

Resumen

Las directivas europeas han potenciado diversas estrategias para minimizar la producción de fango biológico en la depuración de aguas residuales. Desde una perspectiva técnico-económica el tratamiento biológico anaerobio es una de las opciones más claras para tratar las aguas residuales industriales. En este contexto, se ha desarrollado un reactor híbrido anaerobio a escala semi-industrial para el tratamiento de aguas residuales de matadero como alternativa frente a otros sistemas anaerobios más implantados en el mercado. Los resultados han demostrado que es un sistema muy eficaz, robusto y fácil de operar. Se ha reducido la producción de fangos a valores por debajo de 0,12 kg SV/kg DQO eliminada, acompañado de una eliminación de materia orgánica superior al 95%.

Palabras clave:

Agua residual, EDAR, tratamiento anaerobio, reactor híbrido, diseño, fango flocculento, fango granular.

Diseño de reactores híbridos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales industriales

Por: **Soroa del Campo, S.**, doctora en Ciencias Biológicas (*); **Lopetegui Garnika, J.**, doctor en Ciencias (*); **Almandoz Peraita, A.**, ingeniero industrial (*); **García de las Heras, J.L.**, doctor ingeniero industrial (**)

(*) **Asistencia Tecnológica Medioambiental, S.A. (ATM)**

Epele Bailara, 29
20120 Hernani (Guipúzcoa)
Tel.: 943 331 838
E-mail: ssoroa@atmsa.com
Web: www.atmsa.com

(**) **CEIT y Tecnun (Universidad de Navarra)**

Paseo Manuel Lardizábal 15
20018 San Sebastián (Guipúzcoa)
Tel.: 943 212 800
E-mail: garciaheras@ceit.es
Web: www.ceit.es - www.tecnun.es

Abstract**Design of an anaerobic hybrid reactor for industrial wastewater treatment**

The application of the European legislation has promoted different strategies aimed at minimizing the biological sludge production during wastewater treatment. Anaerobic biological treatment is the clearest choice from a technical and economical point of view regarding industrial wastewater. In this context, a semi-industrial anaerobic hybrid reactor has been developed as an alternative technology to other anaerobic systems well-established in the market for the treatment of slaughterhouse wastewater. The results have demonstrated that it is an effective, robust and easy to operate system. The sludge production has been reduced below 0.12 kg VS/kg COD removed, for COD removal efficiencies above 95%.

Keywords:

Wastewater, WWTP, anaerobic treatment, hybrid reactor, design, flocculent sludge, granular sludge.

1. Introducción

La aplicación de la Directiva 91/271/CEE de 21 de mayo sobre tratamiento de aguas residuales urbanas ha supuesto un incremento importante del caudal de aguas residuales depuradas, lo que ha incidido directamente en la cantidad de lodos generados en dichas instalaciones. De igual forma, motivado por la presión legislativa, política y social, la cantidad de lodos generados en instalaciones de depuración de aguas industriales se ha multiplicado.

Por otro lado, la Directiva 99/31/CE de 26 de abril relativa al vertido de residuos, ha limitado de forma considerable la disponibilidad de los vertederos de residuos urbanos para este tipo de fangos, con exigencias cada vez mayores (grado de deshidratación e higienización) y con prohibiciones de vertido en muchos de los casos.

No es difícil imaginar por tanto, que el coste de gestión por tonelada

de fango generado es cada vez mayor, con precios que oscilan entre 30 y 180 euros/t, dependiendo de la comunidad autónoma, situación local específica, origen y clasificación del fango, etc.

En este escenario, se han potenciado diversas estrategias encaminadas a reducir la cantidad de fango generado y/o a mejorar las condiciones higiénicas del mismo. Dentro de estas estrategias, estarían por un lado las asociadas al tratamiento del fango generado en la depuración, procesos de digestión aerobia/anaerobia, digestión termofílica, deshidratación, secado térmico, etc. Por otro lado, estarían las estrategias encaminadas a producir menos fango en las EDARs. Esta última estrategia tiene, desde un punto de vista técnico-económico, mucho más impacto en la solución final del problema y pasa necesariamente por implantar procesos biológicos anaerobios en la depuración de aguas residuales.

Una de las ventajas más importantes que presenta el tratamiento anaerobio es que la tasa de crecimiento bacteriano en esas condiciones es mucho menor que en condiciones aerobias, lo que se traduce en una menor producción de fango. Además, desaparecen los costes energéticos asociados a la aireación y en el proceso se produce biogás rico en metano que se puede utilizar como combustible.

Existen numerosas tecnologías capaces de eliminar materia orgánica de un agua residual de forma anaerobia. Las técnicas más prometedoras son aquéllas que retienen los sólidos dentro del reactor independientemente del líquido, con lo que se separan el tiempo de retención celular (SRT) y el tiempo de retención hidráulico (HRT). A este tipo de reactores se les llama en general sistemas con alta concentración de biomasa o de alta carga. Entre ellos se encuentran el filtro anaerobio, UASB, EGSB, y el reactor híbrido.

El filtro anaerobio es un reactor lleno de un material sobre la superficie del cual se adhieren los microorganismos en forma de una fina película. Se retiene, además, en el relleno una gran cantidad de microorganismos en suspensión. El inconveniente más habitual que suele tener este sistema es la obstrucción debida a la presencia de sólidos suspendidos y grasa del agua de alimentación.

