

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 804 517**

51 Int. Cl.:

C02F 3/00 (2006.01)

C02F 3/28 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.03.2016** **E 16382140 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.05.2020** **EP 3225596**

54 Título: **Procedimiento anaerobio e instalación con proceso de filtración para el tratamiento de aguas residuales a temperatura ambiente**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
08.02.2021

73 Titular/es:

FCC AQUALIA, S.A. (33.3%)
Avenida Camino de Santiago, 40
28050 Madrid, ES;
UNIVERSITAT DE VALÈNCIA, ESTUDI GENERAL
(33.3%) y
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
(33.3%)

72 Inventor/es:

ROGALLA, FRANK;
VÁZQUEZ PADÍN, JOSÉ RAMÓN;
JIMÉNEZ DOUGLAS, EMÉRITA;
SECO TORRECILLAS, AURORA;
BOUZAS BLANCO, ALBERTO;
RIBES BERTOMEU, JOSEP;
RUANO GARCÍA, MARÍA VICTORIA;
FERRER POLO, JOSÉ;
SERRALTA SEVILLA, JOAQUÍN;
ROBLES MARTÍNEZ, ÁNGEL;
GIMÉNEZ GARCÍA, JUAN BAUTISTA y
DURÁN PINZÓN, FREDDY

74 Agente/Representante:

ARIZTI ACHA, Monica

ES 2 804 517 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

Procedimiento anaerobio e instalación con proceso de filtración para el tratamiento de aguas residuales a temperatura ambiente

Campo de la Invención

La presente invención se refiere a un procedimiento según la reivindicación 1 y a una planta de tratamiento de aguas residuales según la reivindicación 13 adjunta para potenciar el tratamiento sostenible de aguas residuales a temperatura ambiente en un proceso anaerobio acoplado a membranas sumergidas de filtración, usando para este fin la adición de un residuo orgánico con elevado grado de biodegradabilidad y modificando los parámetros de operación del proceso de filtración para la optimización energética de la planta.

Técnica anterior de la invención

Las aguas residuales tienen su origen en usos domésticos o urbanos, industriales, agrícolas y aguas procedentes de la lluvia. Para su tratamiento y posterior reutilización se han desarrollado inicialmente procesos exclusivamente aerobios, y en los últimos años han tomado auge los tratamientos anaerobios.

En el estado de la técnica se conocen procedimientos de tratamiento anaerobio, que comprenden la recuperación de gases como metano, hidrógeno, dióxido de carbono, así como una recirculación de parte del biogás al tanque de tratamiento, y una filtración del agua tratada mediante membranas, de modo que los lodos producidos, que incluyen los microorganismos necesarios para el tratamiento anaerobio, se mantienen en la planta el tiempo suficiente para la realización del proceso.

Pero estos procedimientos aún sufren de importantes inconvenientes como:

- bajo rendimiento energético en función del contenido en sulfatos en las aguas residuales influentes, que afecta sensiblemente a la producción de metano al reducir la cantidad de materia orgánica disponible para arqueas,
- el efluente producido, además de presentar sobresaturación en metano, contiene una fracción relevante de este compuesto parcialmente disuelta en función de la temperatura del medio,
- insuficiente rendimiento del proceso de filtración, que incrementa las necesidades de limpieza y mantenimiento de las membranas.
- desconocimiento de estrategias de operación y parámetros óptimos que permitan la operación sostenible de la planta,
- problemas planteados por peligro de acidificación del medio,
- elevado consumo de reactivos químicos empleados para limpiezas periódicas de las membranas que implican costes de operaciones adicionales.

La patente ES2315178 divulga un método para el tratamiento de aguas residuales en un reactor anaerobio y una instalación para llevarlo a cabo. Se ha conseguido con el procedimiento y la instalación descritos en el documento ES2315178 mejorar la eficiencia química y energética, así como la reducción de lodos y la estabilidad del proceso. Sin embargo, teniendo en cuenta la complejidad que conlleva un procedimiento para tratar aguas y la propia instalación que es necesario tener disponible, no hay en dicha patente ninguna indicación de un intervalo de valores para parámetros relevantes en el tratamiento de aguas, ni sugerencia que conduzca al experto a la elección de unos valores u otros. Por ejemplo, no hay en ella ninguna indicación acerca de las cantidades de sólidos que se pueden tener en el reactor o concentración de sólidos en él para un funcionamiento mejorado, o cuál sería el caudal de gas que debe atravesar la membrana para obtener mejores resultados, ni se describe la metodología adecuada para controlar el proceso descrito. Por lo tanto las soluciones al tratamiento de aguas descritas en esta patente aún plantean problemas:

- de rendimiento de las membranas, en particular de filtrabilidad del lodo anaerobio.
- en la producción y recuperación de metano y
- en el control del procedimiento para poder optimizar su eficacia y su viabilidad energética.

La presente invención resuelve los problemas mencionados en esta patente

- mediante el control del biogás recirculado que mejora el rendimiento de las membranas,

- mediante la incorporación de ROB, lo que mejora la producción y recuperación de metano.

Con ambos aspectos se mejora la eficiencia energética del proceso.

5 Se conoce también una solicitud de patente de Veolia Water Solutions & Technologies Support US2013075328 que
 10 notifica un tratamiento anaerobio de una corriente de residuos que tiene componentes biodegradables
 anaeróbicamente y se produce biomasa y biogás. La mezcla se produce en ciertas porciones del reactor anaerobio,
 en particular en las porciones inferior y superior del reactor, de modo que sólidos relativamente pesados se depositan
 15 en la parte inferior y se mezclan con el licor mixto mientras que los sólidos relativamente ligeros o finos flotan a la parte
 superior del reactor donde también se mezclan con el licor mixto. El licor mixto se bombea desde una porción
 intermedia del reactor anaerobio a una unidad de separación de membrana en la que se separa en una corriente de
 permeado y una corriente de rechazo que se concentra en sólidos. Esta patente no aborda específicamente la
 optimización del proceso de filtración con membranas en base a los parámetros operacionales clave y las
 20 características de la corriente de residuos a tratar, lo que compromete la viabilidad energética del proceso. Igualmente,
 se especifica el uso de membranas de tipo *cross-flow*, que requieren la impulsión del licor mixto en un proceso de
 varias etapas de filtración, requiriendo además de un intercambiador de calor para incrementar la temperatura de la
 corriente a tratar. Además no aborda el tratamiento específico de una corriente de aguas residuales.

20 La patente de Zenon US8580113 divulga un procedimiento de utilización interna del biogás generado en un biorreactor
 anaerobio de membranas que trata aguas residuales, con el fin de reducir el ensuciamiento del módulo de filtración
 empleado. En esta invención, el biogás acumulado genera una sobrepresión en el interior del reactor de al menos 10
 Kpa, que se usa para la filtración del efluente final. Esta estrategia no tiene en cuenta ni el intervalo de concentraciones
 de sólidos en el reactor y la cámara de membranas, ni el caudal de recirculación de este licor mixto cuando se trabaja
 25 con una cámara de membranas externa.

