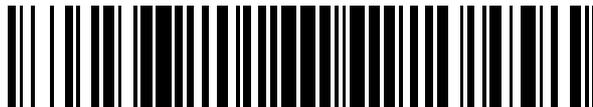


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 589 778**

51 Int. Cl.:

F03G 7/04

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.11.2010 PCT/US2010/055345**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.06.2011 WO11068616**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.11.2010 E 10779151 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.07.2016 EP 2507515**

54 Título: **Eliminación económica y sostenible de subproducto de sal con descarga nula de líquidos**

30 Prioridad:

04.12.2009 US 631248

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

16.11.2016

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)
1 River Road
Schenectady, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

MOE, NEIL EDWIN

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 589 778 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

Eliminación económica y sostenible de subproducto de sal con descarga nula de líquidos

Campo de la invención

5 La invención se refiere a la eliminación ecológica de un subproducto de sal de desalinizadoras con descarga nula de líquidos y al desarrollo sostenible de recursos de aguas salobres tierra adentro.

Estado de la técnica

10 Las tecnologías de desalinización funcionan normalmente dividiendo una sola corriente de alimentación acuosa en dos corrientes de salida: un producto cuyas propiedades se adaptan a su uso final (tal como agua potable), y una corriente de residuos que contiene en su mayoría sales de originales (y otros contaminantes) a una concentración elevada. Actualmente, la eliminación de corrientes de desalinización de alta salinidad plantea problemas significativos, especialmente para las unidades de desalinización de aguas salobres tierra adentro, y se considera que es un importante impedimento para la aplicación de las tecnologías de desalinización. La descarga de la corriente de desechos de alta salinidad de nuevo en el medio ambiente, inevitablemente, da como resultado un aumento de la salinidad de cualquiera de las fuentes de agua locales o de aquellas corriente abajo, por lo que claramente no es sostenible. La retención del subproducto de alta salinidad mediante su inyección en pozos profundos se limita a regiones geográficas específicas y se caracteriza por el alto coste y la incertidumbre sobre el eventual destino del líquido de alta salinidad (por ejemplo, ¿se filtrará finalmente en el suministro de agua subterránea?).

20 Ha habido mucha actividad reciente en torno a las tecnologías de "descarga nula de líquidos" (ZLD) que operan en corrientes de residuos de alta salinidad procedentes de la desalinización. Estas tecnologías permiten la recuperación mejorada de agua y reducir los subproductos de desalinización a sales sólidas o lodos. En la actualidad, las tecnologías de ZLD dependen en gran medida de unidades térmicas costosas y consumen de mucha energía, tales como concentradores de salmuera y cristalizadores, o estanques de evaporación en tierra intensiva. Recientes y casi futuros desarrollos tecnológicos están reduciendo el coste de ZLD mediante la reducción del tamaño de las unidades térmicas, como se muestra en las tablas del escenario de ZLD a continuación. Hoy día en los Estados Unidos, las tecnologías de ZLD son practicadas por aproximadamente 120 instalaciones industriales, en su mayoría plantas de energía.

30 Los municipios todavía no han adoptado las tecnologías de ZLD, pero esta imagen está a punto de cambiar debido al aumento de la escasez de agua y la disminución del coste de convergencia de ZLD. El documento WO 2004/041731A1 se considera la técnica anterior más próxima a la materia objeto de la reivindicación 1 y divulga una desalinizadora por ZLD que tiene una salida de alta salinidad rehidratada.

Escenarios de ZLD

% de recuperación	70 %	99 %	100 %
Unidad	RO	evaporador	cristalizador
Concentración de corriente de alta salinidad (ppm)	6.700	200.000	sólido
Requerimiento de energía incremental (kWh/m ³)	0,8	22	66
Requerimiento de energía acumulada (kWh/m ³)	0,8	7,0	7,6
% de recuperación	95 %	99 %	100 %
Unidad	RO	evaporador	cristalizador
Concentración de corriente de alta salinidad (ppm)	40.000	200.000	sólido
Requerimiento de energía incremental (kWh/m ³)	1,0	22	66
Requerimiento de energía acumulada (kWh/m ³)	1,0	1,8	2,5

35 Sin embargo, a pesar de reducir en gran medida el volumen del subproducto de desalinización, ZLD no resuelve el problema de la eliminación final, que sigue siendo significativo. Por ejemplo, una gran desalinizadora de agua salobre que trata 100.000 m³/día de 2000 ppm de agua salada produce aproximadamente 200 toneladas métricas de residuos de sal por día, o más probable si se utilizan procedimientos químicos suavizantes. El coste de descargar en vertederos la sal a 50 \$ por tonelada sería de 10.000 \$ por día, o 3,5 millones \$ por año. Además del alto coste, la descarga en vertederos no califica como una solución sostenible debido al uso cada vez mayor de la tierra y la posibilidad de filtración.

40

La solución sostenible para la desalinización tierra adentro es encontrar usos para el subproducto de sal, transformando los residuos de hoy en productos valiosos. De hecho, se han desarrollado procedimientos para extraer sales relativamente puras, tales como hidróxido de magnesio, carbonato de calcio, y cloruro de sodio a partir de corrientes de desalinización de alta salinidad. Sin embargo, los procedimientos de extracción tienden a ser complejos y costosos, y los mercados de sales producidas a las escalas necesarias pueden no existir o rápidamente puede llegar a saturarse. Como resultado, persiste la necesidad de procedimientos de eliminación y reutilización rentables y respetuosos con el medio ambiente para la corriente de desalinización alta salinidad procedente de desalinizadoras con descarga nula de líquidos.

Otra corriente de históricamente bajo valor son los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTAR). Después de tratamiento primario y secundario, la mayor parte de aguas residuales municipales se reinyecta de nuevo en el medio ambiente. En las regiones costeras, las tuberías están normalmente colocadas sobre (o bajo) el fondo del mar y llevan los efluentes varios cientos de yardas o incluso millas fuera de la costa. Tales descargas al mar son de particular preocupación ambiental debido a las grandes diferencias de salinidad y densidad entre las aguas residuales municipales (500-2000 ppm normalmente) y el agua de mar (30.000-50.000 ppm normalmente). Las descargas de aguas residuales crean columnas de agua de baja densidad y baja salinidad que pueden ser localmente perjudiciales y tienen que gestionarse cuidadosamente.

La escala de eliminación de aguas residuales contemporánea en el mar es inmensa, como se hará constar con los dos ejemplos que figuran a continuación. La primera es la Planta Conjunta de Control de Contaminación del Agua (JWPCP), una gran planta de tratamiento de aguas residuales en la costa oeste de los Estados Unidos. La JWPCP proporciona tratamiento primario y secundario de las aguas residuales colectivas de 3,5 millones de residentes del condado de Los Angeles antes de expulsar el efluente en el Océano Pacífico (véase http://www.lacsd.org/about/wastewater_facilities/jwpcp/default.asp). El volumen de esta corriente es de $1,14 \times 10^6$ m³/día, o aproximadamente diez veces mayor que la capacidad de la desalinizadora más grande de los Estados Unidos. La salida de la JWPCP comprende aproximadamente el 20 % de la descarga total de aguas residuales en el sur de California hasta el mar. El segundo ejemplo es la ciudad de Singapur, donde en 2006, $1,4 \times 10^6$ m³/día de aguas residuales fueron tratadas por la Comisión de Servicios Públicos (PUB) en diversas instalaciones, y $1,2 \times 10^6$ m³/día fueron descargados (véase <http://www.pub.gov.sg/>). La escala de las descargas está directamente relacionada con el bajo valor percibido de las aguas residuales y la dificultad de encontrar las aplicaciones adecuadas y asequibles para grandes cantidades de agua reciclada.

Las aguas residuales recicladas se han convertido en una fuente cada vez más importante de agua utilizable en regiones con escasez de agua, y hay muchas iniciativas que están siendo discutidas o implementadas para aumentar el reciclaje y la reutilización. Sin embargo, existen límites naturales asociados con la cantidad de aguas residuales que se pueden reciclar y volver a utilizar con eficacia. En primer lugar, la demanda de agua de menor calidad se limita a aplicaciones tales como las obras de construcción, la irrigación o ciertos usos industriales. La infraestructura para la distribución se debe establecer, lo que puede ser costoso. Por otro lado, la tecnología avanzada de tratamiento terciario necesaria para actualizar el efluente secundario para su reutilización potable indirecta tal como la recarga de aguas subterráneas es costosa, y de nuevo la infraestructura de distribución se tiene que construir. Incluso con la inversión en tan costosa tecnología de tratamiento terciario, la resistencia pública a proyectos de reciclaje "WC-a-grifo" percibidos ha sido grande; por lo tanto, persiste la necesidad de medios menos costosos y menos controversiales para extraer valor de las aguas residuales municipales.

Se sabe que la energía de gradiente salino se puede producir por diferentes enfoques, utilizando corrientes contrastantes de alta y baja salinidad. Los dos procedimientos de generación de energía más conocidos están basados en membrana, denominados ósmosis por presión retardada (PRO) y electrodiálisis inversa (RED). PRO y RED se describen en las siguientes publicaciones patentes US 7.563.370, US 4.193.267, US 4.171.409, US 3.906.250 y US 2006/0196836A1. A pesar de que demostraciones a escala piloto tanto de PRO como de RED se están implementando en Europa, ninguna tecnología nunca se ha desplegado comercialmente. La aplicación que se considera en estos estudios piloto es el uso de la diferencia entre la salinidad de los ríos y océanos para generar energía dentro de estuarios. La viabilidad comercial de RED y PRO depende de la capacidad de generar la mayor cantidad de energía utilizando el área de membrana más pequeña. Por desgracia, la mayoría de los análisis de generación de energía con agua de ríos/agua de mar que utilizan membranas actualmente disponibles muestran que el coste de las membranas debe ser demasiado bajo para que el procedimiento sea comercialmente viable. Las mayores diferencias de salinidad entre corrientes de alta y baja salinidad y membranas más eficaces con una mayor permeabilidad mejorarían las perspectivas comerciales.

Sumario de las características inventivas

La presente invención se refiere a una planta de generación de energía, que comprende una unidad de energía de gradiente salino (SGPU) que comprende una alimentación de alta salinidad, una alimentación de baja salinidad, y una salida de agua mezclada. La alimentación de alta salinidad se compone de un subproducto de sal procedente de una operación de ZLD. La salida de agua mezclada desemboca en una masa de agua.

Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 representa una disposición de unidad de desalinización de agua salobre tierra adentro (BWDU) y unidad del deshidratador que resulta en ZLD.

La Figura 2 representa una disposición de SGPU e hidratador acuerdo con la presente invención.

5 Las Figuras 3a-e representan disposiciones de SGPU e hidratador alternativas de acuerdo con la presente invención.

La Figura 4 representa una disposición de unidad de PRO de acuerdo con la presente invención.

La Figura 5 representa una disposición de unidad de RED acuerdo con la presente invención.

La Figura 6 representa un hidratador utilizado para combinar agua de alta y baja salinidad para su descarga.

10 La Figura 7 muestra la energía del derecho termodinámico generada a partir de la mezcla de 1 m³/s de corriente de baja salinidad (concentración fija a 500 ppm) con una corriente de alta salinidad (15.000-160.000 ppm) para hacer agua mezclada (10.000-48.000 ppm).

