

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 654 900**

51 Int. Cl.:

B01D 61/06	(2006.01)
B01D 61/12	(2006.01)
C02F 1/00	(2006.01)
C02F 1/44	(2006.01)
G05B 13/04	(2006.01)
B01D 61/16	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.07.2009 PCT/FR2009/000873**

87 Fecha y número de publicación internacional: **28.01.2010 WO10010243**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.07.2009 E 09800112 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.10.2017 EP 2315622**

54 Título: **Planta de desalación de agua por ósmosis inversa**

30 Prioridad:

21.07.2008 FR 0804140

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

15.02.2018

73 Titular/es:

**SUEZ INTERNATIONAL (100.0%)
16 Place de l'Iris - Tour CB 21
92040 Paris la Défense Cedex , FR**

72 Inventor/es:

**BONNELYE, VÉRONIQUE y
FIEVEZ, ERIC**

74 Agente/Representante:

ILLESCAS TABOADA, Manuel

ES 2 654 900 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

Planta de desalación de agua por ósmosis inversa

- 5 La invención se refiere a una planta de desalación de agua por ósmosis inversa, del tipo de las que incluyen:
- una unidad de membrana de ósmosis inversa,
 - al menos una bomba de alta presión para presurizar al menos una primera parte del agua a tratar a una presión superior a su presión osmótica y enviarla a la entrada de la unidad de membrana,
- 10 - un medio de regulación del caudal de la bomba de alta presión, comprendiendo este medio una válvula regulable instalada en la salida de la bomba de alta presión y/o un motor impulsor de la bomba de velocidad variable,
- un recuperador de energía del tipo de intercambio de presión adecuado para transferir la presión del concentrado que sale de la unidad de membrana a una segunda parte del agua a tratar, donde este recuperador comprende:
- 15 - una primera entrada que recibe la segunda parte del agua a tratar,
- una segunda entrada que recibe el concentrado,
 - una primera salida que suministra a una entrada de la unidad de membrana una mezcla entre una primera parte del concentrado y la segunda parte del agua a tratar,
- 20 - una segunda salida que suministra una segunda parte del concentrado, y un medio de regulación de la tasa de mezcla entre la primera parte del concentrado y la segunda parte del agua a tratar, y una válvula de control regulable (VC) instalada en la segunda salida del recuperador que permite regular la tasa de conversión,
- sensores de diferentes parámetros de funcionamiento, en particular la presión, caudal, temperatura, índice de salinidad, previstos en lugares adecuados,
 - y circuitos de regulación para que el medio de regulación de caudal de la bomba de alta presión, el medio de regulación de la tasa de mezcla entre la primera parte del concentrado y la segunda parte del agua a tratar, y la válvula de control regulable (VC) se mantengan a un valor de referencia.
- 25
- 30 En una planta de desalación de agua por ósmosis inversa, el consumo energético de las bombas de alta presión representa aproximadamente las dos terceras partes del consumo energético y aproximadamente un 20% del coste de explotación.
- 35 La desalación por ósmosis inversa utiliza la presurización del líquido salado más allá de su presión osmótica para permitir la permeación del agua sola (sin las sales disueltas) a través de una membrana semipermeable. El compartimento salado se concentra en sal. El compartimento de filtrado se alimenta con agua desprovista de la mayoría de sus sales. La membrana semipermeable se caracteriza por su rechazo a sales (o paso de sal expresado en %) y por su permeabilidad al agua definida a una temperatura determinada, generalmente a 25°C. El sistema, alimentado continuamente con agua salada, habitualmente agua de mar, permite recoger en continuo agua dulce
- 40 desprovista de sus sales por el lado del filtrado de la membrana, y una solución concentrada en el lado del concentrado de la membrana.
- 45 La tasa de conversión se define como la relación entre el caudal de filtrado y el caudal total de alimentación de la membrana, y permite caracterizar el funcionamiento hidráulico de la planta.
- La membrana de ósmosis inversa se pone en marcha en módulos de tipo espiral o capilares o tubulares, estando los módulos incluidos en tubos presurizados, en paralelo, y en montaje en serie-rechazo. El agua de alimentación se alimenta a presión mediante una bomba de alta presión, o un medio equivalente.
- 50 Los principales parámetros de funcionamiento se miden mediante sensores de caudal, presión, conductividad, temperatura. Se refieren al agua pretratada que alimenta la planta, al filtrado y al concentrado a la salida de la planta.
- 55 Los sistemas recuperadores de energía se utilizan para recuperar la energía aún presente en el concentrado a la salida de las membranas de ósmosis inversa. Los recuperadores de energía pueden ser de tipo hidráulico o de desplazamiento positivo. Se habla típicamente de una turbina Pelton o Francis, acoplada directa o indirectamente a la bomba de alimentación, o de sistemas de desplazamiento positivo de tipo ERI PX, o Calder DWEER o KSB, u otros sistemas similares. En estos últimos casos, el concentrado presurizado transfiere su presión a una parte del agua de alimentación por contacto directo o indirecto.
- 60 El conocimiento del balance energético del proceso permite seleccionar los equipos y dimensionar las instalaciones teniendo en cuenta el parámetro de energía. Este dimensionamiento se basa en hipótesis relativas a la salinidad, temperatura y condiciones hidráulicas previstas en el momento de construcción de la planta y durante su funcionamiento. Tras la construcción de las instalaciones, los parámetros de entrada varían de forma incontrolada, lo que requiere la instalación de circuitos de regulación para mantener el sistema estable. Estos circuitos de regulación
- 65 tienen el fin de:

- regular el caudal de filtrado: a fin de compensar las fluctuaciones de temperatura, salinidad, envejecimiento y colmatación de las membranas de ósmosis inversa, una regulación del caudal permite corregir la presión aplicada a la entrada de la membrana, aumentando o disminuyendo la presión eficaz para mantener un valor de referencia para el caudal de filtrado,
- 5 - regular la tasa de conversión del sistema: para mantener la tasa de conversión en un valor de referencia, los caudales de alimentación de agua a tratar, así como del filtrado (y/o del concentrado) se miden, se calcula la conversión, y se ajusta el caudal de concentrado mediante la válvula regulable prevista a la salida del recuperador de energía;
- 10 - regular el recuperador de energía. Los recuperadores de energía se regulan de forma que se controla, generalmente mediante una bomba de presurización, el paso del concentrado y del agua pretratada en las condiciones de caudal de acuerdo con las referencias.

15 Las referencias introducidas sobre la base de las hipótesis de salinidad, temperatura y condiciones hidráulicas, están previstas, principalmente, para permitir cumplir las condiciones garantizadas de volumen de producción y calidad del agua producida, sin tener en cuenta el consumo energético.