La patente de Kubota EP0970922 divulga un procedimiento para procesar residuos orgánicos de alta concentración,
 tales como lodos de tanques sépticos, lodos de residuos de granja y de restos de alimentos. Sin embargo, y al igual
 que en el documento US2013075328, no se aborda un tratamiento específico y sostenible para una corriente en fase
 líquida de aguas residuales como en la presente invención. Tampoco en esta patente se dan sugerencias sobre
 30 condiciones operativas que lleven a los resultados que se consiguen con la presente invención, ni el procedimiento de
 control del sistema de la misma, o la recuperación del metano disuelto en el efluente final.

Otros documentos más recientes relacionados con tratamiento anaerobio de membrana de aguas residuales son por
 ejemplo el documento US2014124439, que simplemente refleja el actual estado de la técnica.

35 En el estado de la técnica se encuentran también algunos estudios sobre codigestión de residuos de alimentos con
 fango de depuradora (Lacovidou, 2012), con otros residuos orgánicos (Nayono, 2009), con purines y otros residuos
 procedentes de ganado (Zhang, 2011).

40 El trabajo desarrollado por Kujawa-Roeleveld *et al.*, (2003) es el único precedente de un tratamiento de una corriente
 de aguas residuales con residuos orgánicos biodegradables, aunque en este caso se describen ensayos de
 codigestión anaerobia en discontinuo, sin una instalación asociada que permita el tratamiento en continuo y la
 optimización del proceso biológico gracias al uso de membranas de filtración.

45 La presente invención resuelve los problemas anteriores gracias al control de la dosificación de residuos orgánicos
 biodegradables en la línea de tratamiento anaerobio, potenciando la valorización energética de la materia orgánica
 contenida en las aguas residuales, y optimización adicional del proceso de filtración a través de la membrana
 gasificada con recirculación parcial del biogás generado para la optimización energética del proceso. Esta estrategia
 50 posibilita el tratamiento de aguas residuales de baja carga como son, por ejemplo, las aguas residuales urbanas, sin
 incremento en la producción de fangos durante el proceso (véanse la figura 1A, figura 1B y figura 1C), debido a que
 los ROB incorporan sólidos de elevada biodegradabilidad que potencian la producción de metano frente a otros
 procesos como la reducción de sulfato. La producción de biogás enriquecido en metano se puede incrementar hasta
 un 200% con respecto al tratamiento anaerobio de las aguas residuales de baja carga, siendo teóricamente posible
 55 aumentar esta cantidad.

La sostenibilidad del proceso de filtración se asegura mediante instrucciones específicas para operar en un rango de
 parámetros sostenibles. El principal parámetro de control es la necesidad de gas recirculado por volumen de permeado
 SGD_p, definido más adelante, ya que considera simultáneamente el caudal de gas empleado para mantener las
 membranas de filtración, la producción de efluente tratado y la velocidad de ensuciamiento de dichas membranas. La
 60 operación en valores minimizados de SGD_p debe hacerse teniendo en cuenta las restricciones de la planta durante su
 operación, controladas por la concentración de sólidos en la cámara de filtración y el rendimiento biológico del proceso
 anaerobio.

Una adaptación del sistema de control referenciado en el procedimiento de la presente invención permite ajustar los

parámetros de manera dinámica en función de la tasa de ensuciamiento de las membranas, minimizando el valor de SGD_p en tiempo real sin necesidad de interrumpir la operación del reactor anaerobio.

El documento WO2013155631 da a conocer un procedimiento y aparato para tratar productos de desecho, tales como aguas residuales industriales o residuos sólidos industriales, que implica digestión anaerobia, y divulga un digestor anaerobio que funciona a temperatura (aproximadamente 38°C si es mesófilo o aproximadamente 55°C si es termófilo), como primera diferencia esencial con la presente invención.

El artículo "The operating cost of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating sulphate-rich urban wastewater, R. Pretel, A. Robles, M.V. Ruano, A. Seco, J. Ferrer; Separation and Purification Technology, 126, 2014, 30-38, se refiere al rendimiento de un sistema de AnMBR alimentado con aguas residuales urbanas ricas en sulfato. El sistema divulgado en el mismo no considera la codigestión de aguas residuales y residuos sólidos orgánicos en un único reactor, por lo tanto la recuperación de energía no puede optimizarse.

Por lo tanto, no se ha divulgado ni sugerido la potenciación del tratamiento a temperatura ambiente de una corriente de aguas residuales, tal como una corriente de aguas residuales urbanas (ARU) en un proceso anaerobio acoplado a membranas mediante el control de la cantidad de residuos orgánicos biodegradables (ROB) dosificados y el control de los parámetros del proceso de filtración, tal como se describe en el presente documento. La sinergia entre los dos procesos descritos en la presente solicitud (tratamiento anaerobio de aguas residuales, preferentemente urbanas/adición de residuos orgánicos biodegradables (ROB) y filtración por membranas), permite aumentar la producción de biogás y su contenido en metano, sin apenas incrementar la producción de biosólidos en el reactor anaerobio (véanse la figura 1A, figura 1B y figura 1C) y con las condiciones energéticas más óptimas, obteniendo un efluente final con un nivel de calidad adecuado para su vertido o reutilización.

Breve descripción de las figuras

Figuras 1A-1C: Evolución de la concentración de sólidos suspendidos (volátiles y no volátiles) en el reactor anaerobio en cada uno de los periodos estudiados. Para cada uno de los periodos estudiados, en la planta se introducía la cantidad establecida de ROB y se determinaba analíticamente la evolución de los sólidos dentro del reactor hasta observar la estabilización de estos. Además de los valores analíticos, en la figura se puede ver el ajuste teórico realizado.

Figura 2: Valor mínimo de SGD_p que viene definido por la concentración de sólidos en la planta. A partir de los valores de sólidos en el reactor, es posible establecer los flujos de permeado y la demanda específica de gas que permiten minimizar el coste de operación de la planta (energía consumida, vida útil de las membranas, coste de reactivos para limpieza química). Dichos parámetros de operación óptimos vienen determinados por la relación mostrada en la figura 2. Esta relación es específica para cada sistema de filtración. Esta relación permite operar la planta en las condiciones más óptimas para cada concentración de sólidos.

Figura 3: Esquema de la planta de tratamiento empleada para el desarrollo experimental descrito en la presente solicitud de patente. La planta se compone de un reactor anaerobio conectado a dos módulos de membranas. El sistema de alimentación se compone de dos tanques de homogeneización (uno para las aguas residuales y otro para los ROB) conectados a una válvula de 3 vías que alterna la entrada de estos tanques a la planta.

Descripción detallada de la invención

Para facilitar la comprensión de la invención, se proporciona un listado relativo a la terminología y siglas utilizadas:

Definiciones usadas en esta memoria descriptiva:

- "residuos sólidos orgánicos", "residuos sólidos biodegradables" y "residuos sólidos" se usan indistintamente.

- "agua filtrada", "permeado", "efluente", "efluente final" y "efluente filtrado" se usan indistintamente.

- "gas de limpieza" y "biogás" se usan indistintamente

- "planta" e "instalación" se usan indistintamente.

- "módulo de filtración", "módulo de membranas" y "membrana" se refieren indistintamente al elemento de filtración

- "velocidad de carga orgánica" y "carga orgánica volumétrica" se usan indistintamente

- AnMBR: reactor anaerobio de membrana.

- SGD_p: demanda específica de gas, ("*specific gas demand*"), es la relación entre el caudal de gas aplicado por metro cuadrado de membrana, y el caudal de agua filtrada por metro cuadrado de membrana.