El reactor de lecho de fango (UASB) es un sistema que ha tenido un especial auge en el mercado. Este reactor no dispone de medio inerte para retener a los microorganismos en el digestor, sino que la inmovilización se consigue favoreciendo la floculación de los lodos. Se puede trabajar tanto con fango granular como con floculento. El reactor dispone en la parte superior de un separador gas-sólido, con lo que se favorece el retorno de sólidos al lecho. Este reactor tiene el inconveniente de que su funcionamiento depende en gran medida de la sedimentabilidad del fango.

Para evitar los problemas que presenta el UASB se han propuesto mejoras en relación a la pérdida de sólidos, lo que ha hecho surgir nuevos sistemas como el reactor híbrido o el EGSB. El EGSB utiliza únicamente fango granular, por lo que la velocidad ascensional de operación puede ser mucho más elevada que en los UASB. La alta velocidad ascensional junto al efecto del gas producido hace que el lecho se expanda, obteniendo de esta forma un buen contacto entre biomasa y sustrato. Este contacto permite operar el reactor con cargas orgánicas mayores que los sistemas UASB. El in-

En el tratamiento anaerobio desaparecen los costes energéticos asociados a la aireación

conveniente de esta tecnología es que su funcionamiento se limita a la utilización de fango granulado y depende por tanto, de las condiciones necesarias para el mantenimiento de esta granulación, lo que, entre otras cosas, limita el rango de aplicaciones (debido principalmente a la composición del agua residual).

El reactor híbrido anaerobio (en adelante RHA), es un sistema mixto que combina un UASB en su parte inferior seguido de un filtro anaerobio en su parte superior, sustituyendo así el sistema de separación de gas-sólido que lleva el UASB por material de relleno. Las ventajas que presenta este reactor frente a los otros sistemas anaerobios básicamente se pueden reducir a dos:

- Se evita el problema de la obstrucción que tiene el filtro anaerobio mediante la eliminación de relleno de la parte inferior del reactor. Esta obstrucción suele ocurrir debido principalmente a la presencia de sólidos suspendidos y grasa en el agua de alimentación. En el RHA, la mayor parte de la materia orgánica se elimina en la parte del lecho de fango, actuando el relleno a modo de desgasificador más que de soporte para el crecimiento bacteriano.
- Se reduce la pérdida de biomasa que tiene el UASB debido a la sustitución del separador gas-sólido por relleno. Este relleno, por una parte, favorece la granulación y hace que una mayor cantidad de fango vuelva al lecho. Por otra parte, para el tratamiento de aguas residuales que impiden o no favorecen la granulación se puede operar con fango floculento con una efectividad en la retención de sólidos superior al UASB, y pudiendo además eliminar materia orgánica en una zona en la que el UASB no lo puede hacer (parte superior o relleno).

Existen en el mercado pocos reactores híbridos a escala real, aunque según los estudios que existen se presenta como una tecnología prometedora para aguas residuales que no favorecen la granulación. Este tipo de reactor se ha utilizado para el tratamiento de diversos tipos de agua residual, desde agua urbana (Elmitwalli, 2000) hasta aguas industriales diferentes como agua residual de matadero, procesado de café, fábrica de refrescos, productos lácteos, lixiviado de vertedero, procesado de alimentos o azucarera (Batstone, 1999; Hawkes et al., 1995; Di Berardino et al., 1997; Guiot et al., 1984; Tur et al., 1997; Bello-Mendoza et al., 1998).

Por estos motivos, se ha desarrollado un proyecto de I+D subvencionado por el Gobierno Vasco dentro del programa Intek en el que han estado implicadas, además del

CEIT como centro tecnológico, las empresas ATM, Mafrido e Hijos de José Serrats. En este proyecto se ha desarrollado un RHA a escala semi-industrial, utilizando como punto de partida los resultados de un proyecto de I+D previo (Proyecto Oferta/Demanda, 1999-2002) en el que se utilizó un RHA a escala piloto de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales de matadero (Soroa, 2005; Soroa et al., 2005).

El objetivo principal del estudio fue el diseño y construcción de un RHA a escala semi-industrial estudiando todas las variables de diseño y operación sujetas al cambio de escala. Todo este conjunto de variables se optimizó desde el punto de vista de proceso por un lado, y desde el punto de vista de selección y optimización de equipos e instrumentación, por otro.

2. Criterios de diseño del RHA

Cuando se trata de diseñar un RHA se han de tener en consideración distintas cuestiones. El principal objetivo es que el reactor obtenga los resultados esperados con el mínimo coste, tanto de inversión como de operación. El sistema debe ser diseñado para presentar gran estabilidad ante cualquier imprevisto, manteniendo una alta capacidad de depuración, a la vez que la puesta en marcha y operación resulten lo más sencillas posible.

Para conseguir estos objetivos, el diseñador ha de procurar mantener en el reactor la máxima cantidad de biomasa activa para garantizar la reducción de DQO prevista. Otra de las principales tareas es la minimización de zonas muertas y también la de evitar la formación de caminos preferenciales, ya que ambas circunstancias hacen perder volumen útil del reactor, con la consiguiente pérdida de rendimiento. También se ha de garantizar un régimen de turbulencia adecuado para mantener un buen contacto entre sustrato y biomasa que facilite la depuración perseguida.

A la hora de diseñar un RHA, el conjunto de los parámetros de dimensionado tiene que mantenerse dentro de un rango de valores óptimo, por lo que se trataría de ajustar las dimensiones del reactor para que esto se cumpla.

