

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 599 640**

51 Int. Cl.:

**B01D 61/18** (2006.01)  
**B01D 61/22** (2006.01)  
**B01D 65/02** (2006.01)  
**B01D 65/08** (2006.01)  
**C02F 1/44** (2006.01)  
**C02F 3/12** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.07.2006 E 11152729 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.09.2016 EP 2314368**

54 Título: **Control de procedimiento para un sistema de membrana sumergido**

30 Prioridad:

**12.07.2005 US 697953 P**  
**12.07.2005 US 697974 P**  
**21.12.2005 US 751979 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**02.02.2017**

73 Titular/es:

**ZENON TECHNOLOGY PARTNERSHIP (100.0%)**  
**The Corporation Trust Company Corporation**  
**Trust Centre 1209 Orange Street**  
**Wilmington, DE 19801, US**

72 Inventor/es:

**GINZBURG, BORIS FERNANDEZ;**  
**YACOUB, FRANCOIS;**  
**COTE, PIERRE LUCIEN y**  
**JANSON, ARNOLD**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 599 640 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**

Control de procedimiento para un sistema de membrana sumergido

**Campo de la invención**

5 Esta memoria descriptiva se refiere a un sistema o procedimiento de control de procedimiento para un sistema de tratamiento de agua de membrana utilizando membranas sumergidas.

**Antecedentes**

Los sistemas de tratamiento de agua de membrana sumergida incluyen, por ejemplo, los sistemas de tratamiento de aguas residuales, tales como biorreactores de membrana y sistemas de filtración de agua, por ejemplo, destinados a producir agua potable.

10 Tales sistemas pueden utilizar aire u otros gases burbujeados desde debajo o entre las membranas para limpiar la superficie de las membranas para mantener un caudal de permeado para una presión transmembrana determinada. El caudal de aire es normalmente constante para una instalación particular cuando se expresa como un volumen de aire por unidad de área de membrana por unidad de tiempo. Para cualquiera de una variedad de razones, el caudal de aire ideal en cualquier momento puede ser significativamente diferente de la tasa normal.

15 Estas razones pueden incluir:

a) cambios en el caudal de permeado y, por lo tanto, en la tasa de carga de *sólidos suspendidos* sobre la superficie de membrana;

b) cambios en la viscosidad del agua:

20 i) en sistemas de aguas residuales, siempre que se desecha lodo, o si se produce un equilibrio en el depósito de membrana;

ii) en sistemas de agua potable, si son necesarios cambios en la dosis de coagulante debido a los cambios en la composición del agua de alimentación o si se producen cambios en la recuperación; o,

iii) en todos los sistemas, si cambia la temperatura del agua, por ejemplo, debido a las variaciones estacionales;

25 c) cambios en la temperatura del aire de entrada del soplador o la densidad que afectarán a la masa de aire suministrada a las membranas para la limpieza; o,

d) en sistemas de aguas residuales, los cambios en la filtrabilidad del lodo debido a los cambios del procedimiento.

30 La salida de permeado de un sistema de filtración de agua se puede variar para cualquier número de factores. En aplicaciones municipales, los factores incluyen la hora del día, las condiciones climáticas y las fluctuaciones estacionales. En los sistemas industriales, además de estos factores, los programas de producción, huelgas y cierres de plantas pueden resultar en cambios en la salida del sistema.

35 En los sistemas de tratamiento de aguas residuales en particular (por ejemplo, biorreactores de membrana), los flujos del afluente pueden ser muy variables y el equilibrio se proporciona generalmente por el diseñador del sistema. En algunas instalaciones, el equilibrio se proporciona aguas arriba del biorreactor de membrana en un depósito separado con bombas de transferencia y en otras instalaciones, se proporciona el equilibrio en el depósito biorreactor de membrana. En todas las aplicaciones, la viscosidad y la filtrabilidad de la biomasa variarán debido a las condiciones del procedimiento. Por ejemplo, después de que los lodos se desechan a partir de un biorreactor y se introduce alimentación de nueva aportación, la concentración de sólidos suspendidos disminuirá. En esos diseños  
40 de sistemas en los que el equilibrio se proporciona en el biorreactor de membrana, la viscosidad cambiará a medida que el flujo de alimentación al biorreactor de membrana varía. Cuando el nivel de líquido del biorreactor está cerca de su máximo, la viscosidad será la más baja y cuando el biorreactor está cerca de su mínimo, la viscosidad estará en su nivel más alto. La filtrabilidad del lodo cambiará para cualquiera de una variedad de condiciones incluyendo tipos de organismos biológicos presentes, la producción de materiales celulares adicionales, el pH, tasas de carga  
45 de alimento a microorganismos (proporción F: M), edad del lodo, y tiempo de retención hidráulico.

Los sistemas de tratamiento de membrana consisten en cualquier número de bloques separados de membranas, referidos como trenes o bancos, que producen colectivamente el flujo total requerido. La salida de trenes individuales puede variar a medida que varía la salida del sistema por las razones descritas anteriormente. Además, la salida de los trenes individuales se puede ver afectada por otros factores, en particular, el número de trenes  
50 realmente en servicio (algunos trenes pueden estar fuera de servicio por mantenimiento u otras razones) y el grado de incrustaciones de las membranas (si es lo suficientemente grave como para limitar la producción de un tren individual).

En todas las aplicaciones de tratamiento de membrana, se puede definir una "tasa de carga de masa de sólidos suspendidos". Esta tasa refleja la tasa a la que los sólidos suspendidos son llevados a la superficie de membrana por la alimentación y se calcula como la "concentración de sólidos suspendidos x el flujo de permeado" con unidades de "masa/área de membrana unitaria - tiempo". En condiciones de equilibrio, la tasa a la que los sólidos suspendidos son llevados a la superficie de membrana tiene que ser igual a la tasa a la que los efectos de la turbulencia y de limpieza con descarga de aire eliminan los sólidos suspendidos.

En los sistemas de control para sistemas de membranas sumergidos fabricados actualmente, la práctica es fijar la tasa de aireación a una tasa fija basándose en los diseños estándar o datos experimentales. Durante la puesta en marcha, una optimización manual puede dar como resultado un cambio en las tasas de aireación. Una vez que se completa la puesta en marcha, por lo general no se tienen que realizar ajustes en las tasas de aireación. La tasa de aireación (m<sup>3</sup> de aire por m<sup>2</sup> de área de membrana) se encuentra normalmente en o cerca de la aireación óptima necesaria cuando se opera a plena capacidad o a la más alta viscosidad del fluido y es constante para todos los trenes en un sistema.

En los sistemas de tratamiento de membrana sumergidos, el filtro de membrana se sumerge en un depósito abierto que contiene la solución de fluido a filtrar. La filtración se logra mediante introduciendo agua en el interior de la fibra de membrana bajo un vacío. El agua filtrada, también denominada permeado o filtrado, se transfiere a un depósito, reservorio o corriente de recepción aguas abajo. Los materiales que no pasan a través de la membrana, incluyendo sólidos suspendidos, coloides y materiales biológicos, se descargan como una solución llamada la fracción rechazada o retenida. Esta fracción retenida se puede descargar forma continua o intermitentemente dependiendo del diseño del sistema. Aire u otros gases, bajo una ligera presión positiva, se proporcionan a la región del depósito debajo o cerca de la parte inferior de los filtros de membrana. Las burbujas de gas ascendentes limpian la superficie de membrana para reducir las incrustaciones y mantener o ralentizar un descenso de la tasa de penetración.

La productividad de un sistema de membrana sumergido es directamente dependiente de muchos factores, incluyendo: la presión diferencial a través de la membrana (también denominada presión transmembrana), el material de la membrana y la tasa de transferencia de la masa de agua a través de la capa límite en la superficie de la membrana. Las burbujas de aire ascendentes crean turbulencia y causan un flujo ascendente de agua y la combinación de la turbulencia y el flujo ascendente de agua reduce el espesor de la capa límite y aumenta la tasa de transferencia de masa a través de la capa límite. El aire se puede suministrar de forma continua, en función del ciclo (por ejemplo, 10 segundos de activación, 10 segundos de desactivación) o intermitentemente (por ejemplo, 60 segundos cada 30 minutos). La energía es necesaria para proporcionar esta aireación y esto puede ser un importante contribuyente al consumo total de energía de un sistema de membrana sumergido.

En la superficie del filtro de membrana, una "capa límite" existe y toda el agua que pasa a través de la membrana debe pasar primero a través de esta capa límite antes de alcanzar la superficie de membrana. Esta capa límite es la región fina en la superficie de membrana donde existe un gradiente de velocidad pronunciado y mientras más fina es la capa límite, más pronunciado es el gradiente de velocidad y mayor será la tasa de transferencia de masa a través de la capa límite. El espesor de la capa límite varía con muchos factores incluyendo la viscosidad y la velocidad del fluido que pasa sobre la superficie y la concentración de los materiales rechazados por la membrana. El aire suministrado cerca de la parte inferior de la membrana induce turbulencia y cuanto mayor es el caudal de aire, más fina será la capa límite.

Los biorreactores de membrana (MBR) combinan la tecnología de membranas y los procedimientos de biodegradación de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. En los MBR, membranas sumergidas o externas se utilizan para filtrar el lodo activado de un biorreactor para producir un efluente de alta calidad. Los MBR de muestra y su operación se describen en la Publicación Internacional n.º WO 2005/039742 A1.

Las membranas se pueden disponer generalmente en módulos o elementos que comprenden las membranas y os cabezales fijados a las membranas y se pueden formar juntos en casetes y después en trenes. Los módulos se sumergen en un depósito que contiene lodo activado. Una presión transmembrana se aplica a través de las paredes de la membrana lo que hace que el agua filtrada penetre a través de las paredes de la membrana. Los sólidos se rechazan por las membranas y permanecen en el depósito para tratarse biológica o químicamente o drenarse del depósito para su reciclaje o tratamiento adicional.

Un ciclo de tratamiento normal comprende dos etapas. La primera etapa, conocida como permeación, implica la producción de la membrana de permeado a través de la aplicación de una presión transmembrana, como se ha descrito anteriormente.

La segunda etapa consiste en la eliminación de los sólidos de los poros y de la superficie de la membrana. Dos procedimientos operativos diferentes disponibles son la relajación y el lavado a contracorriente. La relajación se realiza mediante la eliminación de la presión transmembrana que hace que la producción de permeado se detenga y permite que las burbujas de aire eliminen las partículas de lodo depositadas sobre la superficie de membrana. El otro procedimiento operacional disponible para la eliminación de sólidos es el lavado a contracorriente. El lavado a contracorriente se realiza mediante la inversión de la dirección del flujo de permeado que permite la eliminación de

las partículas de lodo depositadas libremente en los poros y superficie de la membrana.

Un flujo de aire cíclico se puede aplicar a los módulos para minimizar la deposición de partículas de lodo sobre la superficie de membrana. El sistema de aireación cíclico utiliza un conjunto de válvulas y un controlador de conjunto de válvula para conectar un suministro de aire a una pluralidad de ramas distintas de una red de suministro de aire.

5 Las distintas ramas de la red de suministro de aire se conectan a su vez a los aireadores que pueden estar situados por debajo de los módulos de membrana. Si bien el suministro de aire se opera para suministrar un flujo inicial constante de aire, el conjunto de válvulas y controlador de la válvula dividen y distribuyen el flujo de aire inicial entre las distintas ramas del sistema de distribución de aire de tal manera que el flujo de aire a cada rama alterna entre un caudal mayor y un caudal menor en ciclos repetidos. La duración relativa de los periodos de caudal mayor y menor que se aplica a un aireador dado se determina por el factor de frecuencia de aireación (A.F.F.) que se puede obtener dividiendo las duraciones del período de mayor flujo de aire entre la duración total del ciclo de aireación (es decir, la duración del período de mayor flujo de aire más la duración del período de menor flujo de aire), respectivamente. En las aplicaciones prácticas, los valores entre 0,25 y 1 son comunes. Por ejemplo, un sistema que tiene cuatro ramas puede alternarse entre los estados de (a) proporcionar aire de forma continua a las cuatro ramas, (b) proporcionar ciclos de aire de 10 segundos de activación y 10 segundos desactivada mediante la conmutación entre pares de ramas, (c) proporcionar un ciclo de 10 segundos de activación y 30 segundos de desactivación, proporcionando aire a cada rama o secuencialmente (d) estar en un estado de aire desactivado continuo. El número de sopladores de aire utilizados en el estado (b) puede ser el doble que en el estado (c) y el número de sopladores de aire en el estado (a) puede ser el doble que en el estado (b). Un aparato y procedimiento para proporcionar el flujo de aire cíclico se describen en la Patente de Estados Unidos n.º 6.550.747.

25 Las burbujas de aire se introducen en el depósito a través de aireadores que se pueden montar por debajo o dentro de los módulos de membrana y conectarse mediante conductos a un soplador de aire. Las burbujas de aire suben a la superficie del depósito de membrana y crean un ascensor de aire que recircula el licor mezclado en el depósito alrededor del módulo de membrana. Cuando la caudal de aire está dentro de un alcance efectivo, las burbujas ascendentes y el licor mezclado agitan las membranas para evitar que los sólidos en el licor mezclado formen incrustaciones en los poros de la membrana. Además, también hay una transferencia de oxígeno de las burbujas al licor mezclado que, en aplicaciones de aguas residuales, proporciona oxígeno para el crecimiento de microorganismos si se desea.