- SST: sólidos suspendidos totales.

- SSV: sólidos suspendidos volátiles

- SSNV: sólidos suspendidos no volátiles.

- STLM_{ra}: sólidos totales en el licor mixto del reactor anaerobio.

- TRC: tiempo de retención de lodo (días).

- DQO: demanda química de oxígeno.

- ROB: residuos orgánicos biodegradables – pueden ser sólidos o no -

- RC: residuos de cocina.

- RSO: residuos sólidos orgánicos, son un tipo concreto de ROB

- ARU: aguas residuales urbanas.

- VCO: velocidad de carga orgánica.

La presente invención se refiere a un procedimiento para potenciar y controlar el tratamiento de aguas residuales sostenible a temperatura ambiente.

El procedimiento anaerobio con proceso de filtración para el tratamiento de aguas residuales a temperatura ambiente de la invención comprende:

- alimentar de manera continua al menos un reactor anaerobio no calentado con aguas residuales previamente tamizadas y residuo orgánico biodegradable – ROB - previamente tamizado, estando dicho reactor no calentado acoplado a al menos una membrana de filtración gasificada sumergida, con recirculación de biogás desde el reactor

- llevar a cabo la digestión anaerobia en el reactor de la fracción orgánica contenida en la mezcla de aguas residuales y el ROB, obteniendo una mezcla tratada, y

- filtrar la mezcla tratada, en al menos un tanque de filtración a través de la membrana de filtración gasificada sumergida en condiciones tales que la relación entre el caudal de biogás recirculado aplicado por metro cuadrado de membrana y el caudal de aguas residuales filtradas por metro cuadrado de membrana (SGD_p) es el valor mínimo permitido por la concentración de sólidos suspendidos en una planta de tratamiento, obtenido mediante la ecuación $SGD_p = 0,9096 \times MLSS - 1,5407$, en el que la concentración de sólidos total dentro del reactor anaerobio está comprendida entre 1 y 35 g/l.

La relación de gas aplicado, o gas de limpieza, por metro cuadrado de membrana y unidad de tiempo, y las aguas residuales filtradas, es lo que define el parámetro SGD_p, y es el parámetro que controla durante el procedimiento la relación entre el caudal de gas empleado para el mantenimiento de la membrana y la cantidad de agua filtrada a través de la membrana. El parámetro SGD_p debe tener un valor mínimo sostenible, que es el valor mínimo permitido por la concentración de sólidos en la planta. La concentración de sólidos está definida por los sólidos suspendidos de la planta, SST. Según realizaciones particulares, "sostenible" quiere decir, por ejemplo, que si la concentración de los sólidos, SST, es de 9 g/l, el valor mínimo de SGD_p es 6,7 m³ (gas)/m³ (permeado), mientras que para una concentración de sólidos de 25 g/l el valor de SGD_p será de 21,2 m³ (gas)/m³ (permeado) (véase por ejemplo la figura 2).

La forma óptima de operar el módulo de membranas es controlando la relación entre el caudal de biogás recirculado para la limpieza de las membranas y el caudal de permeado obtenido en la filtración, y la tasa de ensuciamiento en cada ciclo operativo de la membrana utilizada.

El valor óptimo de SGD_p es el mínimo valor posible que puede mantenerse constante de forma sostenible durante el procedimiento (la operación de la instalación) (figura 3), establecido en base al valor crítico que se determina experimentalmente para cada configuración de la planta, o instalación, y tipología de membrana (teniendo en cuenta que la presente invención se basa en membranas que precisan de una corriente de gas para su limpieza y mantenimiento). En una realización preferida, el valor óptimo de SGD_p es aquel que permita que la variación de la presión dentro y fuera de la membrana (d(P)/dt) no supere un valor de 0,05 bar·min⁻¹ durante dos ciclos de filtración

consecutivos.

La concentración de sólidos en el licor mixto dentro del reactor anaerobio (STLM_{ra}) está comprendida entre 1 y 35 g/l, preferentemente entre 9 y 25 g/l.

Estos residuos orgánicos biodegradables, ROB, se trituran y tamizan previamente hasta un tamaño de partícula del orden de milímetros, por ejemplo de menos de 2 mm y preferentemente, de tamaño menor a 0,5 mm.

Tanto las aguas residuales como los ROB se introducen en el reactor, o reactores, tras pretratamiento con tamiz (la luz de malla puede ser variable, aunque la preferida es 0,5 mm) impulsados preferentemente ambos con una bomba (por ejemplo helicoidal, centrífuga etc.) dimensionada adecuadamente según características de la instalación, desde un tanque de ecualización previo.

Según realizaciones preferentes, para regular la entrada total (tanto de agua como de ROB) del reactor, el sistema de control establece el encendido/apagado de la bomba de alimentación en función del nivel/presión en el reactor anaerobio, con el fin de mantener un caudal de entrada (tanto de agua como de ROB) similar al caudal de permeado.

Los ROB triturados y tamizados se pueden alimentar al reactor o reactores anaerobios, por ejemplo, desde un fermentador anexo o desde otras instalaciones.

La VCO de los ROB es superior a la VCO de las aguas residuales, y como máximo será del 200% respecto a la VCO de las aguas residuales alimentadas al reactor (o reactores) para evitar sobrecarga de la planta y una acidificación del proceso por exceso de ácidos grasos volátiles.

Los residuos orgánicos biodegradables, ROB, pueden ser residuos urbanos, por ejemplo, residuos orgánicos domésticos, como restos de alimentos, pero no necesariamente son residuos urbanos. Podrían emplearse también sustratos de industrias colindantes con la planta, residuos de lodos de industrias agroalimentarias, glicerol, metanol o similares.

De manera preferida los ROB empleados deben presentar un potencial de biometanización de la materia orgánica contenida superior al 60% respecto a la DQO total del residuo para que resulte interesante en el proceso de potenciar la producción de metano.

Respecto al mantenimiento del pH en el reactor se puede decir que, en el caso preferente, dada la baja carga de la corriente de aguas residuales a tratar y la elevada biodegradabilidad de los residuos orgánicos biodegradables incluidos, es poco probable que se dé una acidificación del medio como consecuencia de una sobrecarga orgánica. En cualquier caso, se pueden implementar sistemas de dosificación en línea "de emergencia" basados en la adición puntual de alcalinidad, aunque su implementación es convencional y supone un coste.

La membrana o membranas de filtración están sumergidas y situadas preferentemente en al menos un segundo tanque o cámara acoplado al reactor o reactores.

Como membranas pueden utilizarse diversas opciones disponibles en el mercado, pero para el procedimiento de la presente invención deben ser membranas que apliquen una corriente de biogás para su limpieza y mantenimiento. A modo de ejemplo pueden usarse membranas poliméricas sumergidas empleando tamaños de poro en el rango de ultrafiltración. En cualquier caso, en el procedimiento descrito en la presente invención, pueden utilizarse membranas combinadas con otros medios filtrantes análogos. Según realizaciones particulares adicionales del procedimiento, la etapa de filtración de las aguas tratadas en el reactor o reactores comprende cuatro fases: filtración, relajación, contralavado y ventilación. De manera preferente, las operaciones de contralavado y ventilación ocupan un tiempo promedio diario que es como máximo el 2% del tiempo total de operación diario de la planta.