La carga orgánica volumétrica (Organic Loading Rate, OLR) es la variable normalmente empleada para el diseño y dimensionado de reactores anaerobios. Se calcula de la siguiente manera:

$$OLR = \frac{C \cdot Q}{V}$$

donde OLR es la carga orgánica (kg DQO/m³-día); C es la concentración en DQO del agua residual (kg/m³); Q es el caudal influente (m³/día); y V, el volumen del reactor (m³).

Conociendo la concentración y caudal del influente, se selecciona una OLR apropiada (basada normalmente en los resultados experimentales obtenidos en una planta piloto) de manera que se obtiene el volumen de reactor necesario en teoría. No obstante, su volumen total lo marcan, además, otros parámetros como la velocidad del biogás producido o la altura mínima necesaria para la zona de clarificación. Esto hace que el volumen resultante difiera del teórico por consideraciones principalmente de tipo hidráulico.

La carga másica (F/M) es un concepto similar a la OLR pero, en lugar de medir la masa influente por unidad de volumen del reactor y por día, lo hará por unidad de biomasa en su interior y por día. Se define mediante la siguiente expresión:

$$F/M = \frac{C \cdot Q}{V \cdot X}$$

donde F/M es la carga másica (kg DQO/kg SSV·día); C es la concentración en DQO del agua residual (kg/m³); Q es el caudal influente (m³/día); V es el volumen del reactor (m³); y X es la concentración de biomasa en el reactor (kg SSV/m³).

Aunque este parámetro es muy importante, hay que tener en cuenta

otro factor: la disponibilidad del sustrato para los microorganismos según su grado de apelmazamiento, es decir, el contacto que hay entre el sustrato de entrada y la biomasa en la zona del lecho. De hecho, la eficacia de degradación de sustrato para una cantidad fija de biomasa aumenta con el grado de expansión. Por ello, dos reactores de distinta configuración con la misma cantidad de biomasa pueden soportar distintas cargas porque el contacto entre biomasa y sustrato no es igual (Tilche et al., 1991). En un reactor con flujo ascendente, este contacto está afectado por varios factores como los puntos de entrada del influente, la altura del lecho, de la zona de sedimentación y del relleno, la velocidad ascensional y la recirculación, entre otros.

Una buena distribución del influente, por ejemplo, es muy importante para conseguir unos buenos rendimientos, porque con ello se consigue minimizar las canalizaciones del lecho de fango. Es más, una homogénea distribución del influente es la clave para el diseño de reactores de flujo ascendente (Tilche et al., 1991).

Respecto a la altura de las distintas partes de las que está compuesto el reactor (lecho de fango, zona sedimentación y relleno) conviene llegar a un compromiso entre ambas, teniendo en cuenta las dimensiones resultantes del reactor, el tipo de biomasa que se espera generar (más floculenta o menos...), el tipo de material empleado para el filtro, etc.

El tiempo de retención hidráulico (HRT) se define como el tiempo que el agua influente permanece dentro del reactor, y se calcula según la siguiente ecuación:

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

donde HRT es el tiempo de retención hidráulico (día); V es el volumen del reactor (m³); y Q es el caudal influente (m³/día).

Es importante que esta variable tenga un valor mínimo puesto que el

agua residual debe residir un intervalo mínimo de tiempo para que los microorganismos dispongan de tiempo suficiente para degradar la materia orgánica, especialmente la de tipo coloidal o lentamente biodegradable.

La velocidad ascensional (OR) representa la velocidad a la que asciende el líquido en el interior del reactor. Esta velocidad es proporcional al caudal según la siguiente expresión:

$$OR = \frac{Q}{A}$$

donde OR es la velocidad ascensional del agua (m/h); Q es el caudal influente (m³/h); y A es el área del reactor (m²).

Al aumentar el caudal aumenta la velocidad de ascensión del líquido en el interior del reactor, produciendo una expansión del lecho de fango que crea una separación entre los flocúlos y aumenta la superficie específica de contacto entre biomasa y sustrato. Este efecto es similar al que puede provocar la producción de biogás, tal y como se verá más adelante. Es por ello que este parámetro tiene especial importancia cuando la producción de biogás es baja. Según este efecto, al aumentar la OR, a igualdad de cantidad de biomasa presente, mejora el rendimiento. Pero si se trabaja con una OR demasiado elevada, el lecho de fango se expande en exceso pudiendo ocupar toda la zona de clarificación y llegar al filtro. Por el contrario, si la OR de trabajo es baja, el lecho de fango no se expandirá lo suficiente, se apelmazará, no habrá una correcta mezcla y el peligro de aparición de zonas muertas y caminos preferenciales aumentará en gran medida.

La velocidad de ascensión del biogás (G/A) dentro del lecho de fango es un factor clave para determinar el área del reactor. La velocidad a la que asciende el gas producido viene determinada por la producción de metano y el área del reactor mediante la siguiente expresión:

$$G/A = \frac{P \cdot \eta \cdot C \cdot Q}{M \cdot A}$$

sonde G/A es la velocidad de ascensión del biogás (m³_{gas}/m²_{reactor}·h); P es la producción de metano por unidad de DQO eliminada (0,395 m³ CH₄/kg DQO eliminado); η es el rendimiento de depuración (%); C es la concentración en DQO del agua residual (kg/m³); Q es el caudal de entrada (m³/h); M es el porcentaje de metano en el biogás (%); y A es el área del reactor (m²).