20 El documento WO 02/09855 A1 describe un sistema de desalación de agua por ósmosis inversa que comprende dos cámaras de membrana, la energía del concentrado procedente de la segunda cámara de membrana se utiliza para aumentar la presión del concentrado a la salida de la primera cámara de membrana e inyectado a la entrada de la segunda cámara de membrana. Esta recuperación de energía se realiza mediante un turbocompresor. En este sistema, la energía también se recupera mediante una turbina de impulsión.

25 El documento WO 2006/106158 A describe un sistema de desalación de agua que comprende un recuperador de energía que permite transferir la presión del concentrado a una parte del agua a tratar.

El documento US 2004/109788 A1 describe un sistema de producción de agua estéril que puede utilizar un dispositivo de ósmosis inversa.

30 El documento US 2004173528 A1 se refiere a un sistema de filtración de membrana que comprende un recuperador de energía por transferencia de presión entre el concentrado y el líquido a tratar.

35 El documento Alatiqi et al: "Process control in water desalination industry: an overview" Desalination, Elsevier, Ámsterdam, NL, vol. 126, nº. 1-3, 1 de noviembre de 1999, realiza una revisión de diferentes procedimientos de desalación del agua. El sistema de la figura 2 incluye un recuperador de energía mediante turbina.

40 El documento Krause H. et al: "Improvement of operation and availability of MSF plants" Desalination, Elsevier, Ámsterdam, NL, vol. 107, nº. 1, 1 de septiembre de 1996, desarrolla consideraciones generales sobre la regulación de plantas de filtración con membrana y algoritmos de control.

El documento WO 2006/079483 A describe un sistema y un procedimiento para controlar, simular y optimizar una instalación combinada de producción de energía y de desalación de agua.

45 El documento WO 2007/041823 A se refiere a un sistema portátil de depuración del agua que incluye dos filtros conectados en paralelo y que funcionan de manera alternativa.

50 El documento US 4.983.305 A describe un sistema de desalación de agua por ósmosis inversa que comprende una cámara de membrana y un turbocompresor que permite recuperar la energía del concentrado para elevar la presión del agua a tratar en la cámara de membrana.

La invención tiene como objetivo, sobre todo, proporcionar una planta de desalación de agua por ósmosis inversa que permita minimizar el consumo energético del sistema en su conjunto, en los límites que garanticen la cantidad y calidad del agua producida.

55 La invención consiste en invertir las prioridades del control de la planta de desalación en beneficio del consumo energético. El principio de la invención consiste en dotar al conjunto de la etapa de alta presión de la planta de ósmosis inversa de una regulación secundaria que tiene por objetivo la disminución del consumo energético del sistema.

60 Según la invención, una planta de desalación de agua por ósmosis inversa, del tipo definido anteriormente, incluye:

- una regulación secundaria que comprende medios de cálculo programados para determinar, a partir de las condiciones de funcionamiento de la instalación suministradas por los sensores, una combinación de valores de referenciapara:

65

- el caudal de la bomba de alta presión,
- la tasa de mezcla del recuperador de energía,
- la tasa de conversión,
- en su caso, la temperatura del agua de alimentación (en el caso de fuentes de agua no tratada)
- 5 - en su caso, la salinidad del agua de alimentación (si hay varias fuentes de agua no tratada) que permita minimizar el consumo energético de la planta, situándose estos valores de consigna en un límite que garantice la cantidad y calidad del agua producida, y el mantenimiento de los equipos,
- y los medios de unión entre, por una parte, las salidas de la regulación secundaria y, por otra, el medio de regulación de caudal de la bomba de alta presión, el medio de regulación de la tasa de mezcla entre la primera parte del concentrado y la segunda parte del agua a tratar, y la válvula de control regulable (VC), de forma que se puedan introducir estos valores de referencia.

15 Ventajosamente, los medios de cálculo de la regulación secundaria, para llevar a cabo la determinación de las tres referencias óptimas (caudal de la bomba HP, tasa de mezcla del recuperador de energía, tasa de conversión) minimizando la potencia eléctrica consumida durante la ósmosis inversa, se programan para:

- ejecutar, en intervalos regulares, una búsqueda de la combinación óptima de los tres valores de referencia dividiendo cada uno de los campos de variación posibles de los tres valores de referencia en n valores posibles;
- 20 - realizar el cálculo teórico de la potencia consumida con los parámetros de funcionamiento medidos y las $n \cdot n \cdot n$ (n elevado a 3) posibilidades de combinación de las tres referencias,

y la combinación de las referencias que proporciona la potencia teórica mínima se adopta y se aplica al sistema.

25 El programa de los medios de cálculo puede incluir un circuito adicional del circuito lógico principal para comparar el resultado teórico obtenido con el consumo efectivo medido en el sistema y, en caso de divergencia importante, se dispara una alarma, que conduce a una verificación de los equipos del proceso o, en intervalos regulares, a una actualización de las fórmulas de cálculo teniendo en cuenta la evolución de las características de los equipos con respecto a los correspondientes valores asignados que se han usado para establecer la fórmula de cálculo inicial.

30 La planta puede incluir al menos dos fuentes de agua salada teniendo índices de salinidad y/o temperaturas diferentes, y una válvula regulable de una mezcla de los recursos. En ese caso, ventajosamente, los medios de cálculo de la regulación secundaria se programan para determinar un valor de referencia óptima para la tasa de mezcla de las diferentes fuentes de agua salada para reducir el consumo de energía, aplicándose este valor de referencia a la válvula reguladora de la mezcla.

35 Los medios de cálculo de la regulación secundaria se pueden programar para determinar la permeabilidad de la membrana a partir de los parámetros de los caudales, presiones de agua de entrada, temperatura e índice de salinidad del agua pretratada, del filtrado y del concentrado, y para emitir una indicación o una alarma cuando la permeabilidad sea inferior a un límite que indique la necesidad de una limpieza o de una sustitución para minimizar el gasto energético.

45 Los medios de cálculo de la regulación secundaria se programan, preferentemente, para tener en cuenta las curvas de rendimiento y el rendimiento del conjunto de los equipos de la planta, en particular la bomba, membrana, recuperador de energía. Las curvas de rendimiento y los rendimientos que se tienen en cuenta son, al mismo tiempo, teóricos y medidos, especialmente, durante la puesta en marcha de la planta.

