

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 023 933**

51 Int. Cl.:

<b>C02F 3/12</b>	(2013.01)
<b>C12Q 1/00</b>	(2006.01)
<b>C12M 1/34</b>	(2006.01)
<b>C12N 1/36</b>	(2006.01)
<b>G01N 33/18</b>	(2006.01)
<b>C12M 1/36</b>	(2006.01)
<b>C02F 3/00</b>	(2013.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **31.05.2019 PCT/CA2019/050764**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **05.12.2019 WO19227236**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.05.2019 E 19812264 (0)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.03.2025 EP 3810789**

54 Título: **Sensor, sistema y método bioelectroquímico para optimizar el rendimiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales**

30 Prioridad:

**01.06.2018 US 201862679626 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**03.06.2025**

73 Titular/es:

**SENTRY: WATER MONITORING AND CONTROL INC. (100.00%)  
65 Watts Avenue  
Charlottetown PE C1E 2B7, CA**

72 Inventor/es:

**RAGUSH, COLIN;  
AMBLER, JACK y  
KIELY, PATRICK DESMOND**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 3 023 933 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

Sensor, sistema y método bioelectroquímico para optimizar el rendimiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales

5

**Campo**

La presente descripción se refiere a un sistema para detectar y reducir los desequilibrios del sistema en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, y a los métodos y sensores relacionados con los mismos.

10

**Antecedentes**

La necesidad de procedimientos de tratamiento de agua y aguas residuales rentables y fiables ha aumentado con el fin de cumplir con las regulaciones medioambientales más estrictas y los mayores requisitos de fiabilidad del sistema; y de permitir a los operadores reducir los costes asociados con la operación y el mantenimiento del sistema.

15

Los sistemas bioelectroquímicos son una tecnología que se basa en bacterias que normalmente usan depósitos de metales insolubles como sumideros de electrones durante el consumo anaeróbico de sustratos reducidos. Sustituyendo los depósitos metálicos por un par de electrodos (ánodo y cátodo), la corriente eléctrica se puede recoger o registrar a medida que pasa a través de una resistencia externa. Se ha mostrado que la actividad metabólica y la respectiva corriente bioeléctrica de estos sistemas bioelectroquímicos varían de acuerdo con una amplia variedad de alteraciones ambientales que incluyen la composición/química del agua (contenido de nutrientes, pH, estado redox), temperatura y recirculación/pureza.

20

25

Se describen ejemplos de sensores bioelectroquímicos o pilas de combustible adecuados en sistemas de tratamiento de aguas residuales y el uso de diferentes tipos de bacterias en B.R. Ringeisen et al. (2006), C.-Y. Chen et al. (2014), documentos WO 2018/094537, US 2017/0133700, V. Fedorovich et al. (2009), X.-C. Quan et al. (2012) y M. Malki et al. (2008).

30

Son deseables mejoras en la detección y reducción de desequilibrios del sistema en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

**Compendio**

35

Una o más propuestas anteriores consideran que, para que un sistema bioelectroquímico desempeñe la función deseada, la comunidad de biopelícula anódica del sistema debe colocarse en un entorno líquido anaeróbico porque se ha demostrado que la presencia de oxígeno en las proximidades de la comunidad microbiana anódica tiene un impacto negativo en la actividad del sistema bioelectroquímico. Se cree que la presencia de oxígeno afecta negativamente a las comunidades anódicas, por ejemplo: (1) microbios exoelectrógenos facultativos que usan preferentemente oxígeno como aceptor terminal de electrones; (2) dañan y/o destruyen microbios anaerobios estrictos; o (3) una combinación de los mismos. El requisito del uso de sistemas bioelectroquímicos en un entorno anaeróbico ha obstaculizado la adopción generalizada de sistemas bioelectroquímicos en entornos aeróbicos, por ejemplo, en plantas de tratamiento de agua y aguas residuales que comprenden zonas de corrientes de agua o aguas residuales aeróbicas, aireadas, oxigenadas o parcialmente oxigenadas.

40

45

La presente invención se refiere a un sensor bioelectroquímico como se define en las reivindicaciones, así como a sistemas y métodos que lo comprenden, que son adecuados para un sistema de tratamiento de aguas residuales oxigenadas. El alcance de la presente invención se define en el conjunto de reivindicaciones.

50

Una o más ventajas de la presente invención pueden: (1) reducir el coste de operación; (2) disminuir la cantidad de equipos costosos; (3) aumentar la eficiencia y/o rendimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales (4) aumentar la exactitud y/o precisión de las mediciones; (5) ampliar los lugares de uso en un sistema de tratamiento de aguas residuales; (6) reducir el consumo de energía; (7) reducir el uso de la adición de productos químicos y/o la adición de carbono; (8) aumentar la calidad del efluente; (9) reducir la cantidad de muestreo manual; permitir que se muevan caudales más grandes a través de los sistemas; (10) aumentar la eficiencia de la relación de alimento a masa, tasas de recirculación, residuos de lodo y/o concentración de sólidos suspendidos en líquidos mezclados; o (11) una combinación de las mismas, en comparación con las bacterias, sensores, métodos y sistemas exoelectrógenos que requieren un entorno anaeróbico para funcionar de manera deseable.

55

60

Otros aspectos y características de la presente descripción resultarán evidentes para los expertos en la técnica tras la revisión de la siguiente descripción de realizaciones específicas junto con las figuras adjuntas.

65

**Breve descripción de los dibujos**

Ahora se describirán realizaciones de la presente descripción, solo a modo de ejemplo, con referencia a las figuras adjuntas.

- 5 La Fig. 1 es una ilustración de un ejemplo de un sensor bioelectroquímico según la presente invención.
- La Fig. 2 es una ilustración de un ejemplo de una celda de reactor según la presente descripción.
- 10 Las Figs. 3A y B son gráficos que ilustran los datos de sensores bioelectroquímicos duplicados según la presente invención colocados en la corriente de efluente de agua o aguas residuales aireada o parcialmente aireada en un sistema de tratamiento de agua (comparativo) o aguas residuales (invención).
- 15 Las Figs. 4A y B son gráficos que ilustran los datos de sensores bioelectroquímicos según la presente descripción colocados en la corriente de afluente y efluente de agua o aguas residuales aireada o parcialmente aireada en una planta de agua (comparativo) o aguas residuales (invención).
- 20 La Fig. 5 es un gráfico que ilustra los datos de tendencia semanales recogidos de un sensor bioelectroquímico según la presente invención ubicado en un sitio del afluente de una planta de agua (comparativa) o de aguas residuales (invención).
- La Fig. 6 es un gráfico que ilustra los datos de tendencia semanales recogidos de un sensor bioelectroquímico según la presente invención ubicado en un sitio del efluente de una planta de agua (comparativa) o de aguas residuales (invención).
- 25 La Fig. 7 es una ilustración de un sistema de ensayo usado para validar el rendimiento de una celda de reactor según la presente descripción.
- 30 La Fig. 8 es un gráfico que ilustra los datos recogidos por un sensor bioelectroquímico según la presente invención acoplado aguas abajo de la celda ilustrada en la Fig. 7.
- La Fig. 9 es un gráfico que ilustra los datos recogidos de un sensor bioelectroquímico según la presente invención.
- 35 La Fig. 10 es un gráfico que ilustra los datos de tendencia semanales de MET en el afluente recogidos de un sensor bioelectroquímico según la presente invención.
- 40 La Fig. 11 es un gráfico que ilustra un cambio elevado en la MET recogida de un sensor bioelectroquímico según la presente invención el 29 de octubre de 2018 en comparación con los datos de referencia recogidos el 5 de noviembre de 2018.

**Descripción detallada**

- 45 En el contexto de la presente descripción, el entorno oxigenado se refiere a un entorno o zona líquida aeróbica, aireada, oxigenada o parcialmente oxigenada que tiene al menos algo de oxígeno disuelto. El entorno o zona oxigenada puede tener de aproximadamente 0,1 mg/l a aproximadamente 14,6 mg/l de oxígeno disuelto, por ejemplo, aproximadamente 0,1 mg/l; 0,2 mg/l; 0,5 mg/l; 1,0 mg/l; 1,5 mg/l; 2,0 mg/l; 2,5 mg/l; 3,0 mg/l; 3,5 mg/l; 4,0 mg/l; 4,5 mg/l; 5,0 mg/l; 5,5 mg/l; 6,0 mg/l; 6,5 mg/l; 7,0 mg/l; 7,5 mg/l; 8,0 mg/l; 8,5 mg/l; 9,0 mg/l; 9,5 mg/l; 10,0 mg/l; 10,5 mg/l; 11,0 mg/l; 11,5 mg/l; 12,0 mg/l; 12,5 mg/l; 13,0 mg/l; 13,5 mg/l; 14,0 mg/l; 14,6 mg/l; o la concentración es de una de las concentraciones enumeradas anteriormente a otra cualquiera de las concentraciones enumeradas anteriormente, o cualquier concentración entre ellas. Opcionalmente, el entorno o zona oxigenada tiene de aproximadamente 0,5 mg/l a aproximadamente 8,0 mg/l de oxígeno disuelto. Opcionalmente, el entorno o zona oxigenada tiene de aproximadamente 0,5 mg/l a aproximadamente 3,0 mg/l de oxígeno disuelto.
- 55 En el contexto de la presente descripción, el sistema de tratamiento de agua o aguas residuales es cualquier sistema que convierte el agua o las aguas residuales en un efluente que se puede descargar, devolver a un ciclo del agua o reutilizar. El procedimiento de tratamiento de agua o aguas residuales puede comprender al menos una zona o zona oxigenada, por ejemplo, en una cámara que recibe el agua o aguas residuales afluentes que entran en la planta o instalación de tratamiento de agua o aguas residuales, por ejemplo, una cámara de elevación, un clarificador primario y/o una cámara de aireación primaria. Opcionalmente, el al menos un entorno o zona oxigenada es una cámara que descarga agua o aguas residuales tratadas de una planta de tratamiento de agua o aguas residuales, por ejemplo, una cámara de agua o aguas residuales antes y/o después de la etapa de desinfección final (p. ej., UV, cloración, ozono). Opcionalmente, el al menos un entorno o zona oxigenada es una variedad de tanques o cámaras de procedimiento que están asociados con la eliminación biológica de nutrientes (eliminación de nitrógeno o fósforo). Opcionalmente, el al menos un entorno
- 60
- 65

o zona oxigenada es un tanque de igualación, una estación de bombeo o un pozo húmedo, una tubería de recirculación, un digestor aeróbico, un tanque de retención de lodos, cámaras y/o tanques de aireación primarios, secundarios y terciarios, un reactor de secuenciación por lotes que puede alternar entre múltiples condiciones de agua o aguas residuales incluido un reactor aeróbico o anammox.

5 Las bacterias exoelectrógenas se refieren a bacterias que tienen la capacidad de transferir electrones de forma extracelular y que se pueden activar metabólicamente mediante uno o más agentes en un sistema de tratamiento de aguas residuales. Un experto probablemente consideraría que las bacterias exoelectrógenas en un entorno oxigenado transferirían preferentemente electrones de forma extracelular al entorno oxigenado en lugar de a una superficie conductora próxima. Sin embargo, sorprendentemente, como se describe en el presente documento, los autores de la invención descubrieron que: (1) bacterias exoelectrógenas modificadas que: (A) se seleccionan funcionalmente durante su crecimiento en un ambiente oxigenado; y/o (B) se producen genéticamente modificando, seleccionando y/o incorporando citocromos que transfieren preferentemente electrones extracelularmente a un material conductor próximo; (2) que proporcionan una biopelícula de microorganismos multicapa sobre una superficie conductora que permite una interacción sintrófica entre las capas de manera que la(s) capa(s) exterior(es) pueda(n) proteger del oxígeno y/o consumir oxígeno a una velocidad suficiente, para reducir o limitar la cantidad de oxígeno que interacciona con la(s) capa(s) de bacterias exoelectrógenas interiores; o (3) una combinación de los mismos, puede incorporarse en un sensor bioelectroquímico para usar en un entorno oxigenado, como se describe en los ejemplos 1 y 2.

20 En el contexto de la presente descripción, debe entenderse que la referencia a "microbio", "microorganismo" o "bacterias" incluye una o más bacterias. Normalmente, un sistema de tratamiento de aguas residuales comprenderá más de un tipo de bacterias residentes. Los términos "microbio" y "microorganismo" se usan indistintamente en el presente documento para describir una o más bacterias residentes en el sistema de tratamiento de aguas residuales. Los términos bacterias "electrógenas" y "exoelectrógenas" se usan indistintamente en el presente documento.

30 Las bacterias exoelectrógenas comprenden una o más de *Geobacter sulfurreducens*, *Geobacter metaloreducens*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Shewanella putrefaciens*. El número y tipo de bacterias exoelectrógenas pueden depender del tipo de entorno oxigenado. Preferiblemente, la bacteria exoelectrógena comprende o consiste en *Geobacter sulfurreducens*.