15 La Figura 8 muestra la energía del derecho termodinámico generada por metro cúbico de agua total utilizada en el procedimiento (igual al volumen de la corriente de agua mezclada) como funciones de concentración de la corriente de alta salinidad (15.000-160.000 ppm) y la corriente de agua mezclada (10 000-48000 ppm), fijando la concentración de la corriente de baja salinidad a 500 ppm.

La Figura 9 muestra la energía del derecho termodinámico generada por tonelada métrica de sal presente en la corriente de alta salinidad en función de las concentraciones de la corriente de alta salinidad (15.000-160.000 ppm) y la corriente de agua mezclada (10,000-48,000 ppm), fijando la concentración de la corriente de baja salinidad a 500 ppm.

20 La Figura 10 muestra la energía del derecho termodinámico generada a partir de la mezcla de 1 m³/s de corriente de baja salinidad (500-32.000 ppm) con una corriente de alta salinidad (15,000-96,000 ppm) para hacer el agua mezclada (10000-48000 ppm), donde la relación de mezcla de volumen de corriente de alta salinidad/volumen de corriente de baja salinidad se establece en 1.

Descripción detallada de las realizaciones ejemplares

25 La invención se describirá a continuación con referencia a los dibujos, en los que las realizaciones preferidas se describen en detalle para permitir la práctica de la invención. Aunque la invención se describe con referencia a estas realizaciones preferidas específicas, se entenderá que la invención no se limita a estas realizaciones preferidas.

30 Haciendo referencia a continuación a los dibujos, la Figura 1 muestra una BWDU 20 tierra adentro que desala el agua extraída de una masa 10 de agua salada y produce tanto agua utilizable como una salida de alta salinidad En los procedimientos de ZLD, la salida de alta salinidad se puede tratar adicionalmente en un deshidratador 30 que elimina el agua utilizable de la salida de alta salinidad y deshidrata el resto de la salida de alta salinidad. Parte del agua utilizable producida por el deshidratador 30 es el agua potable En una realización, se contempla que el deshidratador 30 se compone de una unidad de evaporador-concentrador de salmuera que concentra las sales y una unidad de cristallizador o estanque de evaporación para recuperar o eliminar el agua restante El nivel de salinidad del agua utilizable es por lo general menos que o igual a 500 ppm, y la salida de alta salinidad son sales sólidas o lodos. La salida de alta salinidad deshidratada se transporta fuera del sitio al hidratador 40 en una SGPU 60, como se representa en la Figura 2. La salida salinidad alta deshidratada se puede transportar utilizando una variedad de procedimientos, incluyendo por camión, tren, barco, o tuberías.

40 En la Figura 2, la salida de alta salinidad deshidratada se rehidrata en el hidratador 40. En una realización, el agua de baja salinidad se utiliza para rehidratar la salida de alta salinidad deshidratada. La salida de alta salinidad rehidratada se suministra a la SGPU y se utiliza como alimentación de alta salinidad. También se suministra agua de baja salinidad a la SGPU y se utiliza como alimentación de baja salinidad. En la realización preferida, esta alimentación de baja salinidad es el efluente secundario de una PTAR 50. Se contempla que en algunas realizaciones se pueda utilizar agua de río como la alimentación de baja salinidad. Además, se contempla que en algunas realizaciones la entrada de alta salinidad auxiliar del hidratador 40 se pueda utilizar para rehidratar la salida de alta salinidad deshidratada con líquidos de alta salinidad, incluyendo salmuera, tales como la corriente de concentrado procedente de una desalinizadora de agua de mar, o agua de mar.

45 Además, los caudales de la alimentación de baja salinidad proporcionados a la SGPU 60, el agua de baja salinidad proporcionada al hidratador 40, la entrada de alta salinidad auxiliar proporcionada al hidratador 40, y la salida de alta salinidad rehidratada proporcionada a la SGPU 60 son ajustables.

50 El caudal ajustable del agua en el hidratador 40, junto con el pH y la temperatura, se puede utilizar para controlar el nivel de salinidad de la salida de alta salinidad rehidratada. Las salidas de alta salinidad que tienen diferentes composiciones se pueden mezclar con el fin de controlar las concentraciones de los iones individuales dentro de la salida de alta salinidad rehidratada. Los caudales de la salida de alta salinidad rehidratada y la alimentación de baja

salinidad que entra en la corriente de alta salinidad en la SGPU 60 controlan el nivel de salinidad de la salida de agua mezclada de la SGPU 60. El nivel de salinidad requerido de la salida de agua mezclada varía dependiendo de la salinidad de la masa de agua en la que se vacía. En ciertos casos puede ser deseable que la salinidad y la densidad del agua mezclada sean sustancialmente equivalentes a las de la masa de agua; en otros casos puede ser deseable que la salinidad y la densidad del agua mezclada sean menores que las de la masa de agua a fin de mantener una flotabilidad positiva. Para realizaciones que utilizan un efluente secundario de una PTAR 50 como la alimentación de baja salinidad, la adición de sal al efluente secundario aumentará su concentración y densidad y puede hacer que la descarga sea más respetuosa con el medio ambiente.

La Figura 3a representa un caso en el que la alimentación de baja salinidad no pasa por la SGPU 60 y diluye la salida de agua mezclada antes de su descarga. En esta realización, el efluente secundario de la PTAR 50 se utiliza como la alimentación de baja salinidad a la SGPU 60 y para hidratar la salida de alta salinidad deshidratada. La Figura 3b representa una realización en la que se utiliza agua de río como la alimentación de baja salinidad a la SGPU 60 y para hidratar la salida de alta salinidad deshidratada en el hidratador 40.

La Figura 3c representa una realización en la que el efluente secundario de una PTAR 50 se utiliza como la alimentación de baja salinidad de la SGPU 60, y el agua de río se utiliza para hidratar la salida de alta salinidad deshidratada en el hidratador 40. Como se puede observar, se proporciona una trayectoria que permite que una combinación de efluente secundario de una PTAR 50 y el agua del río se utilice en la alimentación de baja salinidad de la SGPU 60 y para hidratar la salida de alta salinidad deshidratada.

La Figura 3d representa una realización en la que el efluente secundario de una PTAR 50 se utiliza como la alimentación de baja salinidad de la SGPU 60, y la corriente de concentrado de una desalinizadora de agua de mar se utiliza para hidratar la salida de alta salinidad deshidratada en el hidratador 40.

La Figura 3e representa una realización en la que el efluente secundario de una PTAR 50 se utiliza como la alimentación de baja salinidad de la SGPU 60, y el agua de mar se utiliza para hidratar la salida de alta salinidad deshidratada en el hidratador 40.

La Figura 4 representa una disposición de la unidad 70 de PRO que se puede utilizar en la SGPU. En la unidad 70 de PRO, se muestra un recipiente 80 dividido en una cámara 90 de alta salinidad presurizada y una cámara 100 de baja salinidad sin presurizar. La alimentación de alta salinidad se dirige a la cámara 90 de alta salinidad, mientras que la alimentación de baja salinidad se dirige a la cámara 100 de baja salinidad. Las dos cámaras están separadas por una membrana 110 semipermeable que permite que los contenidos de la cámara 100 de baja salinidad penetren en la cámara 90 de alta salinidad, al tiempo que conserva el contenido de la cámara 90 de alta salinidad. La diferencia de presión hidráulica entre los líquidos en las caras opuestas de la membrana 110 es menor que la diferencia de presión osmótica entre los líquidos. La diferencia de potencial químico entre el contenido de la cámara 90 de alta salinidad y la cámara 100 de baja salinidad da lugar al transporte de agua de la cámara 100 de baja salinidad a la cámara 90 de alta salinidad y a la presurización del volumen de agua transportada, lo que se convierte en energía eléctrica por una hidroturbina 120. La aplicación de presión hidrostática a la salida de alta salinidad rehidratada retardará en parte el transporte de agua. El agua que fluye de la cámara de alta salinidad del 90 al hidroturbina 120 es una mezcla de alimentación de baja salinidad y de alimentación de alta salinidad. La producción de energía de la unidad PRO 70 se ve influenciada por la diferencia de presión osmótica entre las dos soluciones, los caudales relativos de las dos corrientes de entrada, temperatura, presión hidráulica, y propiedades de la membrana. El agua que sale de la hidroturbina 120 se dirige a la salida de agua mezclada de la SGPU.

La capacidad de generación de energía de la unidad 70 de PRO mejora a temperaturas más altas del agua debido al aumento de la fuerza motriz de presión osmótica y al aumento de la permeabilidad de la membrana. El calor residual, tal como el subproducto de la generación de energía se puede utilizar ventajosamente para calentar la alimentación de baja salinidad y/o la alimentación de alta salinidad para aumentar la potencia de salida de la unidad 70 de PRO y utilizar más plenamente los recursos energéticos existentes.

La Figura 5 representa una disposición de la unidad 120 de RED que se puede utilizar en la SGPU. En la unidad 120 de RED, las membranas 140 de cationes (CM) y las membranas 130 de aniones (AM) se disponen en una secuencia alterna, produciendo de este modo compartimentos de alta salinidad y compartimentos de baja salinidad. La alimentación de alta salinidad se dirige a los compartimentos de alta salinidad, mientras que la alimentación de baja salinidad se dirige en los compartimentos de baja salinidad. Puesto que la concentración de iones de sal en los compartimentos de alta salinidad es más alta que los iones de sal en los compartimentos de baja salinidad, los cationes de sodio se difunden desde los compartimentos de alta salinidad a través de la CM 140 en los compartimentos de baja salinidad. Además, los aniones de cloruro de los compartimentos de alta salinidad se difunden a través de la AM 130 en los compartimentos de baja salinidad. Esta separación de la carga produce una diferencia de potencial químico a través de cada membrana que se puede utilizar directamente como energía eléctrica a través de la tensión eléctrica invocada a través del ánodo y el cátodo, y de este modo una corriente eléctrica a través de una carga eléctrica. La capacidad total de producción de energía eléctrica de la unidad 120 de RED se determina por un número de factores, incluyendo el número de membranas en la pila, la temperatura absoluta y la relación de las concentraciones de las soluciones en los compartimentos de alta y baja salinidad, la resistencia interna de la unidad 120 de RED, y las propiedades del electrodo. La salida de agua que sale de los

compartimentos de alta y baja salinidad se mezcla conjuntamente y se convierte en la salida de agua mezclada de la SGPU.

La capacidad de generación de energía de la unidad 120 de RED mejora a temperaturas más altas de agua debido a la mayor movilidad iónica y a la disminución de la resistencia en las cámaras de solución. El calor residual, tal como el subproducto de la generación de energía se puede utilizar ventajosamente para calentar la alimentación de baja salinidad y/o la alimentación de alta salinidad para aumentar la potencia de salida de la unidad 120 de RED y utilizar más plenamente los recursos energéticos existentes.

La Figura 6 representa una configuración en la que la salida de alta salinidad deshidratada se rehidrata en un hidratador 40 y el agua mezclada se descarga del hidratador 40 en una masa de agua de recepción. Esta configuración puede ser útil durante la construcción de la SGPU o cuando la SGPU no está en línea. En una realización, la alimentación de baja salinidad se utiliza para rehidratar la salida de alta salinidad deshidratada. En la realización preferida, esta alimentación de baja salinidad es el efluente secundario de una PTAR 50. Se contempla que en algunas realizaciones, se puede utilizar agua de río como la alimentación de baja salinidad. Además, se contempla que en algunas realizaciones, salmuera de alta salinidad, tal como la corriente de concentrado procedente de una desalinizadora de agua de mar, o agua de mar se puede utilizar para rehidratar la salida de alta salinidad deshidratada a través de la entrada de la salinidad alta auxiliar del hidratador 40. Además, se contempla en algunas realizaciones rehidratar la salida de alta salinidad deshidratada mediante una combinación de dos o más de los siguientes: agua de río, salmuera de alta salinidad, o agua de mar.