La regulación secundaria incluye entradas al menos para los parámetros siguientes:

- 50 - temperatura del agua en la entrada,
- índice de salinidad del agua a tratar,
- caudales de agua a tratar a la entrada de la etapa de alta presión, a la entrada de la bomba de alta presión, a la entrada de la bomba de presurización, a la salida de la etapa de alta presión, en el rechazo del concentrado;
- presiones a la entrada de la bomba de alta presión, a la entrada de las membranas de alta presión, a la entrada de la bomba de presurización, a la salida de la etapa de alta presión (del filtrado y del concentrado), en el rechazo del concentrado;
- 55 - caudal y presión del filtrado a la salida de la unidad de membrana,
- presión a la entrada de la unidad de membrana,
- potencia activa y energía eléctrica consumida por la bomba de alta presión.

60 Los medios de cálculo de la regulación secundaria pueden programarse según un sistema de forma que pueda darse prioridad a las respuestas de la regulación y a su acción sobre la planta dependiendo de las restricciones locales: caudal de filtrado prioritario, o caudal de pretratamiento prioritario, o calidad del agua tratada prioritaria.

65 La invención consiste, además de las disposiciones indicadas más arriba, de un determinado número de otras disposiciones que se explicarán más adelante de manera más detallada con respecto a un ejemplo de realización

descrito con referencia a los dibujos adjuntos, pero que no es limitativo en forma alguna. En estos dibujos:

La Fig. 1 es un esquema simplificado de una planta de desalación de agua.

La Fig. 2 es un esquema más detallado de la planta según la invención.

5 La Fig. 3 es un diagrama que ilustra la variación de la presión de alimentación de una unidad de membrana en función de la temperatura del agua a tratar.

La Fig. 4 es un diagrama que ilustra la variación de la presión de alimentación de la unidad de membrana en función de la salinidad, representada en la abscisa, del agua a tratar.

10 La Fig. 5 es un diagrama que ilustra la variación de la presión de alimentación representada en la ordenada, en función del caudal

del filtrado representado en la abscisa, y

La Fig. 6 es un diagrama de flujo de la regulación.

Con respecto a la Fig. 1 de los dibujos, se puede ver el esquema de una planta de ósmosis inversa que comprende:

15 - una unidad de pretratamiento T del agua a tratar que procede de un recurso R; la unidad de pretratamiento puede estar constituida por las membranas de ultrafiltración, o por un filtro bicapa o unidad equivalente;

- una bomba de alta presión HP que permite presurizar una parte del agua que alimenta las membranas de ósmosis inversa,

20 - una unidad TP de membrana de ósmosis inversa; esta unidad puede estar formada por un tubo de presión que contiene varias membranas, por ejemplo, siete membranas, de tipo espiral, adaptadas para el tratamiento de agua de mar; la salida de filtrado 1 de la unidad está conectada a un depósito 2 de recogida de aguas filtradas; la salida de concentrado 3 de la unidad TP alimenta un recuperador de energía SRE de tipo intercambio de presión.

25 El recuperador de energía SRE incluye una entrada 4 alimentada por agua pretratada, que sale de la unidad T, que no está presurizada. Por lo general, el recuperador de energía SRE comprende una bomba de refuerzo PS instalada en línea entre una salida 17 del recuperador de energía y la entrada de la unidad de membrana TP. La bomba de refuerzo PS permite recuperar las pérdidas de carga vinculadas al paso del agua por el circuito de concentrado del sistema SRE, que incluye una salida 5 para el concentrado que ya no está presurizado. La salida 5 está provista de una válvula de control VC regulable cuyo posicionamiento determina la tasa de conversión de la planta, es decir, la

30 La Fig. 2 es un esquema similar al de Fig. 1, pero más detallado, de una planta según la invención. Los elementos idénticos o similares a los de la Fig. 1 se designan con las mismas referencias, sin repetir su descripción.

35 La unidad de pretratamiento T se puede alimentar desde varios recursos R1, R2 que llegan a una válvula de mezcla VM cuya salida alimenta la unidad T. La válvula de mezcla VM permite regular, en el caudal de salida, la tasa de mezcla, es decir, la proporción de cada uno de los recursos R1, R2 que pueden tener temperaturas e índice de salinidad diferentes.

El caudal total de agua pretratada por la unidad T pasa por un conducto 6 provisto de un caudalímetro 7, una sonda 8 para medir el índice de salinidad, y una sonda 9 para medir la temperatura del agua pretratada.

45 Después de los sensores constituidos por el caudalímetro 7 y las sondas 8 y 9, el conducto 6 se divide en dos conductos 10, 11. El conducto 10 está conectado a la entrada de la bomba HP. Un caudalímetro 12 está instalado en este conducto 10. La bomba HP está impulsada por un motor eléctrico 13 de velocidad regulable. Un sensor 14 permite medir la potencia activa y la energía eléctrica consumida por el motor 13; la señal del sensor 14 se envía a una entrada A de una regulación D que se detallará más adelante. La salida de la bomba HP está conectada a la

50 entrada de la unidad de membrana TP mediante una válvula regulable 15. El caudal de filtrado 22 se puede regular actuando sobre la velocidad del motor 13 y/o sobre la apertura de la válvula 15. El conducto 11 deriva una parte del agua pretratada, no presurizada, hacia el recuperador de energía SRE que comprende un medio de control 16 para el valor de la mezcla concentrado/agua tratada suministrado en la salida 17 conectada a la bomba PS. Un sensor de presión 18 está colocado a la entrada de la unidad TP en un conducto 19 que reagrupa los flujos procedentes de la

55 válvula 15 y de la bomba PS. La señal del sensor 18 es enviada a una entrada de la regulación D. Otro sensor de presión 20 está colocado a la salida de concentrado de la unidad TP. La salida de filtrado 1 está provista de un sensor de presión 21 y un caudalímetro 22 que proporciona el caudal de agua tratada.

60 Puesto que los parámetros de entrada de la planta pueden variar de forma incontrolada, se aplican circuitos de regulación para mantener estable el funcionamiento de la instalación. En la Fig. 2 se han representado esquemáticamente tres circuitos de regulación: un circuito 23 para la regulación del caudal de filtrado, actuando las salidas de este circuito sobre la válvula regulable 15 y/o el motor 13 de velocidad variable; un circuito 24 de regulación de la tasa de conversión del sistema, que actúa sobre la válvula VC para mantener una tasa de

65 conversión que corresponda a un valor de referencia introducido en el circuito 24; y un circuito 25 de regulación del recuperador de energía de forma que se controla la mezcla de concentrado/agua pretratada en condiciones de

caudal que concuerdan con un valor de referencia suministrado al circuito 25.

5 Según la invención, la planta incluye una regulación secundaria D que comprende medios de cálculo 26, constituidos especialmente por un microordenador, programados para determinar, a partir de las condiciones de funcionamiento de la instalación suministradas por los sensores, una combinación de valores de referencia que comprenden el caudal de filtrado; este valor de referencia se suministra a una salida S1 de la regulación conectada mediante un conductor 27 a la entrada de la referencia de caudal en el circuito 23.