30 Limpiezas químicas se pueden aplicar también para eliminar las suciedades que se acumulan en los poros de la membrana a pesar de la aplicación rutinaria de las burbujas, la relajación o el lavado a contracorriente. La limpieza química de mantenimiento, que requiere una solución química menos concentrada, se puede aplicar para mantener o reducir una tasa de disminución de la permeabilidad de la membrana. La limpieza química de recuperación, que requiere una solución química más concentrada, se puede aplicar a una frecuencia inferior para restaurar la permeabilidad de la membrana cuando ha disminuido considerablemente.

35 Las incrustaciones de la membrana es probablemente el problema operativo más común encontrado en los MBR. Las incrustaciones de la membrana se producen cuando los poros de membrana se obstruyen lo que da como resultado una pérdida de la permeabilidad de la membrana, que es el volumen de permeado que se puede pasar a través de una superficie de membrana por unidad de presión o vacío aplicado.

40 Los complejos mecanismos detrás de incrustaciones de la membrana han sido ampliamente estudiados en los últimos años.

Las incrustaciones de la membrana está muy influenciado por diversos parámetros de operación de los MBR tales como la temperatura de aguas residuales de influente, el factor de frecuencia de aireación de membrana, el flujo de aireación de membrana; el flujo de permeado, la duración de la permeación, el flujo y la duración del lavado a contracorriente, la duración de relajación, las frecuencias de limpiezas químicas de mantenimiento y recuperación.

45 El modelo de resistencia en serie se ha utilizado para la cuantificación de incrustaciones de la membrana y para la identificación del mecanismo de incrustaciones principal (es decir, el bloqueo de poros, la filtración de torta) en cualquier conjunto dado de condiciones operativas. Este modelo permite un desglose detallado y la cuantificación de incrustaciones de la membrana lo que permite la identificación de las causas de incrustaciones de la membrana.

50 Como se ha descrito previamente, existen diversas alternativas operacionales para la eliminación de incrustaciones disponibles en MBR tales como la relajación, el lavado a contracorriente, la limpieza química de mantenimiento y recuperación. La aplicación de cada uno de estos procedimientos se dirige a la eliminación de diferentes tipos de incrustaciones. La relajación y el lavado a contracorriente se diseñan para eliminar mecánicamente las suciedades depositadas sobre la superficie de membrana o ligeramente insertadas en los poros de la membrana. Por otro lado, las limpiezas químicas de mantenimiento y recuperación están destinadas a eliminar químicamente los incrustantes profundamente adsorbidos en los poros de la membrana y las biopelículas fuertemente unidas a la superficie de membrana.

Idealmente, la decisión para la aplicación de cualquiera de estos diferentes procedimientos de eliminación de incrustaciones, así como los restantes parámetros de operación de MBR viene precedida de un análisis detallado de incrustaciones de la membrana y de la identificación del mecanismo de incrustaciones principal. Sin embargo, este análisis, si se hace en absoluto, se basa en datos fuera de línea y se realiza de forma esporádica o solo durante el pilotaje o la puesta en marcha. Actualmente, el control de procedimiento de MBR es limitado y carece de flexibilidad para adaptarse a las diferentes condiciones de operación encontradas en la práctica. Los cambios en las operaciones se realizan manualmente a partir de los datos fuera de línea y con poca frecuencia, en todo caso, y dependen altamente de la habilidad y del buen juicio del operario.

El documento JP 2005 144291 A divulga un reactor biológico que incorpora un módulo de filtración de membrana, y divulga un procedimiento para controlar la aireación del mismo para reducir los costes energéticos. Cabassud M. *et al* ("Neutral Networks: a tool to improve UF plant productivity", *Desalination*, vol. 145, páginas 223-231, 10 de septiembre de 2002, Elsevier Science B.V) divulga un algoritmo de control predictivo para mejorar la productividad de una planta piloto de ultrafiltración para la producción de agua potable a partir de la superficie de agua cruda. El documento JP 1119680A divulga una solución para el chapado en oro no-tóxico de objetos no metálicos. El documento US 6.007.435 divulga un procedimiento y sistema para determinar el efecto de incrustaciones de una corriente de alimentación en un filtro de un sistema de filtración.

### **Sumario**

Un primer aspecto de la invención proporciona un procedimiento para el tratamiento de agua, estando el procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 de la presente memoria. Un segundo aspecto de la invención proporciona un sistema para el tratamiento de agua de acuerdo con la reivindicación 6 de la presente memoria. Esta memoria descriptiva describe un sistema de tratamiento de membrana sumergido que utiliza la información del procedimiento en tiempo real para ajustar el caudal de aire de limpieza instantáneo o promedio u otros parámetros alterables. Un procedimiento se describe también para ajustar el suministro de aire de limpieza a una membrana sumergida utilizando la información del procedimiento. El control por retroalimentación del equipo de suministro de aire real puede ser automático (a través de PLC o un ordenador) o manual (por ejemplo, un operario inicia un cambio en la tasa de suministro de aire).

Se han realizado diversas pruebas para determinar la tasa óptima de aireación para diversas aplicaciones, por ejemplo, tratamiento de aguas residuales, filtración directa de aguas superficiales y filtración de aguas tratadas previamente con coagulantes u otros productos químicos. Estos resultados, u otros resultados experimentales, sirven como base para el diseño de las capacidades del soplador y las tasas de aireación en los sistemas a gran escala. Se ha demostrado con éxito que, a una presión transmembrana particular, un aumento en la tasa de aireación puede resultar en un aumento en el flujo de permeado. Bajo estas condiciones, la transferencia de masa a través de la capa límite puede ser limitante de la tasa. La optimización del espesor de la capa límite a través de los ajustes del flujo de aire proporciona un procedimiento para reducir los requisitos energéticos para la operación.

Si la tasa de aireación es menor que la óptima, la transferencia de masa a través de la capa límite puede tener un efecto significativo y reducir la salida de permeado del sistema. Si la tasa de aireación es más alta que la óptima, la energía se desecha a medida que se suministra aire en exceso. Para maximizar la producción de un sistema y reducir al mínimo los costes de operación se requiere el control de la tasa de aireación a medida que varían las condiciones de procedimiento.

Esta memoria descriptiva describe un sistema o procedimiento en el que la eficacia de aireación se mejora para ayudar a reducir la energía de operación y el coste operativo. El flujo de aire, por ejemplo, a una tasa constante o una tasa promediada en el tiempo, se controla para tomar en cuenta las diferencias en tiempo real en las condiciones de procedimiento, por ejemplo, flujos de permeado, viscosidad de agua de alimentación, temperatura del aire de entrada, temperatura del agua o dosificación de coagulante. La presente invención permite que el sistema de control, con la información de la instrumentación del procedimiento, determine una tasa de aireación deseada o cambio en la tasa de aireación predicha para mejorar la producción o reducir los costes. El flujo de aire real se puede ajustar, a continuación, de forma automática por el sistema de control o manualmente por el operario dependiendo de la instalación. El ajuste de la tasa se puede producir mediante el ajuste de la tasa de aireación continua o mediante el ajuste de los tiempos de activación-desactivación de la aireación (aireación cíclica o intermitente), tiempos de activación/desactivación de trenes o el número de trenes en operación.

Los procedimientos de control de un sistema pueden incluir uno o más de

a) Medir el rendimiento del sistema durante un período de tiempo relativamente corto (por ejemplo, de 15 a 60 minutos), comparar esos resultados con los valores de referencia o valores de un período de tiempo previo o anterior y utilizar esa información para ajustar cualquiera de las siguientes:

- el caudal de aire real suministrado a la membrana durante un período de tiempo
- tiempos de activación/desactivación de la aireación cuando se opera en modos de aireación cíclicos o intermitentes

- tiempos de activación/desactivación de trenes
- número de trenes en operación y diseño de flujo de permeado por tren

b) Obtener la información del procedimiento en tiempo real y ajustar el caudal de aire u otras variables que figuran en a) anteriormente basándose en datos del modelo previamente incorporados en el sistema de control.

5 Algunos procedimientos se pueden utilizar con todos los sistemas de membranas sumergidos, incluyendo los sistemas de aguas residuales y de filtración directos.

De acuerdo con la invención reivindicada, esta memoria descriptiva describe un sistema o procedimiento de control de procedimiento en línea que utiliza el modelo de resistencia en serie, que se puede utilizar para operar MBR sumergidos de microfiltración o ultrafiltración u otros sistemas de tratamiento de membrana. Este control de procedimiento considera los datos de resistencia en línea en el ajuste de los parámetros de operación tales como el factor de frecuencia de aireación de membrana, el flujo de aireación de membrana, el flujo de permeado, la duración de la permeación, el flujo y duración del lavado a contracorriente, la duración de relajación, o frecuencias de limpiezas químicas de mantenimiento o recuperación para optimizar los costes operativos relacionados con la eliminación de incrustaciones de la membrana. Los medios para el control pueden ser, por ejemplo, la retroalimentación, la alimentación, predicción de adaptación o del modelo.

El sistema de control de procedimiento en línea consiste en sensores, accesorios de adquisición de datos, un controlador y accesorios de acondicionamiento de señal, si es necesario. Los accesorios de adquisición de datos y de acondicionamiento de señales son responsables de la recogida y acondicionamiento de los datos operativos del sistema (por ejemplo, temperatura de permeado, la presión transmembrana y flujo de permeado, etc.) mientras el controlador se encarga de analizar el flujo de datos operativos en línea utilizando el modelo de resistencia en serie, calcular los parámetros de control (por ejemplo, uno o más de  $R_a$ ,  $\Delta R_{ab}$  y  $R_c$ ), comparar los resultados obtenidos con los correspondientes puntos de consigna y tomar la decisión de cómo modificar el sistema de parámetros de operación para reducir los costes operativos relacionados con la eliminación de incrustaciones de la membrana. Los parámetros de operación se pueden modificar de forma gradual, uno a la vez, siguiendo una lógica de control que da prioridad a los cambios operativos que producen un impacto significativo en la eliminación de incrustaciones de la membrana sobre aquellos que producen un efecto limitado. La lógica de control que se presenta a continuación se puede modificar de acuerdo con las condiciones de operación encontradas en la práctica.

Para aquellos casos donde un valor de la resistencia es mayor que un punto de consigna de límite superior establecido y existe la necesidad de reducir la tasa de incrustaciones de la membrana (modo de Eliminación de Incrustaciones), un solo parámetro se puede cambiar, por ejemplo, el caudal de aireación de membrana o el factor de frecuencia puede aumentar. Como alternativa, se puede establecer una jerarquía de control que incluye uno o más de los siguientes:

1. Cambiar de relajación a lavado a contracorriente, si el lavado a contracorriente no es el modo de operación utilizado actualmente.
2. Aumentar el caudal de lavado a contracorriente.
3. Reducir el flujo de permeado mediante la activación de los trenes de membrana.
4. Aumentar el caudal de aireación de membrana.
5. Aumentar el factor de frecuencia de aireación de membrana.
6. Añadir potenciador de filtrabilidad del lodo activados tal como un polímero o cloruro férrico.
7. Aumentar a factor de frecuencia de aireación máxima disponible.
8. Aumentar la frecuencia de limpieza química de mantenimiento.
9. Aumentar la frecuencia de limpieza química de recuperación.

Para los casos en que se han alcanzado condiciones de operación estables y el valor de cada resistencia medida es igual o inferior a un punto de consigna de límite inferior establecido, hay una oportunidad de disminuir los costes de operación del sistema (modo de Ahorro Energético). Un parámetro individual se puede alterar, por ejemplo, el caudal o factor de frecuencia de aireación de membrana puede disminuir. Como alternativa, una jerarquía de control se puede establecer como sigue:

1. Reducir el factor de frecuencia de aireación de su máximo valor disponible.
2. Detener la adición del potenciador de filtrabilidad del lodo activados.
3. Disminuir el factor de frecuencia de aireación de membrana.

4. Disminuir el caudal de aireación de membrana.
5. Aumentar el flujo de permeado desactivando los trenes de membrana.
6. Disminuir el flujo de lavado a contracorriente, si el lavado a contracorriente es el modo de operación actualmente utilizado.
- 5 7. Cambiar de lavado a contracorriente a relajación, si la relajación si no es el modo de operación actualmente utilizado.
8. Disminuir la frecuencia de limpieza química de mantenimiento.
9. Disminuir la frecuencia de limpieza química de recuperación.

