

# Aplicación de la tecnología SBR para el tratamiento de aguas residuales domésticas

S.Macé, J. Mata-Álvarez

Departamento de Ingeniería Química  
Universidad de Barcelona

## Summary

The objective of the present study is to give an overall vision of SBR (Sequencing Batch Reactors) technology as an alternative way for treating domestic and municipal wastewaters. This technology has been gaining popularity through years, mainly due to its single-tank design and the ease of its automatation. There are a lot of cases in literature dealing with the treatment of this kind of effluents with this technology, wether a lab-scale, pilot scale or industrial scale. Thus, this paper includes relevant experiments found in literature concerning domestic wastewater treatment. There is also a special attention given to an application that has been studied recently: the use of this technology in wastewater treatment plants, concretely for the treatment of the reject water found after anaerobic digesters, which contains high concentrations of ammoniacal nitrogen.

## Introducción

Un reactor secuencial discontinuo es un sistema de tratamiento de fangos activados cuyo funcionamiento se basa en una secuencia de ciclos de llenado-vaciado. Las etapas unitarias que intervienen son idénticas a las de un proceso convencional de fangos activados, ya que en los dos sistemas intervienen la aireación y la sedimentación-clarificación. La diferencia es que en las plantas convencionales estas etapas tienen lugar en tanques separados, mientras que en los SBR tienen lugar secuencialmente en un mismo tanque.

La investigación en reactores SBR empezó el año 1971 (Irvine y Davis), más o menos simultáneamente al desarrollo de otros sistemas discontinuos (por ejemplo, Goronszy, 1979). De hecho, ya en el año 1914, los reactores de fangos activados diseñados por Arden y Lockett se operaban siguiendo los principios de la tecnología SBR.

Una de las ventajas de estos sistemas no estacionarios es que pueden adaptarse fácilmente a las continuas variaciones de las concentraciones de contaminantes (Irvine et al., 1997). Aplicando balances de materia a los sistemas no estacionarios se puede modelizar este comportamiento inherente a las variaciones de los caudales volumétricos, la composición y la concentración de contaminantes (Irvine y Ketchum, 1988). Con el desarrollo de los PLC (Pro-

grammable Logic Controllers), y el aumento en la confianza en estos sistemas, la tecnología SBR se ha popularizado notablemente. De hecho, el tratamiento con este tipo de reactores puede conducir a una calidad superior de los efluentes en comparación con la obtenida mediante tratamientos convencionales. Además, permite operar en un amplio intervalo de variaciones hidráulicas en los caudales y de cargas orgánicas del agua residual a tratar. La Tabla 1 presenta algunas ventajas adicionales de esta tecnología. Todas estas características se detallan en el artículo de Ketchum (1997), donde se exponen con sencillez y claridad el diseño y las características físicas de estos sistemas, así como los factores a tener en cuenta según los objetivos específi-

<p>Menor coste que en los sistemas convencionales de tratamiento Menor requerimiento de espacio comparado con los sistemas convencionales Adaptable a grandes variaciones en las cargas hidráulicas y orgánicas Mejor control del crecimiento de microorganismos filamentosos y de los problemas de sedimentación Menos equipos que mantener Se requiere una menor atención del operario Gran flexibilidad de operación La biomasa no puede escapar Una mala sedimentación puede reconocerse y corregirse Se pueden rellenar con materiales que actúen de soporte para la biomasa</p>
---

Tabla 1. Ventajas del sistema SBR

cos del tratamiento.

La gran cantidad de referencias en la bibliografía, junto con la reciente celebración del *2nd International Symposium on Sequencing Batch Reactor Technology* en Narbonne, Francia demuestran la importancia que esta tecnología está adquiriendo en la actualidad.

Una prueba de la elevada eficacia y versatilidad de estos reactores recae en el hecho de que con los SBR se ha trabajado en casi todos los ámbitos del tratamiento de efluentes residuales. Este artículo se centra en la descripción de estos sistemas así como en el estudio de trabajos realizados con reactores secuenciales discontinuos en el campo del tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales. Por último, se describe una aplicación que ha suscitado un notable interés: el tratamiento de sobrenadantes de digestores anaerobios de depuradora con SBRs para la eliminación del nitrógeno amoniacal.

## Descripción del Reactor Secuencial Discontinuo

El SBR pertenece al grupo de reactores de llenado-vaciado. Se llena y se vacía en un periodo definido de tiempo. Un ciclo del reactor consta de las fases de alimentación, reacción, sedimentación, decantación y reposo (opcional). Este ciclo se va repitiendo continuamente, lo que convierte al SBR en un sistema extremadamente flexible, dado que se puede variar la duración de cada fase en función de los objetivos del tratamiento. Además, las fases de alimentación y reacción pueden ser estáticas, en mezcla o aireadas. Así, se pueden modificar las condiciones aerobias, anóxicas y anaerobias para conseguir la eliminación específica de contaminantes.

