

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 811 334**

51 Int. Cl.:

C02F 3/00 (2006.01)

C02F 3/30 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.12.2016** **E 16382613 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.05.2020** **EP 3336065**

54 Título: **Un proceso y un sistema para controlar automáticamente un proceso de nitrificación-desnitrificación utilizando el potencial redox**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.03.2021

73 Titular/es:

SUEZ GROUPE (100.0%)
Tour CB21, 16 place de l'Iris
92040 Paris la Défense Cedex, FR

72 Inventor/es:

MANZANO RAMIREZ, JOSEP;
POCH PALOU, MAURICI;
ROUGÉ, PHILIPPE y
POCH ESPALLARGAS, MANUEL

74 Agente/Representante:

SUGRAÑES MOLINÉ, Pedro

ES 2 811 334 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

Un proceso y un sistema para controlar automáticamente un proceso de nitrificación-desnitrificación utilizando el potencial redox

5

Campo técnico de la invención

La presente invención se refiere a un proceso y un sistema para controlar automáticamente un proceso de tratamiento de agua en una matriz de agua, especialmente adaptado para activar y desactivar secuencialmente medios de control de aireación con el fin de promover al menos la eliminación de materia orgánica y las fases de nitrificación y desnitrificación, respectivamente, en el agua.

10

Antecedentes de la invención

15 La necesidad de eliminar carbono, nitrógeno y fósforo en las aguas residuales es esencial para alcanzar el nivel de calidad de agua suficiente para los usos definidos en las Directivas o Reglamentos modernos.

20 La aireación, el tiempo de retención del lodo y la adición de fuentes externas de carbono se han identificado como parámetros de control efectivos para la optimización en línea de la eliminación biológica de nitrógeno de los sistemas de lodos activados. En lodos activados de baja carga, el control de los periodos de aireación, basado en la regulación del suministro de aire, es un factor clave para mejorar la eliminación biológica de nitrógeno.

25 Sin embargo, muchas pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales, EDAR, <40.000 equivalentes de población, no tienen implementados procedimientos de control de aireación, mostrando altas tasas de consumo de energía, mayores que o iguales a 0,6 kWh/m³; o presentan procedimientos básicos de control, encendido/apagado, que no permiten operar el tratamiento biológico de manera eficiente.

30 Esta invención tiene como objetivo mejorar la eliminación biológica de nitrógeno utilizando un control sencillo, de bajo coste y fácil de operar basado en la regulación del suministro de aire.

Varias investigaciones han estudiado el uso potencial de la medición del potencial de reducción de la oxidación, ORP, para controlar la aireación y, específicamente, para alternar fases óxicas y anóxicas en la masa de agua bajo tratamiento.

35 Durante la fase óxica, la inyección de oxígeno como aire u oxígeno puro promueve la oxidación de carbono a dióxido de carbono, CO₂, e iones amonio, NH₄⁺, a nitrato, NO₃⁻, mediante bacterias específicas. Los iones amonio se transforman primero en nitrito, NO₂⁻, mediante bacterias oxidantes de amoníaco, AOB, entonces los nitritos se convierten en nitrato mediante bacterias oxidantes de nitrito, NOB. Esta fase promueve la nitrificación.

40 Durante la fase anóxica, se detiene la aireación del reactor. El nitrato se reduce después a nitrito, y el nitrito se reduce sucesivamente a gas nitrógeno no contaminante, N₂, que se elimina en la atmósfera. Esta fase promueve la desnitrificación.

45 La extensión de la fase anóxica conduce a la fase anaeróbica, permitiendo la eliminación de fósforo o desfosfatación.

Algunos autores describieron métodos basados en el uso de valores absolutos de ORP.

50 En este sentido, el documento de patente ES 2361209 describe cómo, cuando se somete la masa de agua a condiciones anóxicas, cuando se alcanza un nivel bajo fijo de ORP, la aireación se enciende hasta alcanzar un valor de referencia en oxígeno disuelto, DO.

En otras propuestas, Heduit, 1989; Charpentier *et al.*, 1989, cuando se alcanza un nivel bajo fijo, la aireación se enciende y se detiene cuando se obtiene un nivel alto fijo.

55 Un inconveniente de tales propuestas es que debido a problemas operativos como el desgaste de los electrodos, deriva de las señales, y así sucesivamente, los valores de referencia alto y bajo deben ajustarse continuamente, lo que hace que el sistema no sea fiable. Esta invención también tiene como objetivo superar este inconveniente.

60 Adicionalmente, los procesos basados en el uso de este tipo de valores de referencia no son flexibles en respuesta a las variaciones de flujo y especialmente a las variaciones de calidad en el afluente. Es otro objetivo de la invención un proceso más versátil, que pueda garantizar tanto oxígeno disuelto suficiente para lograr la nitrificación como una fase anóxica para lograr la desnitrificación en sintonía con las variaciones en el afluente.

65 También se conocen tecnologías que utilizan cambios relativos de ORP con el tiempo. Parecen dar un mejor control, pero se utilizan principalmente para establecer y corregir tiempos anóxicos de aireación predefinidos.

Un ejemplo es la solución descrita en el documento EP 0703194 de acuerdo con la cual se monitoriza el ORP y, durante la fase de aireación, si el valor de ORP excede rápidamente un valor de referencia absoluto, se supone que el medio biológico está completamente oxidado y requiere poco oxígeno. Por lo tanto, no es necesario realizar la aireación durante mucho tiempo y el tiempo de funcionamiento de los medios de aireación se limita a un tiempo específico. Durante una fase de no aireación, si el ORP alcanza rápidamente un valor absoluto mínimo o "suelo", entonces los medios de aireación se vuelven a poner en funcionamiento automáticamente.

En el documento EP 0703194, el ORP se mide continuamente y se calcula la primera derivada del mismo. Cuando la derivada tiende a cero, la derivada y el valor del potencial de oxidación-reducción se correlacionan para determinar si la aireación se debe iniciar, continuar o detener. El proceso de acuerdo con el documento EP 0703194, por lo tanto, utiliza valores de referencia absolutos de ORP, que deben revisarse con los cambios de flujo y calidad en el afluente. Adicionalmente, el valor de ORP puede variar en el tiempo, en sensores sometidos a deriva, y entre instalaciones, lo que dificulta la implementación de esta estrategia con garantías.

Se han presentado otras propuestas recientes que utilizan cambios relativos de ORP con el tiempo.

El documento de patente EP 3028998 describe un método que comprende someter cíclicamente una masa de agua a fases de aireación y no aireación, pero preferentemente para promover la nitrificación y desnitrificación sobre nitrito, lo que permite suprimir la producción de N₂O que constituye una contribución importante a la producción de gases de efecto invernadero.