En la etapa de filtración de la mezcla tratada, se obtiene lo siguiente en el reactor:

- una corriente de agua filtrada, llamada permeado, que pasa a un sistema de desgasificación y de recuperación de metano,

- una corriente de licor mixto de rechazo que se recircula al reactor con un caudal equivalente a 1-6 veces el caudal total de las dos entradas, pero preferentemente menor de 4 veces,

- una corriente de biogás enriquecido en metano que se dirige a un sistema de acondicionamiento, previo a su almacenamiento.

La corriente de biogás enriquecido en metano es susceptible de valorizarse energéticamente en un sistema de cogeneración.

- Según realizaciones particulares adicionales del procedimiento de la presente invención, se lleva a cabo una recirculación de sólidos entre la cámara o tanque de filtración y el reactor. La relación de caudal de recirculación con respecto a licor mixto de rechazo, entre la cámara o tanque de filtración y el reactor es preferentemente menor de 4 veces el caudal de alimentación, y con un rango máximo de 1-6 veces el caudal de alimentación.
- Las aguas residuales tratadas comprenden una fracción de metano en fase gaseosa que se puede recuperar y retornar al reactor mediante un cono o una membrana de desgasificación. En particular es importante la recuperación del metano, ya que al no calentar el reactor, un elevado porcentaje de metano puede estar disuelto en el agua. Las aguas residuales tratadas comprenden por lo tanto una fracción de metano disuelta que se puede recuperar mediante una membrana de desgasificación.
- Las aguas residuales pueden ser cualquier tipo de aguas residuales, tanto urbanas como industriales, aunque son preferentemente aguas urbanas ya que la presente invención resuelve especialmente problemáticas asociadas con el tratamiento de este tipo de corrientes caracterizadas por su baja carga orgánica. Según realizaciones particulares del procedimiento, el biogás obtenido se recircula mediante un soplador a través de difusores ubicados en la parte inferior de los módulos de filtración, para generar un burbujeo que evite la formación de ensuciamiento en su superficie. La fracción excedente de biogás se dirige a un sistema de acondicionamiento previo a su almacenamiento en un gasómetro.
- El procedimiento comprende además preferentemente la realización de una purga de sólidos. Dicha purga se debe efectuar con una frecuencia promedio de purga definida por la concentración de sólidos a fijar en el reactor anaerobio.
- Según realizaciones particulares del procedimiento, los lodos producidos y remanentes se extraen mediante una válvula de purga que puede ser de activación manual o automática. El exceso de lodo que se purga de la planta puede incluirse directamente a la línea de lodos de la planta en la que se ubique el proceso para su estabilización (si fuera necesaria) y posterior valorización energética.
- Si es necesario dependiendo de las condiciones de permeabilidad, se lleva a cabo un lavado externo de la membrana por medios físicoquímicos. Mediante dicho lavado se puede recuperar en la planta un valor sostenible de SGD_p dentro del 90-100% del valor inicial.
- En cuanto a la eliminación de nutrientes biológicos, esta no es necesaria cuando el efluente se puede reutilizar directamente en aplicaciones de riego (áreas de cultivo o campos de golf presentes en la zona). En caso contrario, el efluente final, que tiene valores promedio de $N-NH_4$ en torno a 40-80 mg/l, requeriría un post-tratamiento biológico diseñado para la eliminación de nutrientes. Este post-tratamiento puede ser, por ejemplo, como el descrito en el documento ES2315178, con el fin de obtener un nivel de calidad apto para vertido.
- El procedimiento de limpieza, reparación y/o sustitución de las membranas vendrá descrito por el proveedor de las membranas empleadas en el proceso.
- Según una realización preferente del procedimiento de la invención, el procedimiento de la reivindicación 1 comprende al menos las etapas de:
- añadir los ROB al reactor anaerobio, con una velocidad de carga máxima de los ROB del 200% respecto a la velocidad de carga orgánica de las aguas residuales
 - el reactor tiene una concentración de sólidos total, $STML_{ra}$, comprendida entre 1 y 35 g/l, preferentemente comprendida entre 9 y 25 g/l,
 - más preferentemente el SGD_p tiene un valor tal que la variación de la presión dentro y fuera de la membrana $(d(P)/dt)$ no supera un valor de $0,05 \text{ bar} \cdot \text{min}^{-1}$ durante dos ciclos de filtración consecutivos,
 - y de modo que la relación de recirculación de sólidos entre el reactor y la cámara que comprende la membrana con respecto al caudal de alimentación al reactor es de 1-6, preferentemente menor de 4.
- Otro aspecto de la presente invención es una planta de tratamiento de aguas residuales según la reivindicación 13 adjunta para llevar a cabo el procedimiento de la reivindicación 1, caracterizado por que al menos comprende:
- una zona de tamizado (4) que recibe una corriente de aguas residuales,
 - un tanque de ecualización de aguas residuales (5) que recibe la corriente de aguas residuales tamizada,
 - una zona de tamizado (4) que recibe una corriente de residuos orgánicos biodegradables (ROB),

- un tanque de ecualización de ROB (6) que recibe la corriente de ROB tamizada,

- estando ambos tanques (5, 6) conectados a un reactor anaerobio no calentado (1) a través de una válvula de tres vías,

- al menos un tanque de membrana con una membrana de filtración gasificada sumergida (2) conectado al reactor no calentado (1) con recirculación de biogás desde el reactor,

- un sistema de control que controla el caudal de biogás recirculado desde el reactor y el caudal de las aguas residuales filtradas de modo que la relación entre el caudal de biogás recirculado aplicado por metro cuadrado de membrana y el caudal de aguas residuales filtradas por metro cuadrado de membrana - SGDp - es el valor mínimo permitido por la concentración de sólidos suspendidos en una planta de tratamiento, obtenido mediante la ecuación $SGDp = 0,9096 \times MLSS - 1,5407$, en el que la concentración de sólidos total dentro del reactor anaerobio $STLM_{ra}$ está comprendida entre 1 y 35 g/l.

La planta puede incluir una unidad de recuperación de metano a partir de permeado (3).

Según una realización preferida de la invención, la membrana o membranas se ubican en al menos un segundo tanque acoplado al reactor de la planta.

El procedimiento de la invención se controla de forma automática del siguiente modo: se controlan y miden de forma continua los parámetros de funcionamiento y trabajo (caudales, pH, potencial redox, producción de biogás, turbidez, TMP, flujo transmembrana, sólidos y otros parámetros) y el rendimiento del reactor anaerobio, y de modo tal que se dispone de indicaciones sobre las modificaciones necesarias para resolver problemas para optimizar su rendimiento. Es decir, el seguimiento continuo produce una retroalimentación de instrucciones para las modificaciones de parámetros relevantes (caudal de residuos orgánicos biodegradables a introducir, caudal de permeado, caudal de recirculación de biogás a la membrana,...) que mejoren la eficacia del procedimiento. Un sistema o programa de control que se puede aplicar al procedimiento e instalación de la presente invención se conoce por las publicaciones:

- A. Robles, M.V. Ruano, J. Ribes y J. Ferrer. *Advanced control system for optimal filtration in submerged anaerobic MBRs (SAnMBRs)*. *Journal of Membrane Science* (2013): 430, 330-341.