35 Respirar en una superficie eléctricamente conductora se refiere a cualquier proceso en el que las bacterias exoelectrógenas transfieren un electrón extracelularmente a una superficie eléctricamente conductora en lugar de a su entorno oxigenado. Las bacterias exoelectrógenas pueden respirar en la superficie eléctricamente conductora con una tendencia de aproximadamente 10%, aproximadamente 25%, aproximadamente 30%, aproximadamente 40%, aproximadamente 50%, aproximadamente 60%, aproximadamente 70%, aproximadamente 75%, aproximadamente 80%, aproximadamente 85%, aproximadamente 90%, aproximadamente 95%, aproximadamente 100%, mayor que la tendencia de las bacterias exoelectrógenas a respirar en su entorno oxigenado. La respiración en el entorno oxigenado se refiere a las bacterias exoelectrógenas que transfieren al menos un electrón, extracelularmente, al oxígeno disuelto en el entorno aeróbico, aireado, oxigenado o parcialmente oxigenado. El entorno aeróbico, aireado, oxigenado o parcialmente oxigenado de las bacterias exoelectrógenas se refiere a las bacterias exoelectrógenas que están en comunicación fluida con el entorno oxigenado. Opcionalmente, las bacterias exoelectrógenas están completamente sumergidas en su entorno oxigenado.

50 En el contexto de la presente descripción, "sumergido" dentro o en un entorno se refiere a hundir al menos una parte de las bacterias exoelectrógenas en el entorno, por ejemplo, aproximadamente 10%, aproximadamente 25%, aproximadamente 50%, aproximadamente 75%, aproximadamente 80%, aproximadamente 85%, aproximadamente 90%, aproximadamente 95%, aproximadamente 99%, aproximadamente 100%, o el porcentaje es de uno cualquiera de los porcentajes enumerados anteriormente a otro cualquiera de los porcentajes enumerados anteriormente, o cualquier porcentaje entre los mismos, de la superficie de las bacterias exoelectrógenas está sumergido en el entorno líquido. Opcionalmente, las bacterias exoelectrógenas se acoplan a un sensor bioelectroquímico que está sumergido total o parcialmente dentro de un entorno oxigenado.

55 La producción de bacterias exoelectrógenas se refiere a un procedimiento de generación o cultivo de bacterias a partir de una muestra semilla. La muestra semilla se puede obtener de una cepa o de una bacteria exoelectrógena previamente seleccionada que puede respirar en una superficie eléctricamente conductora en un entorno oxigenado. Las bacterias exoelectrógenas que respiran en una superficie eléctricamente conductora en un entorno oxigenado se pueden seleccionar funcionalmente y/o producir genéticamente.

60 Seleccionadas funcionalmente durante su crecimiento en un entorno o entorno oxigenado se refiere al control de los parámetros de crecimiento de las bacterias exoelectrógenas, que da como resultado bacterias exoelectrógenas con la capacidad de respirar en una superficie eléctricamente conductora en un entorno oxigenado. Opcionalmente, las bacterias exoelectrógenas se añaden a una mezcla oxigenada que comprende una solución de alimentación, se vigila la actividad biológica y se seleccionan las bacterias exoelectrógenas

viables.

En el contexto de la presente descripción, la solución de alimentación es cualquier mezcla líquida que contenga suficientes materiales para producir el crecimiento de las bacterias exoelectrógenas mientras son biológicamente activas. La solución de alimentación puede comprender  $\text{NaHCO}_3$ , hidrolizado de caseína, extracto de carne, urea,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y acetato de sodio. Opcionalmente, la concentración de los componentes de la solución de alimentación se ajusta de modo que la BOD final medida para la solución es de aproximadamente 1 mg/l a aproximadamente 10.000 mg/l. Opcionalmente, la concentración de  $\text{NaHCO}_3$  es de aproximadamente 50 mg/l a aproximadamente 5000 mg/l, por ejemplo, aproximadamente 525 mg/l. Opcionalmente, la concentración de hidrolizado de caseína es de aproximadamente 50 mg/l a aproximadamente 5000 mg/l, por ejemplo, aproximadamente 525 mg/l. Opcionalmente, la concentración de extracto de carne es de aproximadamente 50 mg/l a aproximadamente 3500 mg/l, por ejemplo, aproximadamente 350 mg/l. Opcionalmente, la concentración de urea es de aproximadamente 20 mg/l a aproximadamente 500 mg/l, por ejemplo, aproximadamente 90 mg/l. Opcionalmente, la concentración del  $\text{NaCl}$  es de aproximadamente 5 mg/l a aproximadamente 10.000 mg/l, por ejemplo, aproximadamente 21 mg/l. Opcionalmente, la concentración del  $\text{CaCl}_2$  es de aproximadamente 5 mg/l a aproximadamente 10.000 mg/l, por ejemplo, aproximadamente 10 mg/l. Opcionalmente, la concentración del  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  es de aproximadamente 4 mg/l a aproximadamente 50 mg/l, por ejemplo, aproximadamente 7 mg/l. Opcionalmente, la concentración de acetato de sodio es de aproximadamente 250 mg/l.

Biológicamente activo se refiere a cualquier reacción entre las bacterias exoelectrógenas y al menos un agente más en un entorno oxigenado que hace que al menos un electrón sea transferido extracelularmente desde las bacterias exoelectrógenas, en donde, el al menos un electrón se transfiere extracelularmente desde las bacterias exoelectrógenas a un material conductor próximo, por ejemplo, una superficie eléctricamente conductora. La actividad biológica se puede vigilar, por ejemplo: (1) midiendo la cantidad de ATP en las bacterias exoelectrógenas; (2) midiendo la transferencia de electrones extracelularmente desde las bacterias exoelectrógenas al material conductor próximo; (3) midiendo los subproductos y/o la degradación de sustratos de las bacterias exoelectrógenas; o (4) una combinación de los mismos.

El uno o más agentes son cualquier componente en un entorno oxigenado que interacciona con, y afecta a la capacidad de, las bacterias exoelectrógenas para transferir un electrón extracelularmente. El uno o más agentes pueden ser oxígeno, materia orgánica, un agente tóxico o una combinación de los mismos. La materia orgánica puede ser un compuesto de carbono orgánico. Un compuesto de carbono orgánico es cualquier molécula que comprende carbono e hidrógeno que activa metabólicamente las bacterias exoelectrógenas. Opcionalmente, el compuesto de carbono orgánico es un ácido graso volátil, ácido orgánico, compuesto orgánico complejo, metanol, etanol, acetato, ácido acético, glicerol, melaza azúcar agua, MicroC™, o una combinación de los mismos. Opcionalmente, el agente tóxico es un agente de limpieza, por ejemplo, hipoclorito de sodio, ácido peracético, ácido cítrico o una combinación de los mismos. Opcionalmente, el agente tóxico es un compuesto inhibidor, por ejemplo, amoníaco, metales pesados, arsénico, azufre, temperatura, salinidad, fenoles, cianuros, tiocianato, p-cresol, plaguicidas, ácidos, compuestos de amonio cuaternario o una combinación de los mismos.

El material conductor o superficie eléctricamente conductora pueden ser cualquier material que sirva como canal o medio para la corriente eléctrica. Opcionalmente, la superficie eléctricamente conductora está hecha de fibra de carbono, carbón activado, grafeno, acero inoxidable, platino, paladio, hierro, papel carbón, grafito de carbono, titanio, óxidos metálicos mixtos, cobre, latón, plata o una combinación de los mismos, o cualquier material adecuado para su uso como electrodo. Opcionalmente, la superficie eléctricamente conductora es un ánodo de un par de electrodos. La corriente medida del par de electrodos se puede correlacionar con la actividad biológica de las bacterias exoelectrógenas.

Las bacterias exoelectrógenas pueden estar próximas al material conductor o superficie eléctricamente conductora, por ejemplo, a una distancia de aproximadamente 0 mm a aproximadamente 5 mm del material conductor o superficie eléctricamente conductora. Opcionalmente, las bacterias exoelectrógenas transfieren electrones al material conductor o superficie eléctricamente conductora a través de al menos un compuesto mediador que se encuentra en el entorno que rodea el material conductor o superficie eléctricamente conductora. Opcionalmente, las bacterias exoelectrógenas se acoplan directamente al material conductor o superficie eléctricamente conductora, por ejemplo, las bacterias exoelectrógenas crecen en el material conductor o superficie eléctricamente conductora. Alternativamente, las bacterias exoelectrógenas se acoplan al material conductor o superficie eléctricamente conductora por medio de un conector eléctrico intermedio, por ejemplo, un cable.

Vigilar la actividad biológica puede comprender etapas de vigilancia de la actividad biológica durante un período de tiempo determinado, por ejemplo, de aproximadamente 1 minuto a aproximadamente 2 semanas. Opcionalmente, después del período establecido de tiempo de vigilancia, la mezcla o mezcla oxigenada se reemplaza por una nueva mezcla oxigenada. Este ciclo de seguimiento y reemplazo puede repetirse durante un tiempo total de aproximadamente 1 hora a aproximadamente 2 meses. Tras el ciclo, se pueden seleccionar

bacterias exoelectrógenas metabólicamente activas. Opcionalmente, la mezcla oxigenada se proporciona a las bacterias exoelectrógenas como alimentación continua.

5 La producción genética de bacterias exoelectrógenas que respiran en una superficie conductora o superficie eléctricamente conductora en un entorno oxigenado pueden comprender etapas que: modifican al menos un citocromo que permite que al menos un electrón se transfiera extracelularmente al material conductor o superficie eléctricamente conductora y no al entorno oxigenado; añaden al menos un citocromo que permite que al menos un electrón se transfiera extracelularmente al material conductor o superficie eléctricamente conductora y no al entorno oxigenado; seleccionan al menos un citocromo que permite que al menos un electrón se transfiera extracelularmente al material conductor o superficie eléctricamente conductora; o una combinación de las mismas.

15 Proporcionar una biopelícula bacteriana de microorganismos multicapa sobre una superficie conductora se refiere al crecimiento de un espesor suficiente de microorganismos para evitar que el oxígeno interactúe con las capas interiores de bacterias exoelectrógenas. Los microorganismos son bacterias exoelectrógenas. El espesor de la(s) capa(s) de microorganismos es suficiente para modificar las limitaciones de transporte de masa de oxígeno a través de las capas de los microorganismos y es de aproximadamente 0,2 mm a aproximadamente 5,0 mm desde la superficie conductora. Permitir una interacción sintrófica entre las capas se refiere a una capa más exterior de microorganismos que consumen oxígeno y disminuyen la cantidad de oxígeno que interactúa con una capa más interior de microorganismos y/o bacterias exoelectrógenas.

25 La presente descripción también proporciona una celda o celda de reactor para eliminar el oxígeno de una corriente de aguas residuales oxigenada para medir la cantidad de uno o más agentes en un sistema de tratamiento de aguas residuales, siendo la celda conectable en comunicación fluida aguas arriba de un sensor bioelectroquímico. La celda comprende: un compartimento que tiene una pared exterior que define un conducto a través del mismo; una estructura de soporte, acoplable al compartimento y en comunicación fluida con el conducto, la estructura de soporte acoplable a la biomasa desoxigenante. Opcionalmente, el sensor bioelectroquímico es el sensor bioelectroquímico según la presente descripción. Alternativamente, el sensor bioelectroquímico puede ser un sensor que funciona en un entorno anaeróbico.

30 Un experto probablemente consideraría que la corriente producida por un sensor bioelectroquímico en un entorno oxigenado no se correlacionaría de manera precisa y/o imprecisa con la actividad metabólica de microbios residentes porque las bacterias exoelectrógenas transferirían preferentemente electrones al entorno oxigenado en lugar de a un material conductor próximo o a una superficie eléctricamente conductora. Como se describe en el presente documento, los autores de la invención descubrieron que una celda que elimina el oxígeno del entorno oxigenado aguas arriba del sensor bioelectroquímico da como resultado que el sensor bioelectroquímico produzca una corriente que se correlaciona de manera más exacta y precisa con la actividad metabólica de los microbios residentes en comparación con el uso de los sensores bioelectroquímicos sin la celda, como se describe en el ejemplo 3.