Las burbujas de biogás que se generan en el proceso ascienden junto con el líquido y contribuyen a la turbulencia creada por el propio fluido. Estas burbujas arrastran adheridos flocúlos de biomasa, y si la OLR es alta puede ocurrir que la velocidad sea excesiva, que el lecho de fango se expanda demasiado, y tenga consecuencias similares a la excesiva OR. Por el contrario, de la misma forma que ocurría en el caso de la baja OR, si la OLR de partida es demasiado baja, la producción de gas será escasa y no se producirá la mezcla suficiente para asegurar que todo el sustrato llega a la biomasa. Este problema se puede subsanar recirculando el efluente y aumentando así la velocidad ascensional del agua. Por ello la recirculación cobra especial importancia en momentos de arranque de la planta, cuando la eficiencia del sistema es aún baja y

el caudal de biogás producido no es capaz todavía de expandir suficiente el lecho de fangos.

Como resultado de todas estas consideraciones se obtiene un volumen para el reactor probablemente mayor que el requerido para trabajar con la OLR de partida. Es decir, la OLR a la que realmente trabajará la planta será menor que la de diseño. Pero esto no significa que el reactor esté sobredimensionado en conjunto, sino que, por los motivos antes expuestos de necesidad de mantener cierto volumen para la retención de sólidos, se requiere más volumen que el estrictamente biológicamente activo.

La instalación a escala piloto industrial que se ha utilizado en este proyecto de investigación está formada por los siguientes procesos unitarios (**Figuras 1 y 2**): pozo de bombeo, separador de sólidos, tanque de flotación/sedimentación, tanque de recirculación y reactor biológico. Este último es un reactor híbrido de un volumen neto de 14,4 m³ (2 m de diámetro y 4,7 m de altura de columna de agua). El relleno presente en la parte superior del reactor consiste en pequeños aros digestores de 3 cm de diámetro.

3. Resultados y discusión

El reactor se inoculó inicialmente con fango del digester de la EDAR Urbana de Badiolegi (Azpeitia, Guipúzcoa). La actividad

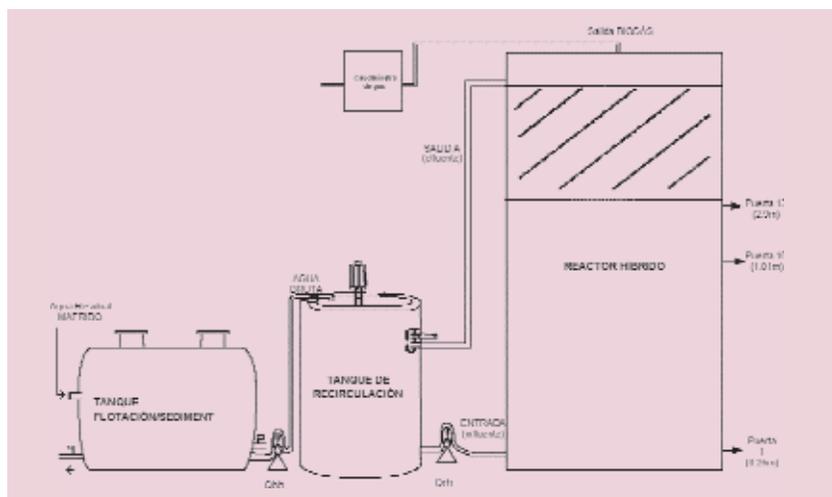


Figura 1. Esquema de la planta piloto instalada.



Figura 2. Fotografía del reactor híbrido.

metanogénica del fango en este primer instante fue de 0,013 kg DQO/kg SSV·d. Se empezó a llenar el reactor con agua de matadero y posteriormente a alimentar el reactor en discontinuo, realizándose varias cargas hasta que subió la producción de gas. Poco a poco la actividad metanogénica del fango del reactor fue aumentando hasta llegar a 0,087 kg DQO/kg SSV·d al cabo de un mes y con el reactor operado a 20°C aproximadamente debido a problemas con el sistema de calentamiento. Una vez ajustada la temperatura del digestor a 35°C, se comenzó la operación en continuo del sistema manteniendo baja la carga (0,76 kg DQO/m³·d aprox.) debido a que la actividad metanogénica era aún baja. Esta actividad fue aumentando hasta alcanzar un valor máximo de 0,29 kg DQO/kg SSV·d (Figura 3).

La carga orgánica aplicada máxima ha sido de 5,07 kg DQO/m³·d y 2,74 kg DQO_{Filtrada}/m³·d, y la carga másica máxima de 0,61 kg DQO_{Filtrada}/kg SV·d. El tiempo de retención hidráulico (HRT) de operación no se ha bajado en ningún momento de 23 horas.