El caudal ajustable del agua en el hidratador 40, junto con el pH y la temperatura, se pueden utilizar para controlar el nivel de salinidad de la salida de alta salinidad rehidratada. Las salidas de alta salinidad que tienen diferentes composiciones se pueden mezclar con el fin de controlar las concentraciones de los iones individuales dentro de la salida de alta salinidad rehidratada. El nivel de salinidad requerido de la salida de agua mezclada varía dependiendo de la salinidad de la masa de agua en la que se vacía. En ciertos casos, puede ser deseable que la salinidad y la densidad del agua mezclada sean equivalentes a las de la masa de agua; en otros casos puede ser deseable que la salinidad y la densidad del agua mezclada sean menores que las de la masa de agua a fin de mantener una flotabilidad positiva. En otros casos puede ser deseable que la salinidad del agua mezclada no supere la salinidad de la masa de agua en más de un 3 %. Para realizaciones que utilizan el efluente secundario de una PTAR para la alimentación de baja salinidad, la adición de sal al efluente secundario aumentará su concentración y densidad, y puede hacer que la descarga sea más respetuosa con el medio ambiente.

30 **Ejemplo de cálculos**

La cantidad de energía generada a partir de un procedimiento de mezcla se puede estimar utilizando la teoría solución ideal, que se describe en cualquier número de libros de texto de química física. A los efectos de estos cálculos, el ejemplo específico de Post y col. es seguido (Post, Veerman, Hamelers, Euverink, Metz, Nymeijer, Buisman, "Salinity-Gradient Power: Evaluation of Pressure-Retarded Osmosis and Reverse Electrodialysis", *Revista de la Ciencia de Membranas*, volumen 228, páginas 218-230, 2007). La energía E libre disponible a partir de la mezcla de una solución concentrada con una solución diluida se toma de la ecuación 3 en esta referencia:

$$E = \sum_i (E_{i,c} + E_{i,d} - E_{i,m}) = \sum_i (c_{i,c} V_c RT \ln(x_{i,c}) + c_{i,d} V_d RT \ln(x_{i,d}) - c_{i,m} V_m RT \ln(x_{i,m}))$$

Los subíndices *c*, *d*, y *m* se refieren a las soluciones concentrada, diluida y mezclada, respectivamente. El subíndice *i* se refiere al número de componentes (dos en este caso: NaCl y agua). *V* es el volumen de la solución (por ejemplo, en m³), *c* es la concentración (mol/m³), y *x* es la fracción molar. Para la sal, la concentración de iones de sodio + cloruro es el doble de la concentración de NaCl. *R* es la constante de los gases, y *T* es la temperatura absoluta. Siguiendo a Post y col., la densidad empírica de soluciones de cloruro de sodio como una función de la concentración de sal a *T* = 293 K se utilizó (RC Weast, ed., Manual CRC de Química y Física, Edición 66ª (1985-1986), CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida páginas D-253-254.) para definir volúmenes de solución. La ecuación de energía libre anterior representa el comportamiento de las soluciones ideales; la comparación con los datos termodinámicos empíricos indica que los resultados predichos son solo aproximadamente demasiado en un 10 %, excepto en las concentraciones más altas de sal. En este punto, la aproximación de solución ideal subestima la energía de mezcla. (M.E. Guendouzi, A. Dinane, A. Mounir, "Water activities, osmotic and activity coefficients in aqueous chloride solutions at *T* = 298,15 K by the hygrometric method", *R. Quim. Termodinámica* 33 (2001) 1059-1072). El cambio en la energía libre es el derecho termodinámico del procedimiento; la cantidad real de energía recuperada por un dispositivo real dependerá de los detalles del diseño del sistema y del procedimiento, pero una eficacia del 50 % no es una suposición irrazonable a los efectos iniciales de estimación.

La Figura 7 muestra la energía del derecho termodinámico generada a partir de la mezcla de 1 m³/s de corriente de baja salinidad (concentración fija a 500 ppm) con una corriente de alta salinidad (15.000-160.000 ppm) para hacer el agua mezclada (10.000-48.000 ppm). Las relaciones de mezcla se varían según sea necesario. Dos tendencias generales se pueden observar a partir de estos datos. En primer lugar, la generación de energía siempre aumenta a medida que aumenta la concentración de sal en la corriente de alta salinidad. Esto se debe a que la energía de mezcla aumenta al aumentar la diferencia de concentración entre las corrientes de alta y baja salinidad. En segundo

lugar, las concentraciones más altas de la salida de agua mezclada por la SGPU dan como resultado mayor producción de energía por unidad de volumen de entrada de alimentación de baja salinidad.

La Figura 8 muestra la energía del derecho termodinámico generada por metro cúbico de agua total utilizada en el procedimiento, (igual al volumen de la corriente de agua mezclada,) como funciones de la concentración de la corriente de alta salinidad (15.000-160.000 ppm) y la corriente de agua mezclada (10000-48000 ppm), fijando la concentración de la corriente de baja salinidad en 500 ppm. Curiosamente, la energía producida en concentraciones moderadamente bajas de la corriente de alta salinidad (50,000-70,000 ppm) es casi independiente de la composición diana del corriente de salida del agua mezclada. A mayores concentraciones de corriente de alta salinidad, la cantidad de energía producida tiende de nuevo a una concentración de la corriente de salida de agua mezclada.

La Figura 9 muestra la energía del derecho termodinámico generada por tonelada métrica de sal presente en la corriente de alta salinidad en función de las concentraciones de la corriente de alta salinidad (15.000-160.000 ppm) y la corriente de agua mezclada (10,000-48,000 ppm), fijando la concentración de la corriente de baja salinidad en 500 ppm. Una vez más se observa la tendencia de que la cantidad de energía generada aumenta a medida que la aumenta la concentración en la corriente de alta salinidad. Por otro lado, la cantidad de energía extraída para una cantidad determinada de sal aumenta a medida que disminuye la salinidad diana de la corriente de salida de agua mezclada. Esto se debe a que la energía de mezcla continúa aumentando tras la dilución continuada de una corriente concentrada. Una mayor dilución da como resultado una mayor producción de energía, pero requiere más agua.

Las Figuras 7-9 tomadas en conjunto sugieren que existen dos estrategias generales de operación para una SGPU. La primera tiene como objetivo minimizar el uso, general, del agua estableciendo una alta concentración diana de la corriente de salida de agua mezclada. Esta será también la opción de bajo coste de capital debido a que la diferencia entre la concentración de corrientes de alta y de baja salinidad (y la fuerza motriz para la mezcla) se maximiza durante todo el procedimiento. Altas fuerzas de accionamiento dan como resultado una mayor producción de energía por unidad de área de la membrana. La segunda estrategia operativa pretende extraer tanta energía como sea posible a partir de la sal en la corriente de alta salinidad, al permitir que proceda la dilución en la medida de lo posible. Preferentemente, la concentración de agua mezclada debe ser mayor que 5000 ppm. Esta estrategia maximiza la cantidad de energía generada a partir de una cantidad limitada de sal, pero el coste de capital y el tamaño del sistema será mayor debido a que se permite, necesariamente, el declive de la fuerza motriz para la mezcla. En ambas estrategias, el aumento de la concentración de la corriente de alta salinidad tan alto como sea posible es beneficioso en principio.

La Figura 10 muestra la energía del derecho termodinámico generada a partir de la mezcla de 1 m³/s de corriente de baja salinidad (500-32.000 ppm) con una corriente de alta salinidad (15,000-96,000 ppm) para hacer el agua mezclada (10000-48000 ppm), donde la relación de mezcla del volumen de corriente de alta salinidad/volumen de corriente de baja salinidad se establece en 1. En contraste con los cálculos que se muestran en las Figuras 7-9, la concentración de la corriente de baja salinidad se varía, pasando de 500 a 32.000 ppm. La cantidad de energía disminuye a medida que aumenta la salinidad de la corriente de baja salinidad, ya que esto reduce la diferencia de concentración entre las corrientes de alta y baja salinidad. Para el intervalo de salinidades en corrientes de aguas residuales municipales convencionales (500-2000 ppm), el efecto no es muy grande, pero si la concentración de la corriente de baja salinidad aumenta demasiado (> 10.000 ppm), la productividad disminuye significativamente. El uso de agua de mar (32,000 ppm) para la corriente diluida es poco probable que sea viable en cualquier situación. (Preferentemente, la relación entre las corrientes de baja salinidad y alta salinidad debe ser superior a 5:1).

La salinidad normal de las aguas residuales municipales varía de 500-2000 ppm, en comparación con la salinidad del océano de 30.000-50.000 ppm. La capacidad de las descargas de aguas residuales municipales para absorber la sal es inmensa. Una descarga de aguas residuales hipotética de un millón de metros cúbicos por día a una concentración de sal de 500 ppm en el agua de mar con una concentración de 30.000 ppm requeriría 29.500 toneladas/día de sal para una "neutralización" total. Continuando con el ejemplo de desalinización tierra adentro de la introducción, (100.000 m³/día, 2.000 ppm de concentración de sal en agua salobre, 200 toneladas de sal/día producidos a partir de ZLD), parecería que las descargas de la planta municipal de tratamiento de aguas residuales en las regiones costeras podrían absorber cualquier cantidad razonable de subproductos de sal de los procedimientos de desalinización tierra adentro.

Ejemplos

Ejemplo comparativo 1

Los cálculos descritos anteriormente se pueden ampliar para evaluar escenarios prácticos. Por ejemplo, como se representa en la Figura 3a, teniendo en cuenta la localización de la SGPU en el sitio de una gran planta de tratamiento de aguas residuales al lado del océano. Supóngase que el volumen de la corriente de agua residual tratada es de 1 millón de metros cúbicos por día y la concentración de sal es de 500 ppm. Una porción de esta corriente se utiliza para compensar la corriente de baja salinidad, y la otra porción se utiliza para rehidratar la sal enviada desde operaciones de desalinización de ZLD tierra adentro (sal que se supone completamente seca por simplicidad), de manera que la concentración de la corriente de alta salinidad es de 150.000 ppm. Se consideran

tres escenarios que establecen diferentes concentraciones de la corriente de salida de agua mezclada: 10.000, 32.000, y 48.000 ppm. En el caso donde la corriente de salida de agua mezclada es 48.000 ppm, una porción de la corriente de baja salinidad se dirige alrededor de la SGPU para diluirla a la concentración de agua de mar (se supone que es 32.000 ppm). Los resultados se proporcionan en la Tabla 1.

5 **Tabla 1**

Concentración de corriente de salida de agua mezclada (ppm)	Volumen de corriente de alta salinidad (m ³ /d)	Masa de sal de ZLD necesaria (t/d)	Energía del derecho termodinámico producida (MW)	Eficacia del procedimiento asumida	Energía producida (MW)
10.000	63.545	9.500	24	50 %	12
32.000	210.702	31.500	46	50 %	23
48.000	210.702	31.500	34	50 %	17

Ejemplo comparativo 2

10 Como se representa en la Figura 3e, se supone un millón de metros cúbicos por día de corriente de agua residual como la corriente de baja salinidad, con una concentración de sal de 500 ppm. El agua de mar (32.000 ppm) se utiliza para rehidratar la sal de ZLD a 150.000 ppm. Se consideran tres escenarios que establecen diferentes concentraciones de la corriente de salida de agua mezclada: 10.000, 32.000, y 48.000 ppm. En el caso de 48.000 ppm en la corriente de salida de agua mezclada, una porción de la corriente de baja salinidad se dirige alrededor de la SGPU para diluirla a la concentración de agua de mar. Los resultados se proporcionan en la Tabla 2.