Este método implica suprimir la segunda etapa de la nitrificación, la conversión de nitritos en nitratos, y el amoníaco se convierte así en nitrito, pero no en nitrato. Además, el método está destinado a aplicarse en un reactor discontinuo secuencial (SBR) y, por lo tanto, no sería adecuado para reactores convencionales de tanque agitado continuo o reactores de flujo pistón continuo, y se requiere un efluente parcialmente nitrificado, con una relación de amonio a nitrato 50:50. De hecho, se determina el contenido de iones amonio del efluente a tratar y se detiene el suministro de efluente cuando dicho contenido de iones amonio es mayor que un valor umbral.

El método de acuerdo con el documento EP 3028998 comprende monitorear los valores de DO y ORP dentro del reactor y calcular la primera derivada de DO, dDO/dt , y la segunda derivada de ORP, d^2ORP/dt^2 , para desactivar y activar respectivamente los medios de aireación cuando alcanzan el primer y segundo valores umbral de referencia. De acuerdo con el documento EP 3028998, el uso de señales derivadas permite que el sistema sea relativamente insensible a la posible deriva de los valores absolutos de DO y ORP debido a la calibración predeterminada.

Sin embargo, este procedimiento solo puede aplicarse en reactores SBR o similares, que operan en modo discontinuo, porque requiere realizar etapas de suministro y extracción. Un objetivo de la invención es realizar nitrificación-desnitrificación sobre nitrito, no nitrato, limitar el crecimiento de bacterias oxidantes de nitrito (NOB) debido a los efectos simultáneos de la inhibición de amonio, privación de sustrato y temperatura. Estos tres parámetros no se pueden controlar en las EDAR a gran escala, por lo que la implementación del método propuesto no es realista.

Adicionalmente, de acuerdo con el documento EP 3028998, el primer valor umbral se determina realizando pruebas preliminares, o calculando el primer umbral óptimo para tener rendimientos óptimos de nitrificación y emisiones mínimas de N₂O basándose, en particular, en las características del reactor y del efluente a tratar. Por tanto, se deben utilizar primeros valores umbral diferentes para diferentes efluentes. Igualmente, el segundo valor umbral también se determina realizando pruebas preliminares, o calculando el segundo umbral óptimo para tener rendimientos óptimos de desnitrificación y emisiones mínimas de N₂O basándose, en particular, en las características del reactor y del efluente a tratar. De nuevo, se deben usar segundos valores umbral diferentes para diferentes efluentes.

Se descartan otras propuestas que combinan mediciones de pH con ORP porque el final de la nitrificación se identifica por una baja variación de pH en los reactores y esto requiere de mediciones de alta resolución y el ruido y la resolución del sensor de pH no permiten lograr estas condiciones no bien controladas. Además, en algunos casos se requieren más de tres sensores de pH; no siendo posible lograr la oxidación parcial de amonio.

En "PH and oxidation-reduction potential control strategy for optimization of nitrogen removal in an alternating aerobic-anoxic system", Research Journal of the Water Pollution Control Federation, Alexandria, VA, EE.UU., vol. 73, n.º 1, 1 de enero de 2001, páginas 95-102, XP001043713, ISSN: 1047-7624 se utiliza un enfoque similar al del preámbulo de la reivindicación 1 para detectar un punto de inflexión de nitrato que desencadena el final de la fase de nitrificación, es decir, la activación de los medios de aireación.

Descripción de la invención

El proceso de la invención, como se describe en la reivindicación 1, está destinado a controlar automáticamente un proceso de tratamiento de agua, específicamente cuando el agua comprende carbono y nitrógeno, por ejemplo en forma de amonio. El proceso de tratamiento de agua comprende someter el agua a ciclos de trabajo sucesivos, cada uno de los cuales comprende al menos una fase de nitrificación u óxica (oxidación de carbono y amonio) y una fase de desnitrificación o anóxica (reducción de nitrato).

Es característico del proceso de la invención que además comprende, en un ciclo de trabajo, activar los medios de aireación provocando la eliminación aeróbica de carbono y la nitrificación del agua durante la fase de nitrificación u óxica; desactivar los medios de aireación provocando la desnitrificación anóxica del agua durante la fase de desnitrificación o anóxica; medir dinámicamente al menos un potencial redox (ORP) del agua; y calcular el valor de una segunda derivada $d^2\text{ORP}/dt^2$ del ORP desde el principio y durante la fase de desnitrificación, es decir, con los medios de aireación desactivados.

En el proceso de la invención, los medios de aireación se activan para finalizar la fase de desnitrificación del ciclo de trabajo y comenzar una fase de nitrificación adicional de un ciclo de trabajo siguiente solo una vez que la $d^2\text{ORP}/dt^2$ del ORP alcance al menos un tercer valor cero durante dicha fase de desnitrificación.

Este proceso permite llevar a cabo un control anóxico al identificar un Punto de Inflexión de Nitrato (NKP) indicativo de que se logra una conversión total de nitrato a nitrógeno gaseoso (N_2). Para detectar el NKP, se detectan y evalúan los puntos de inflexión redox (IP), pero se selecciona un tercer IP como NKP.

Por lo tanto, es necesario medir dinámicamente el potencial redox (ORP) durante un ciclo, lo que significa medir su valor en intervalos continuos o estrechos para detectar sus tendencias instantáneas. Cuanto más estrechos sean dichos intervalos, mayor puede ser la precisión del orden que desencadenará el comienzo de la fase aeróbica del siguiente ciclo de trabajo.

La invención aprovecha un comportamiento observado del ORP durante un ciclo completo de nitrificación-desnitrificación en las EDAR a gran escala, no en plantas a escala piloto, alimentadas con aguas residuales domésticas. Este comportamiento reveló un perfil típico con tres IP durante la fase de desnitrificación, el tercero relacionado con la desaparición de nitratos.

Por lo tanto, la invención está completamente libre de tener que especificar valores absolutos y también de la deriva ORP, ya que solo es importante la forma de las curvas.

De acuerdo con la invención, los medios de aireación se activan para finalizar la fase de desnitrificación de un ciclo de trabajo y comenzar una fase de nitrificación de un ciclo de trabajo siguiente solo una vez que la $d^2\text{ORP}/dt^2$ del ORP alcanza al menos un tercer valor cero durante dicha fase de desnitrificación. Por lo tanto, la invención prevé que los medios de aireación se activen en el instante en que la $d^2\text{ORP}/dt^2$ del ORP alcanza al menos dicho tercer valor cero o en un instante posterior.

En este sentido, es particularmente ventajoso tener en cuenta los eventos anteriores para ajustar aún más la duración de la fase anóxica de un ciclo de trabajo. En concreto, una vez que se detecta el NKP, se aplica un tiempo adicional de apagado T antes de activar los medios de aireación para comenzar la fase de nitrificación del siguiente ciclo.