10 La regulación secundaria D suministra en otra salida S2 un valor de referencia para la tasa de mezcla del recuperador de energía SRE. La salida S2 está conectada mediante un conductor 28 a la entrada de la referencia en el circuito 25.

15 En otra salida S3, la regulación secundaria D suministra un valor de referencia para la tasa de conversión y la regulación de la válvula VC. Esta salida S3 está conectada mediante un conductor 29 a la entrada de referencia del circuito 24.

20 La regulación secundaria D determina la combinación de los tres valores de referencia, anteriormente mencionados, que permiten minimizar el consumo energético del sistema, situándose estos valores de referencia en un límite que garantice la cantidad y calidad del agua producida, y el mantenimiento de los equipos de la planta.

25 Cuando varios recursos R1, R2 están disponibles, se prevé, en la regulación secundaria D, una salida S4 que suministra un valor de referencia de la tasa de mezcla de los diferentes recursos, que se combina con los valores de referencia de las salidas S1-S3 para minimizar el consumo energético. El valor de referencia de la salida S4 se comunica a la entrada de referencia del circuito de regulación de la válvula mediante un conductor 30.

30 La regulación secundaria D incluye varias entradas para los diferentes parámetros de funcionamiento, especialmente una entrada E1 para el índice de salinidad suministrado por la sonda 8 conectada a esta entrada E1; una entrada E2 conectada a la sonda 9 para obtener la temperatura del agua a tratar; y una entrada E3 para el valor del caudal suministrado por el caudalímetro 12.

35 La medida de la potencia activa y de la energía eléctrica, suministrada por el sensor 14, se envía, mediante un enlace no representado, a la entrada A de la regulación D, mientras que el valor del caudal de agua tratada suministrada por el caudalímetro 22 se envía, mediante un enlace no representado, a la entrada B de la regulación secundaria D.

La regulación secundaria D también recibe información de otras entradas no representadas, para los caudales:

40 a la entrada de la etapa de alta presión, es decir, a la entrada de la unidad TP;
a la entrada de la bomba de presurización PS;
a la salida de la etapa de alta presión, es decir, a la salida 3 de la unidad TP;
en el rechazo del concentrado, es decir, antes de la válvula VC.

La regulación D también recibe entradas de los valores de las presiones:

45 a la entrada de la bomba HP;
a la entrada de la unidad de membrana TP (valor suministrado por el sensor 18);
a la entrada de la bomba de presurización PS;
a la salida de la etapa de alta presión, es decir, a la salida de la unidad de membrana TP para el filtrado (sensor 21) y para el concentrado (sensor 20); en el rechazo del concentrado, antes de la válvula VC.

50 La programación de los medios de cálculo 26 tiene en cuenta las curvas de rendimiento y el rendimiento del conjunto de los equipos de la planta: bomba, membrana, recuperador de energía, medidos durante los ensayos de puesta en marcha o de acuerdo con la documentación de los fabricantes.

55 Los medios de cálculo 26 también están programados para determinar la permeabilidad L_p de las membranas de la unidad TP a partir de las medidas de caudales y presiones de agua de entrada, del filtrado y del concentrado, de la temperatura e índice de salinidad del agua. Esta magnitud característica del estado de las membranas es una magnitud de variación lenta, a diferencia de otros parámetros, y se puede utilizar para varias iteraciones de cálculo. La regulación D suministra en una salida S5 instrucciones para mantenimiento/sustitución de las membranas, como resultado de los cálculos de permeabilidad realizados.

60 Mediante este cálculo de la permeabilidad L_p de la membrana, la regulación secundaria D, además de las instrucciones emitidas en la salida S5, podrá emitir, en una salida S6, alarmas y, en una salida S7, informes, por ejemplo semanales, destinados a los responsables de la planta. En particular, se podrá proponer una sustitución de las membranas, una vez que el modelo matemático de minimización del coste de la energía consumida haya detectado que la sustitución de las membranas resulta más interesante que la continuación del funcionamiento con

las membranas actuales, de mayor consumo que las membranas nuevas.

La optimización, que consiste en minimizar el gasto de energía necesario para las bombas, se puede calcular a partir de:

- 5
- las condiciones de presión y caudal de cada una de las bombas,
 - las curvas de rendimiento teóricas y medidas durante la puesta en marcha.

10 Las presiones y caudales óptimos se pueden calcular a partir de la temperatura del agua a tratar, y el índice de salinidad medido, la permeabilidad L_p calculada, y los tres parámetros modulables, es decir, el caudal de filtrado, la tasa de mezcla del recuperador SRE, y la tasa de conversión (y opcionalmente, la temperatura y la salinidad del agua pretratada).

15 Esta optimización económica tiene en cuenta los límites físicos de la planta: campo de variación de los parámetros modulables, mantenimiento de los equipos.

20 La resolución de esta optimización económica, después de varias iteraciones, suministra como datos de salida, en las salidas S1, S2, S3 y opcionalmente S4, la mejor combinación de elementos modulables a aplicar en la planta para minimizar la energía consumida.

Las imprecisiones de medición y cálculo se corrigen, por una parte, mediante iteraciones de los medios de cálculo de la optimización, y mediante la comparación entre la medición de la energía consumida con los resultados esperados.

25 La regulación secundaria D cumple dos funciones:

- una primera función consiste en una minimización a corto plazo del consumo energético, actuando al menos sobre las tres referencias siguientes: tasa de mezcla en el recuperador de energía; tasa de conversión mediante la válvula VC; caudal de la bomba de alta presión HP por acción sobre la válvula 15 y/o sobre la variación de velocidad del motor 13 que actúa la bomba HP;
- siendo la segunda función una minimización a medio-largo plazo, guiando el mantenimiento de la planta y la estrategia de sustitución de los equipos que afectan el consumo energético.

30 Los medios de cálculo 26 de la regulación secundaria se programan según un sistema de forma que pueda darse prioridad a las respuestas de la regulación D y a su acción sobre la planta dependiendo de las restricciones locales: caudal de filtrado prioritario, o caudal de pretratamiento prioritario, o calidad del agua tratada prioritaria.

40 Para ilustrar la relación que existe entre los diferentes parámetros, la curva C1 de la Fig. 3 muestra la evolución de la presión, representada en la ordenada, a la entrada de la unidad de membrana TP en función de la temperatura del agua a tratar. Esta curva depende de la planta, especialmente del tipo de membrana de ósmosis inversa utilizado, y está vinculada a la viscosidad del agua y las características hidráulicas de la planta de desalación. En su conjunto, parece que la presión disminuye en función de la temperatura, siendo esta presión de aproximadamente 55,2 bares para una temperatura de 16°C y de aproximadamente 53,5 bares para una temperatura de 26°C del agua.