Como es sabido, en el tratamiento biológico de aguas residuales tienen lugar una gran variedad de fenómenos, entre los cuales cabe citar la degradación de la materia orgánica (que puede ser aerobia, anóxica o

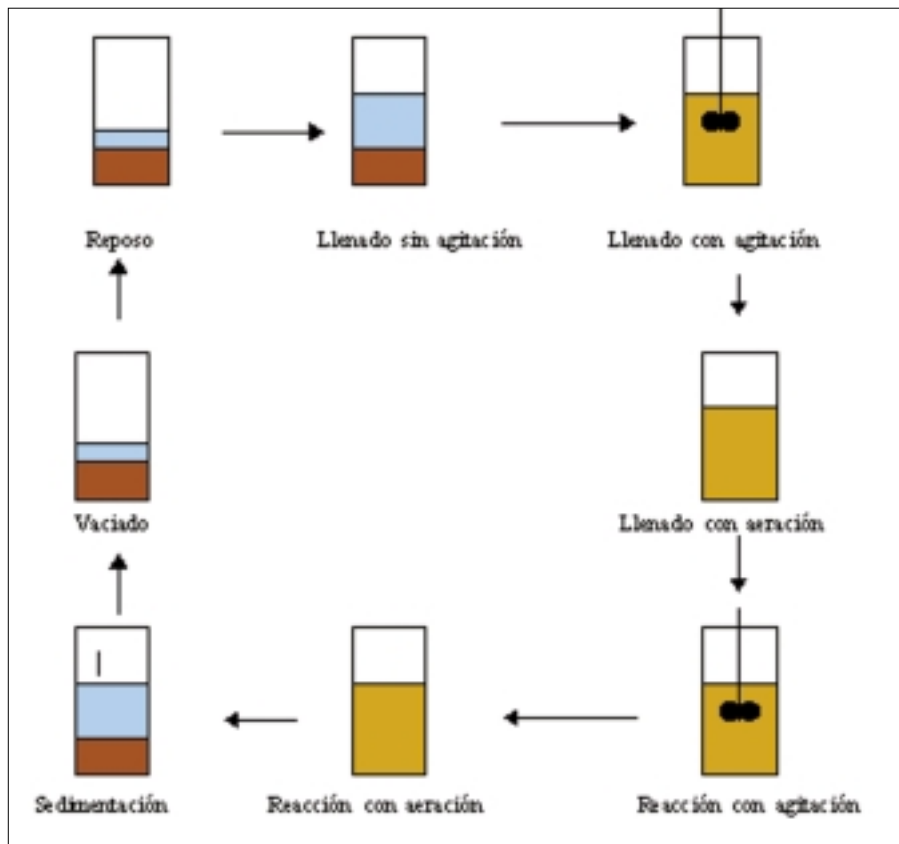


Figura 1.

anaerobia), la eliminación de nitrógeno por el proceso de nitrificación-desnitrificación y la eliminación de fósforo. Todos estos procesos requieren la presencia de una gran variedad de microorganismos que se pueden desarrollar en el SBR adecuando las condiciones de trabajo.

La Figura 1 muestra el esquema de un ciclo completo de este tipo de reactores.

En la etapa de alimentación se realiza la adición del influente. Según el objetivo del tratamiento, la adición puede ser estática, en mezcla o aireada, al igual que la fase de reacción.

Así, por ejemplo, si lo que se desea es conseguir una reducción del carbono orgánico y de los sólidos suspendidos, así como una nitrificación, debe aumentarse el tiempo de reacción aireada para asegurar la oxidación del amoníaco (Ketchum et al., 1979). Por lo contrario, si en lugar de nitrificación, el objetivo es la desnitrificación, es necesario un periodo

**El SBR pertenece al grupo de reactores de llenado-vaciado. Se llena y se vacía en un periodo definido de tiempo. Un ciclo del reactor consta de las fases de alimentación, reacción, sedimentación, decantación y reposo (opcional). Este ciclo se va repitiendo continuamente, lo que convierte al SBR en un sistema extremadamente flexible, dado que se puede variar la duración de cada fase en función de los objetivos del tratamiento**

de reacción con agitación sin aeración después de la reacción aireada para poder eliminar los nitratos.