10 La modificación de estos parámetros se puede hacer, por ejemplo, por una cantidad eficaz incremental o predicha dentro de un intervalo de valores permitidos por el sistema. Opcionalmente, cada elemento de la jerarquía de control puede tener 2 o más estados discretos. Los estados se diferencian en su eficacia contra las incrustaciones. Para reducir las tasa de incrustaciones o contaminación, la jerarquía de control puede mover una o más parámetros controlados al el estado más eficaz partiendo de la parte superior de la jerarquía hasta que se consiguen las condiciones de operación aceptables, por ejemplo, como se determina mediante la comparación de los valores de resistencia con sus puntos de consigna correspondientes. Para proporcionar un ahorro energético, la jerarquía de control puede mover uno o más parámetros a un estado menos eficaz partiendo de la parte superior de la jerarquía hasta que se consigue el rendimiento deseado. Si bien algunos parámetros pueden opcionalmente variarse infinitamente, los inventores han encontrado que muchos parámetros tienen solamente intervalos muy pequeños en los que se pueden variar en un sistema real y proporcionar dos o más estados discretas puede proporcionar un control más eficaz. La limpieza con descarga de aire es, por ejemplo, sorprendentemente difícil de variar. Los sopladores de aire que alimentan los aireadores tienden a operar de manera eficaz solo en un pequeño intervalo de velocidades. Los aireadores también hacen subir los lodos o producen burbujas de tamaño deficiente si el caudal de aire de alimentación está fuera de un intervalo estrecho. Sin embargo, el A.F.F. se puede variar, por ejemplo entre dos estados discretos, tales como 0,5 y 0,25, cambiando la operación de un conjunto de válvulas y activando o desactivando uno o más de un conjunto de sopladores, por ejemplo, desactivando la mitad de los sopladores cuando A.F.F. se cambia de 0,5 a 0,25. Los dos estados se diferencian marcadamente en efecto en las incrustaciones pero los sopladores y los aireadores pueden operar bien en ambos estados. Una jerarquía de control puede tener más o menos parámetros que la jerarquía que se ha descrito anteriormente, y los parámetros puede estar en otros órdenes. Cuando un parámetro en la jerarquía no tiene estados discretos, su valor se puede cambiar a un límite superior o inferior antes de pasar al siguiente parámetro en la jerarquía.

#### **Breve descripción de los dibujos**

- La Figura 1 es una representación esquemática de un sistema de tratamiento de membrana sumergido con un sistema de control de acuerdo con una realización de la invención o adaptado para realizar un procedimiento de acuerdo con la invención.
- 35 La Figura 2 es un árbol de decisión para un sistema de control.
- La Figura 3 es otro árbol de decisión para un sistema de control.
- La Figura 4 es un gráfico de resultados experimentales.
- La Figura 5 es una vista esquemática en planta de un depósito de membrana que muestra la disposición de los aireadores.
- 40 La Figura 6 es un dibujo esquemático de partes de un sistema de suministro de aire.

#### **Descripción detallada**

Haciendo referencia a la Figura 1, un sistema 8 incluye un sistema 10 de tratamiento de agua de membrana sumergido que se conecta a uno o más sensores 12 que proporcionan información de entrada a un ordenador 14 y, opcionalmente, a un operario a través de una interfaz 16 de operario. Las entradas del procedimiento específico proporcionadas por los sensores 12 pueden incluir uno o más de los siguientes:

- Flujo de permeado
- Caudal de rechazo o concentrado
- Filtrabilidad del lodo
- Temperatura del fluido

## ES 2 599 640 T3

- Viscosidad del fluido
- Concentración del fluido de sólidos suspendidos
- Tasa de adición de coagulante u otro tipo compuesto químico de pretratamiento
- tasa o concentración de dosificación de carbón activado
- 5 • Temperatura de aire entrante en soplador
- Tasa de recuperación (permeado producido/agua de alimentación proporcionada)
- Concentración de oxígeno disuelto (sistemas de aguas residuales)
- Tasa de absorción de oxígeno (sistemas de aguas residuales)
- Tiempo de retención de sólidos (sistemas de aguas residuales)
- 10 • Tasas de recirculación de licor mezclado (sistemas de aguas residuales)

Después de considerar la información de los sensores 12, el ordenador 14, después de ejecutar sus propios programas o según las instrucciones de un operario a través de la interfaz 16, instruye a los controladores 18 del procedimiento a ajustar el régimen de aireación del sistema 10.

15 Los procedimientos o etapas que los controladores 18 del procedimiento pueden programar pueden ser uno o más de:

a) Ajustes del caudal de aire (continuo, intermitente o cíclico)

**Ejemplo:** reducir el flujo de aire instantáneo de  $0,35 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$  a  $0,30 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$

b) Ajustes de los tiempos de activación y desactivación de aireación durante el ciclo de aireación cíclico o intermitente,

20 **Ejemplos:** cambiar los tiempos de aireación cíclicos de "10 segundos de activación/10 segundos de desactivación" a "10 segundos de activación/20 segundos de desactivación", o cambiar los tiempos de aireación intermitente de "1 minuto cada 30 minutos" a "1 minuto cada 45 minutos"

c) Ajustes de los tiempos de activación y desactivación de producción para un tren individual, o

25 **Ejemplo:** cambiar de "18 horas de activación/6 horas de desactivación" a "3 horas de activación/1 hora de desactivación "

d) Ajustes del número de trenes en operación o diseño del flujo de permeado para cada tren como parte de un sistema completo.

**Ejemplo:** cambiar de 2 sistemas que operan a un flujo superior a 3 sistemas que operan a un flujo inferior (por ejemplo, cuando la filtrabilidad del lodo cambia)

30 Los procedimientos por los que los sensores 12 se pueden utilizar para recoger las mediciones de procedimiento en tiempo real que se pueden utilizar para determinar los cambios en el régimen de aireación pueden incluir uno o más de los siguientes:

35 Un procedimiento puede implicar las etapas de ensayar, evaluar resultados y después optimizar. Por ejemplo, los controladores 18 del procedimiento pueden operar para proporcionar una tasa de aireación fija durante un período de tiempo para establecer las condiciones de referencia de operación del procedimiento (incluyendo el flujo, la presión transmembrana). Estos datos de referencia se pueden realizar, por ejemplo, durante 4 a 8 ciclos de filtración, aproximadamente 2 horas. El sistema 8 realiza después automáticamente una prueba en uno o más de los trenes. En esta prueba, el mismo mantendría el mismo flujo de producción de permeado, pero ajustaría la tasa de aireación hacia arriba o hacia abajo en un determinado porcentaje, por ejemplo, 5 %, durante tantos ciclos de filtración según sea necesario para obtener un rendimiento de estado estacionario. El sistema 8 podría supervisar las condiciones de procedimiento (en particular TMP y la tasa de incrustaciones) y sería capaz de determinar cuándo se alcanzan las condiciones de estado estacionario. Dado que se espera que el desarrollo de la nueva capa límite sea extremadamente rápido, se espera que el estado de equilibrio sea de 2 o 3 ciclos de filtración. Las condiciones de procedimiento específicas serán evaluadas por el sistema 8 para determinar si el cambio ha afectado a la eficacia de aireación. Conociendo la eficacia de los sopladores y de las bombas de permeado, el sistema 8 puede determinar si la nueva tasa de aireación arroja un mejor rendimiento en términos de cualquiera del flujo de permeado simple o la eficacia energética total (caudal por la entrada de energía unitaria). Si una disminución de la salida del soplador no

45



5 cambia la TMP de permeación, se puede concluir que la tasa de aireación era mayor que la necesaria para eliminar los sólidos suspendidos cargados en la membrana. Si una disminución de la tasa de aireación da como resultado un aumento de la TMP, entonces el sistema de control puede cuantificar los cambios en los costes de operación y evaluar si el cambio fue positivo o negativo. Una vez que el análisis de los resultados se ha completado, el sistema puede realizar una prueba similar a una nueva tasa de aireación. Esta prueba se puede repetir hasta que la tasa de aireación óptima se ha determinado.

10 El sistema continuaría operando a la tasa de aireación de consigna hasta que se observen cambios en las condiciones de operación del procedimiento, por ejemplo un aumento en el punto de consigna del flujo de permeado resultaría en la repetición de las pruebas de optimización. Las pruebas de optimización se podrían desencadenar también en base a un intervalo de tiempo (por ejemplo, cada 6 horas o una vez al día) o siempre que sean iniciadas por el operario (por ejemplo, después de haber desechado los lodos).

En un procedimiento que utiliza una prueba de filtrabilidad en línea, un tren de filtros de membrana se opera en condiciones controladas durante un corto período de tiempo para probar la filtrabilidad del fluido que se filtra. La prueba consiste en tres pasos:

- 15 1. Detener la permeación de la membrana pero continuar con aireación durante un periodo de 30 segundos a 5 minutos. La finalidad de esta etapa es desconcentrar el líquido que rodea las membranas y reducir el espesor de la capa límite a un nivel de referencia.
- 20 2. Detener la aireación e iniciar la penetración de los filtros de membrana a un flujo de membrana especificado durante un periodo de 30 segundos a 20 minutos. Durante este tiempo, la presión transmembrana se elevará debido a la renovación de la capa límite en la superficie de los filtros de membrana. La finalidad de esta etapa es desarrollar una proporción entre la presión de transmembrana y el tiempo. Esta proporción se puede correlacionar con una tasa de aireación óptima.
- 25 3. Detener la permeación de la membrana y reanuda la aireación durante un periodo de 30 segundos a 5 minutos. El objetivo es eliminar los sólidos que se acumulan en las membranas durante la etapa 2.
4. Basándose en los resultados de la prueba, y comparando los resultados con los resultados del modelo introducido previamente, ajustar la tasa de aireación o estrategia de operación (hacer referencia a los procedimientos a) a d) descritos anteriormente y el tren está listo para operar bajo nuevas condiciones optimizadas.

30 En un procedimiento de modelado de los parámetros de procedimiento, el sistema de control utilizaría datos en tiempo real para determinar las condiciones de operación del sistema de membrana y basándose en esas condiciones y modelos previamente introducidos, establecería el flujo de aireación o la estrategia de operación del sistema en consecuencia. La optimización puede ser tan simple como el seguimiento de un solo parámetro (por ejemplo, el flujo de permeado aumenta como también lo hace la tasa de aireación) o tantos parámetros como sea necesario se pueden utilizar. Por ejemplo, en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, la tasa de aireación óptima podría ser una función de la filtrabilidad del lodo y el caudal de permeado. Un modelo se desarrolla primero y los datos se incorporan en el sistema 8. Los modelos necesarios dependerán de cada aplicación y de los parámetros que se pueden esperar que cambien con la operación. Otro ejemplo sería si la filtrabilidad del lodo es buena, 2 trenes pueden operar a un flujo más alto y cuando la filtrabilidad del lodo es baja, tres trenes pueden operar a flujos proporcionalmente más bajos.

40 Un procedimiento de acuerdo con la invención utiliza los datos de resistencia calculados, en la forma de más de uno de los parámetros de resistencia en el modelo de resistencia en serie. De acuerdo con la invención reivindicada, la resistencia en el modelo en serie representa la resistencia total a la filtración como la combinación de una serie de resistencias independientes. Los valores de resistencia se pueden utilizar, por ejemplo, en la retroalimentación, alimentan, procedimientos de control adaptativos o predictivos de modelos.

$$45 \quad R_t = R_m + R_a + R_b + R_c$$

$R_t$  es la resistencia total,  $m^{-1}$

$R_m$  es la resistencia de la membrana,  $m^{-1}$  como se representa por la prueba de agua limpia de membrana

$R_a$  es la resistencia a incrustaciones por adsorción, causada por agentes de incrustaciones adsorbidos en la superficie y en la estructura porosa de la membrana.

50  $R_b$  es la resistencia de bloqueo del poro,  $m^{-1}$ , causada por la materia coloidal y micro partículas que son comparables en tamaño al tamaño de poro de la membrana. Esto normalmente se representa por un rápido aumento de la presión transmembrana inmediatamente después de un lavado a contracorriente.

$R_c$  es la resistencia de torta,  $m^{-1}$  que aumenta progresivamente entre dos ciclos de lavado a contracorriente a medida que la torta se acumula en la superficie de membrana.

Para esta aplicación particular, el valor de  $R_m$  se considera como constante y se puede obtener a partir de una prueba de agua limpia. La resistencia durante el lavado a contracorriente ( $R_{db}$ ) se utiliza para calcular la resistencia a incrustaciones por adsorción  $R_a$  de la resistencia de la membrana como sigue:

$$R_a = R_{db} \cdot f - R_m$$

- 5 donde  $f$  es un factor que relaciona la resistencia durante la permeación con la resistencia durante el lavado a contracorriente.

La resistencia de torta ( $R_c$ ) se calcula mediante la realización de una regresión lineal de aquellos datos experimentales de un ciclo de permeación determinado que corresponde al modo de permeación y cumple con una o más de las siguientes condiciones, denominadas condiciones de Ciclo de Permeación Válido (VPC).

10  $J = J_{\text{consigna}} \pm 35 \%$ ;

donde  $J_{\text{consigna}}$  es el punto de consigna de la bomba de permeado. Criterios alternativos o adicionales también se pueden utilizar para las condiciones de VPC. Por ejemplo, las condiciones de VPC pueden ser que  $J = J_{\text{consigna}} \pm 35 \%$  y  $dR_t/dT < 5 \%$  durante 5 muestras consecutivas.  $dR_t/dT$  es la tasa de aumento de la resistencia total durante la permeación y se calcula como:

15  $dR_t/dT = (R_{n+1} - R_n) / (T_{n+1} - T_n)$

Cuando  $R_n$  y  $R_{n+1}$  son dos puntos de datos consecutivos de la resistencia total de cualquier ciclo de permeación dado y  $T_n$  y  $T_{n+1}$  son los tiempos de permeación correspondientes.

A continuación, la resistencia de torta se calculará utilizando los datos experimentales que cumplen con las condiciones ilustradas anteriormente.

20  $R_c = M (T_2 - T_1)$

donde  $m$  es la pendiente de la regresión lineal;  $T_1$  y  $T_2$  son el inicio y el fin del ciclo de permeación; respectivamente.