Durante la puesta en marcha y operación los parámetros indicadores del estado del proceso tales como la relación alcalinidad intermedia/alcalinidad parcial, el pH dentro

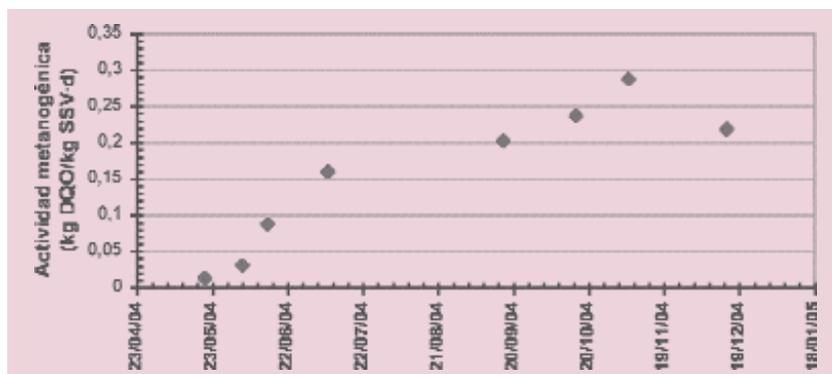


Figura 3. Evolución de la actividad metanogénica del fango del reactor.

del reactor y el rendimiento de eliminación de DQO se han mantenido en valores satisfactorios.

El rendimiento de eliminación de DQO soluble en el reactor ha sido en todo momento muy elevado, llegando hasta un valor máximo de 97% tal como se muestra en la Figura 4, manteniéndose la DQO filtrada de salida por debajo de 300 mg/l. La mayor tasa específica de eliminación de DQO que se ha obtenido ha sido de 0,45 kg DQO_{Filtrada}/kg SV·d.

La alcalinidad intermedia da una estimación de la cantidad de ácidos grasos volátiles (AGV) presentes en el agua, mientras que la alcalinidad parcial estima la cantidad de bicarbonatos. Debido a que la acu-

mulación de AGV consume la alcalinidad de bicarbonato, la relación AI/AP es un indicador de la estabilidad del proceso (Ripley et al., 1986), siendo ésta mayor en situaciones inestables (acumulación AGV). Esta relación es análoga a la relación AGV/Alcalinidad Total utilizado habitualmente para el seguimiento de la digestión anaerobia del fango (WPCF, 1987), aunque la primera es más sensible que esta última.

La relación alcalinidad intermedia/alcalinidad parcial (AI/AP) se ha mantenido en todo momento por debajo de 0,51. De acuerdo al estudio llevado a cabo con el mismo agua residual por Soroa et al.

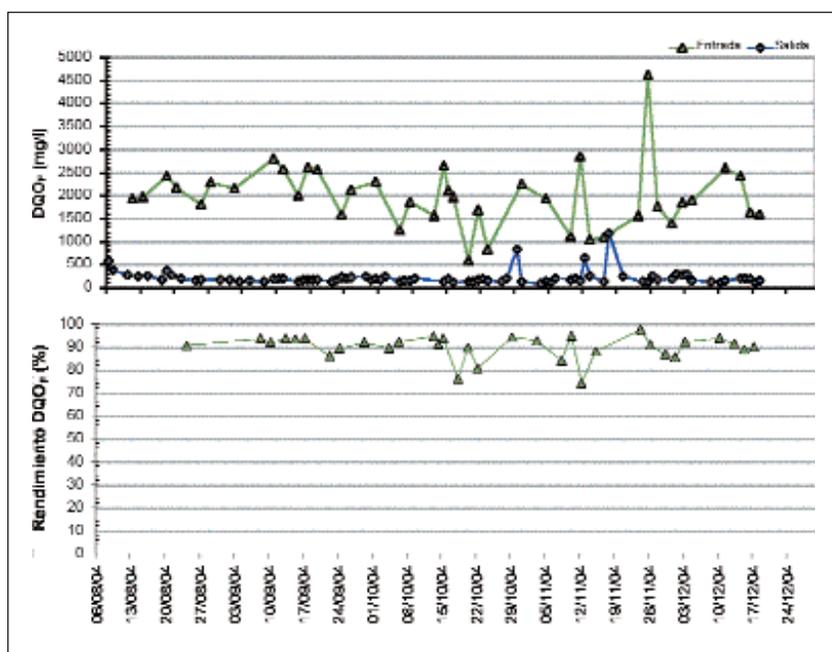


Figura 4. Rendimiento de eliminación de DQO filtrada.

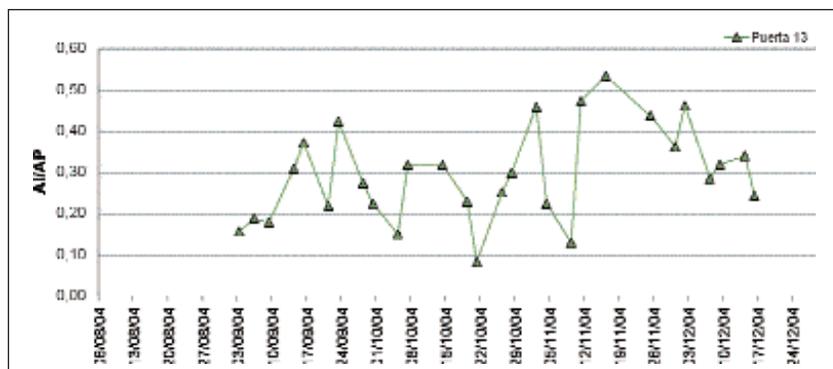


Figura 5. Evolución de la relación AI/AP dentro del reactor.