Tabla 2

Concentración de corriente de salida de agua mezclada (ppm)	Volumen de corriente de alta salinidad (m ³ /d)	Masa de sal de ZLD necesaria (t/d)	Energía del derecho termodinámico producida (MW)	Eficacia del procedimiento asumida	Energía producida (MW)
10.000	67.857	8.007	25	50 %	13
32.000	266.949	31.500	58	50 %	29
48.000	266.949	31.500	43	50 %	22

15

Ejemplo comparativo 3

20 Como se representa en la Figura 3d, se supone un millón de metros cúbicos por día de corriente de agua residual como la corriente de baja salinidad, con una concentración de sal de 500 ppm. Se utiliza un concentrado procedente de la desalinizadora de agua de mar (64.000 ppm) para rehidratar la sal de ZLD a 150.000 ppm. Se consideran tres escenarios que establecen diferentes concentraciones de la corriente de salida de agua mezclada: 10.000, 32.000, y 48.000 ppm. En el caso de 48.000 ppm en la corriente de salida de agua mezclada, una porción de la corriente de baja salinidad se dirige alrededor de la SGPU para diluirla a la concentración de agua de mar (32.000 ppm). Los resultados se proporcionan en la Tabla 3.

Tabla 3

Concentración de corriente de salida de agua mezclada (ppm)	Volumen de corriente de alta salinidad (m ³ /d)	Masa de sal de ZLD necesaria (t/d)	Energía del derecho termodinámico producida (MW)	Eficacia del procedimiento asumida	Energía producida (MW)
10.000	67.857	5.836	25	50 %	13
32.000	266.949	22.957	58	50 %	29
48.000	266.949	22.957	43	50 %	22

25 Hay varias ventajas de un enfoque amplio e integrado para la gestión de recursos de agua como se describe en la presente invención. Los beneficios concretos para una instalación de desalinización tierra adentro son evitar los

5 costes de los vertederos y el paso a un procedimiento sostenible donde la sal se elimina por completo del medio local. Esto se puede conseguir mediante el procedimiento descrito en la presente invención sin la complejidad y los costes asociados con la eliminación de sal selectiva. Las sales mezcladas funcionan igualmente bien como especie pura para la generación de energía. Además, la demanda de energía es esencialmente infinita, en contraste con el mercado para las sales puras. El beneficio concreto de plantas de tratamiento de aguas residuales y comunidades costeras es una fuente adicional de energía limpia (que no va a contribuir a las emisiones de dióxido de carbono), con el beneficio añadido de potencialmente una mayor compatibilidad de los efluentes de agua mezclada final con el agua de mar debido a su salinidad y densidad más compatible. "Neutralizar" las aguas residuales de baja salinidad con sal de ZLD no conlleva un tratamiento pesada ni/o costes de infraestructura de distribución a menudo asociados con los proyectos de reciclaje de aguas residuales, y no va a plantear cuestiones públicas asociadas a la reutilización potable indirecta. Además, la presente invención elimina una de las principales barreras para la implementación comercial de la energía por salinidad mediante el uso de sal de ZLD para aumentar la concentración de la corriente concentrada a un potencial de muchas veces la concentración de agua de mar (hasta 150.000-300.000 ppm o más). Esto aumenta en gran medida la fuerza motriz para la generación de energía, contrayendo el área de membrana y el coste de capital. Un enfoque que equilibra la desalinización tierra adentro, la generación de energía por salinidad, la conservación del agua, y el reciclaje de aguas residuales es maximizar los recursos de agua y energía valiosos de un país o región.

20 Aunque la presente invención se ha descrito junto con las realizaciones específicas descritas anteriormente, es evidente que muchas alternativas, combinaciones, modificaciones y variaciones son evidentes para los expertos en la materia. Por consiguiente, las realizaciones preferidas de la presente invención, como se expone anteriormente pretenden ser ilustrativas, y no en un sentido limitativo.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un sistema que comprende una desalinizadora (20, 30) con descarga nula de líquidos y una planta de generación de energía, comprendiendo la planta de generación de energía una unidad (60) de energía de gradiente salino con una alimentación de alta salinidad, una alimentación de baja salinidad, y una salida de agua mezclada; comprendiendo dicha alimentación de alta salinidad una salida de alta salinidad rehidratada de la desalinizadora (20,30) con descarga nula de líquidos; dicha salida de agua mezclada se dirige a una masa de agua.
2. El sistema de la reivindicación 1, en el que la salinidad de la salida de agua mezclada no supera la salinidad de la masa de agua en más de un 3 %.
- 10 3. El sistema de la reivindicación 1, en el que la salinidad y la densidad de la salida de agua mezclada es menor que la salinidad y la densidad de la masa de agua.
4. El sistema de la reivindicación 1, en el que la alimentación de baja salinidad está comprendida del efluente secundario de una planta (50) de tratamiento de aguas residuales.
5. El sistema de la reivindicación 1, en el que la alimentación de baja salinidad está comprendida de agua de río de un estuario.
- 15 6. El sistema de la reivindicación 1, en el que el efluente secundario de una planta (50) de tratamiento de aguas residuales se utiliza para rehidratar la salida de alta salinidad.
7. El sistema de la reivindicación 1, en el que el agua de río de un estuario se utiliza para rehidratar la salida de alta salinidad.
8. El sistema de la reivindicación 1, en el que el agua de mar se utiliza para rehidratar la salida de alta salinidad.
- 20 9. El sistema de la reivindicación 1, en el que la corriente de concentrado de una desalinizadora se utiliza para rehidratar la salida de alta salinidad.
10. El sistema de la reivindicación 1, en el que dicha unidad de energía de gradiente salino comprende además una unidad (70) de electrodiálisis inversa.
- 25 11. El sistema de la reivindicación 1, en el que dicha unidad de energía de gradiente salino comprende además una unidad (120) de ósmosis por presión retardada.
12. El sistema de la reivindicación 1, en el que dicha salida de agua mezclada se combina con dicha alimentación de baja salinidad antes de entrar en dicha masa de agua.
13. Un procedimiento de producción de energía que comprende las etapas de:
 - 30 proporcionar una unidad (60) de energía de gradiente salino;
 - proporcionar una salida de alta salinidad deshidratada a partir de una desalinizadora (20,30) con descarga nula de líquidos;
 - proporcionar un efluente secundario de una planta (50) de tratamiento de aguas residuales;
 - rehidratar (40) dicha salida de alta salinidad deshidratada;
 - 35 alimentar dicha unidad (60) de energía de gradiente salino con dicha salida de alta salinidad rehidrata como una alimentación de alta salinidad;
 - alimentar dicha unidad de potencia gradiente salino con dicho efluente secundario de una planta (50) de tratamiento de aguas residuales como una alimentación de baja salinidad;
 - generar una corriente eléctrica en dicha unidad (60) de energía de gradiente salino;
 - 40 producir una salida de agua mezclada que se dirige a una masa de agua, no excediendo la salinidad de dicha salida de agua mezclada la salinidad de dicha masa de agua en más de un 3 %.
- 14 El procedimiento de la reivindicación 13, en el que las temperaturas de dichas alimentaciones de alta salinidad y de baja salinidad se incrementan.
15. Un procedimiento de evacuación con descarga nula de líquidos que comprende las etapas de:
 - 45 proporcionar una salida de alta salinidad deshidratada a partir de una desalinizadora (20,30) con descarga nula de líquidos;
 - proporcionar una alimentación de baja salinidad;
 - rehidratar (40) dicha salida de alta salinidad deshidratada;
 - producir (60) una salida de agua mezclada que comprende dicha alimentación de baja salinidad y la salida de alta salinidad rehidratada; y
 - 50 dirigir dicha salida de agua mezclada en una masa de agua, no excediendo la salinidad de dicha salida de agua mezclada la salinidad de dicha masa de agua en más de un 3 %.