La resistencia al bloqueo de los poros se estimará como sigue:

$$R_b = R_{ab} \cdot e - R_m$$

- 25 donde  $e$  es la eficacia de eliminación de la torta y representa la cantidad de la torta que queda en la superficie de membrana después de la aplicación de la relajación o lavado a contracorriente y es una función de la pegajosidad de la torta y las condiciones operativas de la relajación o lavado a contracorriente.  $R_{ab}$  es la resistencia después del lavado a contracorriente y se determina por el promedio de las primeras cinco muestras de un ciclo de permeación que cumplen la condición de VPC como se indica en el cálculo de la resistencia de torta.

$$R_{ab} = (R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_{t4} + R_{t5}) / 5$$

- 30 La primera etapa en la estrategia de control implica el cálculo de las resistencias de filtración durante la operación en modo de permeación utilizando datos operativos de MBR en línea, de manera similar como se ha descrito anteriormente.

- 35 El cálculo de la resistencia después de lavado a contracorriente ( $R_{ab}$ ), de la resistencia después de tasa de aumento de lavado a contracorriente ( $\Delta R_b$ ) y de la resistencia de filtración de torta ( $R_c$ ) son de particular interés para el ajuste del valor del factor de frecuencia de aireación de membrana, del flujo de aireación de membrana, la duración del ciclo de relajación, la duración del ciclo de permeación, el flujo de lavado a contracorriente, la duración del lavado a contracorriente para reducir la tasa de incrustaciones de la membrana, utilizando un control de procedimiento en línea. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- 40 Medir TMP, el flujo de permeado, la temperatura y tiempo para dos ciclos consecutivos de permeación y lavado a contracorriente o relajación.

Calcular  $\Delta R_{ab}$  y  $R_c$  para cualquier ciclo de permeación dado como sigue:

i.  $\Delta R_{ab} = R_{ab} (\text{ciclo 2}) - R_{ab} (\text{ciclo 1})$

ii.  $R_c = M (T_2 - T_1)$

- 45 Comparar los valores de  $\Delta R_{ab}$  y  $R_c$  con sus puntos de consigna correspondientes (Tabla 1.0) para ajustar el valor del factor de frecuencia de aireación de membrana, el flujo de aireación de membrana, la duración del ciclo de relajación, la duración del ciclo de permeación, el flujo y la duración del lavado a contracorriente, las frecuencias de limpieza de mantenimiento y recuperación para reducir al mínimo la energía necesaria para la eliminación de

incrustaciones de la membrana. Los correspondientes cambios en las operaciones se pueden realizar en cada ciclo, si es necesario.

El cálculo de la resistencia por adsorción ( $R_a$ ) es opcional, pero puede ser de particular interés para el ajuste del valor de las frecuencias de limpieza química de mantenimiento y recuperación utilizando un control de procedimiento en línea, si se desea. Sin embargo, el cálculo de  $R_a$  se puede omitir también si no se controlan los procedimientos de limpieza química. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

1. Iniciar un ciclo (1) de filtración seguido de un período de lavado seguido de otro ciclo (2) de filtración. En aquellos casos en los que la relajación se utiliza como el mecanismo para la eliminación de torta se requeriría cambiar al modo de impulso inverso después de un número de ciclos para recoger la información necesaria para estimar la condición de la membrana.

2. Medir TMP, el flujo de permeado, la temperatura y tiempo de dos ciclos de filtración y lavado a contracorriente consecutivos.

3. Calcular ( $R_a$ ) como sigue:

$(R_a) =$  resistencia durante el lavado a contracorriente (ciclo 2) - resistencia durante el lavado a contracorriente (ciclo 1)

4. Comparar los valores de ( $R_a$ ) con su punto de consigna correspondiente para ajustar el valor de las frecuencias de limpiezas químicas de mantenimiento y recuperación para reducir al mínimo la energía necesaria para la eliminación de incrustaciones de la membrana. Los correspondientes cambios operativos se realizarán después de cinco ciclos, si es necesario.

De acuerdo con la invención reivindicada, se establecen dos grupos diferentes de puntos de consigna para un sistema particular, en concreto, un primer y un segundo grupo de puntos de consigna, que se pueden referir como sostenibles y optimizados. Los valores de estos puntos de consigna pueden cambiar para diferentes plantas de tratamiento ya que tienen en cuenta diferentes variables de operación (por ejemplo, características del licor mezclado, la temperatura de las aguas residuales) que se sabe que están relacionadas con el sitio. Los puntos de consigna pueden determinarse durante el pilotaje de un sistema o basarse en el rendimiento histórico del sistema. Uno o más de los puntos de consigna pueden variar también con el tiempo. Las diferentes resistencias que están siendo monitoreadas, por ejemplo,  $1.R_{ab}$  y  $R_e$ , se compararán con sus respectivos puntos de consigna para realizar los cambios operativos adecuados. Las resistencias calculadas pueden ser valores individuales o una combinación de diversos valores separados en el tiempo, por ejemplo, como los obtenidos por un promedio o regresión matemática.

El punto de consigna sostenible representa el valor máximo de la resistencia al que el sistema se debe operar. De acuerdo con la invención reivindicada, cuando cualquiera de los valores de las resistencias que se están monitorizando es superior a cualquiera de los puntos de consigna sostenibles correspondientes (Zona Roja); solo se realizarán aquellos cambios operativos que consiguen una reducción de incrustaciones de la membrana (Modo de Eliminación de Incrustaciones).

Por otra parte, el punto de consigna optimizado es el valor máximo para el que los cambios operativos para lograr ahorros de energía son posibles; de acuerdo con la invención reivindicada, cuando cualquiera de los valores de las resistencias que están siendo monitoreadas se encuentra entre el punto de consigna sostenible y optimizado (Zona Amarilla), no se realizará ningún cambio de los parámetros de operación. De acuerdo con la invención reivindicada, cuando todos los valores de las resistencias que están siendo monitoreadas son más bajos que los valores del punto de consigna optimizado correspondiente (Zona Verde), es entonces posible realizar los cambios operativos que conllevan a un ahorro energético (Modo de Ahorro Energético).

Si se excede uno de los puntos de consigna, entonces se considerará que el sistema se encuentra operativo en la zona correspondiente a ese punto de consigna. Los dos puntos de consigna mejoran la estabilidad del procedimiento, ayudan a evitar el cambio entre operaciones del sistema muy frecuentemente o en respuesta a las mediciones de resistencia errantes y permiten la operación durante largos períodos de tiempo dentro de un intervalo entre los dos puntos de consigna.

Las Figuras 2 y 3 muestran árboles de decisión para sistemas que tienen un solo parámetro, A.F.F., ajustable entre dos estados de operación. Los dos estados son 10 segundos de activación 10 segundos de desactivación y 10 segundos de activación 30 segundos de desactivación. En el ciclo 10/10, una serie de sopladores de aire se utilizan y el suministro de aire total realiza un ciclo entre dos mitades de un número de aireadores. En el ciclo 10/30, la mitad de los sopladores de aire se desactiva y se recicla el aire total entre cuatro cuartas partes del número de aireadores. Por ejemplo, la Figura 5 muestra un depósito 30 de membrana que tiene diversos aireadores 32 de conductos cada uno conectado a uno de los dos colectores 34 de depósito que discurren a lo largo del fondo del depósito 30. El colector 34a de depósito suministra aire a una mitad de los aireadores 32 mientras que el colector 34b de depósito suministra aire a la otra mitad de los aireadores 32. Patas 36 de caída se extienden hacia arriba desde los colectores 34 de depósito y permiten que el aire se alimente desde encima del depósito 30 a la red de aireadores 32. Con

referencia a la Figura 6, 4 depósitos 30 contienen cada uno un número de casetes 38 de membrana sumergidos colocados sobre la red de aireadores 32. Los casetes 38 se conectan entre sí para la eliminación de permeado y pueden denominarse tren. Los aireadores 32, los colectores 34 de depósito y las patas 36 de caída no se muestran en la Figura 6, pero también están presentes en cada depósito 30 de la Figura 6 como se muestra en la Figura 5.

5 Las patas 36 de caída de cada depósito 30 se conectan a los conectores 40 del sistema 42 de suministro. Un sistema 42 de suministro incluye además un conjunto 44 de válvulas en las tuberías 46 entre los conectores 40 y un colector 48 de planta. El colector 48 de planta se conecta a cuatro sopladores 50. Las válvulas 44 se accionan por solenoides de accionadores fluidicos y se conectan a los controladores 18 del procedimiento. Durante la aireación 10/10, los cuatro sopladores 50 están activados, y las válvulas 44 se controlan de tal manera que las válvulas 44a, c, e, g se abren durante 10 segundos mientras que las válvulas 44b, d, f, h se cierran, después las válvulas 44a, c, e, g se cierran durante 10 segundos mientras que las válvulas 44b, d, f, h se abren. Este ciclo se repite siempre que se solicite el ciclo 10/10. Por lo tanto, cada casete tiene siempre un flujo de aire hacia el mismo, pero el flujo cambia entre los aireadores 32 conectados a los diferentes colectores 34 de depósito. Cuando se solicita un ciclo 10/30, dos trenes se vinculan de tal forma que el flujo de aire se alterna entre los dos colectores 34 de depósito en cada depósito 30 y entre los dos depósitos 30, es decir, entre cuatro colectores 34 de depósito en dos depósitos 30. Por tanto, cada casete 38 experimenta un patrón de aireación de 10 segundos de activación 10 segundos de desactivación pero con la fuente de aire en periodos de activación de aire consecutivos entre los dos conjuntos de aireadores 32 en el depósito 30. Cada aireador 32 tiene un patrón de 10 segundos de activación 30 segundos de desactivación. En mayor detalle, durante 10 segundos las válvulas 44a, e están abiertas mientras que las otras están cerradas. Durante los siguientes 10 segundos, las válvulas 44c, g están abiertas mientras que las otras están cerradas. Durante los siguientes 10 segundos, las válvulas 44b, f están abiertas mientras que las otras están cerradas. Durante los siguientes 10 segundos, las válvulas 44d, h están abiertas mientras que las otras están cerradas. Este patrón se repite siempre que se soliciten las aireaciones 10/30. Otros procedimientos de reducir el tiempo y separación promedio de flujo de aire sin reducir el flujo instantáneo a aireadores individuales se podrían utilizar también. Por ejemplo, en un sistema en el que se suministra aire continua o cíclica o intermitentemente a partir de un conjunto de sopladores hacia un conjunto de aireadores, la mitad de los sopladores se puede desactivar y cerrar una válvula para aislar la mitad de los aireadores. Aunque la descripción anterior describe dos o tres tipos de valores de resistencia, uno, dos, tres o más de tres valores de resistencia se pueden utilizar. Por ejemplo, en el sistema de la Figura 2, la resistencia de torta puede ser el único parámetro a utilizar, ya que está estrechamente relacionado con la limpieza con descarga de aire.

## Ejemplos

### Ejemplo 1.

En un período de prueba de 2 meses se estudió la aplicación de un control de procedimiento MBR en línea, basado en los resultados del modelo de resistencia en serie. Este control de procedimiento MBR en línea ajustará diferentes parámetros de operación (por ejemplo, factor de frecuencia de aireación de membrana, la duración de relajación, etc.) para reducir los costes operativos de MBR o aumentar la eliminación de incrustaciones de la membrana, según se requiera.

Una planta piloto de membrana sumergida ZeeWeed®, fabricada por ZENON Environmental Inc, se ha operado utilizando una alimentación de agua residual cruda procedente de un centro de control de contaminación de agua municipal. El agua residual cruda se filtró a través de una pantalla de 0,75 mm. Los pilotos se operaron a un tiempo de retención hidráulico de 6 horas y un tiempo de retención de lodo de 15 días.

En el primer conjunto de condiciones que duró 2 días, las membranas ZeeWeed® fueron operadas durante un ciclo de permeación de 10 minutos con un flujo neto de 14 galones/(pie cuadrado\*día) (gfd), un flujo instantáneo correspondiente de 15,4 gfd y el tiempo de relajación de 1 minuto. Los sistemas se operaron a una concentración de sólidos suspendidos de licor mezclado de aproximadamente 10 g/l.

El factor de frecuencia de aireación de membrana se estableció en 0,25 (10 segundos de activación y 30 segundos de desactivación) durante la permeación y la relajación; se utilizó un caudal de burbujas de aire gruesas de 8 scfm por vacío. El biorreactor se aireó utilizando aireadores de burbujas finas. El licor mezclado se hizo recircular del biorreactor al depósito de membrana por una bomba y se devolvió al biorreactor por gravedad. Los lodos se desecharon en forma intermitente para mantener un tiempo de retención de lodos constante.

Un análisis detallado de las características de este sistema de MBR permitió la identificación de los puntos de consigna correspondientes del control de procedimiento de MBR en línea para este sistema; éstos se presentan en la Tabla 1.0. La zona amarilla es una zona de operación entre la zona roja y la zona verde a pesar de que no tiene un nombre de modo de operación o parámetros distintos.

55

## ES 2 599 640 T3

Tabla 1.0 Puntos de consigna del control de procedimiento de MBR en línea.

			Parámetro		
Zona de operación	Punto de consigna	Modo de operación	$\Delta R_{ab}$	$R_c$	$R_a$
Roja	Sostenible	Eliminación de Incrustaciones	$2 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^5$
Verde	optimizado	Ahorro energético	$1 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^5$

Las Tablas 1.1 y 1.2 contienen algunos de los datos operativos que corresponden a dos ciclos consecutivos de permeación que operan bajo las condiciones operativas descritas anteriormente. Estos datos operativos se utilizan para describir los cálculos de resistencia.