45 La Fig. 4 representa una curva C2 que ilustra la relación entre la presión de alimentación (representada en la ordenada) de la unidad TP, y la salinidad expresada en g/l (gramos/litro), representada en la abscisa. Esta relación está vinculada a la presión osmótica generada por las sales presentes en el agua, y también depende de las condiciones hidráulicas del sistema. La presión aumenta con la salinidad y pasa de aproximadamente 44 bares para una salinidad de aproximadamente 30 g/l, a una presión de aproximadamente 58 bares para una salinidad de aproximadamente 40 g/l.

50 La Fig. 5 muestra, para la curva C3, la variación de la presión de alimentación, representada en la ordenada, en función del caudal de filtrado, representado en la abscisa, manteniendo fijos el índice de salinidad y la tasa de conversión. El caudal o flujo de filtrado se expresa en $l/h/m^2$. En ese caso, para una salinidad del agua definida, el parámetro a tener en cuenta es la permeabilidad de la membrana, asociada a las condiciones hidráulicas. La curva C3 muestra que la presión de alimentación aumenta, cuando el flujo aumenta.

55 La regulación secundaria D se ha evaluado en una una planta piloto de ósmosis inversa según el esquema de la Fig. 2.

60 Los parámetros que pueden afectar el funcionamiento de la planta se controlan en este prototipo.

Primera serie de ensayos

65 Durante los ensayos, la planta funciona de forma estabilizada. La Tabla 1 siguiente resume las condiciones y resultados de la primera serie de ensayos en una planta piloto provista de la regulación secundaria.

Tabla 1

	Condiciones iniciales	Condiciones 1: generación de un aumento de salinidad	Condición 1 después de estabilización	Condiciones 2: generación de un aumento de salinidad	Condición 2 después de estabilización
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20
Salinidad del agua pretratada (g/l)	37,05	37,6	37,6	39,5	39,5
Referencia de caudal (m ³ /h)	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Referencia de conversión (%)	45	45	43,6	43,6	41,3
Presión de alimentación medida (bares)	55,6	56,04	55,6	57,16	55,6
Caudal de fuga SRE %	0	0	6	6	0
Presión de concentrado medida (bar)	54,4	54,8	54,7	56,26	54,7
Presión de filtrado medida (bares)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Modo		Caudal de filtrado limitante	Caudal de filtrado limitante	Caudal de filtrado limitante	Caudal de filtrado limitante
Energía consumida kWh/m ³	2,17	2,19	2,17	2,23	2,17

Condiciones iniciales:

- 5 En estas condiciones iniciales, la planta piloto se alimenta mediante un sistema de pretratamiento de agua de mar, y funciona a un caudal de 3,4 m³/h (caudal de producción de filtrado), con un valor de referencia para la tasa de conversión del 45 %. La salinidad del agua de mar pretratada es de 37,05 g/l y su temperatura de 20°C.

- 10 El consumo de energía de la instalación es igual a la energía consumida por la bomba HP, es decir, 2,17 kWh/m³, aumentada por el consumo eléctrico del pretratamiento (unidad T), lo que totaliza un consumo de 2,33 kWh/m³ de filtrado producido.

Condiciones 1:

- 15 La columna Condiciones 1 corresponde a una modificación de la salinidad del agua a la entrada de la planta, modificación realizada de forma voluntaria para observar el comportamiento de la planta con la regulación secundaria.

- 20 La salinidad pasa de 37,05 a 37,6 g/l, lo que conlleva una corrección de los circuitos de regulación primaria, para mantener estable el caudal de filtrado y la conversión del sistema. Esta corrección se traduce en un aumento de la presión de alimentación, que pasa de 55,6 a 56,04 bares para mantener el caudal de filtrado y la tasa de conversión constantes. La presión del concentrado medida pasa de 54,4 a 54,8 bares, y la energía consumida aumenta a 2,19 kWh/m³.

- 25 La regulación secundaria D comienza por evaluar, en función del modo aplicado (caudal de filtrado prioritario), las posibles acciones sobre la planta. Para minimizar el consumo energético, la regulación secundaria D va a actuar sobre la tasa de conversión de la planta, que disminuye del 45 al 43,6 %, según la tercera columna "Condición 1 después de la estabilización", minimizando en primer lugar la salinidad generada por el recuperador de energía SRE.

- 30 La referencia de caudal de mezcla del recuperador SRE se reduce mediante un circuito de regulación primaria de la bomba PS, lo que corresponde a un caudal de fuga del 6 % de la tercera columna después de la estabilización del sistema. La salinidad baja a la salida del recuperador SRE, que disminuye el impacto del aumento en la salinidad del agua no tratada, y que lleva a la planta hasta su presión de funcionamiento inicial de 55,6 bares. La energía consumida por la bomba de alta presión HP recupera el valor inicial de 2,17 kWh/m³.

35

Condiciones 2:

La salinidad del agua pretratada se aumenta una vez más para pasar de 37,6 a 39,5 g/l, como se indica en la cuarta columna de la Tabla 1. La planta piloto siempre está siempre en el modo de producción de filtrado prioritario. Según

la columna 4, los circuitos de regulación primaria generan un aumento de la presión de alimentación hasta un valor de 57,16 bares para mantener la producción, lo que conlleva un aumento de la potencia consumida a 2,23 kWh/m³ en la bomba HP.

- 5 En ese caso, la regulación secundaria D evalúa los medios de actuación. Una vez que el recuperador SRE ha alcanzado su caudal máximo de desconcentración, la regulación secundaria D modifica la referencia de la tasa de conversión del conjunto de la planta, es decir, el valor de referencia de la válvula VC. La tasa de conversión pasa a un valor del 41,3 % como aparece en la última columna de la Tabla 1.
- 10 Tras la estabilización, la planta piloto vuelve a sus condiciones iniciales de funcionamiento con una presión de alimentación de 55,6 bares y una energía consumida por la bomba HP de 2,17 kWh/m³.

Segunda serie de ensayos

- 15 La Tabla 2 siguiente resume las condiciones y resultados de los ensayos de la planta piloto con la regulación secundaria, durante una segunda serie de ensayos.