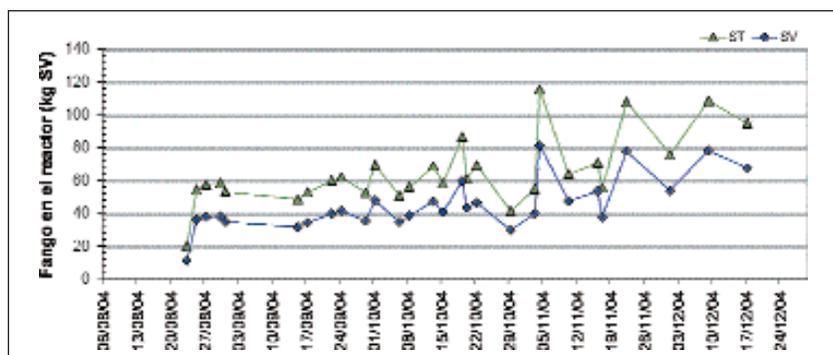


Figura 6. Acumulación de fango en el reactor.

(2005), este valor aún está por debajo del valor al que empeora el estado del proceso (aprox. 1). La **Figura 5** muestra los resultados obtenidos durante el período de operación en continuo y a 35°C de temperatura.

El pH se ha medido on-line y se ha registrado en el autómatas, manteniendo un valor constante en torno a 7 a lo largo de todo el período experimental.

Durante todo el período de operación no se han realizado purgas en el reactor debido a que la cantidad de fango que había dentro del reactor era baja e interesaba que ésta aumentara. La producción de fango estimada ha sido menor de 0,12 kg SV/kg DQO eliminada. En la **Figura 6** se muestra la acumulación de fango en el reactor observada durante el período de operación.

El contenido de fango en el reactor ha sido estimado mediante la realización de perfiles de sólidos. Algunos de estos perfiles se pueden observar en la **Figura 7**.

El fango con el que se ha operado el reactor ha sido mayoritariamente floculento, puesto que el agua residual de matadero no facilita la formación de gránulos. No obstante, el filtro de la parte superior del reactor ha permitido retener los sólidos de forma muy eficiente, lo cual se confirma a la vista de los perfiles de la **Figura 7**. En dicha figura se observan subidas considerables del manto de lodos hasta la parte del filtro como consecuencia de cargas orgánicas elevadas, pero del mismo modo, se confirma por un lado la no presencia de sólidos después del filtro y por otro, la bajada del nivel del manto una vez que la carga orgánica aplicada disminuye.

Si bien la concentración de sólidos en las puertas que están situadas en el relleno ha sido ocasionalmente elevada tal como se ha observado en la primera y tercera gráfica de la **Figura 7** (hasta una concentración de SV de 1,7%), la concentración de

SSV en la salida ha sido inferior a 2.200 mg/l (**Figura 8**).

Por otra parte, debido a las características del relleno utilizado, y a pesar de la alta concentración de sólidos en el agua de entrada en determinados momentos, éste no se ha colmatado. Visualmente se ha podido observar que la mayor parte del fango del relleno se encuentra en suspensión y no adherido, al igual que se observó en un estudio anterior con un reactor híbrido a escala piloto (50 l) tratando el mismo agua residual (Soroa, 2005).

Terminado el de operación en el matadero, se ha llevado el reactor a otra empresa para el tratamiento de agua residual de bodega. En este caso, el reactor se ha inoculado con fango granular, lo que ha llevado a operar el reactor en condiciones un tanto diferentes a las anteriores, especialmente en términos de OR y G/A. El funcionamiento está siendo muy bueno, con rendimientos de eliminación de DQO en torno al 95% y OLR de hasta 8 kgDQO_{Filtrada}/m³·d tras más de 4 meses de operación.

Pese al cambio de determinadas variables de operación y tras pequeños ajustes, el filtro superior está resultando eficiente también en la retención y formación de fango granulado, lo que otorga una versatilidad muy importante al sistema.

4. Conclusiones

Ámbito de aplicación: las diferentes Directivas Europeas han originado un nuevo escenario en el que destaca la importancia de la minimización de la producción de fango biológico en el tratamiento de las aguas residuales. Los sistemas biológicos anaerobios representan una tecnología muy atractiva en el caso de aguas residuales industriales debido a la baja tasa de crecimiento bacteriano que tiene lugar en esas condiciones.

En este contexto, se ha llevado a cabo un proyecto de I+D entre el CEIT y ATM para desarrollar la tecnología del reactor híbrido anaero-