Por lo tanto, mediante el control del procedimiento de la manera indicada se consigue que se realice siempre en las condiciones de operación óptimas. Y están previstas operaciones correctoras cuando los parámetros no tengan los valores adecuados. Por ejemplo, cuando se cumple que $d(P)/dt > 0,05 \text{ bar}^{-1}\text{min}^{-1}$ se establecen tres medidas correctoras que se aplicarán en el orden de prioridad indicado a continuación:

1. La planta se operará con un valor de SGD_p superior, lo que se consigue disminuyendo el caudal de tratamiento y/o aumentando el caudal de gas de limpieza hasta recuperar la operación sostenible.

2. Cuando no sea posible trabajar en el intervalo requerido de SGD_p se disminuirá la concentración de biomasa anaerobia activa en la cámara de filtración modificando la relación de recirculación de sólidos o efectuando purga de sólidos.

3. Se efectuará un procedimiento de limpieza física de la membrana.

Los parámetros principales en el procedimiento según una realización preferida de la invención que determinan cómo se realizan las distintas operaciones son:

- la velocidad de carga orgánica procedente de los residuos orgánicos biodegradables se establece como máximo en un 200% respecto a la velocidad de carga de las aguas residuales

- el potencial bioquímico de metano de los residuos orgánicos se corresponde con potenciales de biometanización por encima del 60% respecto a la DQO total de los residuos,

- se maximiza la capacidad de la membrana reduciendo el valor de SGD_p (m^3 de gas recirculado $\cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 / \text{m}^3$ de permeado $\cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2$), teniendo como condición que el valor adoptado sea sostenible en el tiempo,

- el criterio de sostenibilidad consiste en que $d(P)/dt$ no sea superior a $0,05 \text{ bar}^{-1}\text{min}^{-1}$ a lo largo de dos ciclos de filtración consecutivos,

- la concentración total de sólidos en el reactor, $STLM_{ra}$, está comprendida entre 1 y 35 g/l, preferentemente, 9 y 25 g/l.

El procedimiento para tratar aguas residuales según la invención tiene las siguientes ventajas:

- potenciación de la actividad microbiana empleando residuos orgánicos biodegradables (ROB), que pueden ser de origen doméstico, que se añaden desde un depósito anexo al reactor anaerobio. Este sistema soluciona problemáticas derivadas de la presencia de sulfato disuelto en aguas residuales de baja carga orgánica, y potencia la viabilidad energética incrementando sensiblemente la carga orgánica disponible para los microorganismos de tipo archaea, lo que aumenta la constante de hidrólisis aparente del proceso ($K_{H,Ap}$) y la actividad metanogénica,

- a pesar de la adición de residuos orgánicos biodegradables, la cantidad de biosólidos producidos durante el proceso (expresada en kg SSV·kg DQO⁻¹ eliminada) es mucho menor que en el caso de tratar solo aguas residuales, observándose un incremento en la constante de hidrólisis aparente.

- el control del proceso de filtración permite que la viabilidad económica del proceso se vea incrementada al no requerir de procesos de lavado químico de la membrana utilizada, lo que implica ahorros en consumo de reactivos químicos.

El procedimiento de la presente invención consigue:

i) potenciar el rendimiento energético

ii) y controlar de manera sostenible el tratamiento de aguas residuales y la producción simultánea de energía en forma de biogás mediante la transformación de la materia orgánica presente en el agua, estando el proceso potenciado por la adición de residuos orgánicos biodegradables.

La presente invención supone una tecnología interesante y ventajosa en casos en que:

- se precise mejorar el tratamiento anaerobio a temperatura ambiente con un sistema de filtración, para aguas residuales con baja carga orgánica,

- se precise mantener o mejorar la producción de biogás en el tratamiento anaerobio a temperatura ambiente con un sistema de filtración de aguas residuales con carga orgánica variable,

- se precise incrementar la producción de biogás en un tratamiento anaerobio a temperatura ambiente con un sistema de filtración, para aguas residuales.

La biometanización conjunta de los dos tipos de sustrato, es decir los ROB así como el sustrato orgánico que pueda estar presente es una alternativa ventajosa desde el punto de vista energético, aprovechando la sinergia de las mezclas y compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado.

De este modo, el procedimiento combina una etapa de tratamiento biológico anaerobio con una etapa de filtración.

Las dos principales ventajas de la presente invención son: operación estable en un rango dinámico de parámetros operativos adaptables en función del estado del proceso y la potenciación del rendimiento energético mediante el tratamiento conjunto de aguas residuales y residuos sólidos biodegradables.

Ejemplos

En una realización particular de la invención se lleva a cabo un tratamiento de aguas residuales urbanas siguiendo el procedimiento descrito y añadiendo a la línea de tratamiento anaerobio residuos orgánicos biodegradables, que pueden ser residuos de cocina (RC). Los RC se homogeneizan y se trituran con un triturador convencional (disponible a diversas escalas, según el tamaño de la instalación). Tras pretratamiento con tamiz de luz de malla de 0,5 mm, los RC se almacenan en un tanque previo, impulsándose con una bomba dimensionada adecuadamente según características de la instalación, a intervalos regulares.

La planta usada en la parte experimental se caracteriza porque comprende las siguientes zonas: tamizado, homogeneización o ecualización, reactor anaerobio, cámara o tanque de membranas, tanque de limpieza, recuperación de metano y un tanque de residuos orgánicos biodegradables conectado al reactor anaerobio a través de una válvula de tres vías que es también la entrada de las aguas residuales al reactor.

La planta comprende (figura 3): un reactor anaerobio (1), tanques de membrana (2), tanque CIP ("clean-in-place") (3), rototamiz (4), triturador (7). Y en la misma figura 3 las líneas de guiones representan corrientes de biogás, las líneas de puntos representan corrientes de permeado, las líneas continuas de menor grosor representan las entradas tanto de aguas residuales como de ROB y la línea continua gruesa representa el lodo anaerobio.

Los otros componentes de la planta mostrados en la figura 3 son el tanque de aguas residuales (5) y el tanque de

ROB (6).

La planta comprende además válvulas (válvulas de bola, válvulas de 3 vías, válvulas de muestreo, válvulas de diafragma, válvulas ajustables y anti-retorno), actuadores, conducciones de gas, lodo y agua, bombas de suministro (recirculación de lodo, extracción de permeado, alimentación, sopladores, medios de purga, difusores de biogás, instrumentación para medición en línea: sensores (pH, potencial redox, conductividad, sólidos, turbidez, caudalímetros, sensores de presión, analizador de composición de biogás, sistema de control, motor de cogeneración y membranas de desgasificación.

La planta recibe las aguas residuales previamente tamizadas con un rotofiltro, preferentemente de 0,5 mm de paso y pasa a un tanque de homogeneización, del mismo modo, el RC se tamiza por un rotofiltro de iguales características y pasa a otro tanque. El sistema de alimentación del proceso regula una válvula de 3 vías que conecta tanto el tanque de agua como el tanque de RC con el reactor para determinar en cada momento si lo que se incorpora son aguas residuales o residuos orgánicos.