Tabla 2

	Condiciones iniciales	Condiciones 3: generación de una bajada de la temperatura	Condición 3 después de estabilización	Condiciones 4: generación de un envejecimiento de las membranas de ósmosis inversa	Condiciones 4 después del lavado químico
Temperatura (°C)	20	15,5	15,5	15,5	15,5
Salinidad del agua pretratada (g/l)	37,05	37,05	37,05	37,05	37,05
Referencia de caudal (m ³ /h)	3,4	3,4	3,35	3,35	3,35
Referencia de conversión (%)	45	45	44,3	44,3	44,3
Presión de alimentación medida (bares)	55,6	56,2	55,25	61,1	55,2
Caudal de fuga SRE %	0	0	0	0	0
Presión de concentrado medida (bar)	54,7	55,7	54,35	58,6	54,2
Presión de filtrado medida (bares)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Modo		Caudal de filtrado no limitante Recurso limitante	Caudal de filtrado no limitante Recurso limitante	Caudal de filtrado limitante	Caudal de filtrado limitante
Energía consumida kWh/m ³	2,17	2,19	2,17	2,37	2,17

20 *Condiciones 3:*

La segunda columna de la Tabla 2 recoge las condiciones de un ensayo en el que la temperatura del agua de alimentación se reduce de 20°C a 15,5°C, mediante un intercambiador de calor y un grupo de refrigeración. Los valores dados en la segunda columna corresponden a los proporcionados por los circuitos de regulación primaria antes de la intervención de la regulación secundaria y la estabilización, que corresponde a la tercera columna.

25

Según la segunda columna, para mantener el caudal de producción, los circuitos de regulación primaria ajustan la presión de alimentación de la planta, que pasa de esta manera de 55,6 bares a 56,2 bares lo que conlleva un aumento del consumo de energía por la bomba HP de 2,17 a 2,19 kWh/m³ de filtrado.

30 En este ejemplo, la prioridad se otorga al recurso, ya que el caudal de producción no es prioritario. En ese caso, la

regulación secundaria D va a modificar el caudal de filtrado, que pasa de 3,4 a 3,35 m³/h, la referencia de conversión disminuye de 45 % al 44,3 %. El consumo de energía vuelve al valor inicial de 2,17 kWh/m³ después de la estabilización, como se indica en la columna 3.

5 *Condiciones 4:*

10 El cuarto ejemplo, que corresponde a la cuarta columna de la tabla 2, se refiere al envejecimiento de las membranas de ósmosis inversa. Este envejecimiento se traduce, en este momento, por una pérdida de permeabilidad con un aumento en la pérdida de carga de las membranas, a la que corresponde a la diferencia entre la presión de alimentación de 61,1 bares y la presión del concentrado de 58,6 bares a la salida de la unidad de membrana TP.

15 En ese caso, la regulación secundaria D se basa no solamente en los datos de entrada directa, sino también en los resultados del cálculo de la membrana, identificando un descenso significativo en la permeabilidad. La regulación secundaria va a recomendar al operador realizar un lavado químico. La columna 5 muestra que después de realizar el lavado químico que asegura la mejora de la permeabilidad de las membranas de ósmosis inversa, se recupera una presión de funcionamiento de 55,2 bares (presión de alimentación) y un consumo de energía de 2,17 kWh/m³ comparables a las de la columna 3 (condiciones 3 después de la estabilización), con el agua de alimentación a 15,5°.

20 La Fig. 6 muestra un diagrama de flujo que resume el funcionamiento de la regulación.

25 Las plantas de desalación de agua por ósmosis tratan volúmenes importantes diarios, en promedio, de aproximadamente 120 000 m³ al día, de forma que el ahorro de energía proporcionado por la invención es importante en valor absoluto, aunque el valor relativo sea del orden de algunos puntos porcentuales.

Ventajosamente, los medios de cálculo se programan para llevar a cabo la determinación de las tres referencias óptimas (caudal de la bomba HP, tasa de mezcla del recuperador de energía, tasa de conversión) minimizando la potencia eléctrica consumida durante la ósmosis inversa de la siguiente forma.

30 Se dispone de la siguiente fórmula de cálculo teórico: Potencia eléctrica consumida por las bombas = Función (tres referencias, parámetros de funcionamiento medidos).

35 Se conocen los campos de variación posibles de las tres referencias (limitación dependiendo de la garantía del proceso y las capacidades de los equipos).

A intervalos regulares, se realiza una búsqueda de la combinación óptima de los tres valores de referencia de la manera siguiente:

40 Cada uno de los campos de variación de los tres valores de referencia se somete a dicotomía o, de una forma más general, se divide, en n valores posibles (por ejemplo, para un caudal posible de 100 a 110, se consideran cien valores: 100, 100,1, 100,2, ..., 109,9, 110)

45 El cálculo teórico de la potencia consumida se realiza con los parámetros de funcionamiento medidos y las n*n*n (n elevado a 3) posibilidades de combinación de las tres referencias.

La combinación de las referencias que proporciona la potencia teórica mínima se adopta y se aplica al sistema.

50 Un circuito adicional del circuito lógico principal compara el resultado teórico obtenido con el consumo efectivo medido en el sistema. En caso de divergencia importante, se dispara una alarma, que conduce a una verificación de los equipos del proceso, o a intervalos regulares, a una actualización de las fórmulas de cálculo teniendo en cuenta la evolución de las características de los equipos con respecto a los correspondientes valores asignados que se han utilizado para establecer la fórmula de cálculo inicial.

REIVINDICACIONES

1. Planta de desalación de agua por ósmosis inversa, que comprende:

- 5 - una unidad de membrana de ósmosis inversa (TP),
- al menos una bomba de alta presión (HP) para presurizar al menos una primera parte del agua a tratar a una presión superior a su presión osmótica y enviarla a la entrada de la unidad de membrana,
- 10 - un medio de regulación del caudal de la bomba de alta presión, comprendiendo este medio una válvula regulable (15) instalada en la salida de la bomba de alta presión y/o un motor impulsor de la bomba de velocidad variable (13),
- un recuperador de energía (SRE) de tipo de intercambio de presión adecuado para transferir la presión del concentrado que sale de la unidad de membrana a una segunda parte del agua a tratar, donde este recuperador comprende
- 15 - una primera entrada (4) que recibe la segunda parte del agua a tratar,
- una segunda entrada que recibe el concentrado,
- una primera salida (17) que suministra a una entrada de la unidad de membrana una mezcla entre una primera parte del concentrado y la segunda parte del agua a tratar,
- 20 - una segunda salida (5) que suministra una segunda parte del concentrado, y
- un medio de regulación de la tasa de mezcla entre la primera parte del concentrado y la segunda parte del agua a tratar, y
- 25 - una válvula de control regulable (VC) instalada en la segunda salida (5) del recuperador, que permite regular la tasa de conversión,
- sensores de diferentes parámetros de funcionamiento, en particular la presión, caudal, temperatura, índice de salinidad, previstos en lugares adecuados,
- circuitos de regulación para que el medio de regulación de caudal de la bomba de alta presión, el medio de regulación de la tasa de mezcla entre la primera parte del concentrado y la segunda parte del agua a tratar, y la válvula de control regulable (VC) se mantengan a un valor de referencia,
- 30 - una regulación secundaria (D) que comprende medios de cálculo (26) programados para determinar, a partir de las condiciones de funcionamiento de la instalación suministradas por los sensores, una combinación de valores de referencia para:
- 35 - el caudal de la bomba de alta presión,
- la tasa de mezcla del recuperador de energía,
- y la tasa de conversión, que permiten minimizar el consumo energético de la planta, situándose estos valores de referencia en un límite que garantiza la cantidad y calidad del agua producida, y el mantenimiento de los equipos,
- 40 - y medios de conexión entre, por una parte, las salidas de la regulación secundaria y, por otra parte, el medio de regulación de caudal de la bomba de alta presión, el medio de regulación de la tasa de mezcla entre la primera parte del concentrado y la segunda parte del concentrado y la segunda parte del agua a tratar, y la válvula de control regulable (VC), de forma que se puedan introducir en el mismo estos valores de referencia.