De este modo, en el proceso de acuerdo con la presente invención, el proceso comprende la determinación del carbono residual y el amonio en el agua inmediatamente después de que los medios de aireación se desactiven, midiendo dinámicamente el oxígeno disuelto (DO) en el agua. Al menos en un ciclo de trabajo, el valor de la primera derivada $d\text{DO}/dt$ del oxígeno disuelto (DO) se calcula durante la fase de desnitrificación inmediatamente después de que se desactiven los medios de aireación; y una vez que $d^2\text{ORP}/dt^2$ alcanza al menos el tercer valor cero, los medios de aireación no se activan para comenzar la fase de nitrificación del siguiente ciclo de trabajo antes de que haya transcurrido un periodo T , siendo este periodo T función del valor del valor de la primera derivada del DO calculado al comienzo de la fase de desnitrificación del mismo ciclo de trabajo.

Por lo tanto, la estimación de la velocidad de consumo de oxígeno al comienzo de una fase de desnitrificación se usa para decidir si es ventajoso prolongar las condiciones anóxicas más allá del instante en que se detecta el NKP.

Prolongar dichas condiciones anóxicas puede conducir, por ejemplo, a una eliminación de fósforo de las aguas residuales; y a un proceso aún más eficiente en términos de consumo de energía.

Como se explicará en lo sucesivo en el presente documento, un valor anterior de $d\text{DO}/dt$ establecido puede usarse como un valor de referencia para decidir si se aplicará un periodo adicional T o no.

En una realización de la invención, si la $d\text{DO}/dt$ está por debajo de este valor de referencia, se aplica "tiempo adicional de apagado" y una vez que se agota este "tiempo adicional de apagado" se activa la aireación.

El momento en que los medios de aireación se desactivan para comenzar la fase de desnitrificación de un ciclo de trabajo también es importante. Al estar dirigido el proceso a plantas tipo EDAR, muchas de las cuales no están equipadas con sensores de N-NH_4 y N-NO_3 , en una realización, la medida del potencial redox (ORP) se usa para definir los tiempos óxico y anóxico, es decir, la duración de las fases de nitrificación y desnitrificación.

En este caso, se aplica lógica booleana simple a la primera derivada redox $d\text{ORP}/dt$ y a la segunda derivada redox

d2ORP/dt2 para definir la fase de nitrificación u óxica, activando los medios de aireación, y la fase de desnitrificación o anóxica, desactivando los medios de aireación. Esto requiere una configuración muy simple de la unidad de control de encendido/apagado, como se explicará más adelante.

- 5 Esta realización supera algunos inconvenientes asociados a las propuestas que usan el valor DO, que puede conducir a un exceso de aireación y, por lo tanto, a un consumo innecesario de energía; y brinda la oportunidad de controlar el proceso en modos de nitrificación parcial.

10 De acuerdo con otro aspecto de la invención, un sistema para controlar automáticamente un proceso de tratamiento en una matriz de agua comprende una primera sonda para medir dinámicamente el potencial redox, ORP, en el agua; una unidad de control programable en comunicación con la sonda, en donde la unidad de control recibe datos de la primera sonda que representa la medición del potencial redox; y medios aireadores en comunicación con la unidad de control.

15 En su esencia, este sistema se caracteriza por que la unidad de control tiene medios procesadores capaces de filtrar los datos recibidos de la primera sonda; calcular el valor de la segunda derivada de los datos filtrados; realizar una comparación booleana del valor de dicha segunda derivada con un valor de referencia predeterminado; y contar las veces que el valor de esta segunda derivada es igual al valor de referencia predeterminado; y, al estar los medios de aireación desactivados, la unidad de control está configurada para no volver a activar los medios de aireación antes
20 de que el valor de la segunda derivada sea al menos tres veces el valor de referencia predeterminado.

En una realización, los medios procesadores pueden calcular el valor de la primera derivada dORP/dt de los datos filtrados asociados a la primera sonda; y realizar una comparación booleana del valor de dicha primera derivada con un segundo valor de referencia predeterminado; y, al estar los medios de aireación activados, la unidad de control está
25 configurada para desactivar los medios de aireación cuando el valor de la primera derivada asociado a la primera sonda es igual o tiende a cero.

La invención también concibe que el sistema está provisto de una segunda sonda para medir dinámicamente el oxígeno disuelto (DO) en el agua; y que los medios procesadores pueden filtrar los datos recibidos de esta segunda
30 sonda y calcular el valor de la primera derivada de los datos filtrados asociados a esta segunda sonda. Adicionalmente, al estar los medios de aireación desactivados, la unidad de control está configurada para no volver a activar los medios de aireación hasta que haya transcurrido un periodo adicional T una vez que el valor de la segunda derivada sea al menos tres veces superior al valor de referencia predeterminado, en donde este periodo adicional T es una función del valor de la primera derivada de los datos filtrados asociados a la segunda sonda.

35

Breve descripción de los dibujos

- La Fig. 1, ilustra esquemáticamente un reactor de flujo pistón continuo (CPFR) para mostrar una ubicación preferida para los sensores de DO y ORP;
40 la Fig. 2, muestra la variación redox durante un ciclo de trabajo completo que comprende fases aeróbica, anóxica y anaeróbica;
la Fig. 3, muestra un día completo de operación (24 h) de una planta que pone en práctica el proceso de acuerdo con la invención;
la Fig. 4, muestra una evaluación a largo plazo (9 días) del mismo proceso; y
45 la Fig. 5, muestra la variación de nitrógeno (N) en el afluente y el efluente en una comparación entre un control de ENCENDIDO/APAGADO convencional y el proceso de la invención.

Descripción detallada de la invención

50 La Fig. 2, muestra la variación del ORP durante un ciclo de trabajo completo que comprende fases óxica, anóxica y anaeróbica. El gráfico de la Fig. 2 se ha obtenido practicando el proceso de la invención en una planta comercial cuyos detalles se presentarán más adelante.

Las fases óxica, anóxica y anaeróbica mencionadas posibilitaron realizar la eliminación de carbono, nitrificación, desnitrificación y eliminación de fósforo, respectivamente, en el mismo tanque reactor de la planta comercial, que se muestra esquemáticamente en la Fig. 1.

En concreto, dicho tanque reactor estaba provisto de un sensor de DO y un sensor de ORP. Ambos sensores se colocaron en la cuenca óxica pero podrían estar dispuestos alternativamente después de los difusores. Cuanto más
60 lejos estén los sensores de los difusores/región aireada, mayor será el retraso en su respuesta, lo cual no es recomendable.

La ubicación correcta de los sensores de DO y ORP permite una buena gestión de los sistemas de aireación y mezcla, minimizando el retraso y el tiempo de respuesta, y permitiendo el correcto funcionamiento del proceso biológico.