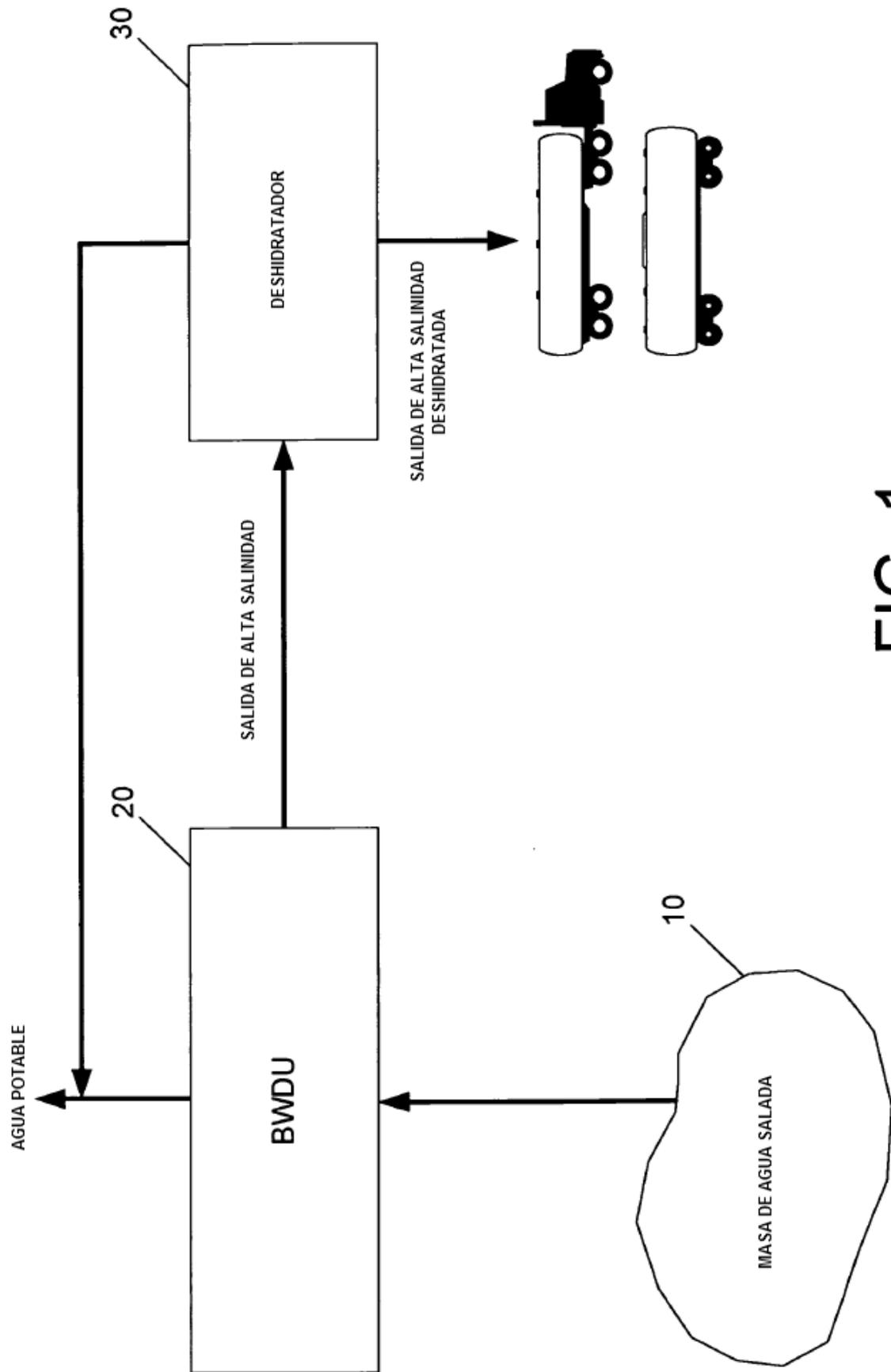


FIG. 1

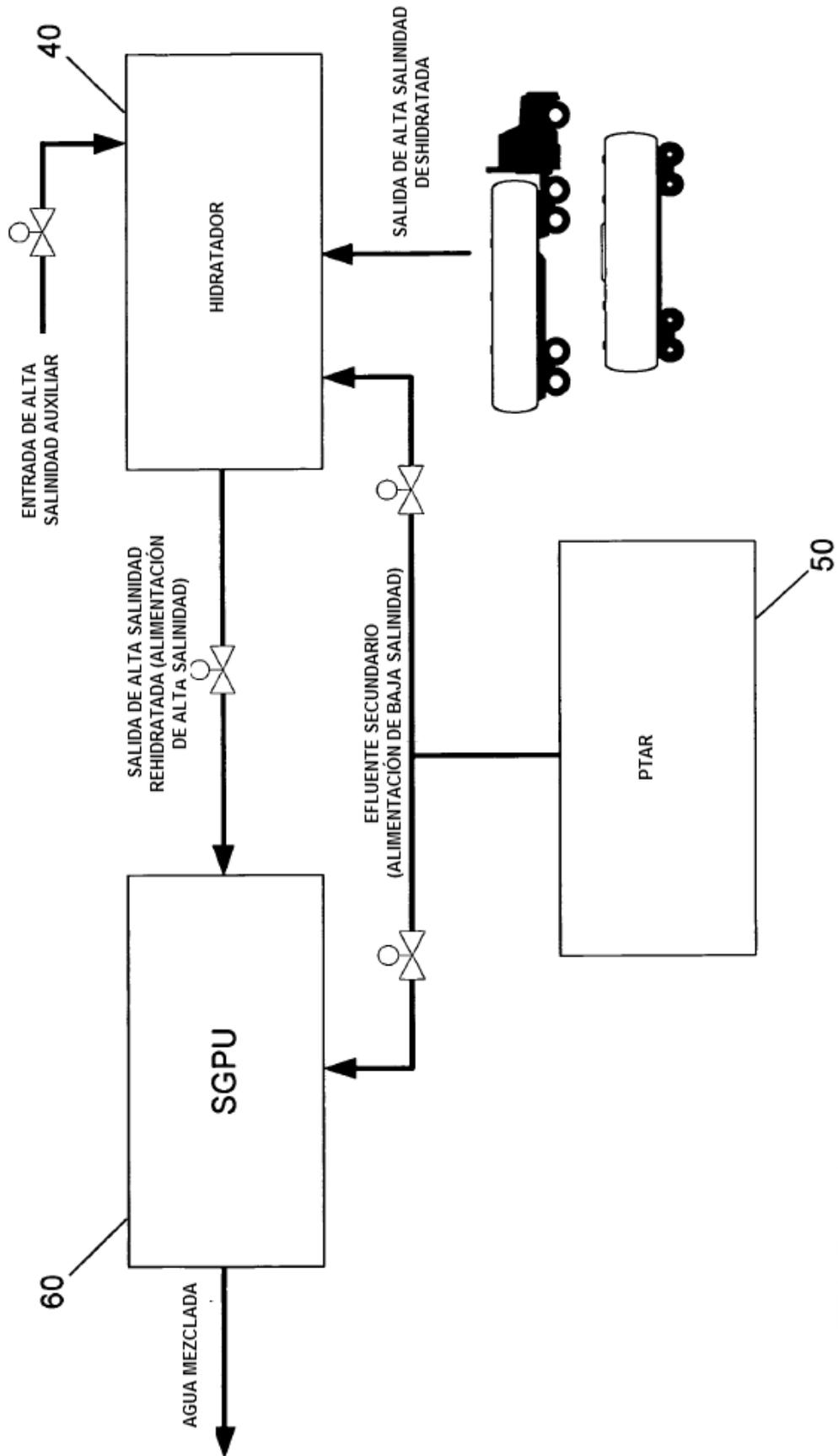


FIG. 2

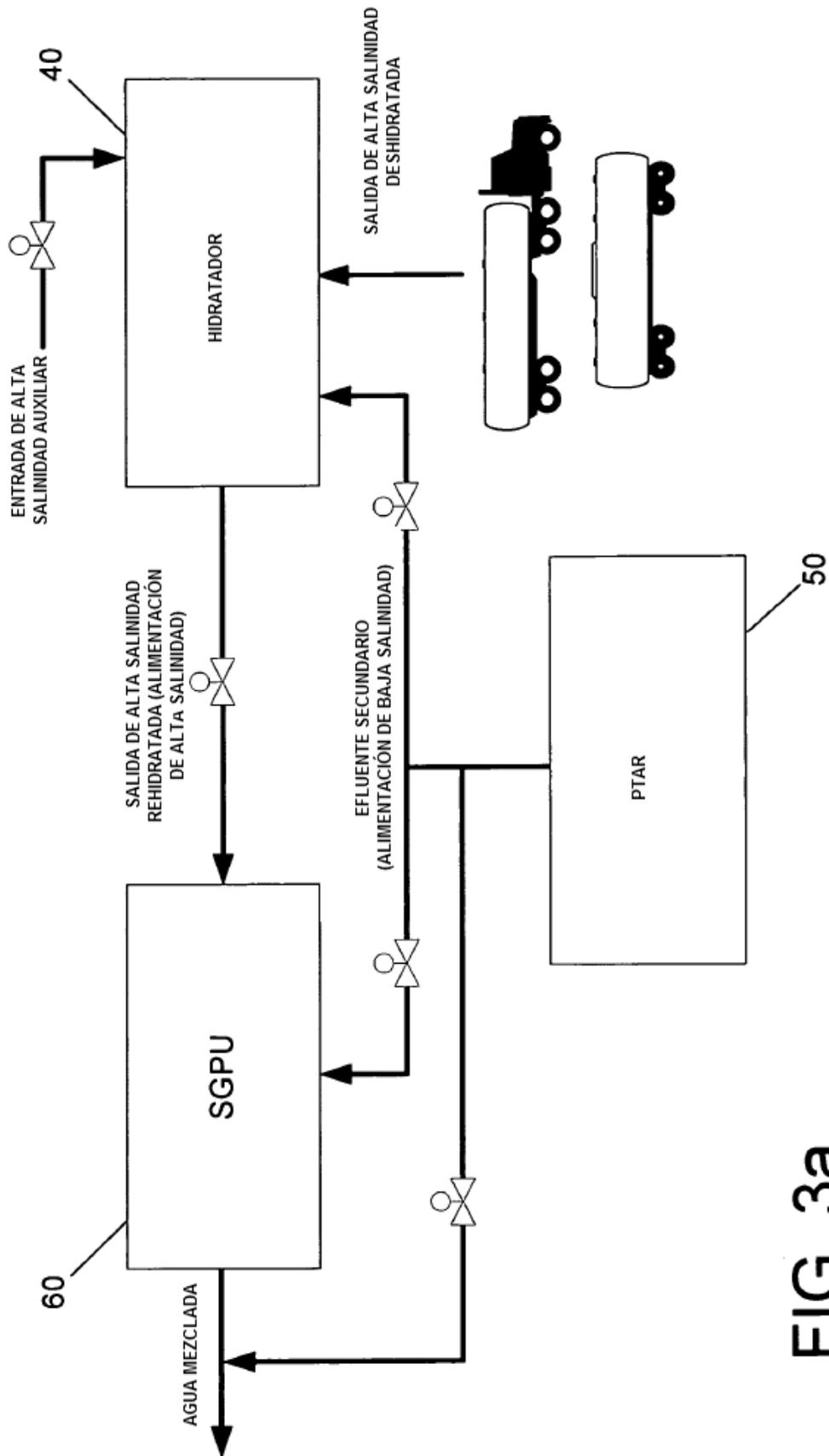


FIG. 3a

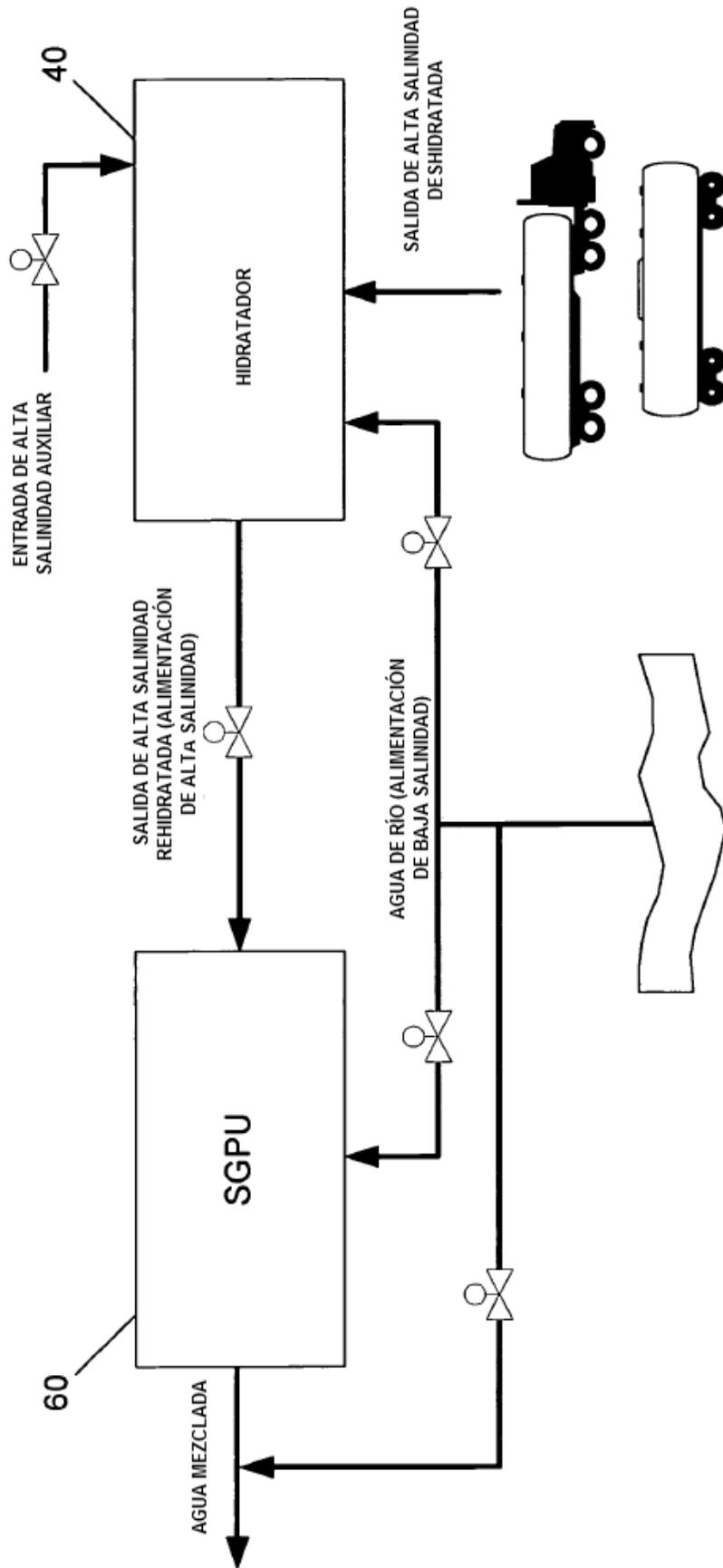