En cuanto al diseño de estos reac-

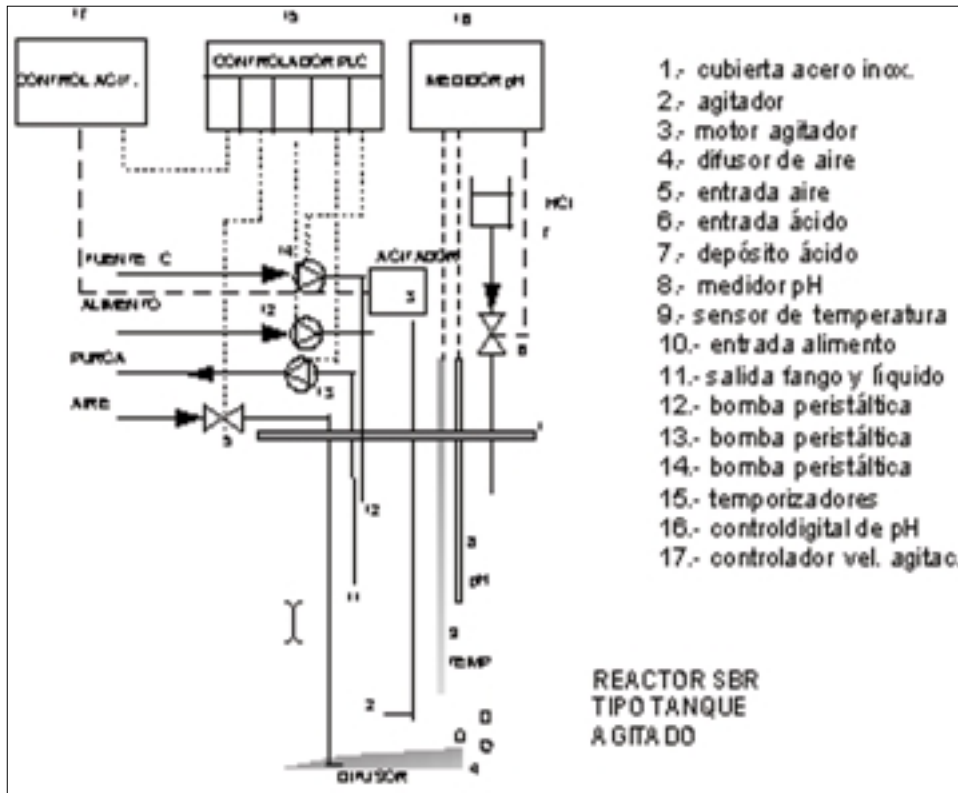


Figura 2

tores, como ya se ha comentado en la introducción, los sistemas SBR no son como los convencionales de flujo continuo, ya que la estabilización de los caudales entrantes, las reacciones biológicas y la sedimentación de la biomasa tienen lugar en un mismo tanque y no en tres tanques diferentes. Además, no es necesaria ninguna recirculación de fangos entre los mismos. Estas características, junto con otras relativas al diseño, dotan al SBR de una serie de ventajas algunas de las cuales se citan en la Tabla 1. Por otra parte, el sistema puede ser diseñado con un solo tanque o más colocados en paralelo. El número de tanques necesarios se determina principalmente en función del diseño de los caudales de entrada. Los tanques SBR múltiples son muy comunes en los tratamientos de efluentes municipales e industriales, y en sistemas donde la alimentación no puede solaparse con las fases de sedimentación y decantación.

### Componentes de un sistema SBR

Los principales componentes de un sistema SBR son el reactor, los

**Para optimizar la duración de las fases y el número de ciclos diarios necesarios deben realizarse experimentos previos hasta conseguir una configuración que proporcione el mayor rendimiento de eliminación con el menor tiempo posible**

sistemas de entrada, salida y aeración y el controlador.

**Reactor:** Los tanques acostumbran a ser relativamente profundos, sin que la relación entre el ancho y la longitud sea importante. Los reactores para el tratamiento de aguas residuales municipales normalmente son de hormigón, aunque algunos de ellos y los industriales son de hierro y cilíndricos, dotados del oportuno control para evitar corrosiones.

**Sistema de aireación:** Muchos sistemas SBR están diseñados para utilizar sistemas de aireación por inyección, aunque también se pueden utilizar sistemas difusores o mecánicos de aireación.

**Sistemas de bombeo:** El influente se bombea directamente al reactor SBR a través de sistemas con válvulas automáticas.

**Controladores automáticos:** Pueden ser sencillos, diseñados para operar mediante un temporizador y controladores del nivel del líquido. Este tipo de control está favorecido en sistemas pequeños y en sistemas donde los caudales y las características del influente son previsibles. Otros sistemas de control más complejos permiten una mejor conservación de la energía, el uso de tanques más pequeños y un control más preciso.