65

Naturalmente, la Fig. 1 sirve solo como ejemplo. La invención prevé realizar el proceso también en otro tipo de

reactores, tales como en un reactor de tanque agitado continuo (CSTR). En este caso particular, la ubicación preferida para los sensores sería también la cámara óxica, evitando instalarlos sobre los difusores para minimizar el ruido del sensor.

- 5 El tanque del reactor también estaba provisto de medios de aireación y de una unidad de control programable en comunicación con los sensores de DO y ORP y con los medios de aireación.

Los parámetros controlados, DO y ORP, fueron monitoreados y recogidos en línea cada 10 segundos. Adicionalmente, ambos parámetros fueron sometidos a filtrado de datos aplicando un filtro de primer orden con el objetivo de: en el caso de DO, eliminar parcialmente el ruido y mantener un bajo retraso; y en el caso de ORP, eliminar completamente el ruido.

La aplicación de un filtro en las señales analógicas proporcionadas por los sensores es una técnica conocida. Este filtrado es necesario para la estabilización de la medición y la reducción del ruido.

15 En una realización, este filtro, basado en la transformada de Fourier, procesa matemáticamente la señal hasta que se obtiene una señal estable y uniforme tanto en el tiempo como en la amplitud de la medición.

20 Como se explicará, el uso del sensor ORP permitió controlar los ciclos de oxidación-reducción al cambiar las condiciones del tanque del reactor de óxica a anóxica. Durante la fase óxica, los medios de aireación se activan permitiendo procesos de eliminación de carbono y nitrificación y, durante la fase anóxica, se desactivan los mismos medios de aireación que conducen a un proceso de desnitrificación.

25 En concreto, el final de la fase óxica se controló mediante la medición indirecta de la tasa de oxidación (oxidación de carbono y amonio) por medio de $dORP/dt$, y en particular mediante la detección de cuándo $dORP/dt$ tendía a cero.

En la realización ejemplar de la Fig. 2, se definió un valor de punto de ajuste $dORP/dt$ en 1,5 mV/min. Este valor indica una presencia residual de formas reducidas (carbono y amonio) y su conversión total práctica a compuestos oxidados. En este punto, los medios de aireación se desactivaron, lo que condujo a condiciones anóxicas.

30 En otros casos, el valor del punto de ajuste para $dORP/dt$ puede ser "cero" (0), como un indicador de que la oxidación se alcanza por completo. Sin embargo, en el caso presentado en la Fig. 2 esto no se requería.

La invención prevé seleccionar un valor de punto de ajuste entre 0 y 2 mV/min.

35 El control de oxígeno durante la fase óxica es interesante porque un control óptimo permite mantener una concentración estable de DO en la cámara óxica. Además, también se requiere para la determinación indirecta de la proporción de formas reducidas (carbono y amonio) frente a formas oxidadas (nitrato). Por este motivo, un control basado en lógica difusa, conocido en la técnica, se utilizó precisamente para mantener los niveles deseados de DO.

40 Básicamente, este control utilizó los datos de DO recopilados por el sensor de DO y estaba basado en un mecanismo de retroalimentación convencional.

45 La diferencia entre la concentración de DO y el DO definido por el operador como "NORMAL" se utilizó para medir un desplazamiento; y este desplazamiento de DO se combinó con la tendencia de DO (por medio de la primera derivada de DO) y al usar una combinación de reglas de lógica difusa se generó una instrucción definida para los medios de aireación con el objetivo de lograr un DO definido como "NORMAL".

50 Los medios de aireación se pueden accionar fácilmente, modificando su frecuencia de trabajo o encendiendo/apagando individualmente sus sopladores, si este es el caso, por ejemplo, en configuraciones 1+1 o 2+1.

Inmediatamente después de desactivar los medios de aireación, durante un periodo de transición de condiciones óxica a anóxica, el oxígeno disminuyó a 0 ppm (o casi residual). Durante este periodo, se midió dDO/dt (es decir, el "consumo de oxígeno") permitiendo la determinación indirecta del carbono residual y el amonio. En el caso presentado en la Figura 2, la dDO/dt medida fue de 0,105 mg/minl.

60 Es interesante establecer un valor absoluto de O_2 para determinar el valor final para medir la dDO/dt porque el oxígeno residual aún podría permanecer o porque podría producirse una compensación de DO. Como ejemplo, este valor absoluto se puede establecer a aproximadamente 0,15 mg/l.

Como muestra la Fig. 2, la desnitrificación (fase anóxica) se determinó bien utilizando un perfil que muestra tres puntos de inflexión (IP). Estos IP se identificaron utilizando la segunda derivada de ORP, d^2ORP/dt^2 . En concreto, el tercer IP corresponde al final de la desnitrificación, siendo total el consumo de N-NO₃. Este tercer punto IP es el punto NKP.

65 Aunque el valor exacto no es un factor clave para la realización de la invención, en el caso ilustrado en la Fig. 2, se detectó el tercer IP (y, por lo tanto, el NKP) a ORP -26 mV. Precisamente porque este valor específico podría cambiar

debido a la deriva del sensor, la cinética o en función de los valores iniciales de N-NO₃, la identificación del tercer IP (mediante el cálculo de $d2ORP/dt^2$) se utiliza para identificar el consumo total de N-NO₃.

5 En el ejemplo de la Fig. 2, los medios de aireación se activaron nuevamente para comenzar la fase óxica (nitrificación) del siguiente ciclo de trabajo una vez que se detectó el NKP y después de un periodo adicional T de "tiempo adicional de apagado", cuya longitud depende del consumo medido de dDO/dt o DO previo. En este caso, los operarios definieron un "punto de ajuste" dDO/dt máximo de 0,14 mg/l·min para aplicar este "tiempo adicional de apagado", de modo que si la dDO/dt medida fuera inferior a 0,14 mg/l·min, de se debía aplicar un periodo T de "tiempo adicional de apagado", que conduce a condiciones anaeróbicas y a la eliminación de fósforo de las aguas residuales. Una vez que se agotó este "tiempo adicional de apagado", se tuvo que encender la aireación.

Se podrían seleccionar otros valores posibles para el "punto de ajuste", pero preferentemente en el intervalo de 0,10 mg/l·min a 0,30 mg/l·min.

15 En el caso ilustrado en la Fig. 2, se aplicó un periodo T de 60 minutos después de la desnitrificación o después del NKP, permitiendo la eliminación biológica de fósforo.

Se podrían seleccionar otros valores posibles para el periodo adicional T, preferentemente en el intervalo de 20 min a 90 min.

20 La invención contempla el uso de otros enfoques, como, por ejemplo, los basados en regresiones lineales o no lineales, como una alternativa al uso de valores de dDO/dt tabulados previamente y sus periodos correspondientes de "tiempo adicional de apagado" T, basándose en datos empíricos o experiencia adquirida.