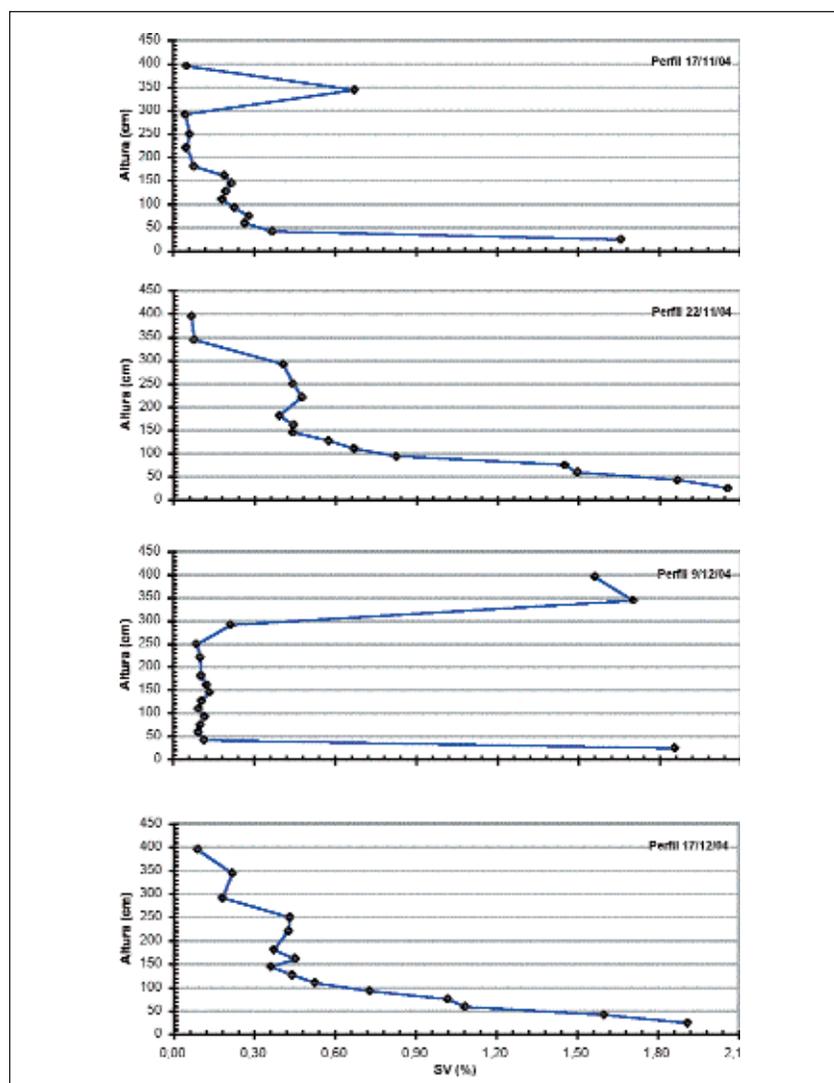


Figura 7. Perfiles de sólidos realizados para el seguimiento del estado del lecho de fango en el reactor.

bio (RHA) como alternativa interesante frente a otros sistemas anaerobios hasta ahora más implantados en el mercado.

RHA frente a otros sistemas anaerobios: El RHA evita por un lado los problemas de obstrucción del filtro anaerobio manteniendo su capacidad de retención de biomasa y por otro, consigue reducir la pérdida de sólidos que presenta un UASB. Además, a diferencia de este último, puede tratar aguas con poca o nula capacidad de granulación ya que trabaja perfectamente con biomasa flocculenta sin necesidad de provocar la granulación del fango.

Diseño de un RHA: se han ajustado los diversos parámetros conoci-

dos de diseño de modo que se consiga un sistema robusto y fácil de operar. Los ajustes realizados han sido principalmente a nivel de ingeniería debido al escalado que ha supuesto la construcción de un RHA de casi 15 m³ de volumen. Se ha prestado especial atención al sistema de alimentación y distribución del influente, así como a detalles relacionados con el filtro y la capacidad de retención de biomasa.

Eficacia del RHA: el RHA ha demostrado ser muy eficaz en la retención de biomasa en el sistema pese a trabajar con valores de OLR de hasta 5 kg DQO/m³ d. Gracias a esto, se ha conseguido una eliminación de materia orgánica (DQO) de hasta el

97%. Esta eliminación ha ido acompañada de una producción de fangos muy baja, menor de 0,12 kg SV/kg DQO eliminada.

Estabilidad: el pH del reactor así como la relación de alcalinidades han indicado un comportamiento muy estable pese a trabajar en condiciones diferentes de carga orgánica. Igualmente, la calidad del agua de salida, tanto en términos de DQO como de sólidos en suspensión ha sido óptima y muy constante.

Versatilidad: se ha comprobado el correcto funcionamiento de un RHA operado con fango flocculento y con fango granular (pese a necesitarse aún más tiempo experimental con fango granular). Esto tiene dos ventajas importantes: por un lado el fango granular permite operar con cargas más elevadas y por otro, el campo de aplicación de la tecnología es más amplio que otras tecnologías anaerobias ya que no depende de que el agua residual a tratar genere o no problemas con la granulación del fango.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a Usoa Urabayen y Sergio Rodríguez todo el trabajo realizado en la operación del reactor en estudio. Agradecen también al Gobierno Vasco la ayuda aportada para la consecución del proyecto.

6. Bibliografía

- [1] Batstone, D.J. (1999). High rate anaerobic treatment of complex wastewater. Ph.D. Thesis. University of Queensland.
- [2] Bello-Mendoza, R.; Castillo-Rivera, M.F. (1998). Start-up of an anaerobic hybrid (UASB/Filter) reactor treating wastewater from a coffee processing plant. *Anaerobe* 4, 219-225.
- [3] Di Berardino, S.; Bersi, R.; Converti, A.; Rovatti, M. (1997). Starting up an anaerobic hybrid filter for the fermentation of wastewater from food industry. *Bioprocess Engineering* 16, 65-70.
- [4] Elmitwalli, T. (2000). Anaerobic Treatment of Domestic Sewage

