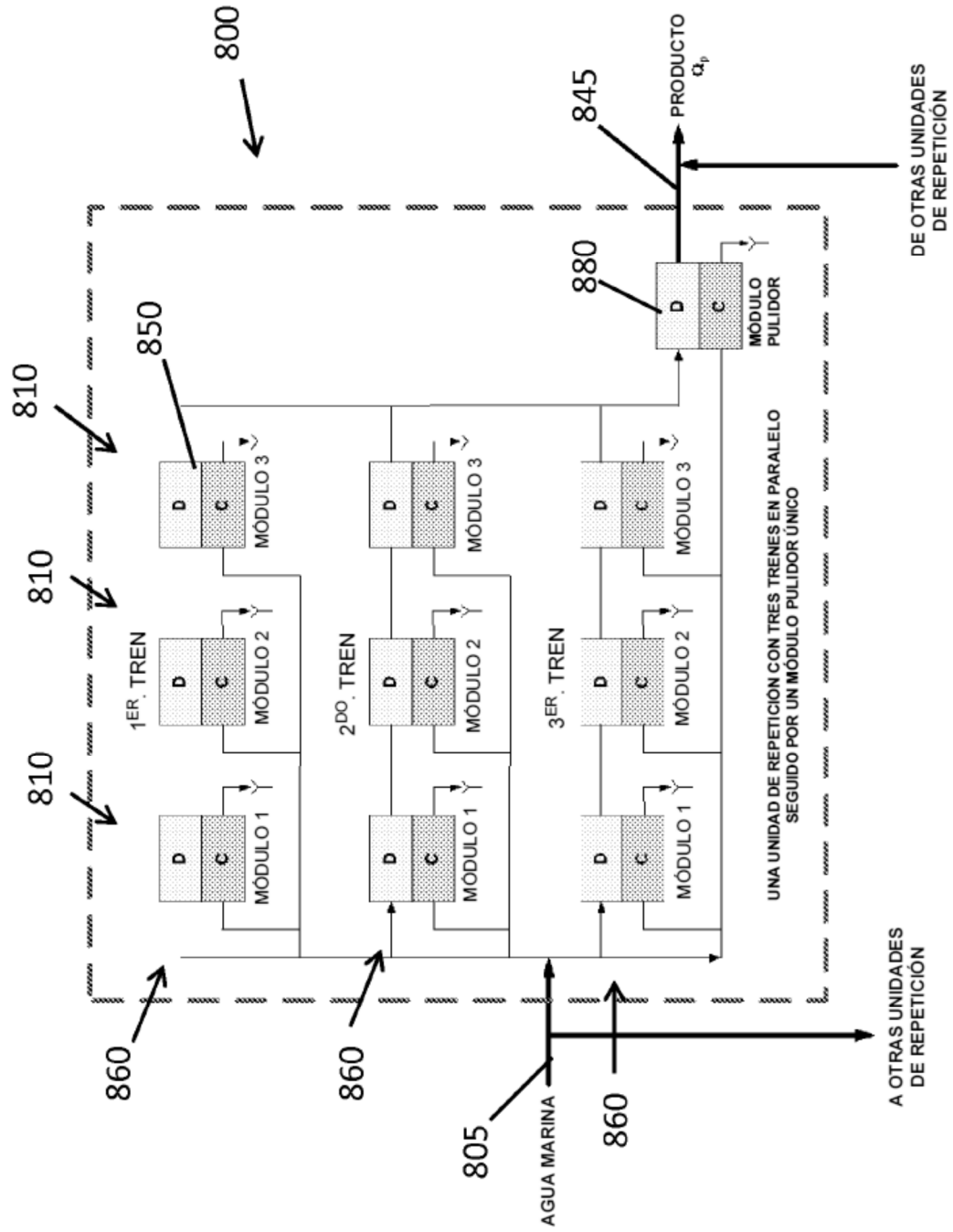


FIG. 14