FIG. 3b

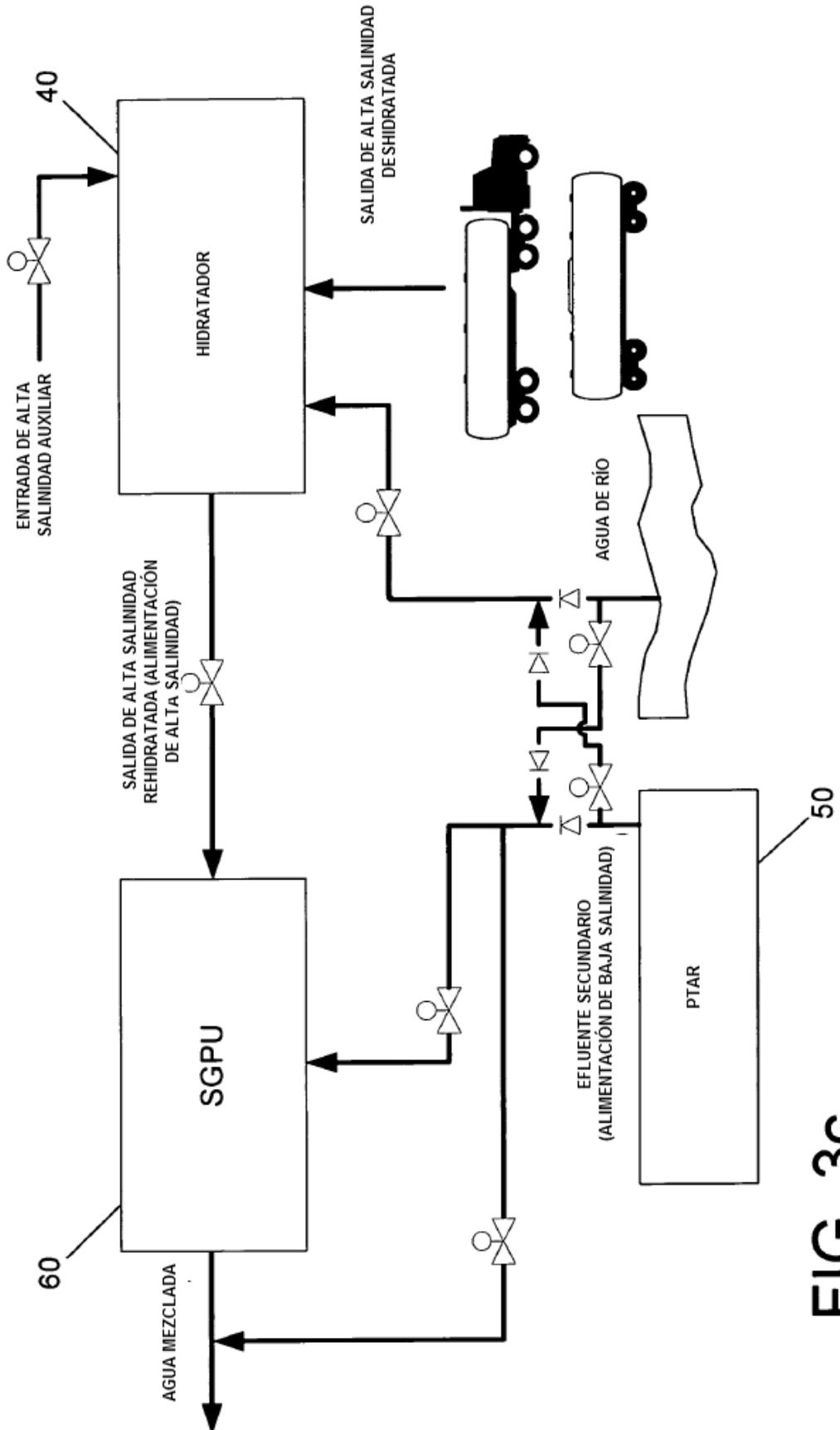


FIG. 3C

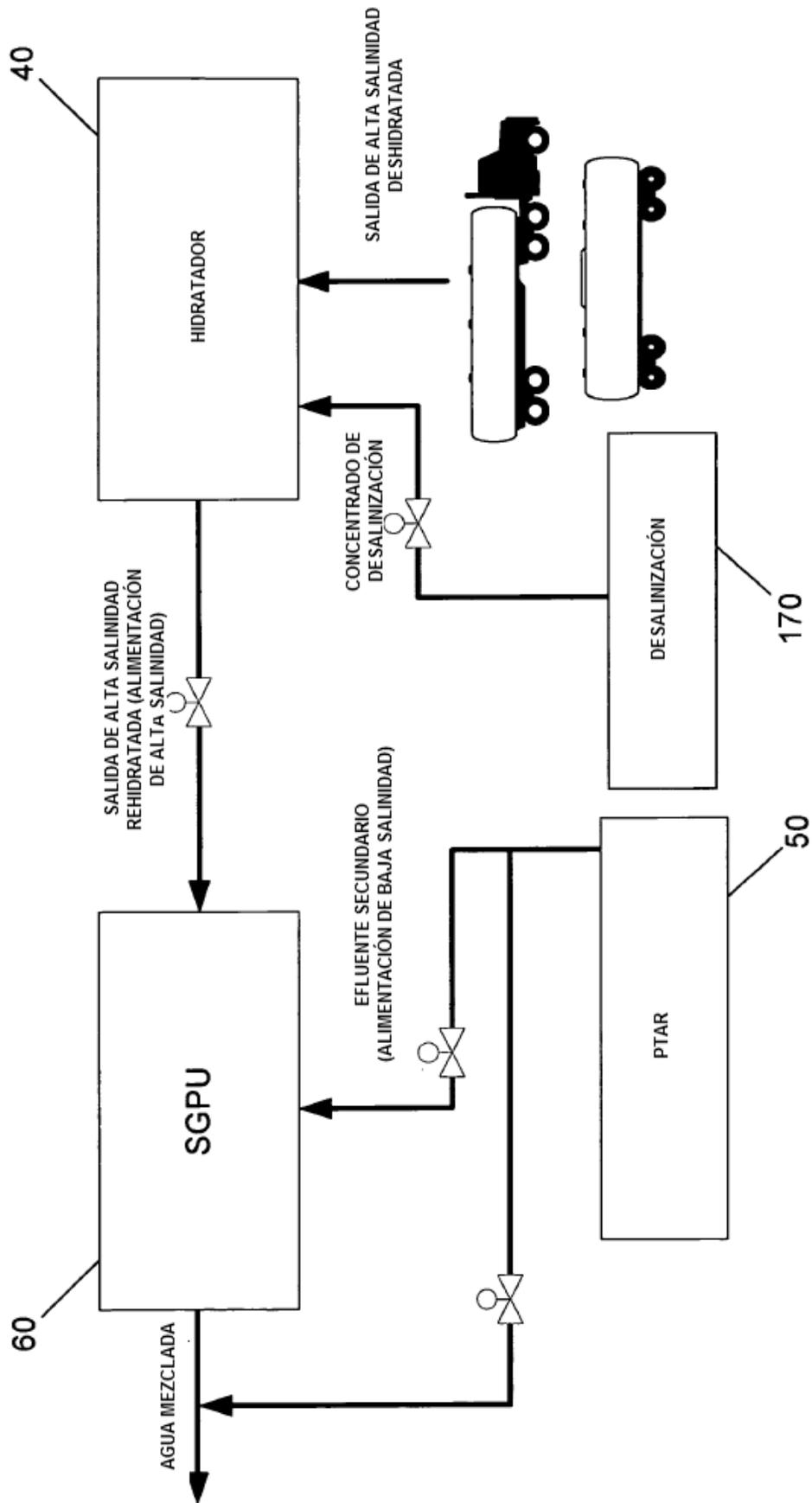


FIG. 3d

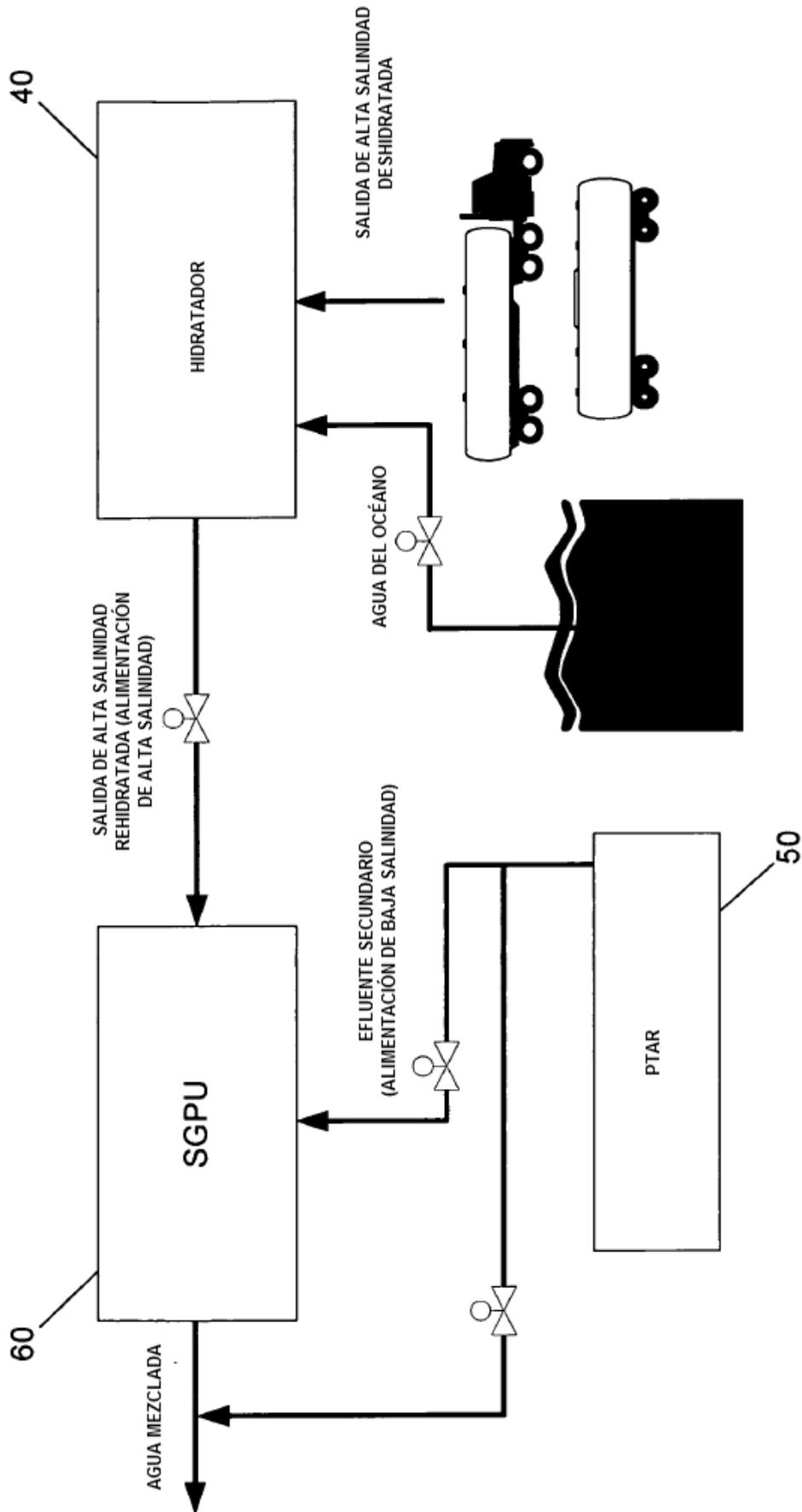


FIG. 3e