40 El conducto puede ser de cualquier tamaño con la condición de que el entorno oxigenado pueda pasar a través del mismo. El compartimento puede estar hecho de cualquier material con la condición de que el compartimento sea capaz de soportar el entorno oxigenado que pasa a través del mismo. El compartimento puede estar hecho de un material plástico, material metálico, material de vidrio, resina, epoxi, fibra de vidrio o una combinación de los mismos. Opcionalmente, el material plástico es HDPE, PVC o silicio. Opcionalmente, el material metálico es acero inoxidable o cobre. La estructura de soporte puede ser de cualquier material que se pueda acoplar a la biomasa desoxigenante. Opcionalmente, la biomasa desoxigenante se cultiva directamente sobre la estructura de soporte. Alternativamente, la biomasa desoxigenante se puede conectar a la estructura de soporte por medio de un conector intermedio. La estructura de soporte puede estar hecha de un material plástico, material metálico, material de vidrio, material a base de carbono o una combinación de los mismos. Opcionalmente, el material plástico es HDPE, PVC o silicio. Opcionalmente, el material metálico es acero inoxidable o cobre. Opcionalmente, el material a base de carbono es malla de carbono o carbón activado.

55 La biomasa desoxigenante se puede cultivar en la superficie de la estructura de soporte o en la superficie del compartimento. En algunos ejemplos según la presente descripción, la biomasa desoxigenante se suspende en la celda sin el requisito de una estructura de soporte.

60 La biomasa desoxigenante es cualquier masa de organismos que tiene la capacidad de eliminar oxígeno por consumo de su entorno. Opcionalmente, la biomasa desoxigenante es una biopelícula bacteriana activa que comprende una comunidad microbiana mixta. La comunidad microbiana mixta puede ser facultativa y capaz de ser metabólicamente activa en presencia de oxígeno o en entornos con poco o sin oxígeno.

65 La velocidad a la que el entorno oxigenado se mueve a través de la celda puede variar con la condición de que la biomasa desoxigenante pueda consumir al menos aproximadamente 10%, aproximadamente 20%, aproximadamente 25%, aproximadamente 50%, aproximadamente 75%, aproximadamente 85%, aproximadamente 90%, aproximadamente 95% o 100% del oxígeno en el entorno oxigenado. El caudal del

entorno oxigenado se puede ajustar para aumentar o disminuir la cantidad de consumo de oxígeno en el entorno oxigenado. Opcionalmente, el entorno oxigenado es una corriente de una planta de tratamiento de aguas residuales.

- 5 Opcionalmente, la longitud de la celda se extiende para aumentar la cantidad de consumo de oxígeno por la biomasa desoxigenante. Alternativamente, se pueden poner celdas adicionales en serie para aumentar la cantidad de consumo de oxígeno por la biomasa desoxigenante.

10 Las bacterias exoelectrógenas aquí descritas se incorporan en un sensor bioelectroquímico para seguir la actividad metabólica de una población de bacterias exoelectrógenas en respuesta a uno o más agentes en un entorno oxigenado. La presente descripción proporciona un sensor bioelectroquímico para seguir la actividad metabólica de una población de bacterias exoelectrógenas en respuesta a uno o más agentes en las aguas residuales oxigenadas en un sistema de tratamiento de aguas residuales. El sensor comprende: al menos un par de electrodos que comprende un ánodo y un cátodo, el ánodo en comunicación eléctrica con las bacterias exoelectrógenas para recibir electrones de las mismas; un sensor de corriente para medir el flujo de electrones entre el ánodo y el cátodo y producir una salida eléctrica que se correlaciona con la actividad metabólica de las bacterias exoelectrógenas; y una fuente de alimentación en comunicación eléctrica con el par de electrodos para suministrar una tensión a través del par de electrodos. Las bacterias exoelectrógena son bacterias exoelectrógenas como se describe actualmente, y el ánodo del sensor bioelectroquímico es el material conductor o superficie eléctricamente conductora.

25 En el contexto de la presente descripción, el sensor bioelectroquímico es cualquier sensor que puede, con una entrada de voltaje, seguir la actividad metabólica de microbios en aguas residuales oxigenadas en un sistema de tratamiento de aguas residuales en tiempo real y proporcionar una salida eléctrica que se correlaciona con la actividad metabólica. Opcionalmente, el sensor bioelectroquímico es una celda de electrólisis microbiana.

30 Sin estar limitados por ninguna teoría, los sensores bioelectroquímicos según la presente descripción producen una corriente sustancialmente constante en condiciones de entorno oxigenado constante. Esto puede denominarse, por ejemplo, corriente de estado estacionario. Una vez que se alcanza el estado estacionario en el entorno oxigenado, una desviación indica un impacto en la actividad metabólica de los microbios residentes. Por ejemplo, cuando se introduce un componente tóxico en un entorno oxigenado, el entorno o entorno oxigenado se desequilibra y la actividad metabólica de la comunidad de microorganismos en el entorno oxigenado puede verse afectada, dando como resultado una desviación de una corriente de referencia o corriente de estado estacionario. Un operador del sistema podrá determinar una desviación del umbral o corriente umbral en la que se necesita una acción.

40 Un experto probablemente consideraría que la corriente producida por un sensor bioelectroquímico en un entorno oxigenado no se correlacionaría de manera precisa y/o imprecisa con la actividad metabólica de microbios residentes porque los electrones producidos por las bacterias exoelectrógenas se transferirían preferentemente al entorno oxigenado en lugar de a una superficie conductora próxima. Sin embargo, los autores de la invención descubrieron que: (1) bacterias exoelectrógenas modificadas que: (A) se seleccionan funcionalmente durante su crecimiento en un ambiente oxigenado; y/o (B) se producen genéticamente modificando, seleccionando y/o incorporando citocromos que transfieren preferentemente electrones extracelularmente a un material conductor próximo; (2) que proporcionan una biopelícula de microorganismos de múltiples capas sobre una superficie conductora que permite una interacción sintrófica entre las capas de manera que la(s) capa(s) exterior(es) pueda(n) proteger del oxígeno y/o consumir oxígeno a una velocidad suficiente, para reducir o limitar la cantidad de oxígeno que interacciona con la(s) capa(s) de bacterias exoelectrógenas interiores; o (3) una combinación de los mismos, pueden incorporarse en un sensor bioelectroquímico usado para vigilar y/o controlar uno o más agentes en un entorno oxigenado, como se describe en los ejemplos 1 y 2.

55 El sensor bioelectroquímico comprende al menos un par de electrodos que comprende un ánodo y un cátodo. El ánodo del un par de electrodos está en comunicación eléctrica directa con las bacterias exoelectrógenas, por ejemplo, las bacterias exoelectrógenas pueden estar unidas a, crecer sobre o estar acopladas eléctricamente de otro modo al ánodo. Al menos una capa de microorganismos puede crecer sobre o estar acoplada de otro modo a las bacterias exoelectrógenas.

60 El sensor de corriente es cualquier sensor que mide el flujo de electrones entre el ánodo y el cátodo y produce una salida eléctrica. Opcionalmente, el sensor de corriente comprende un aceptor de electrones terminal en comunicación eléctrica con el cátodo para recibir electrones del mismo, y una resistencia en comunicación eléctrica con el par de electrodos, donde la corriente eléctrica se mide a través de la resistencia. La resistencia puede funcionar en el intervalo de aproximadamente 1 ohmio a aproximadamente 10.000 ohmios, por ejemplo, 1 ohmios, 2 ohmios, 3 ohmios, 4 ohmios, 5 ohmios, 6 ohmios, 7 ohmios, 8 ohmios, 9 ohmios, 10 ohmios, 25 ohmios, 50 ohmios, 75 ohmios, 100 ohmios, 250 ohmios, 500 ohmios, 1.000 ohmios, 2.500 ohmios, 5.000 ohmios, 7.500 ohmios, 10.000 ohmios; o la resistencia eléctrica está entre una cualquiera de las resistencias eléctricas enumeradas anteriormente y otra cualquiera de las resistencias eléctricas enumeradas anteriormente,

o cualquier resistencia eléctrica entre las mismas. Opcionalmente, la resistencia es una resistencia de bajo valor de ohmios (aproximadamente 5 ohmios). La medición de una salida eléctrica a través de la resistencia se refiere a medir el cambio en el potencial eléctrico antes y después de la resistencia.

5 La fuente de alimentación puede ser cualquier instrumento emisor de energía que aplique una tensión a través del par de electrodos del sensor bioelectroquímico. La tensión aplicada puede ser de aproximadamente 0,1 V a aproximadamente 1,5 V, por ejemplo, aproximadamente 0,1 V; 0,2 V, 0,3 V, 0,4 V, 0,5 V, 0,6 V, 0,7 V, 0,8 V, 0,9 V, 1,0 V, 1,1 V, 1,2 V, 1,3 V, 1,4 V, 1,5 V; o la tensión está entre una cualquiera de las tensiones enumeradas anteriormente a otra cualquiera de las tensiones enumeradas anteriormente, o cualquier tensión entre las mismas. Opcionalmente, la tensión aplicada es de aproximadamente 0,3 V a aproximadamente 0,9 V. Sin estar limitados por ninguna teoría, la tensión aplicada al sensor bioelectroquímico puede permitir que el sensor use un aceptor de electrones terminal que no sea oxígeno, por ejemplo, H<sup>+</sup> o CO<sub>2</sub>. En el contexto de la presente descripción, un aceptor de electrones terminal se refiere a cualquier componente que recibe o acepta un electrón. Opcionalmente, el aceptor de electrones terminal es cualquier material conductor que permita una reacción de reducción electroquímica, por ejemplo, la reducción de H<sup>+</sup> como aceptor de electrones terminal en la producción de gas hidrógeno.

20 Como se usa en el presente documento, la frase "aceptores de electrones terminales de oxígeno" se refiere al uso del compuesto dióxígeno (es decir, O<sub>2</sub>) como aceptor de electrones terminal. Por el contrario, la frase "aceptores de electrones terminales que no son oxígeno" se refiere a aceptores de electrones terminales que no son dióxígeno (es decir, O<sub>2</sub>); sin embargo, esto no pretende excluir los aceptores de electrones terminales que pueden estar compuestos por átomos de oxígeno, tales como, pero no limitados a, CO<sub>2</sub>, etc.

25 Los sensores bioelectroquímicos aquí descritos pueden incorporarse en sistemas para vigilar y/o controlar uno o más agentes en un entorno oxigenado. La presente invención proporciona un sistema para vigilar uno o más agentes en aguas residuales oxigenadas en un sistema de tratamiento de aguas residuales. El sistema comprende: un sensor bioelectroquímico para vigilar la actividad metabólica de una población de bacterias exoelectrógenas y proporcionar una salida eléctrica que se corresponde con la actividad metabólica, comprendiendo el sensor bioelectroquímico un par de electrodos y una fuente de alimentación para suministrar una tensión a través del par de electrodos; y un analizador de la salida eléctrica para analizar la salida eléctrica y correlacionar la salida eléctrica con uno o más agentes del sistema de tratamiento de aguas residuales. Las bacterias exoelectrógenas son las bacterias exoelectrógenas como se describen aquí. La presente invención también proporciona un sistema para controlar el suministro de uno o más agentes en aguas residuales oxigenadas en un sistema de tratamiento de aguas residuales. El sistema comprende: un sensor bioelectroquímico para vigilar la actividad metabólica de una población de bacterias exoelectrógenas y proporcionar una salida eléctrica que se correlaciona con la actividad metabólica, comprendiendo el sensor bioelectroquímico un par de electrodos y una fuente de alimentación para suministrar una tensión a través del par de electrodos; un analizador de la salida eléctrica para analizar la salida eléctrica y proporcionar una señal a un controlador; y una bomba acoplada operativamente al controlador para controlar el suministro de uno o más agentes en respuesta a la señal. Las bacterias exoelectrógenas son las bacterias exoelectrógenas tal como se describen aquí. El par de electrodos comprende un ánodo y un cátodo, el ánodo en comunicación eléctrica con las bacterias exoelectrógenas para recibir electrones de las mismas. El sensor bioelectroquímico comprende además un sensor de corriente para medir el flujo de electrones entre el ánodo y el cátodo y producir una salida eléctrica que se correlaciona con la actividad metabólica de las bacterias exoelectrógenas.

45 El analizador de la salida eléctrica proporciona una señal a un controlador, que a su vez controla el suministro de uno o más agentes al entorno oxigenado a través de una bomba. El controlador es cualquier procesador en comunicación con el sensor bioelectroquímico que acepta una señal del analizador de la salida eléctrica y transmite la señal a una bomba.