25 La eliminación de fósforo de las aguas residuales implica la incorporación de fosfato en TSS y la posterior eliminación de esos sólidos. El "tiempo adicional de apagado" permitió condiciones anaeróbicas (en donde el nitrato y el oxígeno están ausentes) antes de la aireación (encender la aireación). En estas condiciones, un grupo de bacterias heterotróficas, llamados organismos acumuladores de polifosfatos (PAO) se enriquecen selectivamente en la comunidad bacteriana dentro del lodo activado. La aplicación del "tiempo adicional de apagado" después de la detección de NKP permitió la eliminación biológica de fósforo en lugar de la precipitación química (más común) y el consiguiente ahorro de OPEX en la dosificación reactiva.

30 En resumen, la duración de los ciclos óxico, anóxico y anaeróbico se identifican en la Fig. 2, estando estos delimitados por 41, 47 y 60 minutos, respectivamente, permiten la aplicación de "tiempo adicional de apagado" no solo para la eliminación de fósforo sino también para contribuir al ahorro de energía.

35 Una evaluación de 24 horas, de la cual se extrajo el ciclo detallado que se muestra en la Fig. 2, se presenta en la Fig. 3. Dicha Fig. 3 muestra que la oxidación (eliminación de carbono y amonio) y la desnitrificación se logra sistemáticamente durante un día completo sin acumulación mediante el uso de la primera derivada ($dORP/dt$) y la segunda derivada de ORP ($d2ORP/dt^2$) para desactivar y activar, respectivamente, los medios de aireación.

40 En el caso reportado en la Fig. 3, la desactivación de los medios de aireación, controlada por $dORP/dt$ para apagarse especialmente cuando el valor de $dORP/dt$ estaba por debajo de 1,5 mV/min, está indicada por el punto b) en uno de los ciclos de trabajo.

45 Como se ha comentado anteriormente, una vez que los medios de aireación se desactivaron o apagaron, se midió dDO/dt (Fig. 3, punto b), es decir, se midió la velocidad de consumo de oxígeno.

50 La desnitrificación completa, asociada con una eliminación completa de N-NO₃, que fue controlado por $dORP^2/dt^2$ y específicamente identificando el NKP, se indica con el punto c) en el mismo ciclo de trabajo.

Por último, el comienzo del siguiente ciclo de trabajo, una vez transcurrido el periodo T después de la detección del NKP, está indicado por el punto d).

55 El proceso permitió una buena eliminación de contaminantes carbonosos y N-NH₄ y N-NO₃, siendo en este caso el efluente promedio de 24 horas de 0,9 mg/l y 0,6 mg/l, respectivamente. Adicionalmente, se demostró que la aplicación prolongada de "tiempo adicional de apagado" permitió mejorar el cultivo de PAO y la eliminación biológica de fósforo de 10 mg/l a una concentración por debajo de 5 mg/l (expresada como P-PO₄).

60 Como se ha avanzado anteriormente, los datos de las Figs. 2 y 3 se obtuvieron realizando de forma práctica el proceso de la invención en una EDAR comercial, en concreto la EDAR Corvera, situada en la región de Murcia (España), siendo la capacidad de diseño de la planta 14.285P.E.

65 Esta EDAR está basada en un tratamiento primario básico (cámara de rejilla y eliminación de arena y grasa) seguido de un tratamiento secundario diseñado para eliminar sólidos suspendidos, carbono y nutrientes (nitrógeno y fósforo).

5 El tratamiento secundario está basado en un sistema de dos carruseles en paralelo con un volumen unitario de 1,755 m³ (solo uno por operación). Una cuenca de carrusel tiene la forma de una pista de carreras y tiene un tabique central longitudinal. Mientras las aguas residuales circulan por el canal, los microorganismos descomponen los compuestos orgánicos, nitrógeno y fósforo contenidos en las aguas residuales. En términos prácticos, podría considerarse un CPF. La aireación se suministra a ambas líneas por un colector/tubería de aire común usando dos (2) sopladores de pistón rotatorio con una potencia nominal de 22 kW. Cada reactor está equipado con dos (2) hélices de refuerzo de flujo sumergidas ("mezcladoras") para mantener la velocidad de flujo mínima requerida en los canales con una potencia nominal de 4 kW.

10 El DO y el ORP se midieron usando un sensor de oxígeno disuelto luminiscente (LDO), LXV416.99.20001, y sensor de ORP diferencial, DRD1R5.99 (electrodo de platino ORP, Ryton Housing) respectivamente, ambos son sensores de bajo mantenimiento y están conectados a un controlador SC200, suministrado por HACH.

15 Para la evaluación del proceso de acuerdo con la invención, se usaron tomamuestras automáticos, ya disponibles en la entrada y la salida de la EDAR. Aunque debería haber sido preferentemente su instalación en la entrada y la salida del reactor biológico, estas no son ubicaciones comunes en la EDAR y no permitirían obtener proporciones comparables con otras EDAR. Se llevaron a cabo análisis de laboratorio de cada muestra automática. Los parámetros y la frecuencia de muestreo se muestran en la Tabla 1.

20 **Tabla 1** Seguimiento de la planificación del análisis de parámetros y frecuencia

	Punto de muestreo	
	Entrada	Salida
<i>COD (mg/l)</i>	2 semanas	2 semanas
<i>TN (nitrógeno total)</i>	2 semanas	2 semanas
<i>Amonio (N-NH₄)</i>	2 semanas	2 semanas
<i>Nitrato (N-NO₃)</i>	-	2 semanas

25 La Fig. 4 presenta una evaluación a largo plazo, nueve (9) días, del mismo proceso ya descrito en referencia a las Figs. 2 y 3, mostrando su robustez y estabilidad. Para simplificarlo, solo esta vez: se presentan oxígeno (-), ORP (•) y estado del soplador, encendido/apagado (-).

30 Es interesante observar cómo se adaptó la aireación a lo largo de los diferentes días. Este aspecto podría evaluarse fácilmente contando los ciclos de ENCENDIDO/APAGADO (1/0 respectivamente): siendo del día 1 al 3 de 24 ciclos, del día 4 al 6 de 22 ciclos y del día 7 al 9 de 26 ciclos. Por otra parte, no solo el número de ciclos cambia entre días, sino también la duración de la aireación (ENCENDIDO) entre cada uno (estado del soplador = 1). Se observa un ejemplo en la Fig. 4, sectores A y B, en donde la duración de la aireación (ENCENDIDO) es más corta en A que en B. Este comportamiento se repitió sucesivamente durante los 9 días.

35 La longitud más corta durante la primera mitad del día (A) que durante la segunda mitad (B) se atribuye a una menor carga en A, que apoya la viabilidad de usar la primera derivada de ORP para controlar la fase de oxidación.

La evaluación a largo plazo de la Fig. 4 también muestra la buena respuesta del uso de la segunda derivada de ORP (d2ORP/dt²) para la detección de NKP.