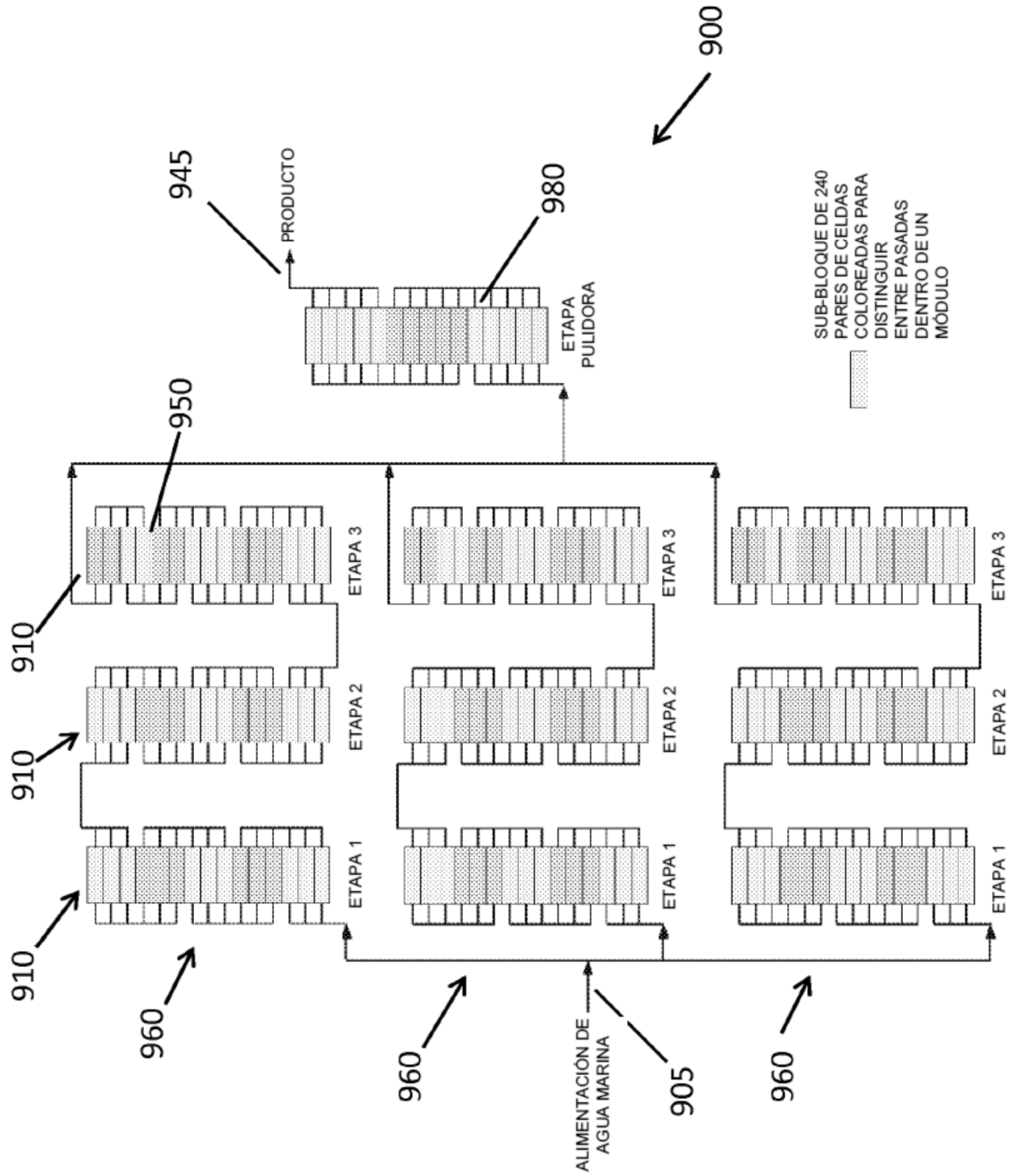


FIG. 15