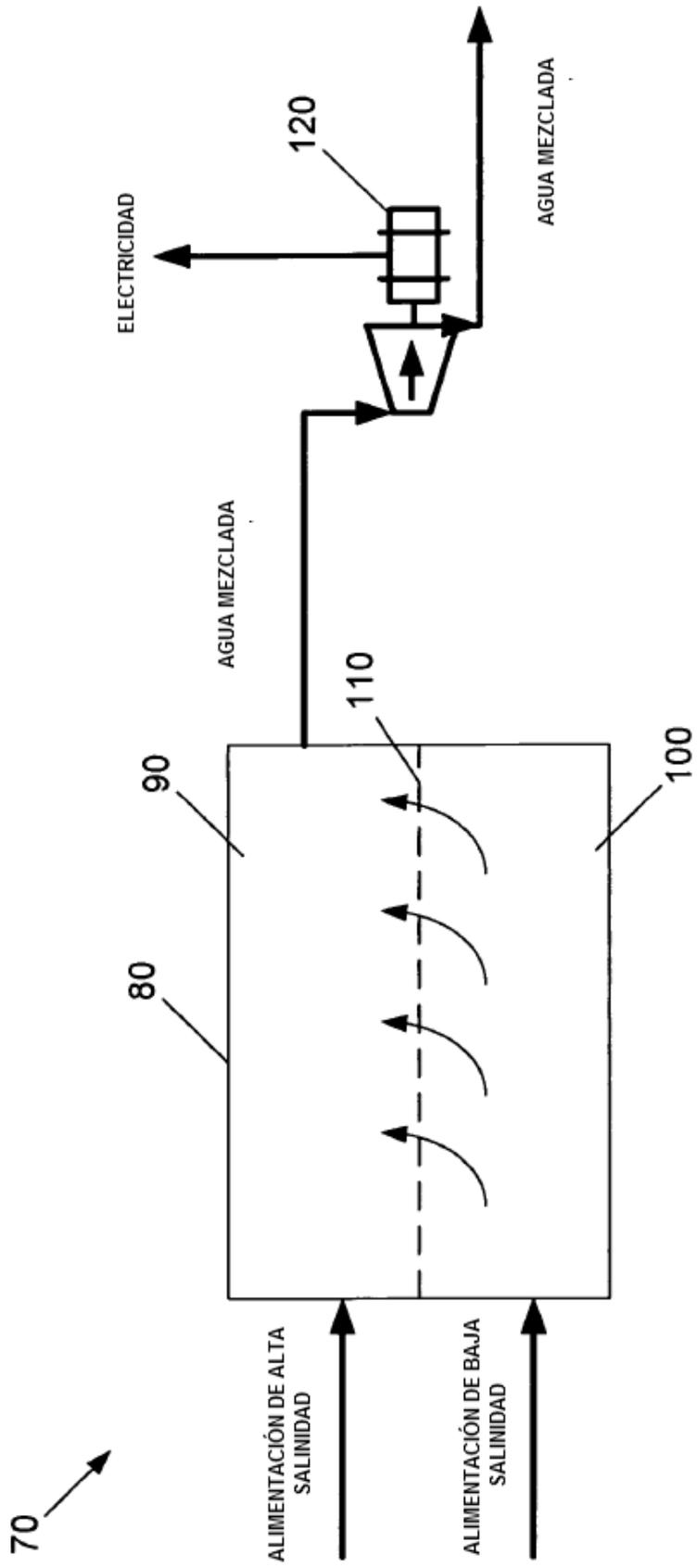


FIG. 4

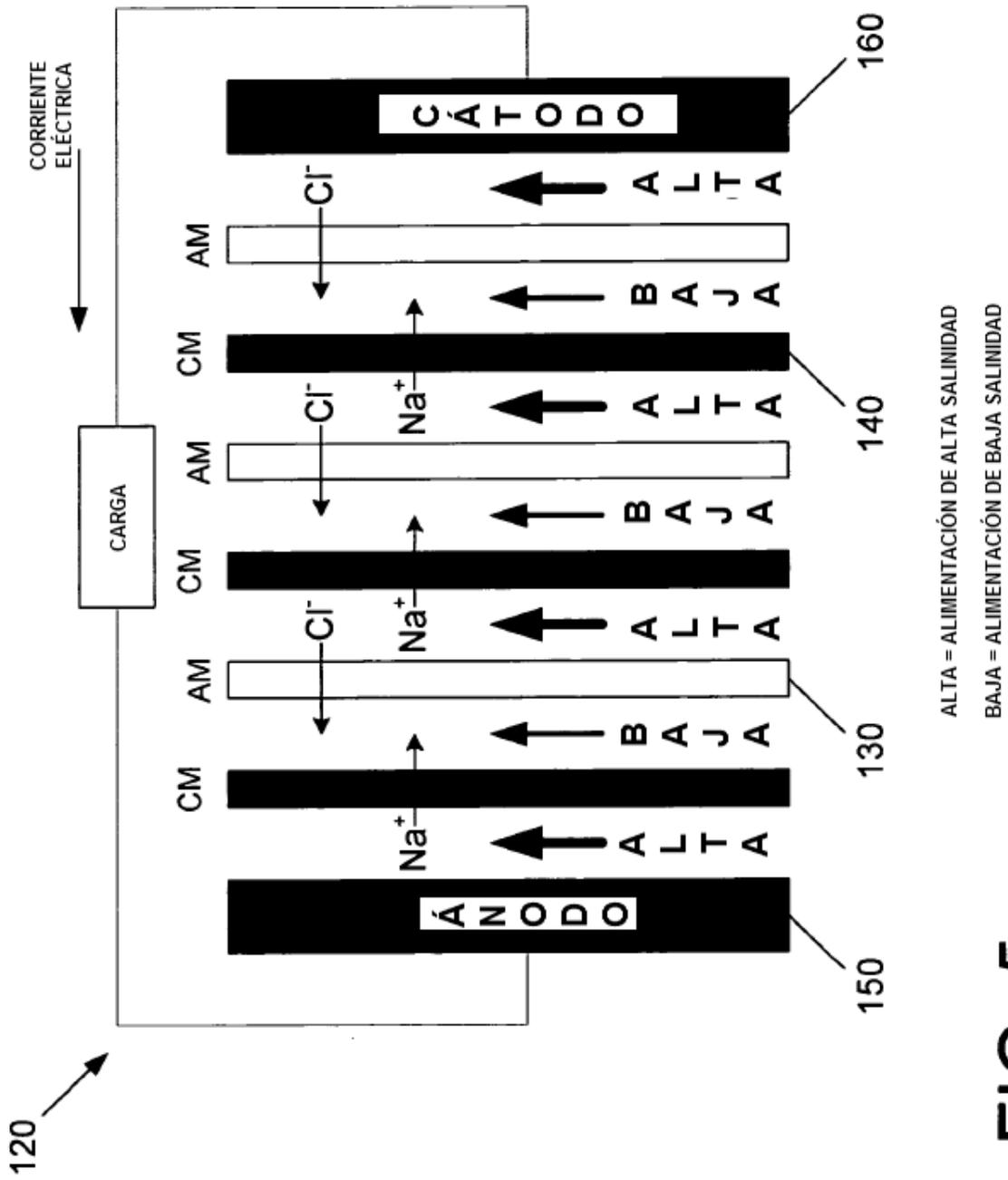


FIG. 5

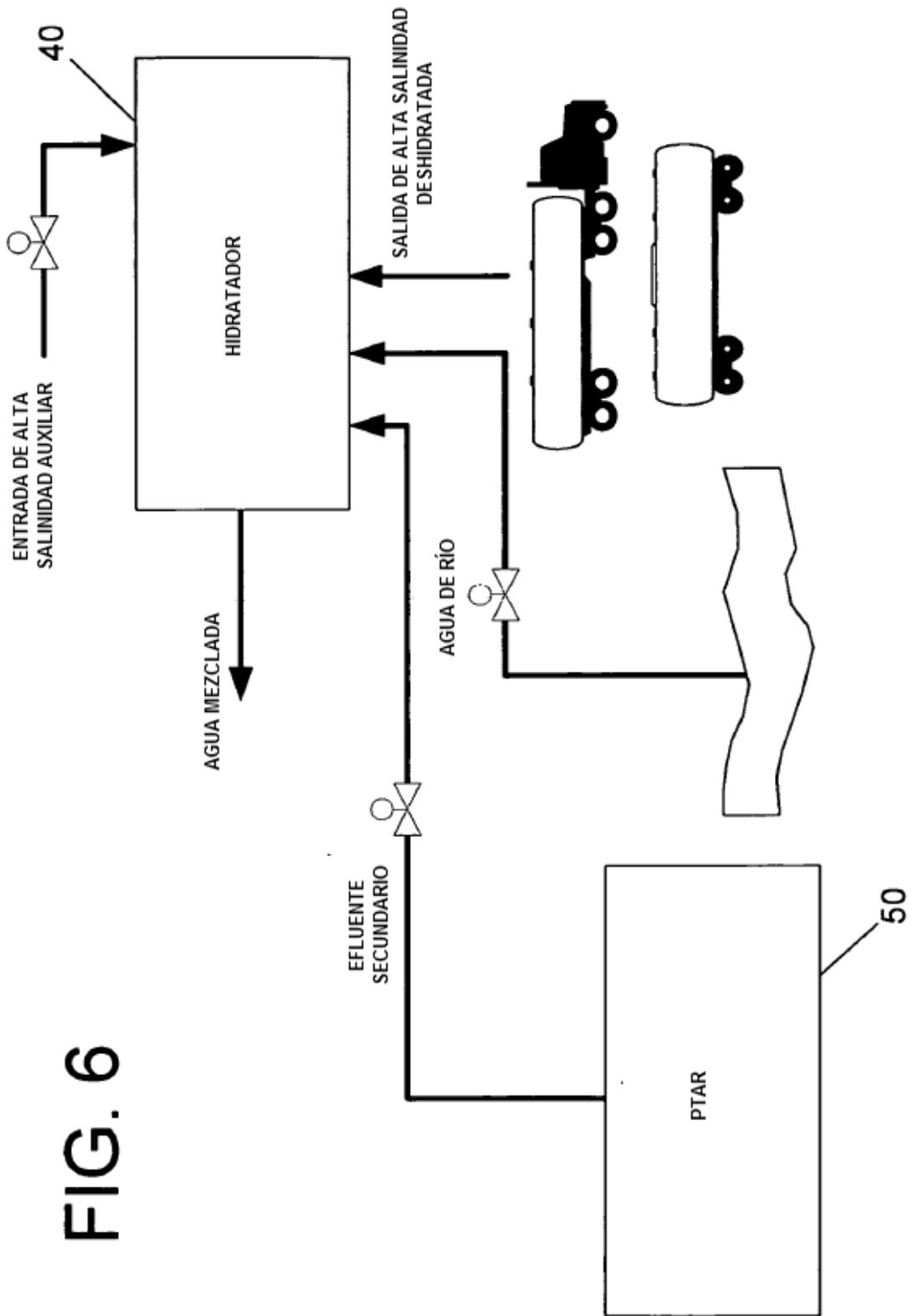


FIG. 6

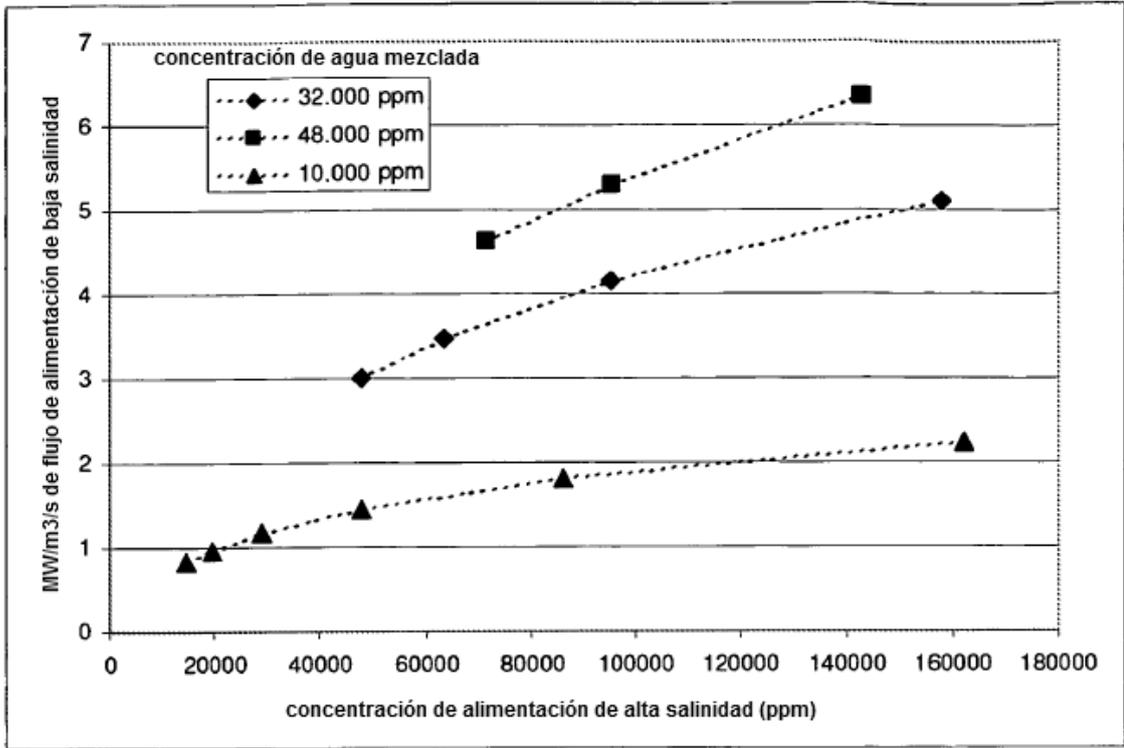