Comparativo

40 Esta sección muestra los resultados para la calidad del agua y el consumo de energía, respectivamente, operando con estrategias de control anteriores (ENCENDIDO/APAGADO), (FLC) sin periodo de "tiempo adicional de apagado" y operando de acuerdo con la invención (FLC con T adicional) con un periodo de "tiempo adicional de apagado".

45 Las estrategias de control anteriores mencionadas consisten en un temporizador de ENCENDIDO/APAGADO o. En concreto, el tiempo constante de ENCENDIDO y APAGADO se define en base a la experiencia que conduce a condiciones óxicas y anóxicas sin considerar los datos en línea.

50 La estrategia de control de ENCENDIDO/APAGADO y la invención permiten llevar a cabo una operación de seguridad, y a pesar de que se pudieron observar picos puntuales de COD, en todos los casos se logró una reducción completa del COD, manteniendo el efluente por debajo de los límites legales. No obstante, la estrategia convencional de control de ENCENDIDO/APAGADO requiere operar con altas concentraciones de oxígeno o con largos periodos de aireación para asegurar que la calidad del efluente esté dentro de los límites legales.

55 En el caso del nitrógeno, en todos los casos fue posible mantener la concentración de efluentes por debajo de los límites legales, sin embargo, el proceso de la invención demostró una mayor robustez que reduce los picos influyentes

y permite mejorar la seguridad del proceso. Este comportamiento se pudo observar, comparando la respuesta del efluente con un pico de afluente desde el día 14 (control ENCENDIDO/APAGADO) y 136 (FLC) como se muestra en la Fig. 5.

5 La Tabla 2 resume los valores promedio para la EDAR Corvera, con respecto a los parámetros presentados a continuación. Se obtuvieron rendimientos de eliminación similares en todos los casos; no obstante, el proceso de la invención permitió mejorar la desnitrificación.

10 Por otra parte, la concentración de efluente medida obtenida para COD, TN y N-NH₄ (compuestos reducidos) y N-NO₃ (compuestos oxidados) confirmó los buenos resultados al operar la planta de acuerdo con la invención.

Tabla 2 Comparación de afluentes y efluentes de la EDAR Corvera que funciona con control antiguo y FLC

	Control de encendido/apagado			FLC			FLC con T adicional		Rendimiento
	ENTRADA	SALIDA	%	ENTRADA	SALIDA	%	ENTRADA	SALIDA	%
<i>Flujo (m³/d)</i>	257,0	-	-	261	-	-	264,0	-	-
<i>COD (mg/l)</i>	790,0	28,3	96 %	753,0	22,0	97 %	746,0	25,0	97 %
<i>TN (nitrógeno total)</i>	91,4	8,5	91 %	84,5	1,9	98 %	82,3	2,7	97 %
<i>N-NH₄</i>	67,4	0,9	99 %	61,2	0,0	100 %	60,4	1,1	98 %
<i>N-NO₃</i>		4,0			0,9	99 %		1,5	98 %

15 La implementación del proceso de la invención también permitió una reducción del consumo específico de energía de aireación (en kWh) y la optimización del sistema con respecto a los límites de descarga como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Comparación de las relaciones de consumo de energía de la EDAR que funciona con ENCENDIDO/APAGADO y FLC (sin y con aplicación de T adicional)

Modo de control	kWh	kWh/kg COODr	kWh/kg TNr
ENCENDIDO/APAGADO	118	0,60	5,54
FLC (ahorro)	82 (30 %)	0,43 (28 %)	3,82 (31 %)
FLC - con T adicional (ahorro)	78 (34 %)	0,41 (32 %)	3,70 (33 %)

20

REIVINDICACIONES

1. Un proceso para controlar automáticamente un proceso de tratamiento de agua, comprendiendo dicha agua nitrógeno y comprendiendo el proceso de tratamiento de agua someter el agua a ciclos de trabajo sucesivos, cada uno de los cuales comprende al menos una fase de oxidación de carbono y nitrificación; y una fase de desnitrificación, comprendiendo el proceso además, en un ciclo de trabajo
- activar los medios de aireación provocando la oxidación aeróbica del carbono y la nitrificación del agua durante la fase de nitrificación,
 - desactivar los medios de aireación provocando la desnitrificación anóxica del agua durante la fase de desnitrificación,
 - medir dinámicamente al menos un potencial redox, ORP, del agua, y calcular el valor de una segunda derivada d^2ORP/dt^2 del ORP desde el principio y durante la fase de desnitrificación, es decir, con los medios de aireación desactivados, en donde los medios de aireación se activan para finalizar la fase de desnitrificación del ciclo de trabajo y comenzar una fase adicional de nitrificación de un ciclo de trabajo siguiente solo una vez que la d^2ORP/dt^2 del ORP alcanza al menos un tercer valor cero durante dicha fase de desnitrificación, estando el proceso **caracterizado por que** comprende además la determinación del carbono residual y el amonio en el agua después de que los medios de aireación se desactivan, midiendo el consumo de oxígeno; y **por que** los medios de aireación para comenzar la fase de nitrificación adicional del siguiente ciclo de trabajo no se activan para comenzar la fase de nitrificación del siguiente ciclo de trabajo antes de que un periodo adicional T de "tiempo adicional de apagado", cuya duración depende del carbono residual y amonio determinados previamente en el agua, haya transcurrido después de que la d^2ORP/dt^2 del ORP alcanza al menos un tercer valor cero durante la fase de desnitrificación, en donde para medir el consumo de oxígeno en un ciclo de trabajo, el valor de la primera derivada dDO/dt del oxígeno disuelto DO se calcula durante la fase de desnitrificación inmediatamente después de que se desactivan los medios de aireación; siendo así el periodo adicional T función del valor de dicho valor de la primera derivada del DO calculado al comienzo de la fase de desnitrificación del mismo ciclo de trabajo.
2. Un proceso de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por que** se establece un valor absoluto de O_2 para determinar el valor final para medir dDO/dt , siendo este valor absoluto de 0,1 mg/l a 0,2 mg/l.
3. Un proceso de acuerdo con la reivindicación 2, **caracterizado por que** el valor absoluto de O_2 es 0,15 mg/l.
4. Un proceso de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por que** se establece un punto de ajuste máximo de dDO/dt para aplicar el periodo adicional T y solo si la dDO/dt medida está por debajo de este punto de ajuste máximo de dDO/dt se aplica el periodo adicional T.
5. Un proceso de acuerdo con la reivindicación 4, **caracterizado por que** el punto de ajuste máximo de dDO/dt se selecciona de 0,10 mg/l·min a 0,30 mg/l·min.
6. Un proceso de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que comprende además
- calcular el valor de una primera derivada de $dORP/dt$ del ORP durante la fase de nitrificación de un ciclo de trabajo, es decir, con los medios de aireación activados; y
 - desactivar los medios de aireación para comenzar la fase de desnitrificación del mismo ciclo de trabajo cuando el valor mencionado de la primera derivada $dORP/dt$ del ORP alcanza o tiende a un valor cero.
7. Un sistema (100) para controlar automáticamente un proceso de tratamiento en una matriz de agua (1) que comprende una primera sonda (2) para medir dinámicamente el potencial redox, ORP, en el agua; una unidad de control programable (4) en comunicación con la primera sonda (2), en donde la unidad de control recibe datos de la primera sonda que representa la medición del potencial redox; y medios aireadores (5) en comunicación con la unidad de control (4), en donde
- la unidad de control (4) tiene medios procesadores adaptados para filtrar los datos recibidos de la primera sonda (2); calcular el valor de la segunda derivada de los datos filtrados; realizar una comparación booleana del valor de dicha segunda derivada con un valor de referencia predeterminado; y contar las veces que el valor de esta segunda derivada es igual al valor de referencia predeterminado; y en donde
 - estando desactivados los medios de aireación (5), la unidad de control (4) está configurada para no volver a activar los medios de aireación (5) antes de que el valor de la segunda derivada sea al menos tres veces un valor de referencia predeterminado que sea cero, estando el sistema **caracterizado por que** comprende además una segunda sonda (3) para medir dinámicamente el oxígeno disuelto, DO, en el agua, en donde
 - los medios procesadores están adaptados para filtrar los datos recibidos de la segunda sonda (3); y para calcular el valor de la primera derivada de los datos filtrados asociados a la segunda sonda (3); y **por que**
 - estando desactivados los medios de aireación (5), la unidad de control (4) está configurada para no volver a activar los medios de aireación (5) hasta que haya transcurrido un periodo adicional T una vez que el valor de la segunda derivada sea al menos tres veces el valor de referencia cero predeterminado, en donde este periodo