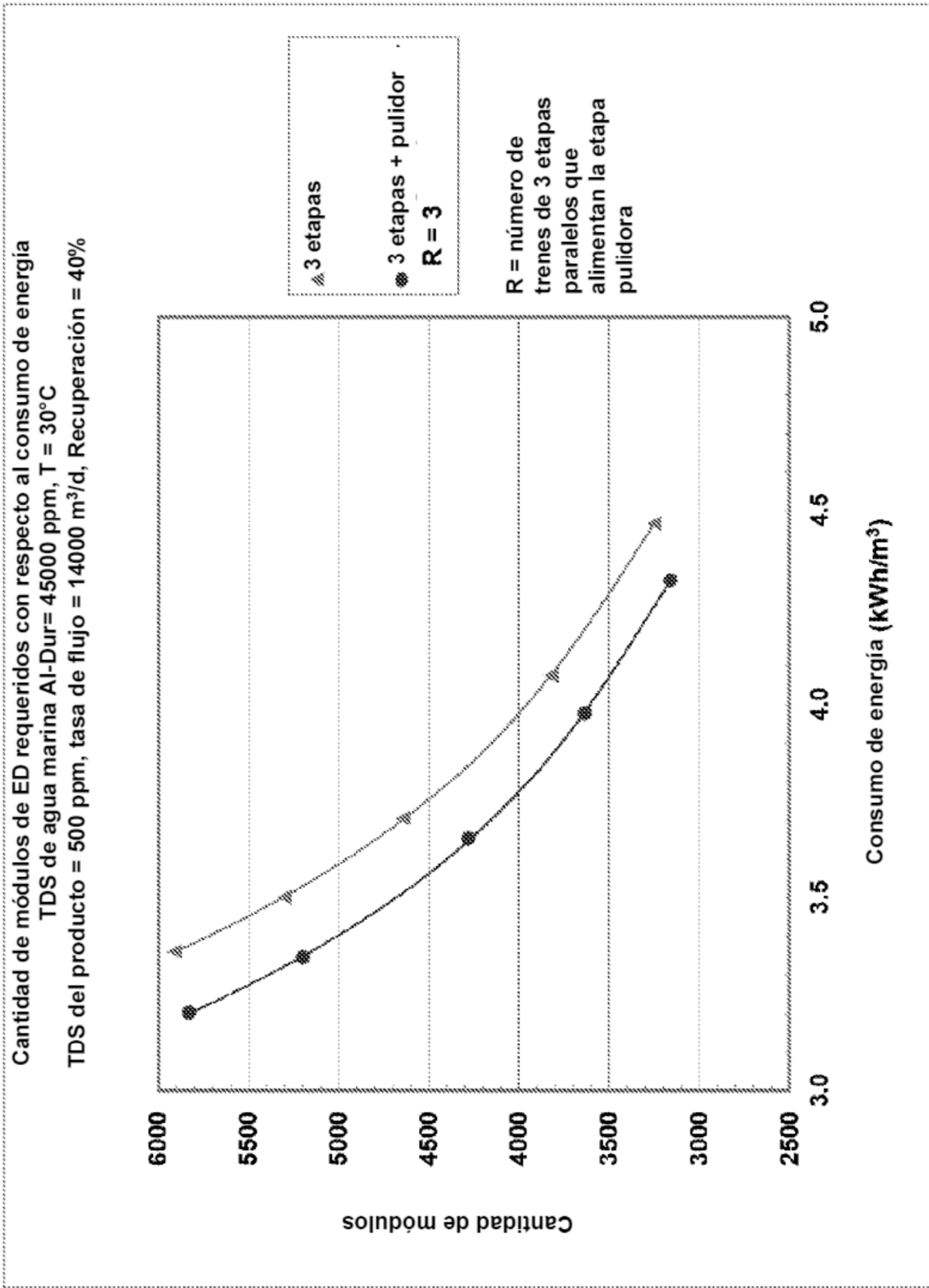


FIG. 16