50 Los sensores exoelectrógenos aquí descritos también pueden usarse en métodos de vigilancia y/o control de una población de bacterias exoelectrógenas en respuesta a uno o más agentes en un entorno oxigenado. La presente invención también proporciona un método para vigilar uno o más agentes en aguas residuales oxigenadas en un sistema de tratamiento de aguas residuales. El método comprende: aplicar energía a un sensor bioelectroquímico; medir una salida eléctrica del sensor bioelectroquímico y correlacionar la salida con la actividad metabólica de las bacterias exoelectrógenas presentes en el sistema; y correlacionar la salida eléctrica con uno o más agentes en el sistema de tratamiento de aguas residuales. Las bacterias exoelectrógenas son las bacterias exoelectrógenas tal como se describen aquí. La presente invención también proporciona un método para controlar el suministro de uno o más agentes en aguas residuales oxigenadas en un sistema de tratamiento de aguas residuales. El método comprende: aplicar energía a un sensor bioelectroquímico; medir una salida eléctrica del sensor bioelectroquímico y correlacionar la producción con la actividad metabólica de las bacterias exoelectrógenas presentes en el sistema; suministrar el uno o más agentes al sistema; vigilar un cambio en la salida eléctrica en respuesta al uno o más agentes; y ajustar el suministro del uno o más agentes en respuesta a un cambio en la salida eléctrica. Las bacterias exoelectrógenas son las bacterias exoelectrógenas como se describen aquí.

Los sistemas y métodos descritos en el presente documento pueden iniciar, aumentar, disminuir o interrumpir el suministro de uno o más agentes a un entorno oxigenado en respuesta a una señal producida como resultado de un cambio en la salida eléctrica cuando la salida eléctrica alcanza o supera un umbral. El uno o más agentes pueden afectar negativamente a las bacterias exoelectrógenas dando como resultado una disminución de la actividad metabólica y una disminución de la corriente medida. Alternativamente, el uno o más agentes pueden afectar positivamente a las bacterias exoelectrógenas dando como resultado un aumento de la actividad metabólica y un aumento de la corriente medida.

El analizador de la salida eléctrica descrito en el presente documento es capaz de analizar la salida eléctrica del sensor bioelectroquímico y proporcionar una señal, cuando sea apropiado, para producir un ajuste en el entorno oxigenado. Opcionalmente, la señal se proporciona cuando la salida eléctrica alcanza una salida umbral o se desvía de una salida de referencia.

Una salida umbral es una salida (tal como una medición de corriente) a la que los parámetros del entorno oxigenado ya no se están en niveles aceptables para la operación o función continua. Como sabrá un experto en la técnica, la determinación de lo que se considera un nivel(es) de parámetros aceptables para la operación o función del entorno oxigenado dependerá o estará determinado por el tipo específico de entorno oxigenado. La corriente umbral u otra salida puede representar una desviación de una salida eléctrica operativa de referencia de, por ejemplo, aproximadamente 5%, aproximadamente 10%, aproximadamente 20%, aproximadamente 50%, aproximadamente 100% de desviación, o el porcentaje es de uno cualquiera de los porcentajes enumerados anteriormente a otro cualquiera de los porcentajes enumerados anteriormente. La salida operativa de referencia puede ser, por ejemplo, una corriente de referencia o de estado estacionario. Un experto, tal como un fabricante o un operador, podrá determinar los niveles aceptables de desviación. La corriente umbral se puede predeterminar, por ejemplo, a partir de métodos anteriores; valores conocidos en la técnica; o un valor determinado usando métodos alternativos conocidos por un experto. Opcionalmente, el umbral se determina en relación con la corriente generada a partir de la actividad metabólica de las bacterias exoelectrógenas en condiciones operativas estándar, por ejemplo, temperatura, niveles de oxígeno, pH, presión o una combinación de los mismos.

La desviación se puede medir a lo largo del tiempo; y se puede establecer un umbral en función de uno de o tanto de la desviación como del tiempo. La desviación puede medirse a lo largo de un período de aproximadamente 1 segundo a aproximadamente 5 horas, por ejemplo, aproximadamente 1 segundo, 2 segundos, 3 segundos, 5 segundos, 10 segundos, 20 segundos, 30 segundos, 60 segundos, 120 segundos, 240 segundos, 500 segundos, 1000 segundos, 3600 segundos, 5000 segundos, 10.000 segundos, 18.000 segundos; o el tiempo es desde uno cualquiera de los tiempos enumerados anteriormente a otro cualquiera de los tiempos enumerados anteriormente, o cualquier tiempo entre los mismos. En algunos ejemplos según la presente descripción, la medición se inicia aproximadamente 10 segundos después de la adición de uno o más agentes, y se vigila el entorno oxigenado para detectar una desviación durante aproximadamente 1 hora después. En algunos ejemplos según la presente descripción, una desviación umbral puede ser una desviación de más de aproximadamente 10% de la salida eléctrica operativa de referencia a lo largo de aproximadamente 2 horas desde la introducción de uno o más agentes en el sistema de tratamiento de aguas residuales. La desviación se puede medir en menos de aproximadamente 15 segundos, aproximadamente 10 segundos, aproximadamente 5 segundos, aproximadamente 1 segundo, o el tiempo es desde uno cualquiera de los tiempos enumerados anteriormente a otro cualquiera de los tiempos enumerados anteriormente, después de la introducción de uno o más agentes o condiciones. El impacto de uno o más agentes puede ser visualizado por el operador o señalado por un sistema si tiene un impacto en el sensor bioelectroquímico. Esta variación o desviación en la salida del sensor bioelectroquímico puede usarse para interrumpir o controlar la adición de uno o más agentes. El período de tiempo después de la introducción de uno o más agentes o condiciones en las que se puede medir un cambio en la corriente dependerá de varios factores, por ejemplo, componentes en el entorno oxigenado, tamaño volumétrico del entorno oxigenado, el tipo y la cantidad de bacterias exoelectrógenas, o una combinación de los mismos.

Los sistemas y métodos descritos en el presente documento pueden usarse para ajustar la cantidad, tipo, o combinación de los mismos, de uno o más agentes suministrados a un entorno oxigenado. Una vez que se determina que la corriente medida ha alcanzado el umbral determinado, se envía una señal a una bomba que controla el suministro de uno o más agentes al entorno oxigenado, que a su vez disminuye o interrumpe el suministro de uno o más agentes. Una vez que se determina que la corriente medida está dentro de un intervalo aceptable o dentro de la salida umbral, se puede enviar una señal adicional a una bomba para aumentar o comenzar el suministro de uno o más agentes.

Un operador puede efectuar un ajuste en el sistema en respuesta a las señales proporcionadas por los sensores, sistemas y métodos bioelectroquímicos como se describen aquí. Opcionalmente, un procesador que ejecuta un algoritmo y está en comunicación con los sensores y sistemas bioelectroquímicos aquí descritos predice los desequilibrios en el entorno oxigenado basándose en la salida eléctrica proporcionada por los sistemas y sensores bioelectroquímicos descritos en el presente documento, y ajusta el entorno oxigenado en respuesta a la predicción. Opcionalmente, el procesador es una máquina de aprendizaje predictivo.

Los presentes sistemas descritos pueden incorporar un sensor bioelectroquímico aquí descrito muy cerca de una parte del tanque de tratamiento de aguas residuales donde las aguas residuales entran en el tanque, por ejemplo, cuando es preferible vigilar y/o controlar uno o más agentes que entran en el tanque desde fuentes aguas arriba. Los presentes sistemas descritos también pueden incorporar un sensor bioelectroquímico aquí descrito cerca de una parte del tanque de tratamiento de aguas residuales donde el agua sale del tanque, por ejemplo, cuando es preferible vigilar uno o más agentes que salen del tanque. Se puede poner más de un sensor bioelectroquímico dentro de un tanque de tratamiento de aguas residuales, por ejemplo, cuando es preferible vigilar uno o más agentes en diferentes sitios dentro del tanque. Opcionalmente, un sensor bioelectroquímico se coloca muy cerca de una parte del tanque de tratamiento de aguas residuales donde las aguas residuales entran en el tanque, y un sensor bioelectroquímico se coloca muy cerca de una parte del tanque de tratamiento de aguas residuales donde el agua sale del tanque, por ejemplo cuando: es preferible (1) vigilar un cambio en la cantidad de uno o más agentes en el tanque; (2) vigilar el movimiento de uno o más agentes en el tanque; o (3) una combinación de los mismos.

La presente invención proporciona además un método para vigilar la viabilidad de los microorganismos en un entorno oxigenado. En general, el método comprende proporcionar bacterias exoelectrógenas en el entorno oxigenado. La corriente generada a partir de la actividad metabólica de las bacterias exoelectrógenas se mide y se compara con una corriente de referencia de una cantidad viable de los microorganismos. Si la corriente medida está por encima o por debajo de la corriente umbral establecida, es necesario un ajuste. Una cantidad viable de los microorganismos es una cantidad suficiente de microorganismos para operar en el entorno oxigenado. Los sensores bioelectroquímicos aquí descritos pueden usarse en el método de vigilancia de la viabilidad de los microorganismos en un sistema de tratamiento de aguas residuales. Las bacterias exoelectrógenas son las bacterias exoelectrógenas como se describen aquí.

La presente descripción también proporciona un uso de un sensor bioelectroquímico como se describe aquí en los métodos y/o sistemas como se describen aquí.

El funcionamiento de los sensores, sistemas y métodos bioelectroquímicos descritos en el presente documento en un entorno oxigenado puede: (1) reducir la cantidad de equipos costosos; (2) aumentar la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales; (3) aumentar la precisión de la correlación de la salida eléctrica y la actividad metabólica de las bacterias exoelectrógenas; o (4) una combinación de los mismos, en comparación con los sensores, sistemas y métodos bioelectroquímicos propuestos previamente que operan preferiblemente en ambientes oxigenados.

Como se ha indicado anteriormente, la presente invención proporciona un sensor bioelectroquímico para llevar a cabo los métodos descritos anteriormente, así como para incorporarlo en los sistemas descritos anteriormente. En la Fig. 1 se muestra una configuración de sensor de ejemplo. El sensor (100) generalmente comprende: un par de electrodos que comprende un ánodo (104) y un cátodo (106), el ánodo (104) en comunicación eléctrica con las bacterias exoelectrógenas (108) para recibir electrones de las mismas; una resistencia (110) acoplada eléctricamente al par de electrodos, midiéndose la corriente eléctrica a través de la resistencia (110); una fuente de alimentación (112) en comunicación eléctrica con el par de electrodos para suministrar tensión a través del par de electrodos; y un aceptor de electrones terminal (no se muestra) para recibir electrones del cátodo. Los cambios en la salida eléctrica se pueden usar para optimizar el rendimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales, por ejemplo, para determinar el suministro opcional de uno o más agentes al sistema. Un cambio en la salida eléctrica puede medirse frente a un umbral establecido para determinar cuándo es necesario un ajuste.

Como se ha indicado antes, la presente descripción proporciona una celda para eliminar el oxígeno de una corriente de aguas residuales aireada para medir la cantidad de uno o más agentes en un sistema de tratamiento de aguas residuales, siendo la celda conectable en comunicación fluida aguas arriba de un sensor bioelectroquímico. En la Fig. 2 se muestra una celda de ejemplo. La célula (200) comprende un compartimento (202) que tiene una pared exterior que define un conducto a través del mismo (flechas); una estructura de soporte (206), acoplable al compartimento (202) y en comunicación fluida con el conducto (flechas), la estructura de soporte (206) acoplable a la biomasa desoxigenante (208).

## Ejemplos

Ejemplo 1 - Planta de agua o aguas residuales 1 (Sensores BES de afluente y efluente duplicados)

Se instalaron sensores bioelectroquímicos duplicados según la presente invención en un canal de efluente de una planta de agua (comparativo) o aguas residuales (invención) inmediatamente antes de las luces UV para vigilar el agua o aguas residuales efluentes y se instalaron dos sensores en el afluente de la planta de tratamiento de agua o aguas residuales (en el efluente del clarificador primario) para vigilar el impacto del agua o aguas residuales entrantes. La planta es una planta de tratamiento de agua o aguas residuales típica, con filtros, clarificadores primarios, depósitos de lodos activados, clarificación secundaria, desinfección UV y digestión

anaeróbica. La planta es la principal responsable del tratamiento de los compuestos orgánicos y los TSS.

5 Para vigilar el efluente, las sondas se unieron entre sí para confirmar la fiabilidad de los datos y ensayar dos sensores bioelectroquímicos en paralelo. Los sensores bioelectroquímicos se colgaron en la corriente de agua o aguas residuales usando dos soportes de alambre. Los sensores bioelectroquímicos colgaban en una aplicación de tipo oscilante, lo que permitía que los sensores oscilaran en el canal pero no enrollarse uno alrededor del otro.

10 El operador tenía la capacidad de levantar fácilmente los sensores bioelectroquímicos del efluente y sacudir las algas. El operador puede raspar las algas de los vertederos de forma manual y regular porque, a medida que las algas fluyen por el sistema, pueden quedar atrapadas en los sensores bioelectroquímicos y las luces UV. Este equipo se limpia después de raspar los vertederos. Para adecuar la limpieza de las algas de los sensores bioelectroquímicos, se extendió el cable de acero inoxidable para conectarlo a cada sonda y al lateral de la rejilla. En lugar de conectarse a la rejilla en cada lado, los alambres pasaban por la rejilla y unían los dos extremos en la parte superior central de la rejilla con una abrazadera para cables. El operario puede coger el alambre de la parte superior de la rejilla, sacudir las algas y volver a dejarlo caer en el canal.