FIG. 7

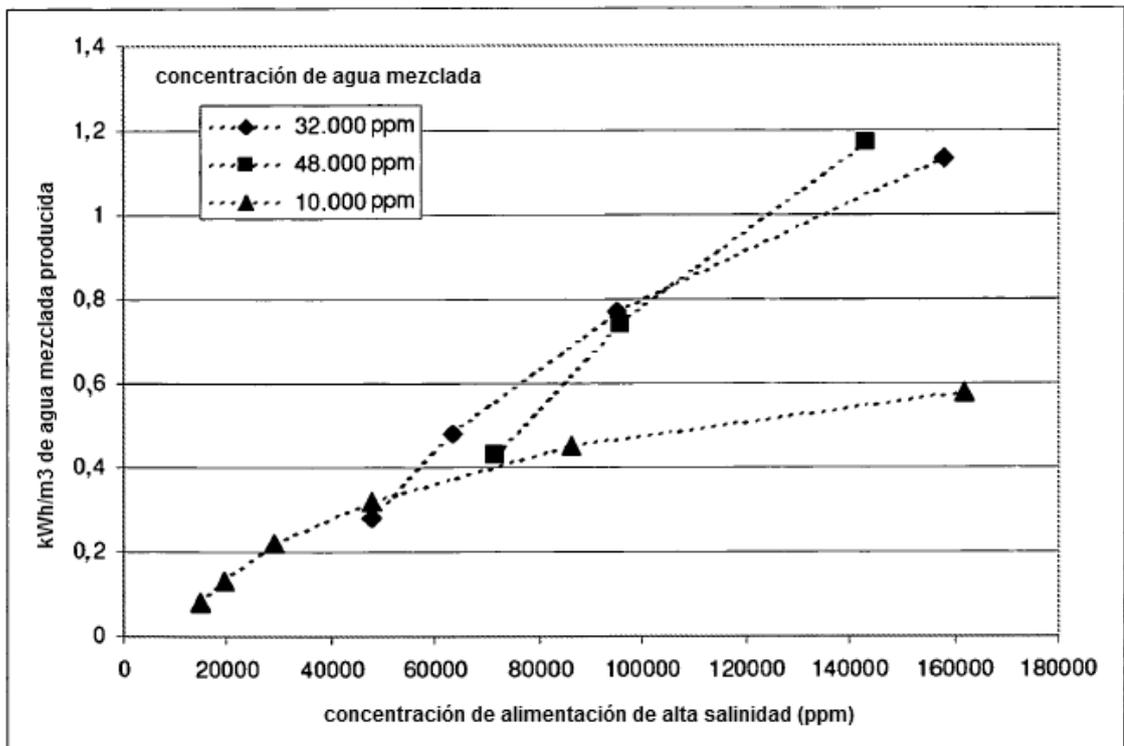


FIG. 8

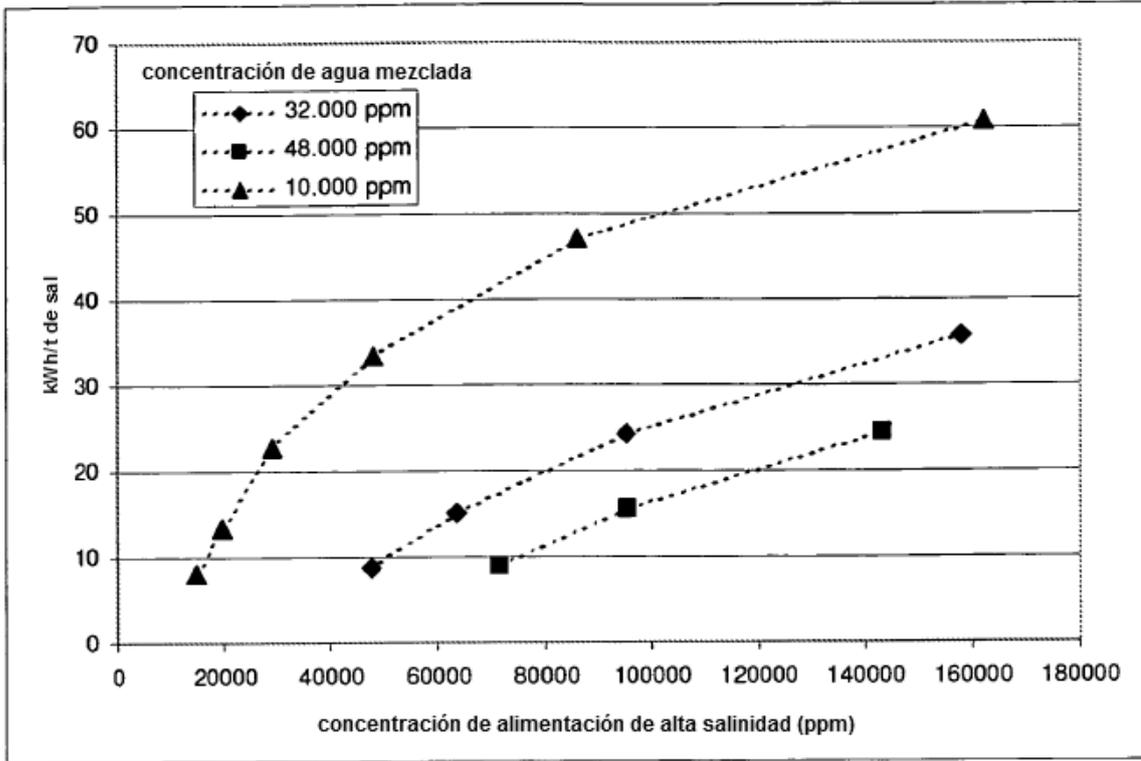


FIG. 9

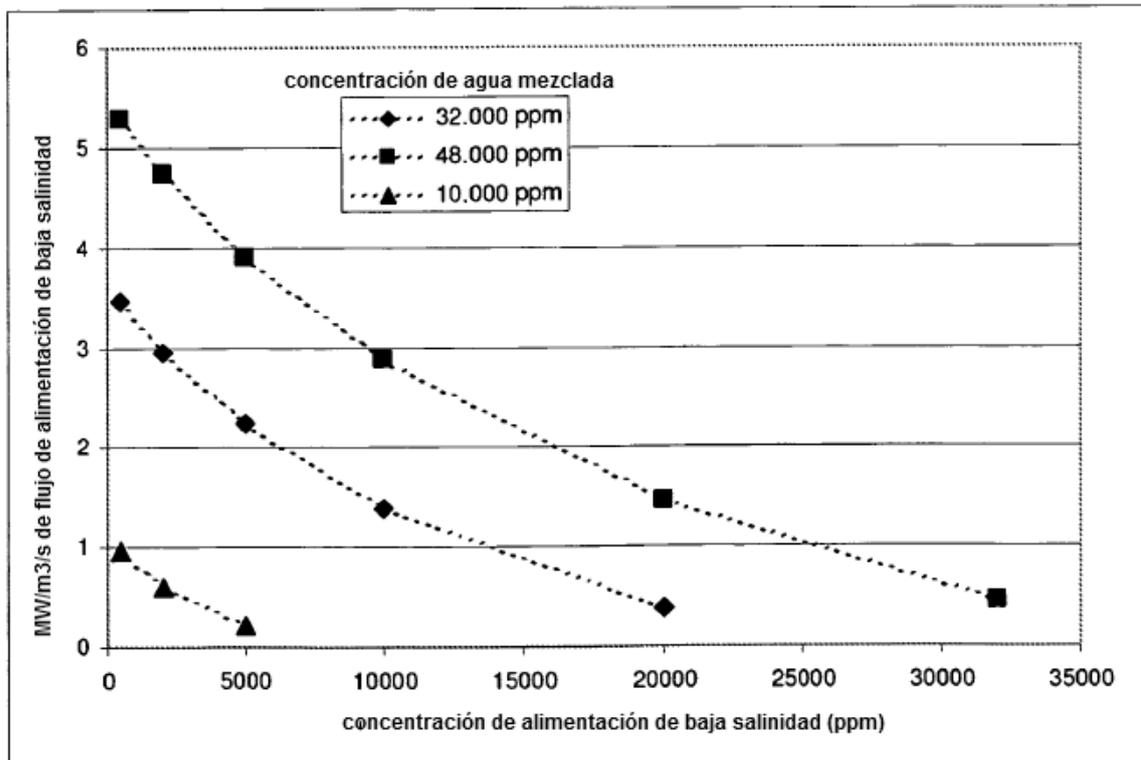


FIG. 10