5 Tabla 1.1 Datos experimentales del ciclo 1 de permeación (condiciones 1 experimentales).

Hora	FLUJO (gfd)	TMP (psi)	Temperatura (°C)	$\mu$	$R_t (m^{-1})$	dR/dT
08:50:41	0,0	0,04	12,73	0,0	N/A	N/A
08:50:46	0,0	0,02	12,73	0,0	N/A	N/A
08:50:51	0,0	0,03	12,72	0,0	N/A	N/A
08:50:56	0,0	0,03	12,72	0,0	N/A	N/A
08:51:01	0,0	0,03	12,68	0,0	N/A	N/A
08:51:07	0,0	0,03	12,69	0,0	N/A	N/A
08:51:12	0,0	0,03	12,69	0,0	N/A	N/A
08:51:17	0,0	0,01	12,70	0,0	N/A	N/A
08:51:22	0,0	-0,07	12,71	0,0	N/A	N/A
08:51:27	0,0	0,02	12,72	0,0	N/A	N/A
08:51:32	0,0	-0,02	12,74	0,0	N/A	N/A
08:51:37	0,0	0,84	12,73	0,0	N/A	N/A
08:51:42	8	1,39	12,72	0,0	2,57E + 12	6
08:51:47	15,5	2,90	12,70	0,0	2,73E + 12	2
08:51:52	15,6	2,96	12,71	0,0	2,79E + 12	0
08:51:57	15,5	2,99	12,70	0,0	2,79E + 12	1
08:52:02	15,7	2,99	12,69	0,0	2,81E + 12	1
08:52:07	15,6	3,01	12,68	0,0	2,83E + 12	0
08:52:12	15,7	3,02	12,70	0,0	2,83E + 12	-1
08:52:17	15,7	3,03	12,71	0,0	2,81 E + 12	0
08:52:22	15,4	3,03	12,72	0,0	2,79E + 12	1
08:52:27	15,5	3,00	12,71	0,0	2,83E + 12	0

## ES 2 599 640 T3

Tabla 1.2 Datos experimentales del ciclo 2 de permeación (condiciones 1 experimentales).

Hora	FLUJO (gfd)	TMP (psi)	Temperatura (°C)	$\mu$	Rt (m <sup>-1</sup> )	dR/dT
09:01:42	0,000	0,09	12,65	0,001	N/A	N/A
09:01:47	0,000	0,06	12,64	0,001	N/A	N/A
09:01:52	0,000	0,04	12,63	0,001	N/A	N/A
09:01:57	0,000	0,05	12,62	0,001	N/A	N/A
09:02:02	0,000	0,04	12,63	0,001	N/A	N/A
09:02:07	0,000	0,04	12,63	0,001	N/A	N/A
09:02:12	0,000	0,16	12,64	0,001	N/A	N/A
09:02:17	0,000	0,03	12,65	0,001	N/A	N/A
09:02:22	0,000	-0,01	12,66	0,001	N/A	N/A
09:02:27	0,000	0,02	12,65	0,001	N/A	N/A
09:02:32	0,000	0,02	12,65	0,001	N/A	N/A
09:02:37	0,000	0,02	12,64	0,001	N/A	N/A
09:02:42	4,753	0,77	12,64	0,001	2,37E + 12	15
09:02:48	9,888	1,89	12,64	0,001	2,80E + 12	1
09:02:53	15,777	3,03	12,63	0,001	2,83E + 12	2
09:02:58	15,550	3,08	12,64	0,001	2,90E + 12	3
09:03:03	15,410	3,20	12,64	0,001	2,97E + 12	0
09:03:08	15,498	3,09	12,65	0,001	2,98E + 12	-5
09:03:13	15,593	3,09	12,66	0,001	2,84E + 12	2
09:03:18	15,601	3,06	12,66	0,001	2,89E + 12	0
09:03:23	15,667	3,10	12,65	0,001	2,89E + 12	1
09:03:28	15,550	3,12	12,64	0,001	2,93E + 12	0
09:03:33	15,615	3,13	12,64	0,001	2,93E + 12	2
09:03:38	15,396	3,13	12,64	0,001	2,99E + 12	0

Los datos operativos correspondientes a estas condiciones se utilizaron para calcular las diferentes resistencias relevantes.

- 5 Como se ha mencionado anteriormente, se calculará la resistencia después del lavado a contracorriente basándose en el promedio de los primeros cinco valores que cumplan con las condiciones validas del ciclo de permeación. La resistencia a incrustaciones por adsorción no se calculó en los siguientes ejemplos.

- 10 Como se puede observar en la tabla presentada, para el primer ciclo de permeación, los valores anteriores a 08:51:47 no cumplen con las condiciones de VPC y en consecuencia no se pueden utilizar para este cálculo. Los valores correspondientes de 08:51:47 a 08:52:07 son los primeros cinco valores que cumplen con estas condiciones. Para el segundo ciclo de permeación se utiliza el mismo procedimiento. El valor de  $R_{ab}$  se calcula como sigue:

$$R_{ab}(\text{ciclo 1}) = (2,73 \cdot 10^{12} + 2 \cdot 2,79 \cdot 10^{12} + 2,81 \cdot 10^{12} + 2,83 \cdot 10^{12}) / 5 = 2,79 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

$$R_{ab}(\text{ciclo 2}) = (2,80 \cdot 10^{12} + 2,83 \cdot 10^{12} + 2,90 \cdot 10^{12} + 2,97 \cdot 10^{12} + 2,98 \cdot 10^{12}) / 5 = 2,89 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

## ES 2 599 640 T3

$$\Delta R_{ab}(\text{ciclo 1}) = R_{ab}(\text{ciclo 2}) - R_{ab}(\text{ciclo 1}) = 2,89 \cdot 10^{12} - 2,79 \cdot 10^{12} = 1,0 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

Como se ha establecido anteriormente,  $R_c$  se puede estimar como sigue:

$$R_c = M (T_2 - T_1)$$

Después de realizar la regresión lineal el valor de la pendiente  $M$  se determinó:

5  $M = 1,18 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}/\text{min}$

$$R_c = 1,18 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}/\text{min} \cdot (9,99 \text{ min}) = 1,17 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

10 A partir del análisis de las resistencias calculadas, se puede concluir que los valores de  $\Delta R_{ab}$  y  $R_c$  son ambos superiores a los puntos de consigna sostenibles correspondientes, lo que significa que el sistema está operando en la Zona Roja y la aplicación del modo de Eliminación de Incrustaciones se necesita para evitar cualquier formación de obstrucciones en los módulos de membrana.

15 Siguiendo la jerarquía de control establecida para el modo de Eliminación de Incrustaciones, el factor de frecuencia de aireación se incrementó de 0,25 (10 activación/30 desactivación) a 0,5 (10 activación/10 desactivación), manteniendo constantes los parámetros operativos restantes. Inmediatamente después del cambio en el factor de frecuencia de aireación, se utilizaron los datos operativos correspondientes a estas nuevas condiciones operativas para el cálculo de las diferentes resistencias relevantes para evaluar la eficacia de estas medidas sobre la eliminación de incrustaciones. El procedimiento es el mismo que se realizó anteriormente.

Las Tablas 1.3 y 1.4 contienen algunos de los datos operativos correspondientes a dos ciclos de permeación consecutivos realizados en el modo de Ahorro Energético utilizando un factor de frecuencia de aireación de 0,25. Estos datos operativos se utilizan para describir los cálculos de resistencia.

20 Tabla 1.3. Datos experimentales del ciclo 1 de permeación (condiciones 2 experimentales).

Hora	FLUJO (gfd)	TMP (psi)	Temperatura (°C)	$\mu$	$R_t$ (m <sup>-1</sup> )	dR/dT
00:05:42	0	0,016	14,256	0,001	N/A	N/A
00:05:47	0	-0,109	14,260	0,001	N/A	N/A
00:05:52	0	0,003	14,244	0,001	N/A	N/A
00:05:57	0	0,011	14,240	0,001	N/A	N/A
00:06:02	0	0,019	14,214	0,001	N/A	N/A
00:06:07	0	-0,109	14,206	0,001	N/A	N/A
00:06:12	0	0,003	14,191	0,001	N/A	N/A
00:06:17	0	0,011	14,176	0,001	N/A	N/A
00:06:22	0	-0,006	14,160	0,001	N/A	N/A
00:06:27	0	-0,029	14,149	0,001	N/A	N/A
00:06:32	0	-0,001	14,160	0,001	N/A	N/A
00:06:37	0	0,005	14,153	0,001	N/A	N/A
00:06:42	6,350	0,850	14,157	0,001	1,940E + 12	-1,68
00:06:47	14,466	1,886	14,157	0,001	1,908E + 12	-3,77
00:06:52	15,117	1,900	14,160	0,001	1,839E + 12	0,29
00:06:57	15,154	1,910	14,153	0,001	1,844E + 12	-0,46
00:07:02	15,264	1,920	14,153	0,001	1,836E + 12	1,37
00:07:07	15,117	1,921	14,153	0,001	1,861E + 12	-0,01
00:07:12	15,147	1,929	14,157	0,001	1,861E + 12	-0,01
00:07:17	15,213	1,930	14,179	0,001	1,861E + 12	-1,11
00:07:22	15,271	1,919	14,199	0,001	1,840E + 12	1,21
00:07:28	15,227	1,936	14,210	0,001	1,863E + 12	-0,78

## ES 2 599 640 T3

Tabla 1.4. Datos experimentales del ciclo 2 de permeación (condiciones 2 experimentales).

Hora	FLUJO (gfd)	TMP (psi)	Temperatura (°C)	$\mu$	Rt (m <sup>-1</sup> )	dR/dT
00:16:47	0,000	0,011	14,286	0,001	N/A	N/A
00:16:52	0,000	-0,037	14,275	0,001	N/A	N/A
00:16:57	0,000	0,007	14,267	0,001	N/A	N/A
00:17:02	0,000	0,035	14,256	0,001	N/A	N/A
00:17:07	0,000	0,008	14,233	0,001	N/A	N/A
00:17:12	0,000	0,042	14,221	0,001	N/A	N/A
00:17:17	0,000	0,004	14,210	0,001	N/A	N/A
00:17:22	0,000	-0,023	14,199	0,001	N/A	N/A
00:17:27	0,000	0,002	14,172	0,001	N/A	N/A
00:17:32	0,000	-0,011	14,172	0,001	N/A	N/A
00:17:37	0,000	0,007	14,172	0,001	N/A	N/A
00:17:42	0,000	0,777	14,153	0,001	N/A	N/A
00:17:47	7,398	1,020	14,160	0,001	1,987E + 12	-7,99
00:17:52	15,073	1,893	14,172	0,001	1,840E + 12	0,75
00:17:57	15,073	1,912	14,160	0,001	1,854E + 12	-0,17
00:18:03	15,198	1,915	14,137	0,001	1,851E + 12	0,57
00:18:08	15,183	1,931	14,141	0,001	1,861E + 12	0,04
00:18:13	15,154	1,931	14,160	0,001	1,862E + 12	-0,43
00:18:18	15,235	1,930	14,160	0,001	1,854E + 12	0,29
00:18:23	15,249	1,935	14,179	0,001	1,859E + 12	-0,12
00:18:28	15,227	1,939	14,191	0,001	1,857E + 12	-1,32
00:18:33	15,396	1,933	14,199	0,001	1,833E + 12	-0,26
00:18:38	15,344	1,911	14,202	0,001	1,828E + 12	1,90
00:18:43	15,161	1,929	14,206	0,001	1,884E + 12	-0,25

Los datos operativos correspondientes a estas nuevas condiciones se utilizaron para calcular las diferentes resistencias relevantes.

- 5 Como se ha mencionado anteriormente, se calculará la resistencia después del lavado a contracorriente para ambos ciclos de permeación basándose en el promedio de los primeros cinco valores que cumplan con las condiciones válidas del ciclo de permeación. Como se puede observar a partir de la tabla anterior; los valores anteriores a 0:06:47 no cumplen las condiciones de VPC y en consecuencia no se pueden utilizar para este cálculo. Los valores correspondientes de 0:06:47 a 0:07:07 son los primeros cinco valores que cumplen con estas condiciones. Para el segundo ciclo de permeación se utiliza el mismo procedimiento. El valor de  $R_{ab}$  se calcula como sigue:

$$R_{ab}(\text{ciclo 1}) = (1,908 \cdot 10^{12} + 1,839 \cdot 10^{12} + 1,844 \cdot 10^{12} + 1,836 \cdot 10^{12} + 1,861 \cdot 10^{12})/5 = 1,857 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

$$R_{ab}(\text{ciclo 2}) = (1,840 \cdot 10^{12} + 1,854 \cdot 10^{12} + 1,851 \cdot 10^{12} + 1,861 \cdot 10^{12} + 1,862 \cdot 10^{12})/5 = 1,853 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

$$\Delta R_{ab}(\text{ciclo 1}) = R_{ab}(\text{ciclo 2}) - R_{ab}(\text{ciclo 1}) = 1,853 \cdot 10^{12} - 1,857 \cdot 10^{12} = -4 \cdot 10^9 \text{ m}^{-1}$$



## ES 2 599 640 T3

Como se ha establecido anteriormente,  $R_c$  se puede estimar como sigue:

$$R_c = M (T_2 - T_1)$$

Después de realizar la regresión lineal el valor de la pendiente  $M$  se determinó:

$$M = 1,65 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-1}/\text{min}$$

5  $R_c = 1,65 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-1}/\text{min} \cdot (9,99 \text{ min}) = 1,648 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$

A partir del análisis de las resistencias calculadas, se puede concluir que los valores de  $\Delta R_{ab}$  y  $R_c$  son ambos inferiores a los puntos de consigna optimizados correspondientes, lo que significa que el sistema está operando en la Zona Verde y la aplicación del modo de Ahorro Energético está disponible para reducir los costes operativos de MBR.