La cantidad de ROB, que en este caso son residuos orgánicos biodegradables, que se puede añadir, se expresa mediante el porcentaje de residuos en comparación con la carga orgánica volumétrica total (aportada por la mezcla de aguas residuales y el residuo sólido orgánico). En base a este parámetro se establece por lo tanto el caudal de ROB que se va a introducir al reactor anaerobio. La presente invención permite trabajar con valores de porcentaje de residuos sólidos urbanos de 0 a 100.

Considerando los valores estimados de producción de ARU (aguas residuales urbanas) y RC por habitante y día, aproximadamente la mitad de la carga orgánica volumétrica se aporta en forma de RC. De este modo, se pueden utilizar 15,8 ml de RC por cada litro de aguas residuales de origen doméstico.

Preferentemente, los residuos sólidos orgánicos empleados deben presentar un valor de contenido en materia orgánica, expresada como DQO, en el intervalo de 45-75 g DQO/L, con un tamaño de partícula posterior al tamizado (0,5 mm) tal que el 90% de los RC llega al reactor anaerobio.

Un estudio de caracterización de residuos de cocina determinó la relación DQO/S-SO₄, siendo el valor promedio obtenido de 154,62 (61570 mg de DQO/398,21 mg de S-SO₄). En el proceso de tratamiento anaerobio, existe competencia por la materia orgánica entre las bacterias sulfatorreductoras (SRB) y las archaea metanogénicas (AM) cuando ambas estén presentes en el medio. De este modo, la materia orgánica que utilicen las SRB en la reducción del sulfato (2 gramos de DQO por cada gramo de SO₄-S), no estará disponible para las AM. Gracias a la incorporación de los RC en el proceso, la nueva relación se encuentra muy por encima de la relación de consumo de DQO para la reducción del sulfato presente en las aguas residuales. De esta forma existe suficiente DQO para el crecimiento de ambas poblaciones, por lo que cuanto mayor sea esta relación mayor será el incremento en la tasa de producción de biogás debido a la potenciación de la actividad metanogénica.

Para el estudio experimental, se han realizado pruebas de tratamiento de aguas durante periodos de tiempo diferentes (véase la tabla). En todos estos periodos se ha operado a una temperatura aproximada de 27°C y un tiempo de retención de lodo de 70 días. Cada uno de estos periodos se diferencia por la cantidad de RC introducida en el sistema: aproximadamente un % de RC del 25% en el periodo 1, aproximadamente un % RC del 50% en el periodo 2 y ninguna adición de RC en el periodo 3.

La Tabla 1 muestra que la producción de biogás enriquecido en metano se incrementa hasta un 160% con respecto al tratamiento anaerobio de aguas residuales de baja carga, siendo teóricamente posible aumentar esta cantidad. En este procedimiento se ha definido la constante de hidrólisis aparente ($K_{H,Ap}$) para mostrar que el incremento en el porcentaje de RC introducidos aumenta la producción de metano en el sistema porque se aumenta la proporción del sustrato más biodegradable, lo cual es equivalente a aumentar la constante de hidrólisis del sustrato en el sistema.

Tabla 1. Resultados experimentales del proceso de incorporación de residuos orgánicos biodegradables.

<i>TRC</i>	<i>TRH</i>	<i>T</i>	<i>[VCO]_{ARU}</i>	<i>[VCO]_{RSO}</i>	<i>[VCO]_{TOTAL}</i>	% de RSO	<i>K_{H,Ap}</i>	<i>Producción de biogás</i>
<i>d</i>	<i>d</i>	°C	<i>kg DQO·d⁻¹·m⁻³</i>			%	<i>d⁻¹</i>	<i>L CH₄·kg⁻¹ DQO_{inf}</i>
70	0,99	27,5	0,563	0,000	0,563	0,0%	0,0091	89,3
72	0,93	26,7	0,623	0,201	0,824	24,9%	0,0153	110,7
70	0,99	26,8	0,528	0,416	0,907	47,3%	0,0261	144,0

La ecuación 1 muestra la relación entre la constante de hidrólisis aparente y el porcentaje de RC.

$$k_{H,Ap} = 0,0358 * RC(\%) + 0,0082$$

donde $k_{H,Ap}$ es la constante de hidrólisis aparente y "RC (%)" es el porcentaje de la carga orgánica volumétrica correspondiente a los residuos de cocina.

5

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento anaerobio con proceso de filtración para el tratamiento de aguas residuales a temperatura ambiente, que comprende:
 - alimentar de manera continua al menos un reactor anaerobio no calentado con aguas residuales previamente tamizadas y residuo orgánico biodegradable (ROB) previamente tamizado, estando dicho reactor no calentado acoplado a al menos una membrana de filtración gasificada sumergida, con recirculación de biogás desde el reactor
 - llevar a cabo la digestión anaerobia en el reactor de la fracción orgánica contenida en la mezcla de aguas residuales y el ROB, obteniendo una mezcla tratada, y
 - filtrar la mezcla tratada, en al menos un tanque de filtración a través de la membrana de filtración gasificada sumergida en condiciones tales que la relación entre el caudal de biogás recirculado aplicado por metro cuadrado de membrana y el caudal de aguas residuales filtradas por metro cuadrado de membrana (SGD_p) es el valor mínimo permitido por la concentración de sólidos suspendidos en una planta de tratamiento, obtenido mediante la ecuación $SGD_p = 0,9096 \times MLSS - 1,5407$, en el que la concentración de sólidos total dentro del reactor anaerobio $STLM_{ra}$ está comprendida entre 1 y 35 g/l.
2. Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que los residuos orgánicos biodegradables ROB se introducen en el reactor anaerobio con una velocidad de carga orgánica máxima de ROB del 200% respecto a la velocidad de carga orgánica de las aguas residuales tratadas.
3. Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que los residuos orgánicos biodegradables ROB son residuos urbanos, previamente triturados y tamizados hasta un tamaño de partícula menor de 2 mm.
4. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que se lleva a cabo una recirculación de sólidos entre el tanque de filtración y el reactor con una relación de recirculación de sólidos entre el tanque de filtración y el reactor de un valor máximo de 6.
5. Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que la etapa de filtración de las aguas tratadas en el reactor comprende cuatro etapas: filtración, relajación, contralavado y ventilación.
6. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que las etapas de contralavado y ventilación ocupan un tiempo promedio diario que es como máximo el 2% del tiempo total de operación diario de la planta.
7. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además efectuar una purga de sólidos.
8. Procedimiento según la reivindicación 7, en el que el caudal de purga de sólidos (L/d) depende de la concentración específica de sólidos a mantener en el reactor, preferentemente entre 9 y 25 g/l, y la realización de un lavado externo de la membrana por medios físicoquímicos en caso de ser preciso según las condiciones de permeabilidad.
9. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las aguas residuales tratadas comprenden una fracción de metano disuelta que se recupera y retorna al reactor mediante una membrana o cono de desgasificación.
10. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las aguas residuales son aguas residuales urbanas.
11. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los residuos sólidos biodegradables son residuos orgánicos domésticos.
12. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que:
 - los residuos orgánicos biodegradables - ROB - se añaden al reactor anaerobio, con una velocidad de carga máxima de los ROB del 200% respecto a la velocidad de carga orgánica de las aguas residuales
 - el reactor tiene una concentración de sólidos total, $STLM_{ra}$, comprendida entre 1 y 35 g/l, y
 - la relación de recirculación de sólidos entre el reactor y la cámara que comprende la membrana, con respecto al caudal de alimentación del reactor, es menor de 6.