20 Los sensores bioelectroquímicos se instalaron justo antes de una válvula de compuerta grande. Para garantizar que las sondas no pudieran chocar con la válvula de cierre, se añadió un tercer cable, atado alrededor de los dos sensores bioelectroquímicos, lo suficientemente corto como para evitar que los sensores bioelectroquímicos chocaran contra la compuerta en situaciones de flujo alto. Este alambre se fijó a la rejilla creando un lazo en el alambre con una abrazadera de cables y se aseguró a la rejilla con un mosquetón.

25 El oxígeno disuelto en la corriente de agua o aguas residuales efluente variaba de 0,5 mg/l a 4,0 mg/l. Se instalaron los sensores bioelectroquímicos y la información de los sensores bioelectroquímicos se recogió usando un panel de control en línea. Los datos se recogieron de los sensores bioelectroquímicos y las mediciones de la BOD se recogieron del agua o aguas residuales y se correlacionaron con la salida de los sensores bioelectroquímicos. Los datos de los sensores bioelectroquímicos se ilustran en las Figs. 3A y B.

30 Los datos recogidos demostraron que la salida de señal de los sensores bioelectroquímicos de los efluentes es reproducible para los dos sensores bioelectroquímicos instalados en la corriente de agua o aguas residuales efluente. El intervalo para la salida de señal era de 2 a 16  $\mu$ A, apareciendo un patrón diario y los picos más altos de rendimiento se identificaban a las 12:00 p. m. cada día. Las fluctuaciones diarias en la salida de señal de la biología son una medida directa de la actividad biológica mayor en este momento y se correlaciona con mayor demanda biológica de agua o aguas residuales en este momento.

40 Los operadores de la planta realizaron correlaciones de la BOD en las muestras de afluentes y efluentes. La salida del sensor es la de la transferencia microbiana de electrones (MET). La MET es específicamente la medición de los electrones transferidos a través de la resistencia (o corriente), que se coloca entre el par del ánodo y cátodo. La representación gráfica de estos datos combinados muestra que el valor de los sensores (MET) en estos puntos temporales predice la BOD con un  $R_2$  de 0,916. Los casos de muestreo de la BOD del afluente mostraron un promedio de 231 mg/l, con un intervalo de 136 a 372 mg/l.

45 Los patrones diarios y semanales clave se identificaron mediante un análisis estadístico de los datos de los sensores generados en los sensores de afluentes y efluentes.

Se realizó un análisis del ciclo del afluente diario. El período nocturno comprendido entre las 5 p. m. y las 8 a. m. mostró la actividad más baja, y la mayor actividad del afluente se producía normalmente al mediodía.

50 Usando estos datos diarios y semanales, el operador puede obtener una comprensión adicional de las demandas cambiantes (es decir, la carga orgánica o los impactos tóxicos) en el sistema. Esto permite al operador comprender los tiempos y días lógicos para los tiempos de parada por mantenimiento (durante los períodos de flujo bajo/estrés bajo) y comprender mejor el estrés en el sistema.

55 Usando estos datos, se podrían aceptar cargas orgánicas adicionales (que generan ingresos) en la instalación. El sensor podría usarse para predecir los tiempos óptimos para recibir estos flujos.

60 La precipitación tiene un efecto pronunciado en la planta de tratamiento de agua o aguas residuales. Generalmente hay un retraso de 3-6 horas desde el momento de inicio de un suceso de precipitación hasta que tiene un impacto en la planta de agua o aguas residuales. Estos sucesos pueden producir grandes cambios en la MET que entra en el sistema, disminuyendo la concentración en el agua o aguas residuales tanto como un 80%.

Ejemplo 2 - Sensores BES en afluente, tanque de retención de lodos, cuenca de aireación y efluente

65 Los sensores bioelectroquímicos según la presente invención se instalaron en diferentes lugares de conexión de una planta de agua (comparativa) o de aguas residuales (invención). La planta de tratamiento de agua o

aguas residuales consiste en cribado, una cuenca de aireación de lodos activados/tanque de tratamiento primario, clarificación secundaria, desinfección UV, digestión aeróbica de lodos, tanque de retención de lodos y desinfección UV.

5 Ubicación de instalación del sensor en el afluente: el sensor bioelectroquímico se instaló en un canal que recibía agua bruta o aguas residuales que entraban en la planta. El sensor bioelectroquímico se bajó a una cuba que recibía el agua o aguas residuales afluentes justo después de una serie de filtros y antes del tanque de tratamiento primario. El sensor bioelectroquímico estaba totalmente sumergido en el agua o aguas residuales y recibía el flujo de una estación de bombeo.

10

Ubicación de instalación del sensor en el efluente: El sensor bioelectroquímico se instaló en un canal de efluente antes del vertedero de efluente final. El sensor bioelectroquímico se colgó de un soporte angular de hierro existente en el canal. El sensor bioelectroquímico se aseguró con un alambre de acero inoxidable y abrazaderas de alambre de acero inoxidable. Colgaba aproximadamente 61 cm (2 pies) por debajo del nivel del agua. Este nivel de agua estaba aproximadamente 12,7 cm (5 pulgadas) por encima del fondo del vertedero triangular. El sensor bioelectroquímico no podía secarse del todo en este lugar ni siquiera con niveles de agua bajos. El alambre de soporte del sensor bioelectroquímico se colocó lejos de la pared del tanque, lejos de los puntos muertos, donde hay flujo visible.

15

20 El oxígeno disuelto en las corrientes de agua o aguas residuales se mantuvo en un intervalo de 1 y 2,5 mg/l de dO usando un ventilador de mecanismo de frecuencia variable. Se instalaron los sensores bioelectroquímicos y la información de los sensores bioelectroquímicos se recogió usando un panel de control en línea. Se recogieron los datos del sensor y se recogieron las mediciones de BOD del agua o aguas residuales y se correlacionaron con la salida de señal de los sensores bioelectroquímicos. Los datos de los BES recogidos se ilustran en las figuras 4A y B.

25

Los datos recogidos demostraron que la salida del sensor bioelectroquímico es significativamente mayor para la corriente de agua o aguas residuales afluente en comparación con el sensor bioelectroquímico situado en la corriente de efluente. El intervalo para el agua o aguas residuales afluentes en estado estacionario era de 80 a 140  $\mu$ A, mientras que el agua o aguas residuales efluentes tenían una salida más variable y variaba de 0 - 15  $\mu$ A. Esta variación en la salida de los sensores bioelectroquímicos refleja la actividad metabólica microbiana y la presencia de concentraciones más bajas de demanda biológica de oxígeno o carbono biodisponible en la corriente de efluente en comparación con el agua o aguas residuales afluentes.

30

35 Ubicación en la cuenca de aireación: el sensor bioelectroquímico se instaló directamente en la cuenca de aireación de lodos activados. Esto se hizo conectando el sensor a una tubería de PVC y bajándolo dentro de la cuenca. El sistema se instaló para intentar entrar en contacto con una muestra representativa de la solución.

40

La salida de datos de la cuenca de aireación mostró una variación interesante en la actividad microbiana en la biología. La salida estaba principalmente entre 20-70  $\mu$ A. La tendencia en la ubicación mostró que había una variación diurna de al menos +/- 30  $\mu$ A. La actividad microbiana más alta aproximadamente a las ~6 a.m., con la actividad más baja entre 1 p.m. - 3 p.m.

45

Ubicación en el tanque de retención de lodos: El sensor bioelectroquímico se instaló en el tanque de retención de lodos. Esto se hizo conectando el sensor a una tubería de PVC y bajándolo dentro de la cuenca. El sistema se instaló para intentar entrar en contacto con una muestra representativa de la solución.

50

La salida de datos de retención de lodos mostró un nivel relativamente bajo de salida. Se recogió una muestra y se llevó al laboratorio para confirmar que la salida era muy baja. Esto puede deberse al hecho de que la actividad biológica y los compuestos eran limitados en este lugar, ya que la biología de este sistema en este momento habría eliminado la mayoría de los compuestos orgánicos solubles.

55

Observaciones: El análisis de los datos de los afluentes mostró que el período nocturno entre 1 a.m. - 3 a.m. mostraba la concentración orgánica más baja, produciéndose la concentración más alta del afluente entre 11 a.m. - 3 p.m. (véase la figura 5). Tras analizar los datos de varios meses, la mayor cantidad de estrés para la instalación parecía producirse durante los meses de verano (de principios de junio a mediados de agosto), coincidiendo con la carga adicional de verano que sufre la instalación debido a su ubicación estacional.

60

Los datos de tendencias semanales del efluente mostraban una variación diurna del efluente, con una MET máxima generalmente entre las 11 a. m. y las 3 p. m. Las concentraciones mínimas tendían a ocurrir entre 1 a. m. - 3 a. m. Los fines de semana tenían la concentración más baja (véase la figura 6).

Ejemplo 3 - Validación de la celda.

65

Para proteger las comunidades biológicas de los sensores bioelectroquímicos según la presente invención del posible impacto negativo del oxígeno, los autores de la invención ensayaron y validaron la aplicación de una

celda (celda de putrefacción) para la eliminación de oxígeno de una corriente de agua o aguas residuales. El aparato de ensayo para validar la celda de putrefacción se ilustra en la figura 7.

5 El agua o aguas residuales afluentes se recogen en un tanque de retención y se pueden reservar para eliminar el oxígeno o se pueden airear. Este sistema de ensayo se desarrolló para validar que una célula de putrefacción podía funcionar para eliminar el oxígeno de una corriente de agua o aguas residuales aireada antes de que alcanzara la superficie de un sensor bioelectroquímico según la presente descripción.

10 Metodología: Se mezcló agua o agua residual sintética que contenía 825 mg/l de acetato de sodio trihidrato y almohadillas de BOD como condiciones del agua o aguas residuales (según las relaciones de dilución del método de dilución de BOD) como un lote grande en una cubeta de 19 litros (5 galones). El agua o aguas residuales sintéticas se desoxigenaron luego haciendo burbujear nitrógeno a través de ellas hasta que el oxígeno disuelto medido estaba por debajo de 1,5 mg/l. El experimento se dividió en 4 fases para determinar el impacto de la celda de putrefacción.

15 Fase 1: La muestra, después de haber sido desoxigenada, se envió directamente desde la cubeta al sensor bioelectroquímico. (La celda de putrefacción se lavó con chorro con 1 litro de agua antes de conectarla al sensor).

20 Fase 2: La muestra, después de haber sido desoxigenada, se envió a través de la celda de putrefacción antes del sensor bioelectroquímico.

Fase 3: La muestra, ahora aireada continuamente, se envió a través de la celda de putrefacción.

25 Fase 4: Finalmente, el sistema se apagó, aún con el contenido de la sonda en agitación pero sin que entrara medio nuevo en la célula.

30 Resultados: Fase 1: El agua o aguas residuales anaeróbicas se enviaron directamente al sensor bioelectroquímico y no a través de la celda de putrefacción.

35 Fase 2: Tras permanecer en este estado durante más de 2 horas, el sistema se reconfiguró y la celda de putrefacción se puso en línea antes del sensor bioelectroquímico. Se produjo un aumento notable en la señal, sin embargo, a lo largo de las 4 horas en que la célula de putrefacción estuvo conectada, fue evidente un aumento medible en la señal, como se ilustra en la Fig. 8. Parece que la propia celda de putrefacción contribuye a la señal y genera sustrato adicional para que lo consuma la biología del sensor bioelectroquímico.

40 Fase 3: La configuración del sistema no se modificó, pero se aireó la cubeta con el agua o aguas residuales sintéticas. Esto no parece tener un impacto material en la señal y sugiere que la aireación de una muestra (al menos con una BOD significativa) no es motivo de preocupación para afectar a la medición. Se ha demostrado que la celda de putrefacción limita cualquier impacto negativo de la presencia de oxígeno en el tanque de retención del afluente inicial.

45 Fase 4: Finalmente, la bomba se apagó mientras se mantenía la agitación y la señal disminuyó moderadamente (50 uA) a las mismas condiciones que cuando se proporcionó una muestra que fluía sin pasar por la celda de putrefacción.

Ejemplo 4 - Inoculación de comunidades microbianas bioelectroquímicas tolerantes aerobias.

50 El desarrollo de comunidades microbianas anódicas que sean tolerantes al oxígeno pero que sigan usando la superficie del electrodo para la respiración va en contra del consenso científico actual sobre cómo se cree que funcionan específicamente las celdas de electrólisis microbiana.