- 10 Siguiendo la jerarquía de control establecida para el modo de Ahorro Energético, la duración del periodo de relajación se disminuyó de 1 minuto a 30 segundos y el flujo neto de permeado se incrementó de 14 a 16 gfd aumentando el flujo instantáneo de 15,4 a 17,6 gfd, mientras se mantuvieron constantes los parámetros operativos restantes. Opcionalmente, el flujo de permeado neto solamente podría haberse ajustado como se hizo en las pruebas a largo plazo que se describen más adelante. Aunque la jerarquía de control proporciona una mayor
- 15 preferencia a otros cambios operativos tales como la disminución del factor de frecuencia de aireación o el flujo de aireación y el aumento de la duración del ciclo de permeación, estos cambios eran difíciles de implementar debido a las limitaciones intrínsecas del sistema MBR en este ejemplo.

- Inmediatamente después del cambio en la duración del periodo de relajación y del aumento de flujo neto de permeado, se utilizaron los datos operativos correspondientes a estas nuevas condiciones operativas para el cálculo de las diferentes resistencias relevantes para evaluar la eficacia de estas medidas en el mantenimiento de las condiciones de operación estables al tiempo que permite ahorros de costes operativos de MBR. El procedimiento es el mismo que se ha realizado anteriormente.
- 20

- Las Tablas 1.5 y 1.6 contienen algunos de los datos operativos que corresponden a dos ciclos consecutivos de permeación que operan bajo las condiciones de operación descritas anteriormente. Estos datos operativos se utilizan para describir los cálculos de resistencia.
- 25

Tabla 1.5 Datos experimentales del ciclo 1 de permeación (condiciones 3 experimentales).

Hora	FLUJO (gfd)	TMP (psi)	Temperatura (°C)	$\mu$	$R_t$ ( $\text{m}^{-1}$ )	dR/dT
00:09:45	0,000	0,068	17,803	0,001	N/A	N/A
00:09:50	0,000	-0,070	17,800	0,001	N/A	N/A
00:09:55	0,000	0,013	17,800	0,001	N/A	N/A
00:10:00	0,000	0,020	17,800	0,001	N/A	N/A
00:10:05	0,000	0,044	17,796	0,001	N/A	N/A
00:10:10	0,000	-0,112	17,800	0,001	N/A	N/A
00:10:15	6,607	0,808	17,788	0,001	1,984E + 12	4,781757
00:10:20	15,564	2,227	17,784	0,001	2,084E + 12	-7,68263
00:10:25	16,956	2,284	17,785	0,001	1,935E + 12	1,196952
00:10:30	18,948	2,270	17,769	0,001	1,959E + 12	1,201163
00:10:35	16,846	2,282	17,762	0,001	1,982E + 12	-0,05997
00:10:40	16,941	2,296	17 750	0,001	1,981E + 12	0,573327
00:10:45	16,941	2,306	17,750	0,001	1,993E + 12	0,402593
00:10:50	16,919	2,313	17,758	0,001	2,001E + 12	0,783189
00:10:56	16,890	2,323	17,769	0,001	2,017E + 12	-1,33901
00:11:01	17,117	2,334	17,765	0,001	1,990E + 12	0,347578

ES 2 599 640 T3

(continuación)

Hora	FLUJO (gfd)	TMP (psi)	Temperatura (°C)	$\mu$	Rt (m <sup>-1</sup> )	dR/dT
00:11:06	16,919	2,296	17,765	0,001	1,997E + 12	-0,7252
00:11:11	17,088	2,301	17,777	0,001	1,982E + 12	-0,55843
00:11:16	16,985	2,292	17,773	0,001	1,971E + 12	-0,22469
00:11:21	17,029	2,287	17,773	0,001	1,967E + 12	-0,17168
00:11:26	17,190	2,305	17,773	0,001	1,964E + 12	2,277346
00:11:31	16,890	2,317	17,758	0,001	2,009E + 12	0,058487

Tabla 1.6 Datos experimentales del ciclo 2 de permeación (condiciones 3 experimentales).

Hora	FLUJO (gfd)	TMP (psi)	Temperatura (°C)	$\mu$	Rt (m <sup>-1</sup> )	dR/dT
00:20:19	0,000	0,048	17,765	0,001	N/A	N/A
00:20:24	0,000	0,082	17,773	0,001	N/A	N/A
00:20:29	0,000	0,010	17,769	0,001	N/A	N/A
00:20:34	0,000	0,021	17,773	0,001	N/A	N/A
00:20:39	0,000	0,030	17,762	0,001	N/A	N/A
00:20:44	0,000	0,004	17,754	0,001	N/A	N/A
00:20:49	6,658	0,838	17,750	0,001	1,971E + 12	7,160825
00:20:54	15,125	2,175	17,746	0,001	2,124E + 12	-11,0537
00:20:59	17,139	2,259	17,731	0,001	1,912E + 12	1,299441
00:21:04	17,124	2,262	17,712	0,001	1,937E + 12	0,266417
00:21:09	17,190	2,286	17,708	0,001	1,943E + 12	1,798625
00:21:14	17,007	2,291	17,704	0,001	1,978E + 12	0,18199
00:21:19	17,022	2,315	17,704	0,001	1,982E + 12	-0,7813
00:21:24	17,205	2,312	17,712	0,001	1,966E + 12	1,718922
00:21:29	17,007	2,321	17,720	0,001	2,001E + 12	1,289662
00:21:34	16,861	2,337	17,712	0,001	2,027E + 12	-3,71094
00:21:39	16,956	2,407	17,697	0,001	1,954E + 12	0,680588
00:21:44	17,139	2,313	17,712	0,001	1,968E + 12	0,559187
00:21:49	16,861	2,308	17,704	0,001	1,979E + 12	1,170542
00:21:54	16,802	2,299	17,712	0,001	2,002E + 12	-0,89163
00:22:00	16,970	2,310	17,697	0,001	1,985E + 12	1,07242
00:22:05	16,941	2,322	17,697	0,001	2,006E + 12	1,359174
00:22:10	16,787	2,333	17,697	0,001	2,034E + 12	-1,23236
00:22:15	17,036	2,342	17,689	0,001	2,009E + 12	-0,00051

Los datos operativos correspondientes a las diferentes condiciones operativas se utilizaron para calcular las diferentes resistencias relevantes.

5 Como se ha mencionado anteriormente, se calculará la resistencia después del lavado a contracorriente para ambos ciclos de permeación basándose en el promedio de los primeros cinco valores que cumplan con las condiciones válidas del ciclo de permeación. Como se puede observar a partir de la tabla anterior; para el primer ciclo de permeación los valores anteriores a 0:10:20 no cumplen estos requisitos y, por consiguiente no se pueden utilizar para este cálculo. Los valores correspondientes de 0:10:20 a 0:10:40 son los primeros cinco valores que cumplen con estas condiciones. Para el segundo ciclo de permeación se utiliza el mismo procedimiento. El valor de  $R_{ab}$  se calcula como sigue:

10  $R_{ab}(\text{ciclo 1}) = (2,084 \cdot 10^{12} + 1,935 \cdot 10^{12} + 1,959 \cdot 10^{12} + 1,982 \cdot 10^{12} + 1,981 \cdot 10^{12})/5 = 1,988 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$   
 $R_{ab}(\text{ciclo 2}) = (2,124 \cdot 10^{12} + 1,912 \cdot 10^{12} + 1,937 \cdot 10^{12} + 1,943 \cdot 10^{12} + 1,978 \cdot 10^{12})/5 = 1,979 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$   
 $\Delta R_{ab}(\text{ciclo 1}) = R_{ab}(\text{ciclo 2}) - R_{ab}(\text{ciclo 1}) = 1,979 \cdot 10^{12} - 1,988 \cdot 10^{12} = -9,00 \cdot 10^9 \text{ m}^{-1}$

Como se ha establecido anteriormente,  $R_c$  se puede estimar como sigue:

$$R_c = M (T_2 - T_1)$$

15 Después de realizar la regresión lineal el valor de la pendiente M se determinó:

$$M = 1,67 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-1}/\text{min}$$

$$R_c = 1,67 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-1}/\text{min} \cdot (9,99 \text{ min}) = 1,66 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

20 A partir del análisis de las resistencias calculadas, se puede concluir que los valores de  $\Delta R_{ab}$  y  $R_c$  son ambos inferiores a sus puntos de consigna sostenibles correspondientes, lo que significa que el sistema está operando en la Zona Verde y la aplicación del modo de Ahorro Energético está disponible para reducir los costes operativos de MBR, en tanto se mantienen las condiciones operativas sostenibles en el sistema.

25 La Figura 4 presenta los resultados a largo plazo obtenidos a partir de pruebas utilizando un sistema similar al anterior, excepto que  $dR/dT$  no se utiliza como una condición VPC y A.F.F. fue el único parámetro controlado. La Figura 3 muestra el flujo de permeado neto con la resistencia de torta obtenida para cada ciclo de permeación junto con los valores de resistencia de torta sostenible y optimizada, respectivamente. Durante esta prueba, eventos de flujo máximo frecuentes fueron simulados mediante el aumento del flujo de permeado neto de 16 a 26 gfd. Estos eventos de flujo máximo se realizaron para evaluar la sensibilidad del sistema de control de procedimiento en línea cuando se enfrenta a problemas operativos.

30 Como se puede observar en la Figura 4, puesto que el flujo de permeado neto aumentó de 16 gfd a 26 gfd la resistencia de torta también aumentó. Durante algunos de los eventos de flujo máximo los valores obtenidos de la resistencia de torta excedieron el valor del punto de consigna de resistencia de torta sostenible haciendo que el sistema opere en el modo de Eliminación de Incrustaciones utilizando, por tanto, un factor de frecuencia de aireación de 0,5.

35 Sin embargo, durante la mayoría de los ciclos de permeación los valores obtenidos de resistencia de torta estaban alrededor del punto de consigna optimizado permitiendo que el sistema opere en el modo de Ahorro Energético utilizando, por tanto, un factor de frecuencia de aireación de 0,25. Los valores obtenidos de  $\Delta R_{ab}$  se utilizaron, pero no se presentan en la Figura 4. La tendencia observada de  $\Delta R_{ab}$  fue muy similar a la de la resistencia de torta. La Tabla 1.7 presenta el porcentaje y el número de ciclos realizados en cada factor de frecuencia de aireación.

Tabla 1.7 Resumen de pruebas en sistema de control de procedimiento en línea a largo plazo.

A.F.F	Frecuencia de Aireación	% Realizado	Número de ciclos
0,25	10 ACTIVACIÓN/30 DESACTIVACIÓN	87	4007
0,5	10 ACTIVACIÓN/10 DESACTIVACIÓN	13	602

40 Como se puede observar en la Tabla 1.7 para la gran mayoría de los ciclos de permeación el consumo de aire se redujo en un 50% mediante la prolongación del tiempo de DESACTIVACIÓN de 10 a 30 segundos, lo que llevó a una reducción significativa en los requerimientos energéticos del sistema de MBR.