2. Planta según la reivindicación 1, **caracterizada por que** los medios de cálculo (26) de la regulación secundaria, para realizar la determinación de las tres referencias óptimas que minimizan la potencia eléctrica consumida en la ósmosis inversa, se programan para:

- 50 - ejecutar, en intervalos regulares, una búsqueda de la combinación óptima de los tres valores de referencia dividiendo cada uno de los campos de variación posibles de los tres valores de referencia en n valores posibles;
- realizar el cálculo teórico de la potencia consumida con los parámetros de funcionamiento medidos y las $n*n*n$ posibilidades de combinación de las tres referencias,

y la combinación de las referencias que proporciona la potencia teórica mínima se adopta y se aplica al sistema.

3. Planta según la reivindicación 2, **caracterizada por que** el programa de los medios de cálculo comprende un circuito adicional del circuito lógico principal para comparar el resultado teórico obtenido con el consumo efectivo medido en el sistema y, en caso de divergencia importante, se dispara una alarma, que conduce a una verificación de los equipos del proceso o, en intervalos regulares, a una actualización de las fórmulas de cálculo teniendo en cuenta la evolución de las características de los equipos con respecto a los correspondientes valores asignados que se han utilizado para establecer la fórmula de cálculo inicial.

4. Planta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que incluye al menos dos fuentes de agua salada teniendo índices de salinidad y/o temperaturas diferentes, y una válvula regulable (VM) para regular una

mezcla de los recursos, **caracterizada por que** los medios de cálculo (26) de la regulación secundaria se programan para determinar un valor de consigna óptima para el índice de mezcla de las diferentes fuentes de agua salada para reducir el consumo de energía, aplicándose este valor de consigna a la válvula reguladora (VM) de la mezcla.

- 5 5. Planta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que** los medios de cálculo (26) de la regulación secundaria se programan para determinar la permeabilidad (Lp) de la membrana a partir de los parámetros de los caudales, presiones, temperatura y salinidad del agua pretratada, del filtrado y del concentrado, y para emitir una indicación o una alarma cuando la permeabilidad sea inferior a un límite que indique la necesidad de una limpieza o una sustitución para minimizar el gasto energético.
- 10 6. Planta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que** los medios de cálculo (26) de la regulación secundaria se programan para tener en cuenta las curvas de eficiencia y rendimiento del conjunto de los equipos de la planta, en particular de la bomba, de la membrana y del recuperador de energía.
- 15 7. Planta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que** la regulación secundaria (D) incluye entradas al menos para los parámetros siguientes:
- temperatura del agua en la entrada,
 - índice de salinidad del agua a tratar,
- 20 - caudales de agua a tratar a la entrada de la etapa de alta presión, a la entrada de la bomba de alta presión, a la entrada de la bomba de presurización, a la salida de la etapa de alta presión, en el rechazo del concentrado;
- presiones a la entrada de la bomba de alta presión, a la entrada de las membranas de alta presión, a la entrada de la
- 25 bomba de presurización, a la salida de la etapa de alta presión, en el rechazo del concentrado;
- caudal y presión del filtrado a la salida de la unidad de membrana,
 - presión a la entrada de la unidad de membrana,
 - potencia activa y energía eléctrica consumida por la bomba de alta presión.
- 30 8. Planta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que** los medios de cálculo (26) de la regulación secundaria se programan según un sistema de forma que pueda darse prioridad a las respuestas de la regulación (D) y a su acción sobre la planta dependiendo de las restricciones locales: prioridad al caudal de filtrado, o prioridad al caudal de pretratamiento, o prioridad a la calidad del agua tratada.