13. Una planta de tratamiento de aguas residuales para llevar a cabo el procedimiento descrito en la reivindicación 1, caracterizado por que comprende al menos:
- 5 - una zona de tamizado (4) que recibe una corriente de aguas residuales,
- un tanque de ecualización de aguas residuales (5) que recibe la corriente de aguas residuales tamizada,
- 10 - una zona de tamizado (4) que recibe una corriente de residuos orgánicos biodegradables (ROB),
- un tanque de ecualización de ROB (6) que recibe la corriente de ROB tamizada,
- 15 - estando ambos tanques (5, 6) conectados a un reactor anaerobio no calentado (1) a través de una válvula de tres vías,
- al menos un tanque de membrana con una membrana de filtración gasificada sumergida (2) conectado al reactor no calentado (1) con recirculación de biogás desde el reactor,
- 20 - un sistema de control que controla el caudal de biogás recirculado desde el reactor y el caudal de las aguas residuales filtradas de modo que la relación entre el caudal de biogás recirculado aplicado por metro cuadrado de membrana y el caudal de aguas residuales filtradas por metro cuadrado de membrana - SGDp - es el valor mínimo permitido por la concentración de sólidos suspendidos en una planta de tratamiento, obtenido mediante la ecuación $SGDp = 0,9096 \times MLSS - 1,5407$, en el que la concentración de sólidos total dentro del reactor anaerobio $STLM_{ra}$ está comprendida entre 1 y 35 g/l.
- 25 14. Una planta según la reivindicación 13, en la que la membrana o membranas están ubicadas en al menos un segundo tanque acoplado al reactor.