**REIVINDICACIONES**

1. Un procedimiento de tratamiento de agua, que es un procedimiento de control de procedimiento en línea mediante un modelo de resistencia en serie, comprendiendo el procedimiento de tratamiento de agua las etapas de:
  - 5 a) proporcionar un sistema (10) de tratamiento de agua que tiene una unidad de membrana sumergida en un depósito, teniendo la unidad de membrana membranas de filtración para retirar el permeado filtrado del agua que está siendo tratada, comprendiendo también dicho sistema (10) de tratamiento de agua uno o más colectores (12) de datos y un controlador (14), y pudiendo el sistema de tratamiento de agua operarse de acuerdo con dos o más modos discretos de operación, diferenciándose los modos de operación en su efecto sobre las incrustaciones de las membranas, en el que los modos de operación se diferencian entre sí en relación con uno o más de (a) régimen de lavado a contracorriente, (b) régimen de permeación, (c) régimen de limpieza con descarga de aire, (d) régimen de limpieza química de la membrana o (e) régimen de mejora de filtrabilidad de lodos;
  - b) operar el sistema (10) de tratamiento de agua en uno de los modos de operación en cada uno de una pluralidad de períodos de tiempo;
  - 15 c) recoger con dichos uno o más colectores (12) de datos los datos relacionados con más de una resistencia de las membranas, y calcular con dicho controlador (14), utilizando el modelo de resistencia en serie, los valores de más de una resistencia de las membranas de vez en cuando, mientras se opera el sistema (10) de tratamiento de agua, y se monitorizan esas resistencias;
  - d) considerar los valores de más de una resistencia cuando se selecciona el modo de operación para uno o más de los períodos de tiempo;
  - 20 en el que el modelo de resistencia en serie es un modelo en el que la resistencia total para la filtración se representa como una combinación de un número de resistencias individuales y en el que la etapa (d) comprende:
    - i) establecer un primer grupo de puntos de consigna y un segundo grupo diferente de puntos de consigna;
    - ii) comparar las diferentes resistencias que están siendo monitoreadas con sus respectivos puntos de consigna para realizar los cambios adecuados en el modo de operación;
    - 25 iii) cuando cualquiera de los valores de las resistencias que están siendo monitoreadas son superiores a cualquiera de los primeros puntos de consigna correspondientes, que representan los valores máximos de resistencia a los que debería operar el sistema, el modo de operación se elige para ser un modo de Eliminación de Incrustaciones para reducir las incrustaciones de las membranas;
    - iv) cuando cualquiera de los valores de las resistencias que están siendo monitorizadas están entre el primer y segundo puntos de consigna, el modo de operación no se cambia; y
    - 30 v) cuando todos los valores de las resistencias que están siendo monitoreadas son inferiores a los segundos puntos de consigna correspondientes, el modo de operación se elige para ser un modo de Ahorro Energético para conducir al ahorro energético.
- 35 2. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que dos o más modos discretos de operación se diferencian en la relación de tiempo en la que las membranas se limpian con descarga de aire en relación con el tiempo en el que las membranas no se limpian con descarga de aire.
3. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que más de una resistencia incluye parámetros seleccionados del grupo de (a) resistencia a incrustaciones por adsorción, (b) resistencia de torta o (c) un cambio en el tiempo de la resistencia total después de lavado a contracorriente.
- 40 4. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los modos de operación se diferencian al menos en relación con el régimen de limpieza con descarga de aire y la más de una resistencia incluye la resistencia de torta.
5. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se realizan cambios en el modo de operación mediante una jerarquía de cambios de los procedimientos disponibles.
- 45 6. Un sistema (10) de tratamiento de agua para el tratamiento de agua de acuerdo con el procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores utilizando un modelo de resistencia en serie, comprendiendo el sistema:
  - a) una unidad de membrana sumergida en un depósito, teniendo la unidad de membrana membranas de filtración para la retirada del permeado filtrado del agua que está siendo tratada;
  - 50 b) un subsistema (18) para realizar una función relacionada con la operación de la unidad de membrana, teniendo el sub-sistema dos o más modos discretos de operación, diferenciándose los modos de operación en su efecto sobre las incrustaciones de las membranas, en el que los modos de operación se diferencian entre sí en relación con uno

o más de (a) régimen de lavado a contracorriente, (b) régimen de permeación, (c) régimen de limpieza con descarga de aire, (d) régimen de limpieza química de la membrana o (e) régimen de mejora de filtrabilidad de lodos;

c) uno o más colectores (12) de datos para la recogida de datos relacionados con los valores de más de una resistencia de las membranas de vez en cuando durante el operación del sistema (10) de tratamiento de agua;

5 d) un controlador (14) unido al sub-sistema (18) y al uno o más colectores (12) de datos para calcular los valores de más de una resistencia de las membranas, utilizando el modelo de resistencia en serie, y para cambiar automáticamente el modo de operación del subsistema tomando en consideración los valores de la más de una resistencia calculada a partir de los datos recogidos;

10 en el que el sistema es capaz de operar para controlar las resistencias calculadas y comparar las diferentes resistencias que están siendo monitoreadas con sus puntos de consigna seleccionados para realizar cambios adecuados del modo de operación, y:

15 i) cuando cualquiera de los valores de las resistencias que están siendo monitoreadas son superiores a cualquiera de los primeros puntos de consigna correspondientes, que representan los valores máximos de resistencia a los que debería operar el sistema, el modo de operación se elige para ser un modo de Eliminación de Incrustaciones para reducir las incrustaciones de las membranas;

ii) cuando cualquiera de los valores de las resistencias que están siendo monitorizadas están entre el primer y segundo puntos de consigna, el modo de operación no se cambia; y

20 iii) cuando todos los valores de las resistencias que están siendo monitoreadas son inferiores a los segundos puntos de consigna correspondientes, el modo de operación se elige para ser un modo de Ahorro Energético para conducir al ahorro energético del sistema.

25 7. El sistema (10) de la reivindicación 6, en el que el sub-sistema (18) comprende uno o más sopladores, un conjunto de válvula, y una pluralidad de aireadores, en el que el conjunto de válvulas y los sopladores son capaces de operar para proporcionar un flujo de un gas del soplador a los aireadores, alternado la tasa de flujo de gas en cada aireador entre un caudal mayor y un caudal menor y siendo una duración del caudal inferior en relación con la duración del caudal superior variable entre al menos dos proporciones.

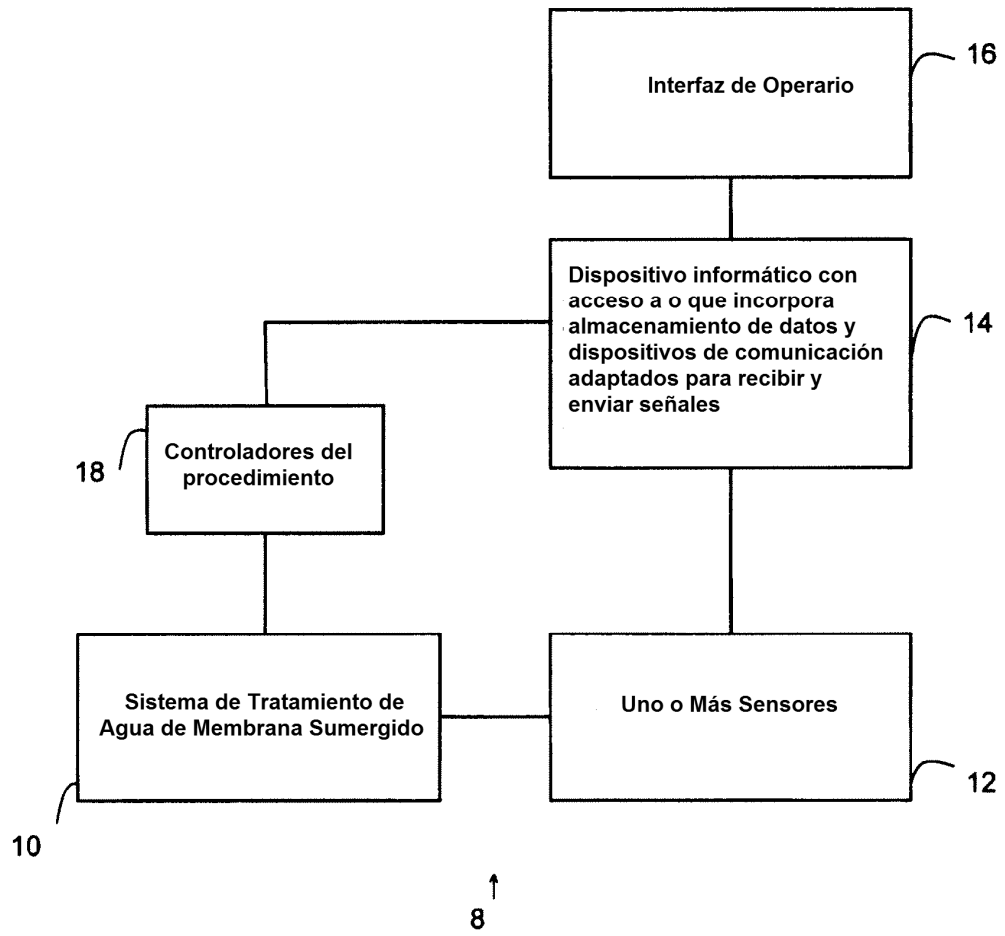
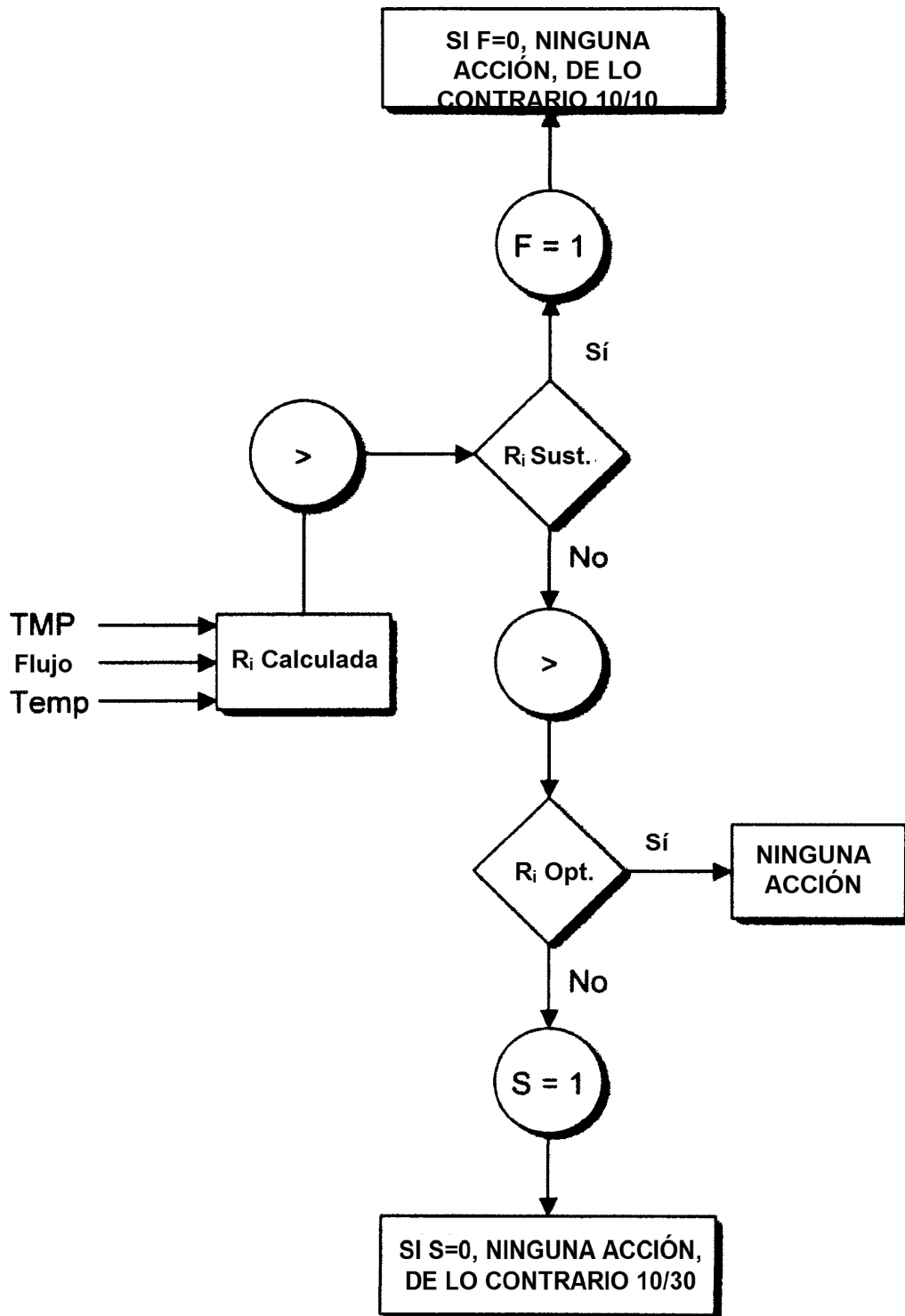