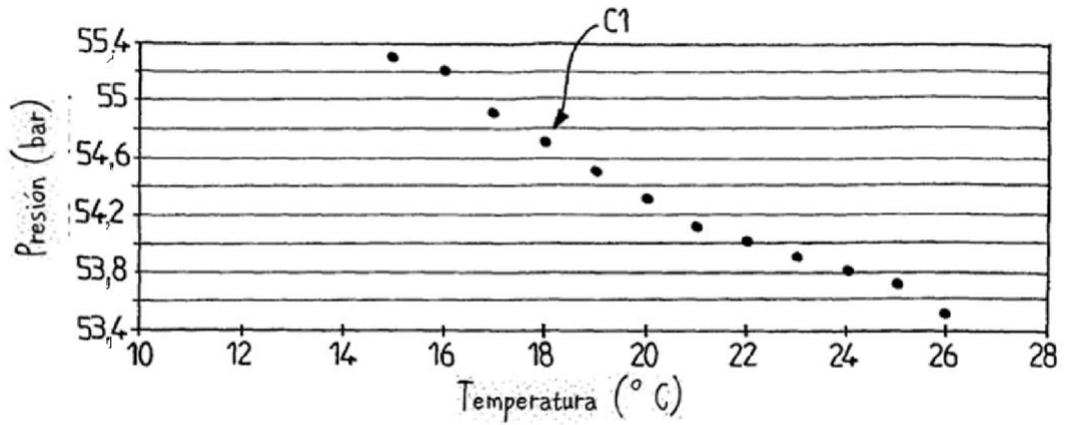


FIG. 3

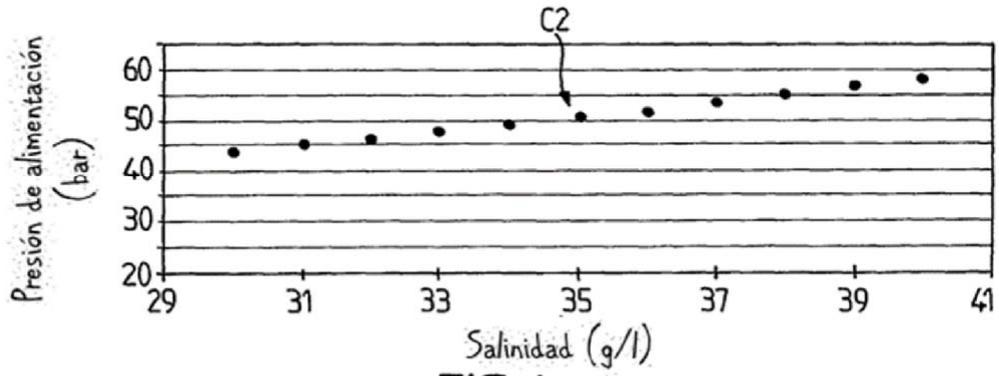


FIG. 4

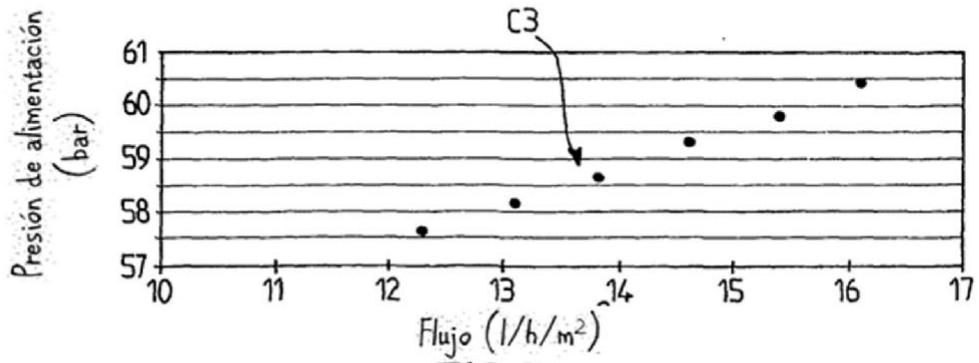


FIG. 5

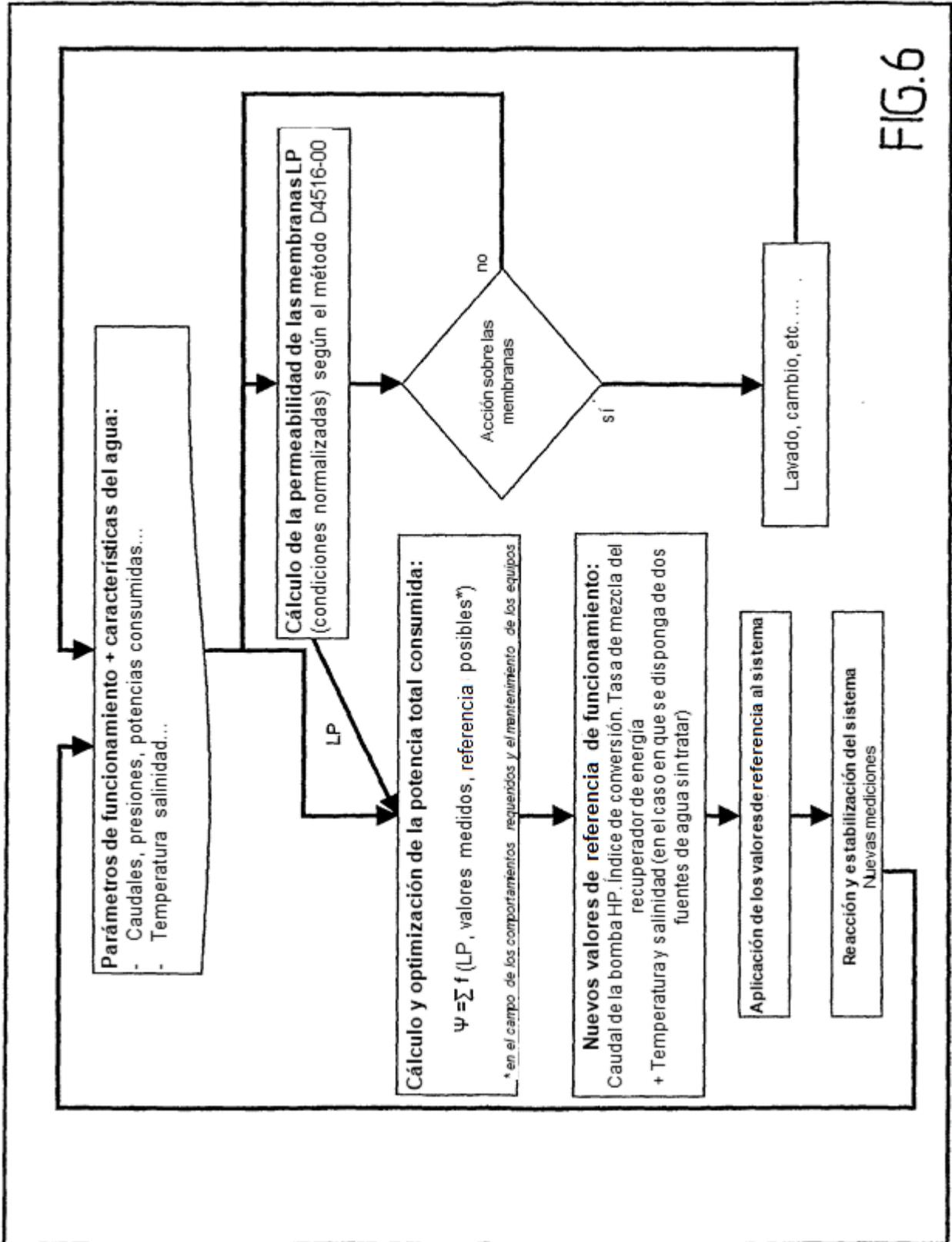


FIG.6

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

5 La lista de referencias citadas por el solicitante es, únicamente, para conveniencia del lector. No forma parte del documento de patente europea. Si bien se ha tenido gran cuidado al compilar las referencias, no pueden excluirse errores u omisiones y la OEP declina toda responsabilidad a este respecto.

Documentos de patente citados en la descripción

- WO 0209855 A1 [0010]
- WO 2006106158 A [0011]
- US 2004109788 A1 [0012]
- US 2004173528 A1 [0013]
- WO 2006079483 A [0016]
- WO 2007041823 A [0017]
- US 4983305 A [0018]

10

Literatura no patente citada en la descripción

- **ALATIQI et al.** Process control in water desalination industry: an overview'' Desalination. Elsevier, 01 Noviembre 1999, vol. 126 [0014]
- Improvement of operation and availability of MSF plants. **KRAUSE H. et al.** Desalination. Elsevier, 01 Septiembre 1996, vol. 107 [0015]

15