55 El siguiente procedimiento para inocular una biopelícula microbiana exoelectrógena en un entorno microaeróbico o aeróbico ha permitido a los autores de la invención seleccionar comunidades microbianas que conservan una funcionalidad única. La capacidad de las comunidades bacterianas de respirar en la superficie de un electrodo de un sensor bioelectroquímico (específicamente de una celda de electrólisis microbiana) mientras están en presencia de agua o aguas residuales oxigenadas.

60 El procedimiento no implica ningún aspecto de burbujeo de corrientes de agua o aguas residuales para excluir el oxígeno del procedimiento de inoculación. Las muestras de semillas de agua o aguas residuales originales se recogen generalmente de zonas aireadas de una planta de tratamiento de agua o aguas residuales. Durante la inoculación celular, no hay burbujeo de agua o aguas residuales de alimentación o de inóculo de semillas. Además, no se requiere un sellado hermético en las celdas de inoculación del sensor.

65 1. Se recoge una muestra de semilla. De un sensor bioelectroquímico que ya está en funcionamiento según la presente descripción (preferido). Alternativamente, de una fuente de agua, aguas residuales o ambiental.

2. Se mezcla la alimentación líquida según la Tabla 1 en una concentración preferida (la recomendación es de 25 x 1 L). Se midieron las masas requeridas en un recipiente de 1 L y se llenó el recipiente hasta la marca de 1 L y se mezcló bien para así introducir oxígeno.

3. A un recipiente de mezcla de alimentación (vaso medidor) se añadió lo siguiente: 40 ml de 25x solución de alimentación por litro; la semilla; si se parte de reactores anteriores, se usó una dilución de 1 en 5 para obtener tiempos de arranque óptimos. (200 ml/1 litro); y se completa con el volumen deseado de agua.

4. Se llenaron todos los recipientes de inoculación con el agua de alimentación sembrada, asegurándose de dejar espacio para el desplazamiento cuando se añade el sensor. Se mezcló bien para así introducir oxígeno.

5. Se vigiló la actividad biológica de las celdas durante 48 horas. En ese momento, las celdas se vaciaron y se volvieron a alimentar con agua de alimentación sembrada oxigenada.

6. El ciclo de alimentación del procedimiento de inoculación se continuó durante un período de 14 días, momento en el que la biopelícula microbiana exoelectrógena se consideró adecuada para la instalación.

Tabla 1:

Componente	Concentración diluida (mg/l)	25 x masa (mg) 1 litro
NaHCO <sub>3</sub>	525	13.125
Hidrolizado de caseína	525	13.125
Extracto de carne	350	8750
Urea	90	2250
NaCl	21	525
CaCl <sub>2</sub>	10,1	252,5
mgSO <sub>4</sub> · 7 H <sub>2</sub> O	7	175
Acetato de sodio	250	6250

Tabla 1 Receta adaptada para agua o aguas residuales sintéticas (Peel y Nyberg 1989) usada como inoculación y alimentación para las celdas de inoculación SENTRY con la adición de acetato de sodio y la preparación de una solución madre de 25x 1 litro.

#### Ejemplo 5 - Ejemplo de funcionamiento

Los sensores bioelectroquímicos según la presente invención se instalaron en tres lugares de conexión diferentes de una planta de agua (comparativa) o de aguas residuales (invención) el 10 de octubre de 2018: uno situado en un clarificador primario de la planta de agua o aguas residuales, otro situado justo antes de los reactores biológicos de nutrientes de la planta de agua o aguas residuales y otro situado en un efluente de la planta de agua o aguas residuales.

Ubicación en la instalación del clarificador primario: El sensor bioelectroquímico se instaló en un clarificador primario de puente móvil, que giraba aproximadamente una vez por hora. Se conectó al puente móvil mediante una tubería de PVC y detectaba la variación de la concentración del agua o aguas residuales.

Antes de los reactores de eliminación biológica de nutrientes: los sensores bioelectroquímicos se instalaron justo antes de entrar en los reactores de eliminación biológica de nutrientes.

Ubicación del sensor del efluente: El sensor bioelectroquímico se instaló en el efluente de los biorreactores.

Información relevante obtenida: El sensor se correlacionó bien con TCOD/fCOD/TBOD<sub>5</sub>, con r<sup>2</sup> que variaba de 0,49-0,82; cuando se combinaron los datos, r<sup>2</sup> aumentó adicionalmente.

Las Figs. 9, 10 y 11 ilustran los resultados de medición de las muestras de afluentes y efluentes. El sensor identificó los días de la semana con la mayor concentración orgánica en el afluente (miércoles-viernes) y una hora del día (después de las 5 p. m.). La concentración orgánica más baja en el afluente se producía el lunes (así como el fin de semana), con la actividad más baja alrededor del mediodía.

Durante este tiempo se produjeron cuatro sucesos importantes en la instalación, cuya causa principal de alteración fueron las lluvias en la región y el material adicional aportado al sistema.

## 5 Ejemplo 6 - Ejemplo de funcionamiento

El sistema SENTRY se instaló en una planta de tratamiento de agua. Los sensores descritos en el presente documento se usaron para vigilar la actividad biológica del agua en dos lugares clave de la instalación. La instalación usa los sensores para ayudar a indicar la actividad biológica anormal y los constituyentes anormales del agua que entran en sus instalaciones (toma de agua bruta) y salen del procedimiento de tratamiento del agua, contactor de carbón activado granular (GACC). El agua bruta entrante, que se extrae de una fuente lacustre a la planta de tratamiento, se considera aeróbica con una concentración de oxígeno disuelto en el intervalo de 0,1 a 5,0 mg/l. El lago forma parte de la cuenca hidrográfica local y se ve afectado por las lluvias, escorrentía, variaciones estacionales y descargas puntuales y no puntuales de la región, incluidas las instalaciones de tratamiento de agua o aguas residuales aguas arriba.

Ubicación en la instalación: El sensor 1 se instaló en la toma de agua bruta de la planta. El sensor 2 se instaló en el efluente del reactor de contactores de carbón activado granular (GACC).

Resultados: Los sensores mostraron un alto nivel de respuesta a las fluctuaciones en la calidad del agua tanto en la toma de agua bruta como en el efluente de los contactores de carbón activado granular. Se estableció un sistema de alerta basado en la web para indicar y enviar correos electrónicos a los operadores de la planta durante fluctuaciones grandes fuera de un intervalo controlado específico. Esto permite al personal de operaciones tomar muestras adicionales durante los sucesos de desequilibrio para seguir rastreando el cambio en las condiciones. Se rastrearon cinco sucesos de alerta durante el período de tiempo de ensayo. Los sensores pudieron captar los sucesos de derivación de agua o aguas residuales de la planta de tratamiento de agua o aguas residuales aguas arriba, mostrando picos anormales en ambas ubicaciones de los sensores.

Se extrajeron correlaciones iniciales con los compuestos orgánicos ensayados por la OCWA (TOC/COD/DOC). Las correlaciones eran más fuertes con TOC ( $R^2$  de 0,68-0,79) y DOC ( $R^2$  de 0,89), que muestran el valor del sensor como una estimación en tiempo real del carbono biológicamente disponible en el sistema.

La información que proporciona la sonda SENTRY es única, ya que proporciona datos tanto sobre la concentración orgánica relativa como sobre la respuesta biológica a sucesos conocidos y desconocidos. Generalmente, se proporcionaría un sensor independiente, caro y complicado para las estimaciones de la BOD, y no hay ninguna sonda disponible para recibir actualizaciones instantáneas sobre los desajustes de los procesos biológicos (los kits de ensayo de ATP son un ejemplo de una tecnología que es una foto instantánea de la salud biológica, pero son sucesos únicos y su ejecución es cara por suceso).

En la descripción precedente, con fines explicativos, se exponen numerosos detalles con el fin de proporcionar una comprensión completa de los ejemplos. Sin embargo, será evidente para un experto en la técnica que estos detalles específicos no son necesarios. Por consiguiente, lo que se ha descrito es meramente ilustrativo de la aplicación de los ejemplos descritos y son posibles numerosas modificaciones y variaciones a la luz de las enseñanzas anteriores.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Un sensor bioelectroquímico para vigilar la actividad metabólica de una población de bacterias exoelectrógenas en respuesta a uno o más agentes en aguas residuales oxigenadas en un sistema de tratamiento de aguas residuales, comprendiendo el sensor:
- 10 al menos un par de electrodos que comprende un ánodo y un cátodo, el ánodo en comunicación eléctrica con las bacterias exoelectrógenas para recibir electrones de las mismas, en donde las bacterias exoelectrógenas se forman en una biopelícula multicapa sobre el ánodo, teniendo dicha biopelícula un espesor de aproximadamente 0,2 mm a aproximadamente 5,0 mm, y en donde las bacterias exoelectrógenas comprenden una o más de *Geobacter sulfurreducens*, *Geobacter metalorreducens*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Shewanella putrefaciens*;
- 15 un sensor de corriente para medir el flujo de electrones entre el ánodo y el cátodo y producir una salida eléctrica que se correlaciona con la actividad metabólica de las bacterias exoelectrógenas; y
- una fuente de alimentación en comunicación eléctrica con el par de electrodos para suministrar una tensión a través del par de electrodos.
- 20 2. El sensor bioelectroquímico de la reivindicación 1, en donde el uno o más agentes son: 1) oxígeno; 2) materia orgánica tal como un compuesto de carbono orgánico; un agente de limpieza, que comprende, por ejemplo, hipoclorito de sodio, ácido peracético, ácido cítrico o una combinación de los mismos; o 3) cualquier combinación de los mismos.
- 25 3. El sensor bioelectroquímico de las reivindicaciones 1 o 2, en donde las aguas residuales oxigenadas son: 1) una corriente de aguas residuales afluente, y en donde el sensor bioelectroquímico se puede colocar dentro de la corriente de aguas residuales afluente; 2) una corriente de aguas residuales efluente, y en donde el sensor bioelectroquímico se puede colocar dentro de la corriente de aguas residuales efluente; o 3) una combinación de los mismos.
- 30 4. Un sistema para vigilar uno o más agentes en aguas residuales oxigenadas en un sistema de tratamiento de aguas residuales, comprendiendo el sistema:
- 35 un sensor bioelectroquímico para vigilar la actividad metabólica de una población de bacterias exoelectrógenas y proporcionar una salida eléctrica que se corresponde con la actividad metabólica, comprendiendo el sensor bioelectroquímico: un par de electrodos que comprende un ánodo y un cátodo; en donde las bacterias exoelectrógenas se forman en una biopelícula multicapa sobre el ánodo, teniendo dicha biopelícula un espesor de aproximadamente 0,2 mm a aproximadamente 5,0 mm, y en donde las bacterias exoelectrógenas comprenden una o más de *Geobacter sulfurreducens*, *Geobacter metalorreducens*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Shewanella putrefaciens*;
- 40 una fuente de alimentación para suministrar una tensión a través del par de electrodos; y
- 45 un analizador de salida eléctrica para analizar la salida eléctrica y correlacionar la salida eléctrica con uno o más agentes del sistema de tratamiento de aguas residuales.
5. Un sistema para controlar el suministro de uno o más agentes en aguas residuales oxigenadas en un sistema de tratamiento de aguas residuales, comprendiendo el sistema:
- 50 un sensor bioelectroquímico para vigilar la actividad metabólica de una población de bacterias exoelectrógenas y proporcionar una salida eléctrica que se corresponde con la actividad metabólica, comprendiendo el sensor bioelectroquímico: un par de electrodos que comprende un ánodo y un cátodo; en donde las bacterias exoelectrógenas se forman en una biopelícula multicapa sobre el ánodo, teniendo dicha biopelícula un espesor de aproximadamente 0,2 mm a aproximadamente 5,0 mm, y en donde las bacterias exoelectrógenas comprenden una o más de *Geobacter sulfurreducens*, *Geobacter metalorreducens*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Shewanella putrefaciens*;
- 55 una fuente de alimentación para suministrar una tensión a través del par de electrodos;
- 60 un analizador de la salida eléctrica para analizar la salida eléctrica y proporcionar una señal a un controlador; y
- una bomba acoplada operativamente al controlador para controlar el suministro de uno o más agentes en respuesta a la señal.
- 65 6. El sistema de la reivindicación 5, en donde el sistema comprende además un calentador acoplado

operativamente al controlador para controlar la cantidad de energía térmica suministrada a las aguas residuales oxigenadas en respuesta a la señal.