FIGURA 1



**FIG. 2**

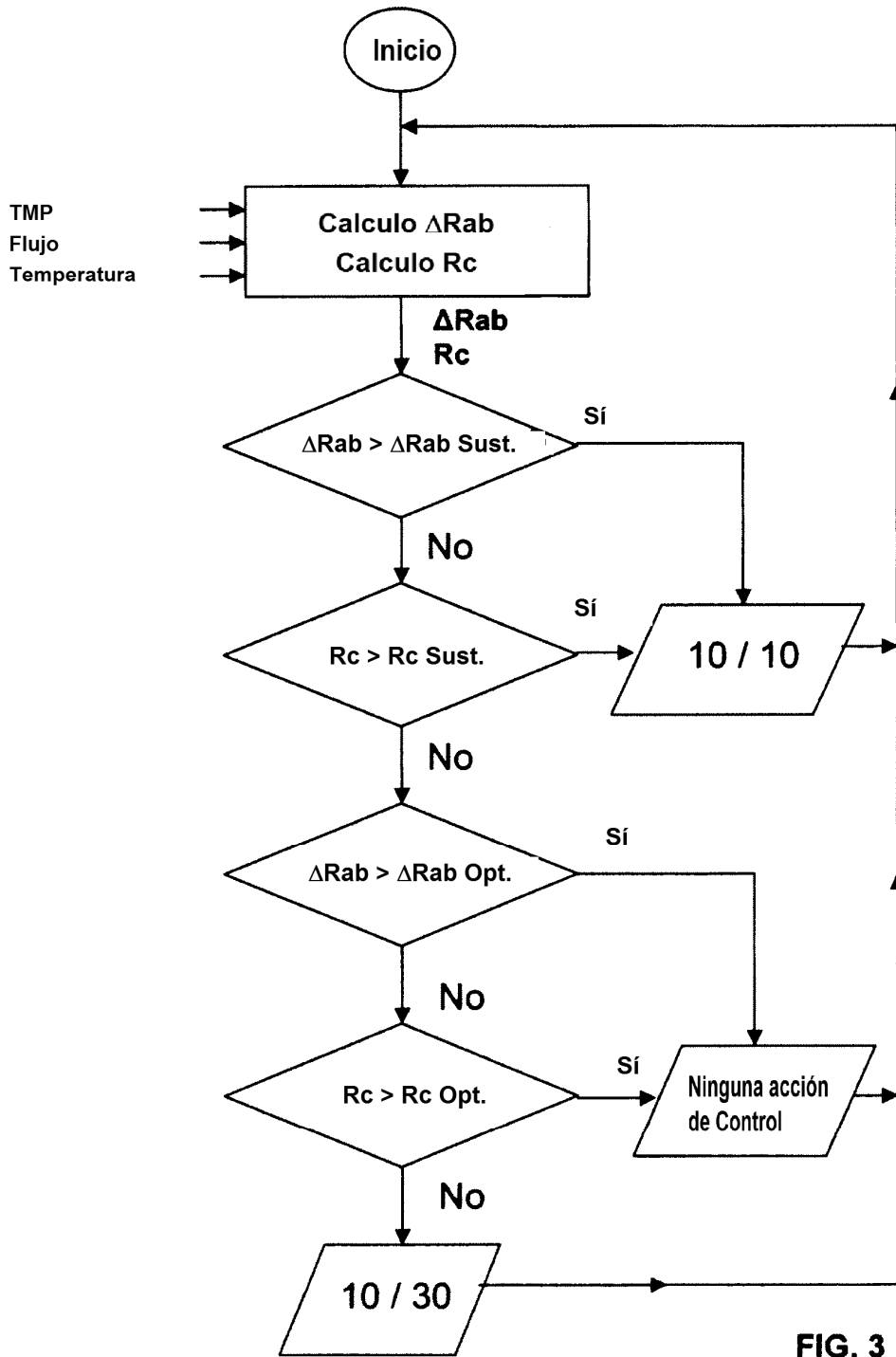
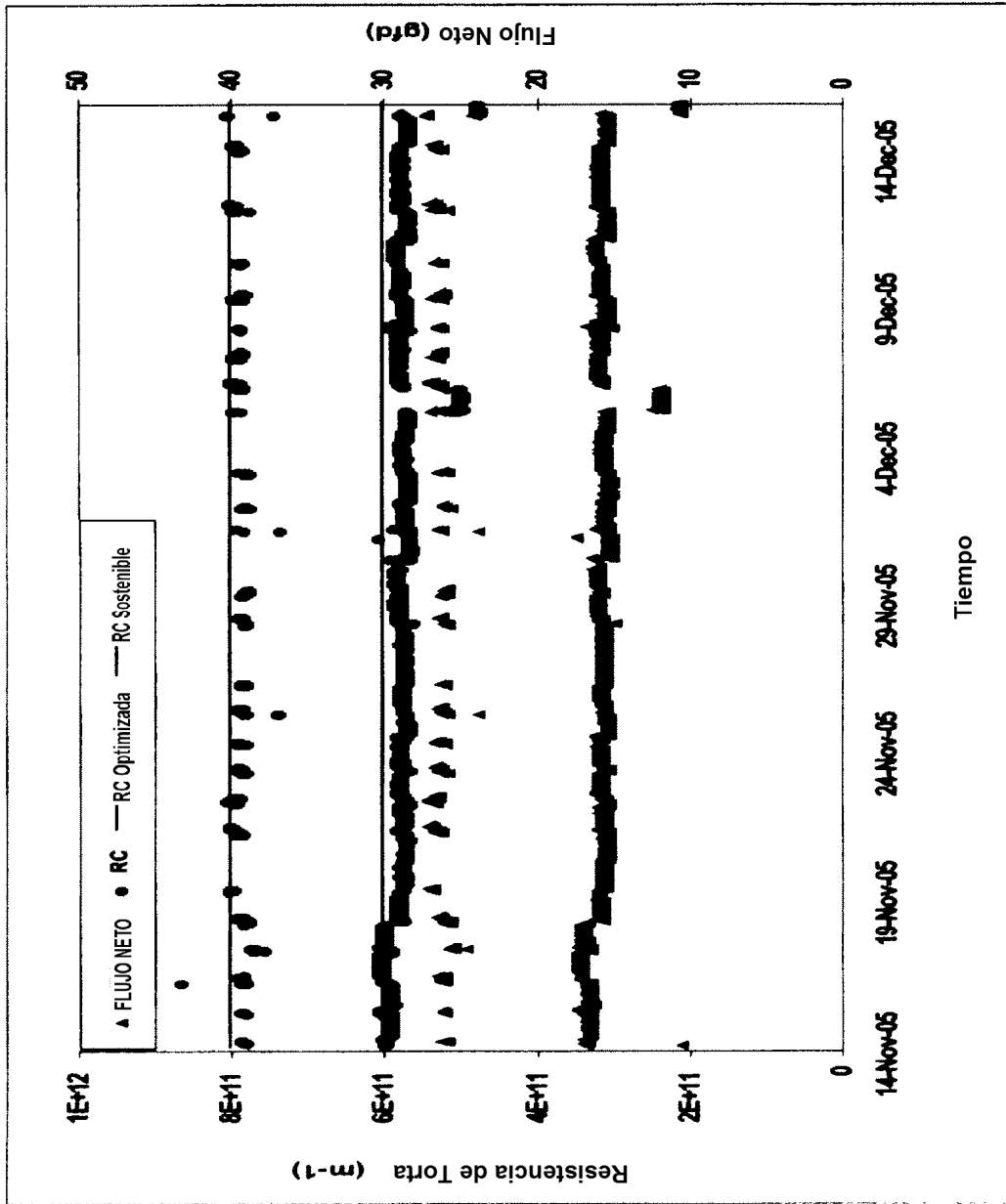


FIG. 3



Figura 4 Resultado de pruebas a largo plazo en sistema de control de procedimiento en línea.



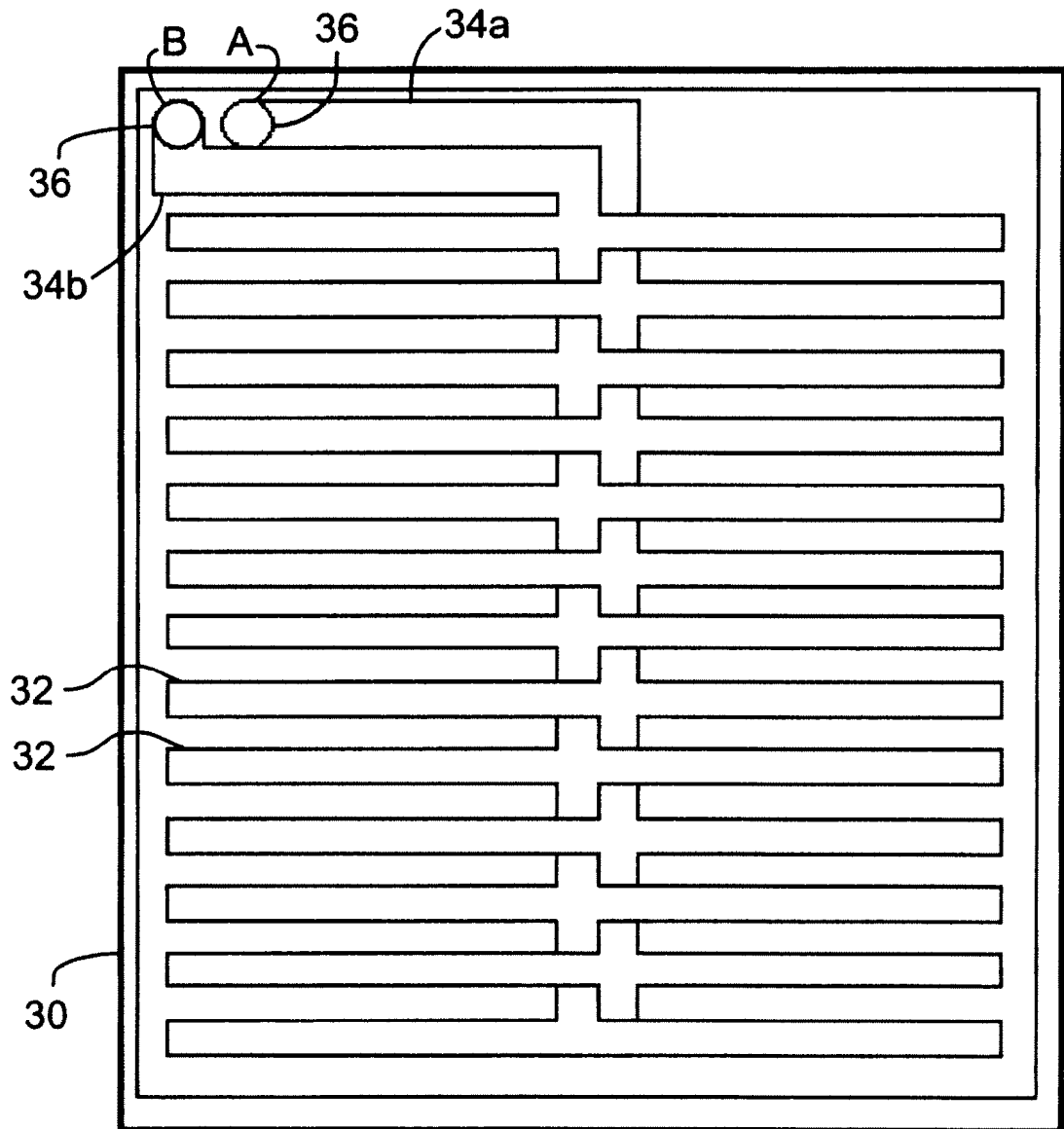


FIGURA 5

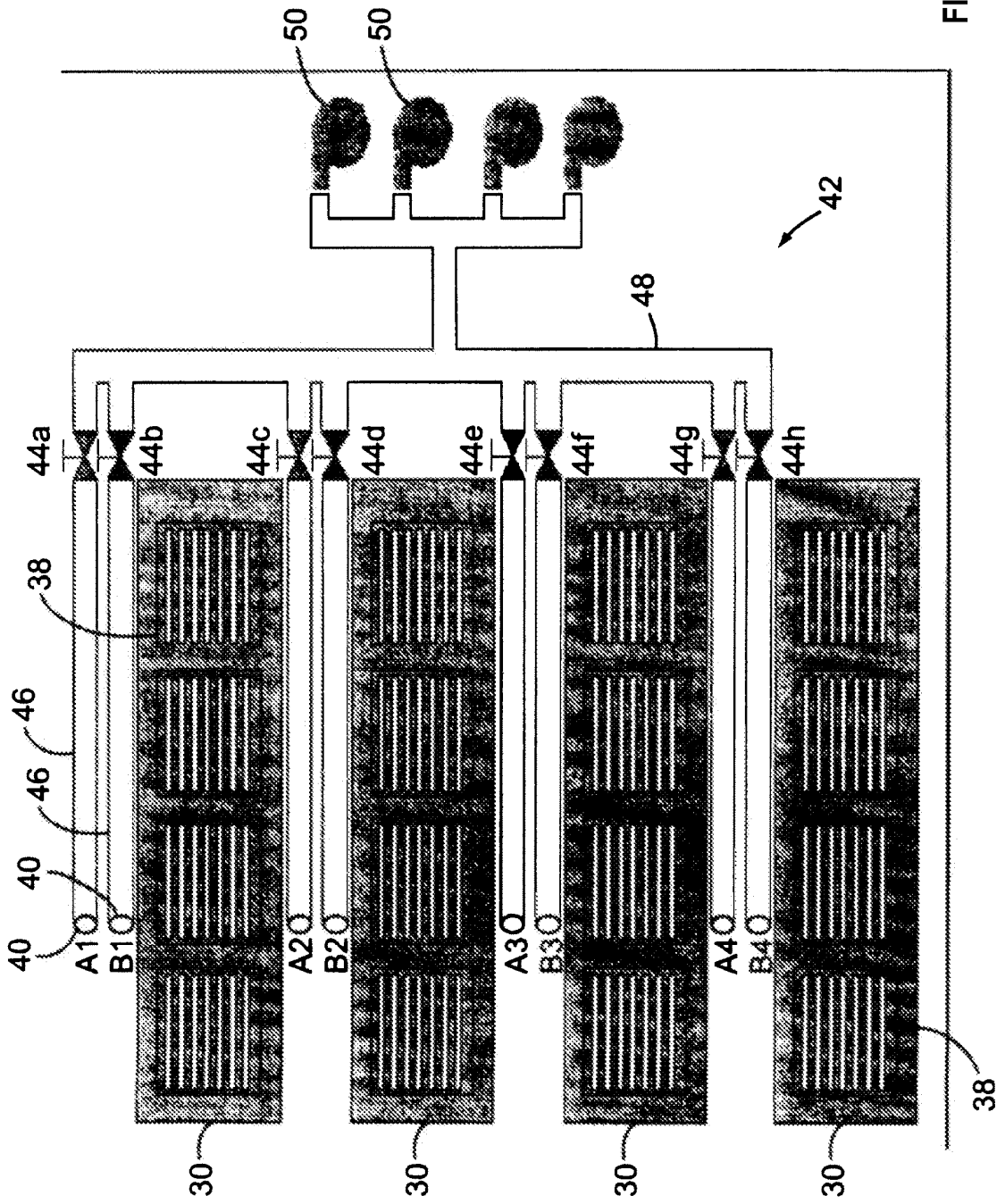


FIGURA 6