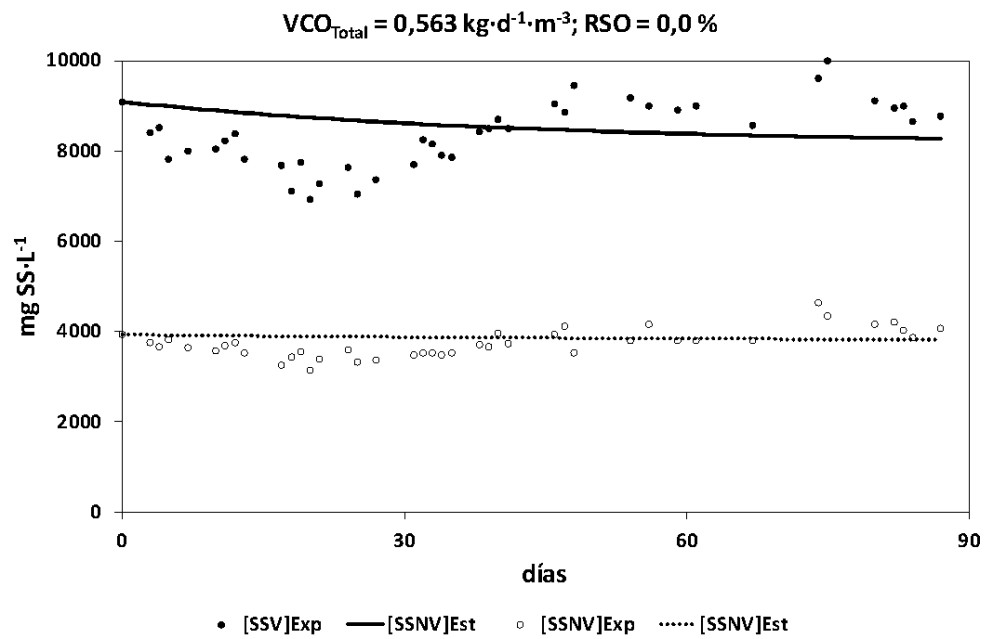


Fig. 1A

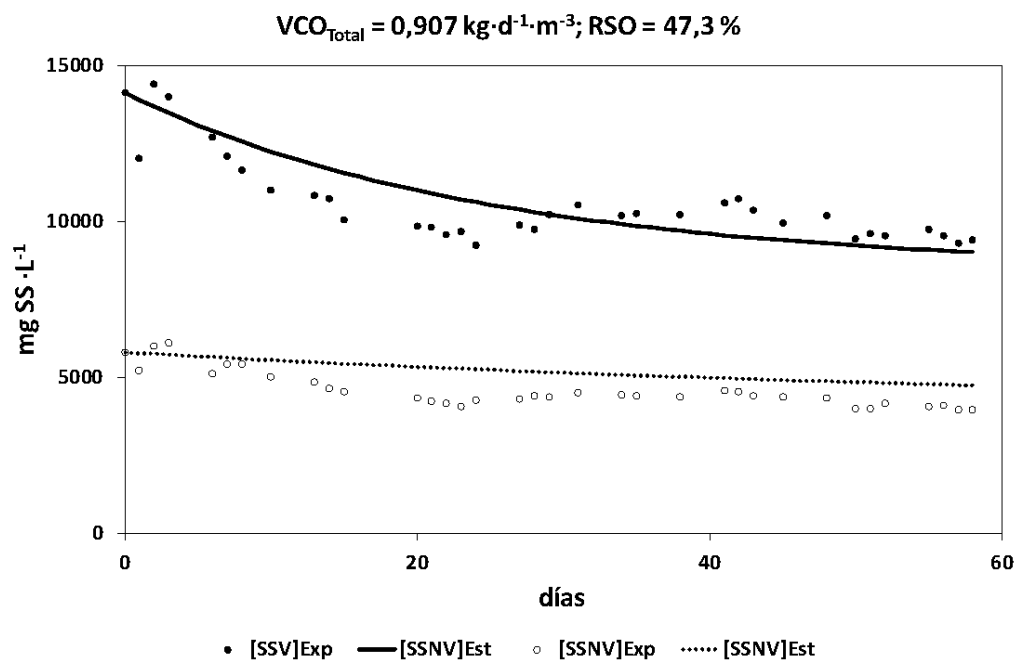


Fig. 1B

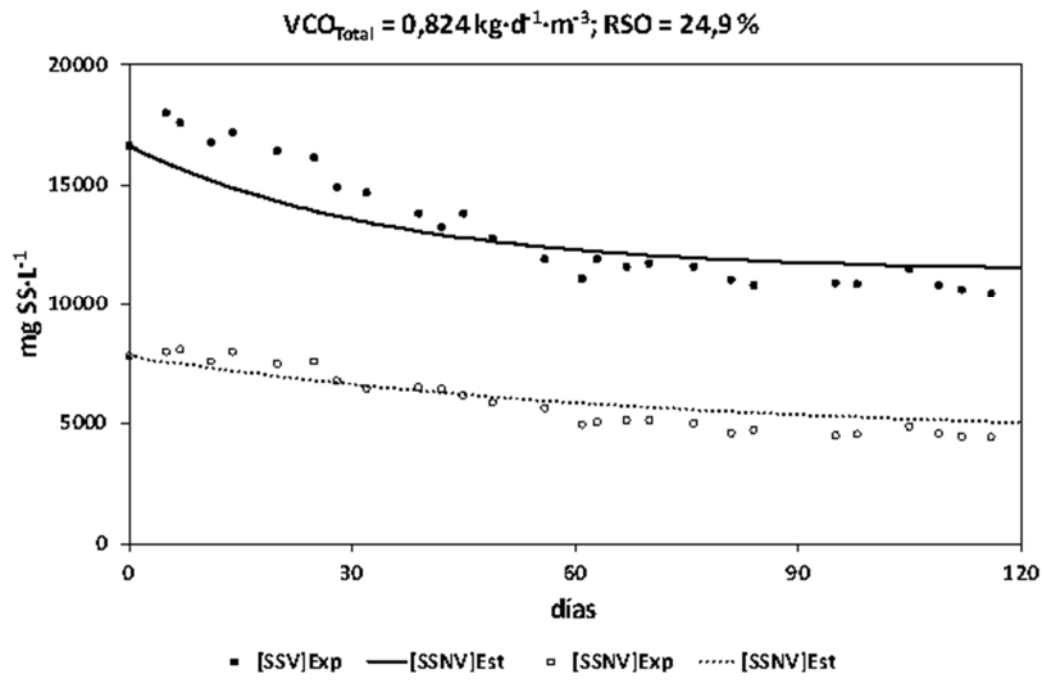


Fig. 1C

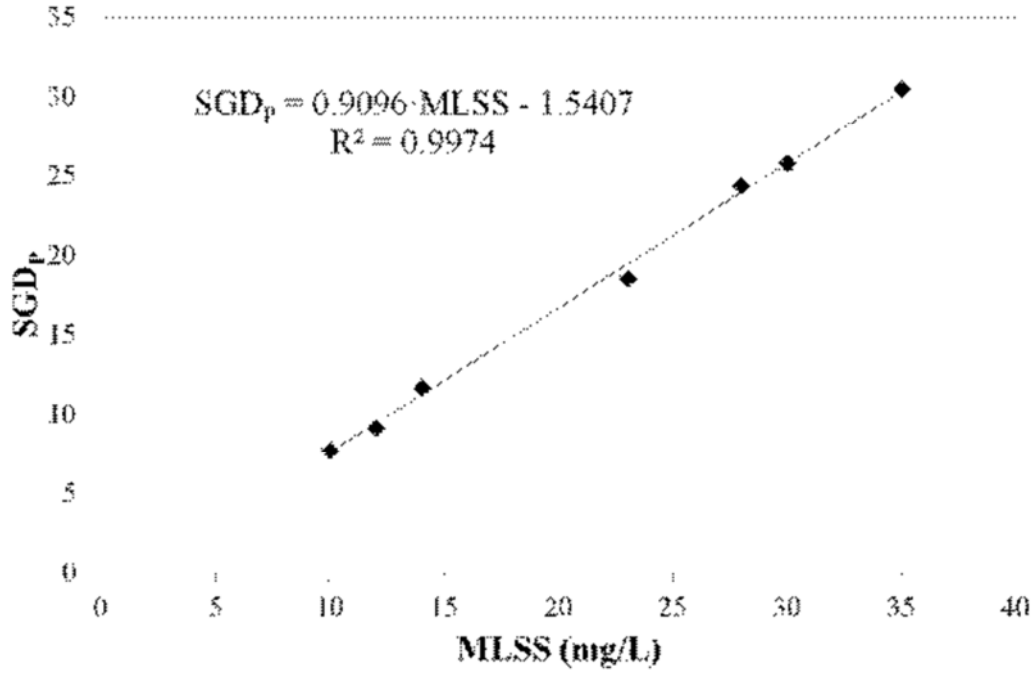


Fig. 2

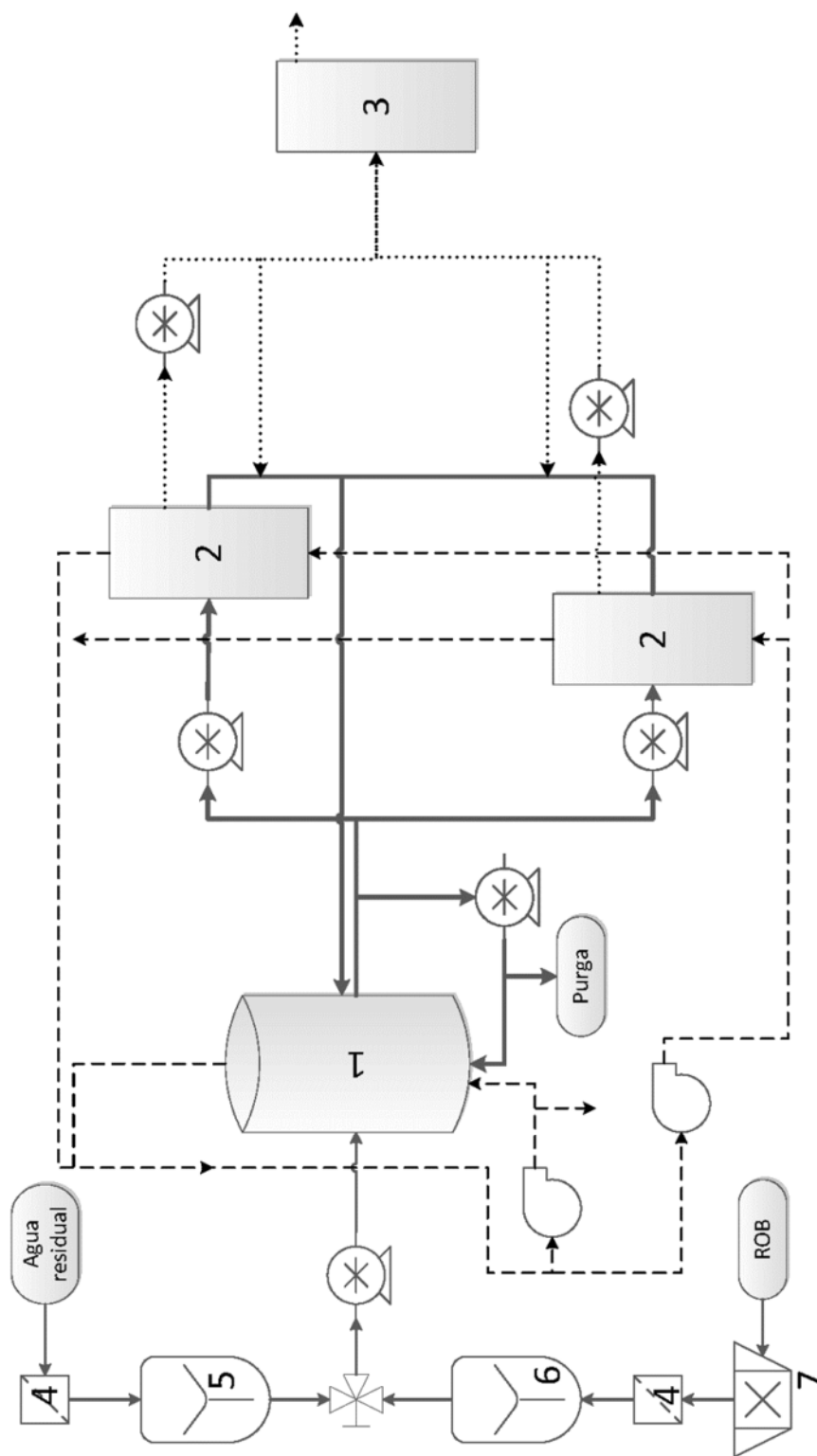


Fig. 3