- 5 7. El sistema de una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6, en donde el uno o más agentes son: 1) oxígeno; 2) materia orgánica tal como un compuesto de carbono orgánico; un agente de limpieza, que comprende, por ejemplo, hipoclorito de sodio, ácido peracético, ácido cítrico o una combinación de los mismos; o 3) cualquier combinación de los mismos.
- 10 8. El sistema de una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 7, en donde las aguas residuales oxigenadas son: 1) una corriente de aguas residuales afluente, y en donde el sensor bioelectroquímico se puede colocar dentro de la corriente de aguas residuales afluente; 2) una corriente de aguas residuales efluente, y en donde el sensor bioelectroquímico se puede colocar dentro de la corriente de aguas residuales efluente; o 3) una combinación de los mismos.
- 15 9. Un método para vigilar uno o más agentes en aguas residuales oxigenadas en un sistema de tratamiento de aguas residuales, comprendiendo el método:
- 20 aplicar energía a un sensor bioelectroquímico según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3 o definido en el sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 8;
- medir una salida eléctrica del sensor bioelectroquímico y correlacionar la salida con la actividad metabólica de las bacterias exoelectrógenas presentes en el sistema; y
- 25 correlacionar la salida eléctrica con uno o más agentes del sistema de tratamiento de aguas residuales.
10. Un método para controlar el suministro de uno o más agentes en las aguas residuales oxigenadas en un sistema de tratamiento de aguas residuales, comprendiendo el método:
- 30 aplicar energía a un sensor bioelectroquímico según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3 o definido en el sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 8;
- medir una salida eléctrica del sensor bioelectroquímico y correlacionar la salida con la actividad metabólica de las bacterias exoelectrógenas presentes en el sistema
- 35 suministrar el uno o más agentes en el sistema;
- vigilar un cambio en la salida eléctrica en respuesta al uno o más agentes; y
- 40 ajustar el suministro del uno o más agentes en respuesta a un cambio en la salida eléctrica.
11. El método de la reivindicación 10, en donde el método comprende además ajustar un calentador para controlar la cantidad de suministro de energía térmica a las aguas residuales oxigenadas en respuesta a un cambio en la salida eléctrica más allá de un umbral.
- 45 12. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, en donde las aguas residuales oxigenadas son: 1) una corriente de aguas residuales afluente; 2) una corriente de aguas residuales efluente; o 3) una combinación de las mismas.
- 50 13. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en donde el uno o más agentes son: 1) materia orgánica; 2) materia orgánica tal como un compuesto de carbono orgánico; un agente de limpieza, que comprende, por ejemplo, hipoclorito de sodio, ácido peracético, ácido cítrico o una combinación de los mismos; o 3) cualquier combinación de los mismos.