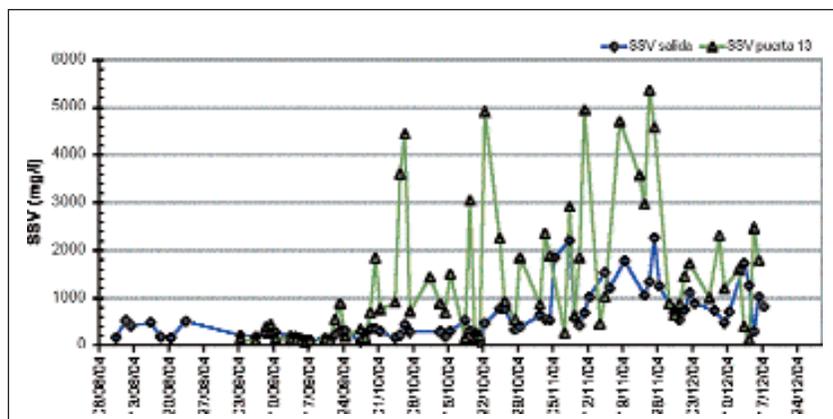


Figura 8. Concentración de sólidos volátiles en las muestras de la puerta 13 (antes del relleno) y salida.

at Low Temperature. Ph.D. Thesis. Wageningen University.

[5] Guiot, S.R.; van den Berg, L. (1984). Performance and biomass retention of an upflow anaerobic reactor combining a sludge blanket and a filter. *Biotechnology Letters* 6 (3), 161-164.
 [6] Hawkes, F.R.; Donnelly, T.; Anderson, G.K. (1995). Comparative performance of anaerobic

digesters operating on ice-cream wastewater. *Wat. Res.* 29 (2), 525-533.

[7] Ripley, L.E., Boyle, W.C. and Converse, J.C. (1986). Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *Journal WPCF* 58 (5), 406-411.
 [8] Soroa, S. (2005). Estudio experimental en planta piloto y mo-

delización matemática de un Reactor Híbrido Anaerobio para el tratamiento de agua residual de matadero. Tesis doctoral. Universidad de Navarra.

[9] Soroa, S., Gómez, J., García-Heras, J.L. (2005). Experimental study of an Anaerobic Hybrid Reactor treating slaughterhouse wastewater. *Bioresource Technology* (enviado).
 [10] Tilche, A., Vieira, S.M.M. (1991). Discussion report on reactor design of anaerobic filters and sludge bed reactors. *Wat. Sci. Tech.* 24 (8), 193-206.
 [11] Tur, M.Y.; Huang, J.C. (1997). Treatment of phthalic waste by anaerobic hybrid reactor. *Journal of Environ. Eng.* (11) 1093-1099.
 [12] WPCF, 1987. Anaerobic sludge digestion. Manual of practice N° 16. Operation and maintenance.

RECOMENDACIONES A LOS AUTORES DE ARTICULOS

La revista *Tecnología del Agua* tiene como objetivo esencial la divulgación e intercomunicación entre todas aquellas personas y entidades vinculadas al mundo del agua. Por lo tanto, en la presentación de los trabajos es necesario tener en cuenta

un conjunto de exigencias habituales en el periodismo científico-técnico relacionadas con la forma y el contenido de esos artículos. A continuación relacionamos algunas normas con el fin de facilitar la publicación de los artículos.

1. El título, con el correspondiente subtítulo, no debe sobrepasar en total los 100 espacios.
2. Deberán figurar el nombre y dos apellidos del autor o autores, su titulación y/o cargo en el organismo o empresa al que pertenezcan, dirección completa, teléfono de contacto, fax, e-mail y web.
3. Al inicio del artículo se incluirá un breve resumen de no más de 100 palabras en castellano y su traducción, junto con la del título y subtítulo, en inglés. También las palabras claves (de 5 a 10) del artículo y su traducción en inglés.
4. El texto seguirá una línea de explicación coherente y progresiva, contando de partes con subtítulos enumerados, que habitualmente empiezan con una introducción al tema para pasar a su estudio pormenorizado, terminando con las conclusiones, a modo del resultado, del estudio. Finalmente se relacionará la bibliografía o aquellos textos cuya lectura se recomienda.
5. El artículo se redactará evitando el lenguaje académico o excesivamente denso, sin por ello dejar de mantener un rigor conceptual, explicando cuando convenga aquellos términos o conceptos de uso poco habitual.
6. Preferentemente se utilizarán frases y párrafos cortos. También se evitará en lo posible la inclusión de notas a pie de página, incorporándolas dentro del texto.
7. Se cuidará la correcta expresión de las unidades, símbolos y abreviaciones.
8. El texto tendrá una extensión de unas 5-15 hojas, formato DIN A4, mecanografiadas a doble espacio.
9. Preferentemente se incluirán gráficos, esquemas, dibujos o fotografías en color para facilitar la comprensión del texto, procurando que tengan suficiente calidad gráfica para su reproducción directa. Cada figura llevará su número y pie explicativo. Si las fotografías y gráficos son enviados por e-mail, disquette, CD-Rom..., deben tener

un mínimo de 300 ppp (píxeles por pulgada) de resolución y en formato .jpg, .tiff o .bmp, preferentemente.

10. El artículo debe remitirse sobre papel, soporte informático (CD-Rom, disco óptico, disquette, zip, etc.) escrito en Word, Wordperfect o compatibles, o e-mail. Se agradecerá que las gráficas también se graben independientemente del texto, además de incluirse en el archivo de texto. Los artículos deberán dirigirse al Director Técnico o Jefe de Redacción de la revista *Tecnología del Agua*, a la dirección o correo electrónico siguiente:

r
 Dtor. de la revista
Tecnología del Agua
 Entença, 28 entl.
 08015 Barcelona España
 E-mail: r.vinagre@rbi.es