adicional T es una función del valor de la primera derivada de los datos filtrados asociados a la segunda sonda (3).

8. El sistema (100) de acuerdo con la reivindicación 7, además **caracterizado por que**

- 5
- los medios procesadores pueden calcular el valor de la primera derivada de los datos filtrados asociados a la primera sonda (2); y realizar una comparación booleana del valor de dicha primera derivada con un segundo valor de referencia predeterminado; y **por que**
 - estando activados los medios de aireación (5), la unidad de control está configurada para desactivar los medios de aireación (5) cuando el valor de la primera derivada asociado a la primera sonda (2) es igual o tiende a cero.
- 10

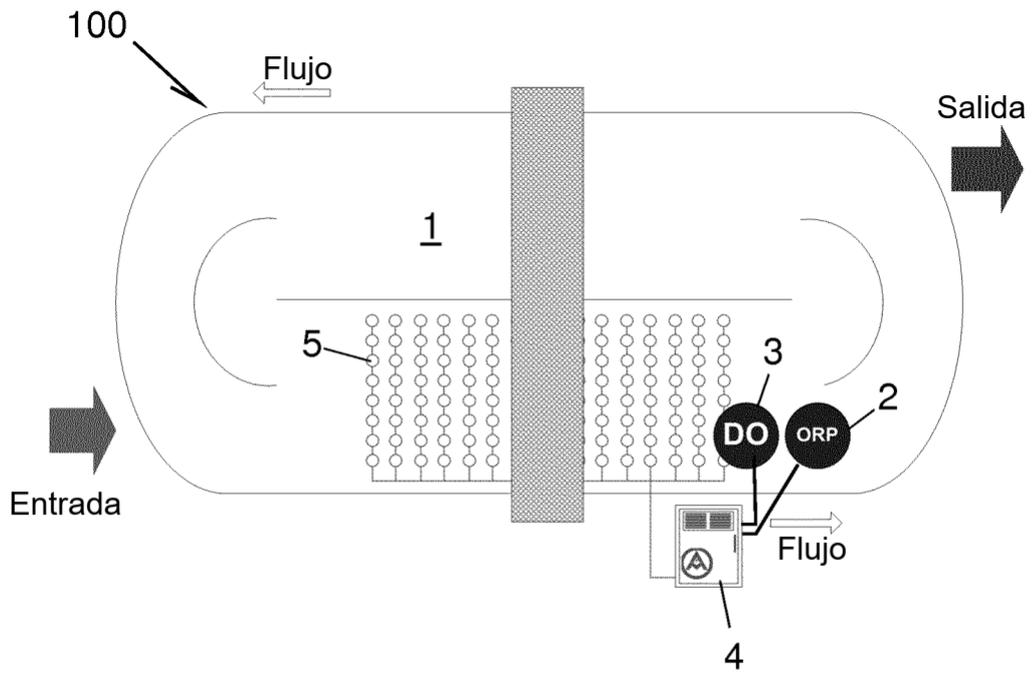


Fig. 1

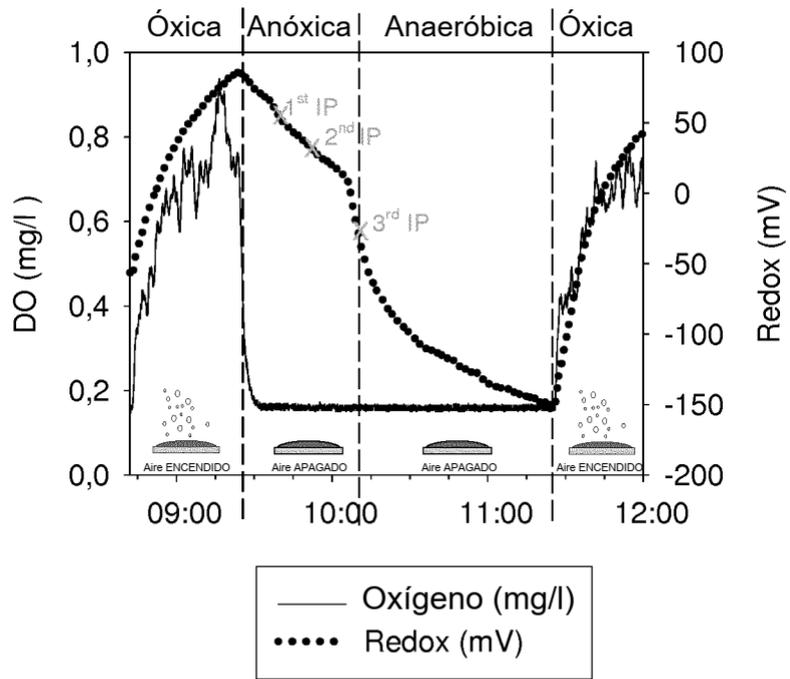


Fig. 2

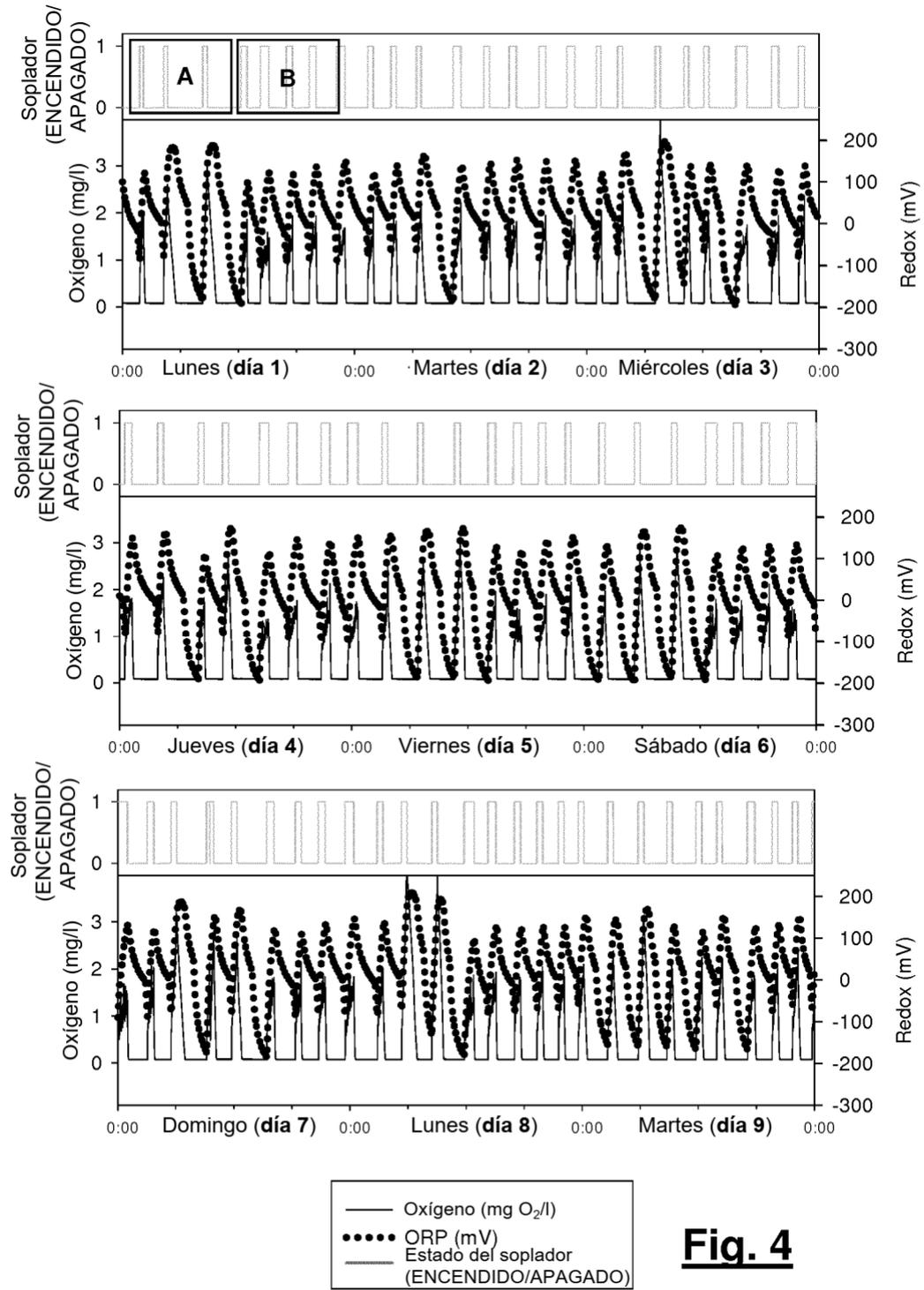


Fig. 4

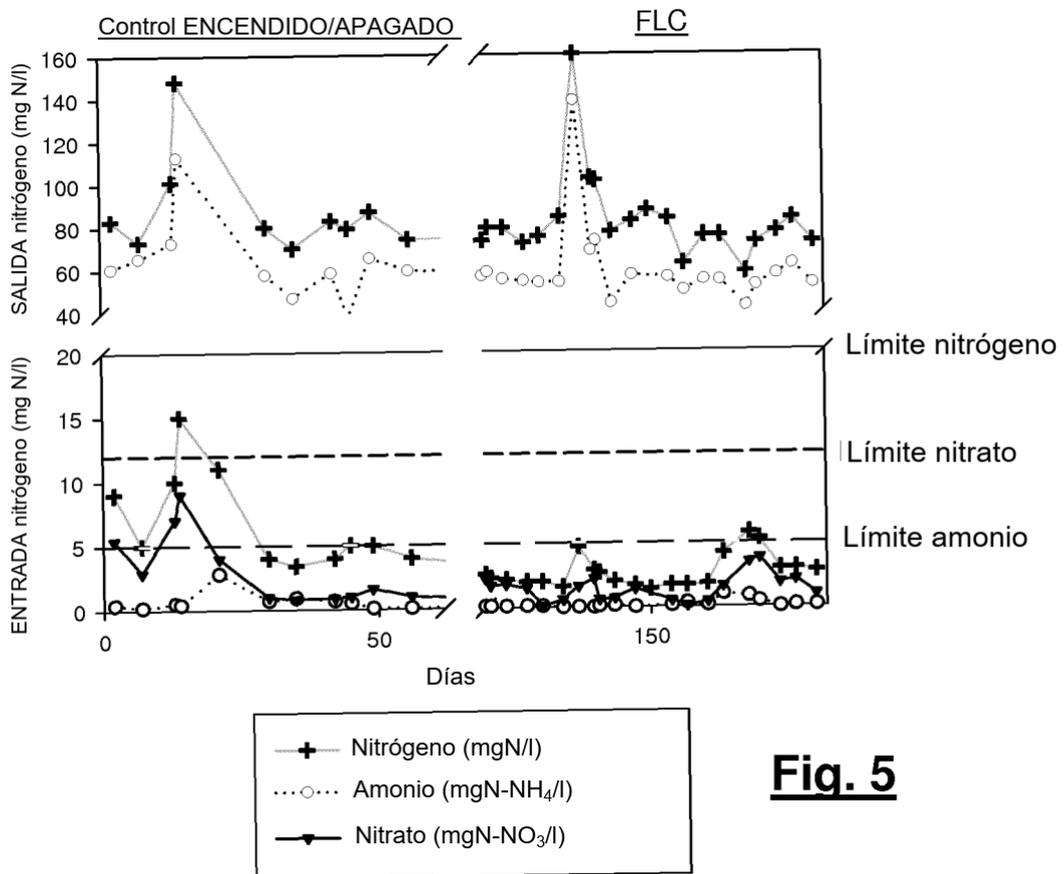


Fig. 5