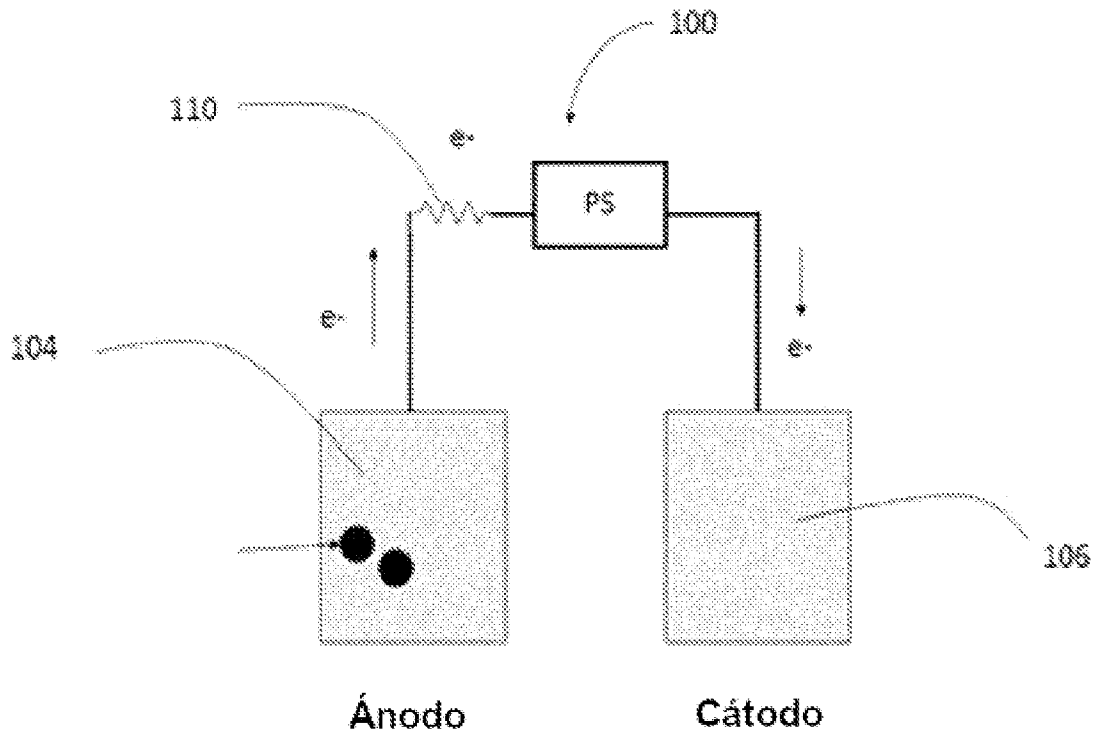


Figura 1

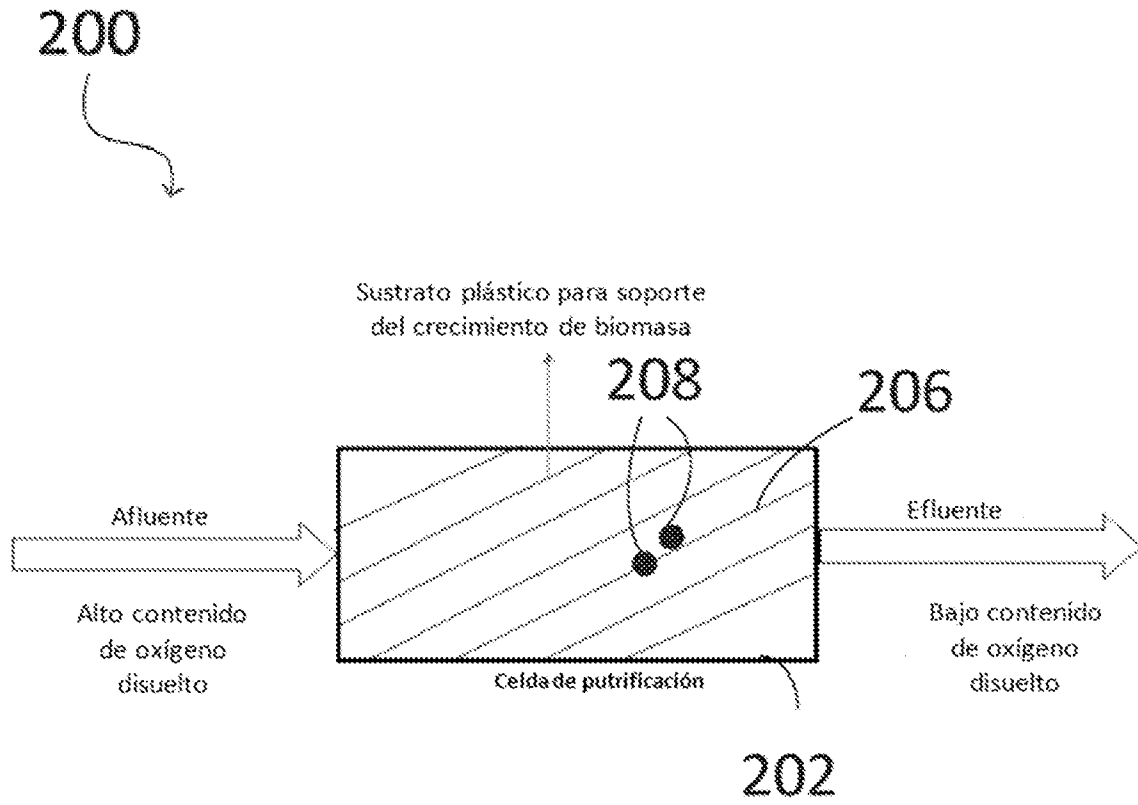


Figura 2



Figura 3A

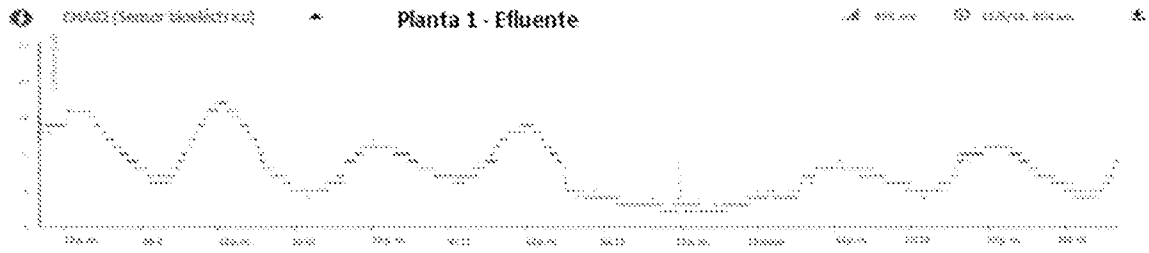


Figura 3B

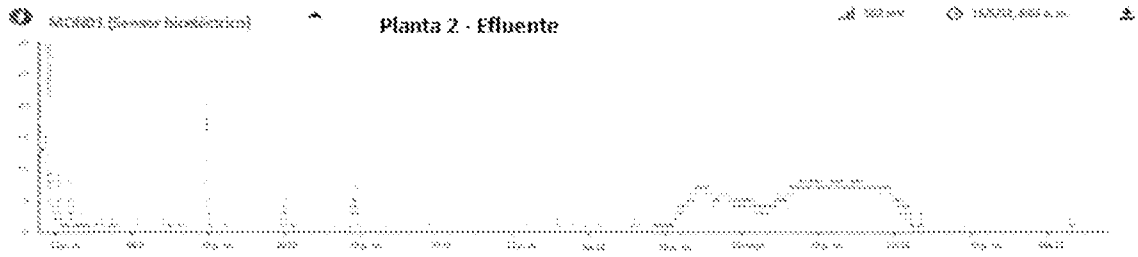


Figura 4A

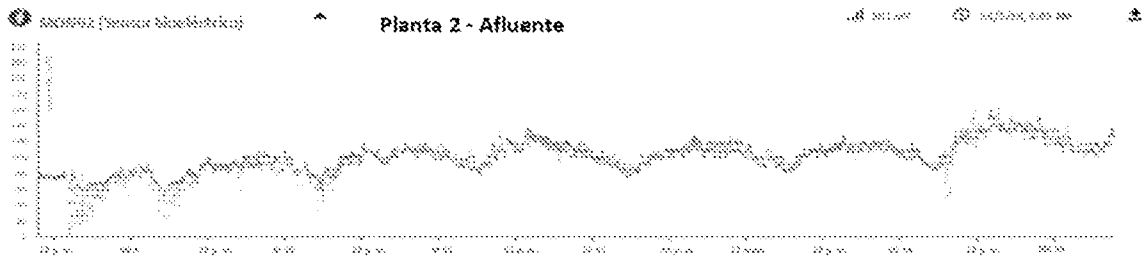


Figura 4B

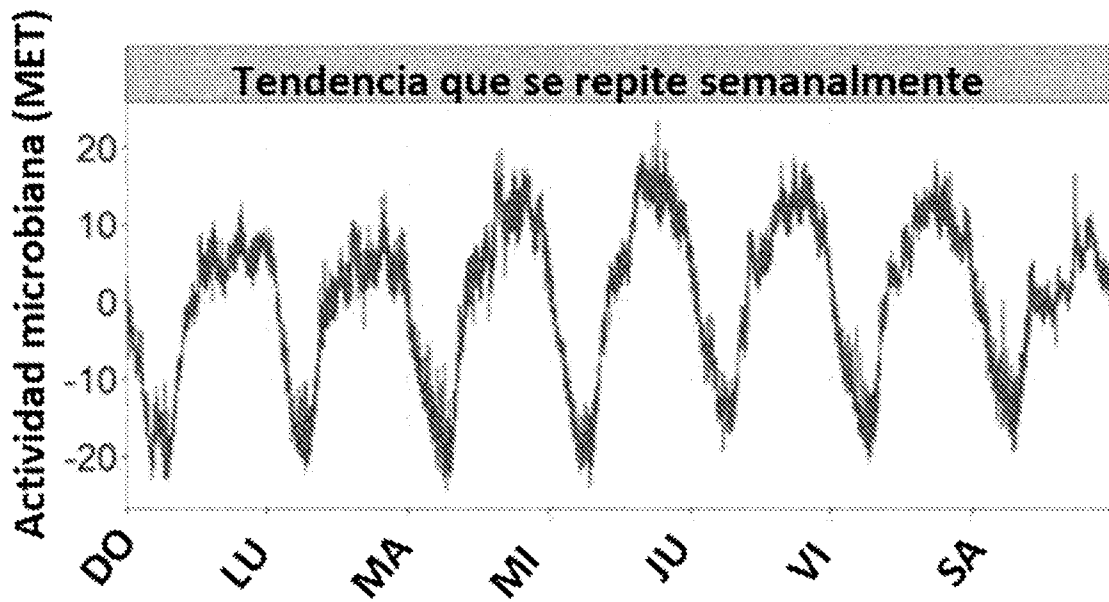


Figura 5

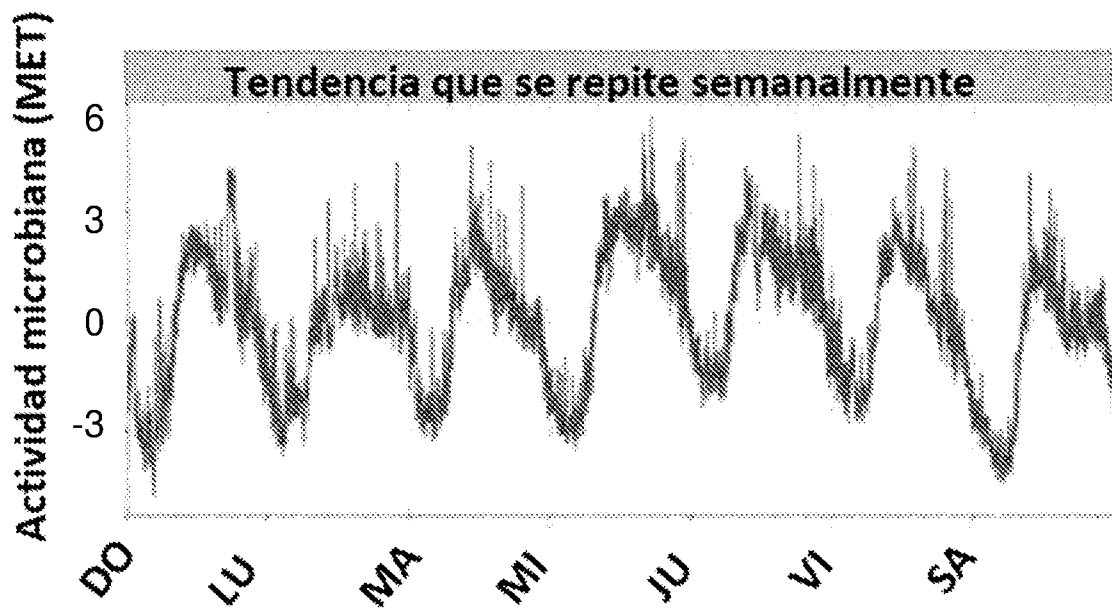


Figura 6

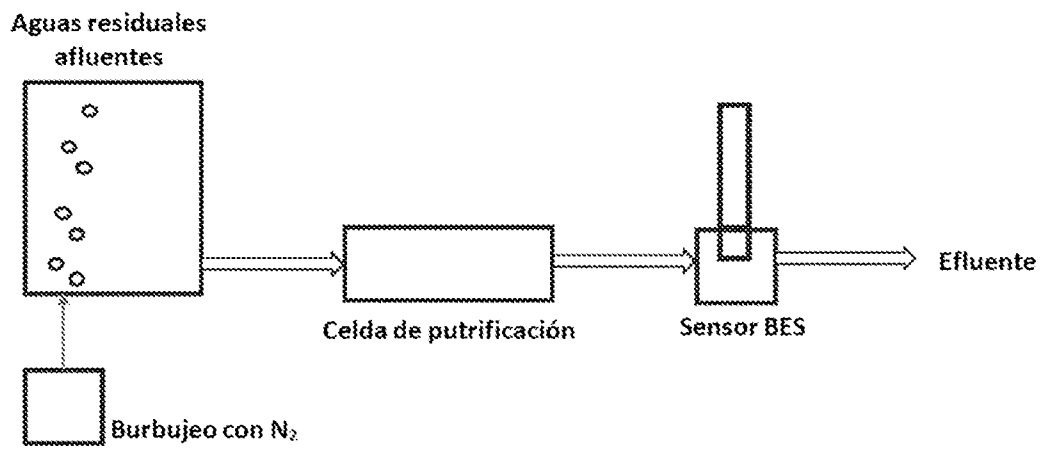


Figura 7

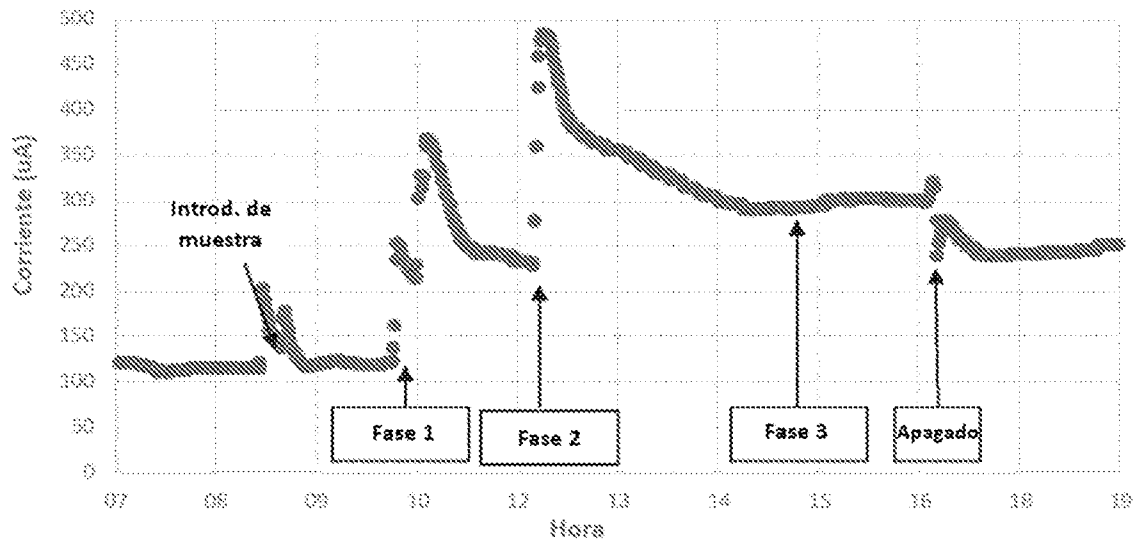


Figura 8

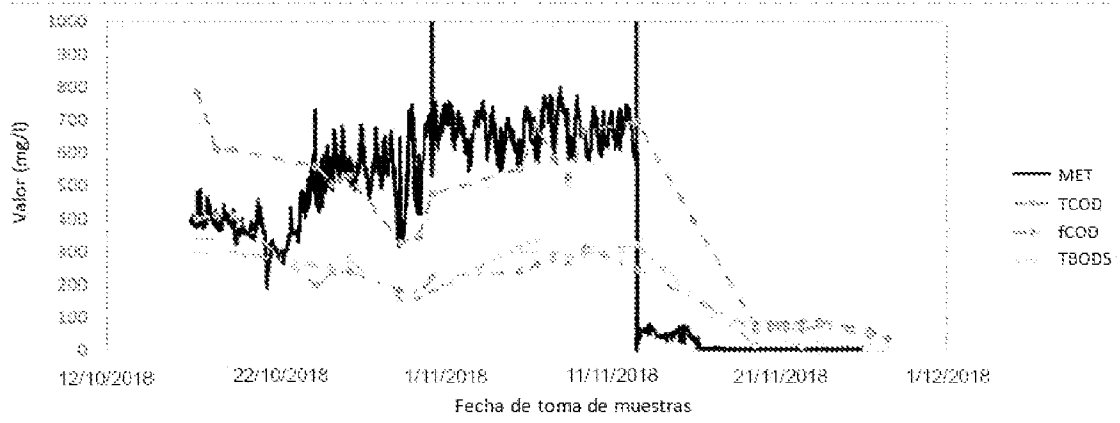


Figura 9

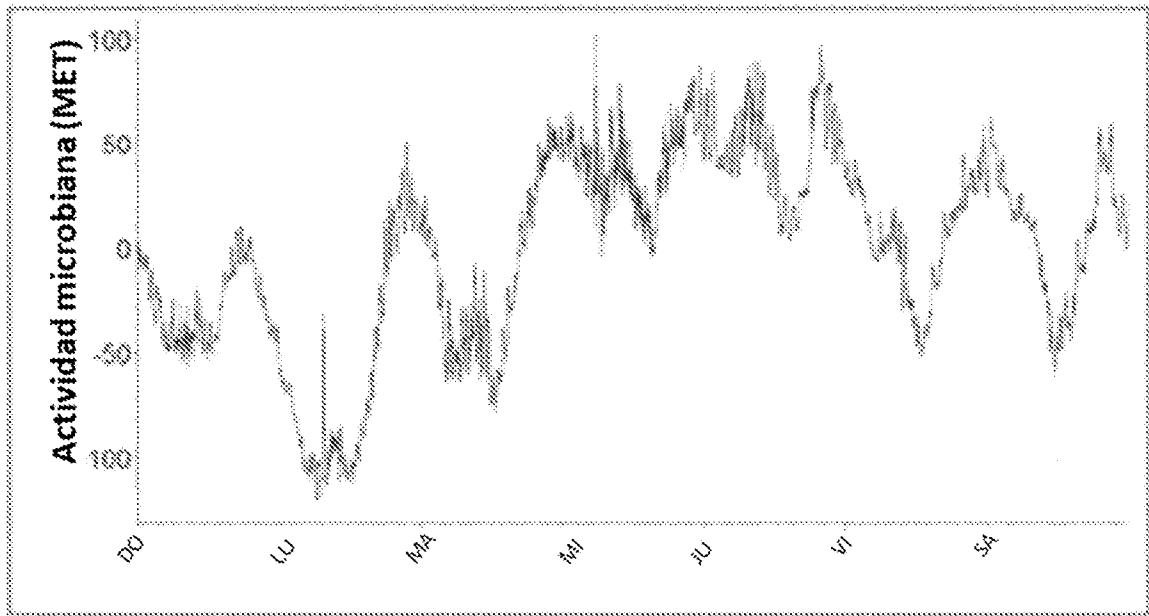


Figura 10

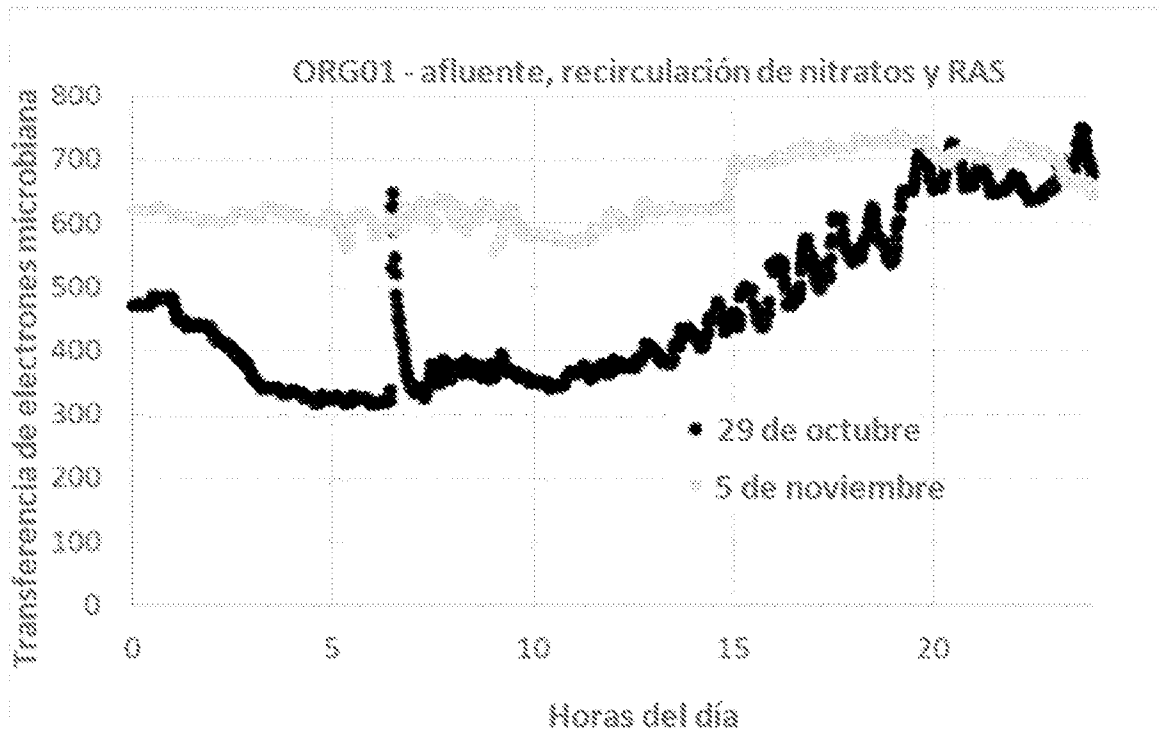


Figura 11