La Figura 2 muestra de forma esquemática un reactor SBR de laboratorio

### Optimización del ciclo de un SBR

De la comparación de los diversos ejemplos de la bibliografía examinada y más adelante comentada, se deduce que no se puede establecer un ciclo determinado como el adecuado para cualquier caso. Para optimizar la duración de las fases y el número de ciclos diarios necesarios deben realizarse experimentos previos hasta conseguir una configuración que proporcione el mayor rendimiento de eliminación con el menor tiempo posible. También debe examinarse la posibilidad de añadir nutrientes para el control del pH. Las aguas urbanas, sin embargo, requieren pocas adiciones de compuestos químicos ya que contienen muchos nutrientes y tienen una elevada alcalinidad.

En la optimización del tiempo dedicado a cada fase, deben considerarse factores como los siguientes:

-La sedimentación de biomasa depende de la concentración de la misma en el medio (una concentración inicial de 2 mg/L conduce a una concentración de la capa de biomasa

sedimentada de 8 mg/L). Para reactores poco profundos es adecuado un tiempo de sedimentación de 0.5h y para tanques profundos, 0.75h. Para asegurar una sedimentación completa se recomiendan tiempos de 1h.

-La fase de decantación se diseña en base a la capacidad hidráulica de decantación y la calidad del decantador. El tiempo adecuado es de una hora, pudiendo ser mayor en sistemas grandes.

-La fase de reacción se diseña en base a los objetivos del tratamiento, las constantes cinéticas de reacción, el tiempo de aireación durante la alimentación y la necesidad o no de una fase de reacción en mezcla. Es por este motivo que los tiempos varían de 1.5 a 3h.

-La fase de reposo se diseña en base a la necesidad de estabilizar los caudales y a la incertidumbre asociada a las fluctuaciones de éstos. El tiempo de esta fase es muy corto (pocos minutos) si se conocen bien las fluctuaciones.

-Se recomiendan tiempos de retención hidráulicos (TRH) de unas 12 horas si se desea alcanzar una reducción total del carbono orgánico y de los sólidos suspendidos y de 18 a 24 horas cuando los caudales son muy variables y se requiere la eliminación biológica de fósforo, nitrificación y desnitrificación.

Lo más normal es operar a razón de aproximadamente tres ciclos por día, con una duración de ciclo de 6 a 24h.

## Algunos ejemplos

Se ha realizado un extenso estudio bibliográfico para encontrar casos que ilustren todo lo que se ha comentado sobre esta tecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales urbanas.

Entre todos los ejemplos encontrados, se van a exponer algunos de ellos, divididos en experimentos a nivel de laboratorio, de planta piloto y a escala industrial. En todos ellos, se refleja la efectividad del sistema en base a los elevados porcentajes de reducción obtenidos con una ins-

---

***Conviene también mencionar que la tecnología SBR no sólo se ha utilizado para tratar efluentes líquidos (aguas residuales municipales), sino también para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos***

---

talación muy sencilla como es el SBR.

## Nivel de laboratorio

Los experimentos realizados a nivel de laboratorio con SBR son muchos y muy diversos, empezando a ser abundantes a partir del año 1995.

De Sousa y Foresti (1996), por ejemplo, propusieron un sistema combinado para el tratamiento de aguas residuales domésticas en regiones tropicales: un sistema aerobio-anaerobio combinado formado por un reactor UASB y un SBR. En un sistema así, el UASB elimina buena parte de la materia orgánica del influente, mientras que el SBR oxida la materia orgánica restante y el amonio. Para estudiar la viabilidad de tal sistema, los autores trabajaron a nivel de laboratorio en una instalación alimentada con sustrato sintético, de composición similar a la de las aguas residuales urbanas. Se operó durante 38 semanas y se encontró que, con ciclos de cuatro horas de duración, los resultados eran buenos. Éstos confirmaron las hipótesis iniciales, es decir, se obtuvieron efluentes de elevada calidad (DBO<sub>5</sub> y SSV de concentraciones inferiores a 10mg/l) y eliminaciones de 95% de DQO, 96% de SST y 85% de nitrógeno total. Además, los resultados indicaron que un sistema como éste es capaz de competir con los sistemas aerobios convencionales en los aspectos de consumo de energía, excesiva producción de fangos y eli-

minación de nutrientes.

Otro estudio de interés y parecido al descrito anteriormente, es el que realizaron Umble y Ketchum (1997), que también trataron agua residual municipal con la tecnología SBR. La flexibilidad de este sistema proporcionó el tratamiento biológico necesario, es decir, la oxidación de la materia orgánica, la eliminación de los sólidos en suspensión y una nitrificación con resultados muy notables: hubo una disminución del 98% de DBO<sub>5</sub>, un 90% de reducción de los SST y un porcentaje de nitrificación de 89%. En este caso, la duración óptima de los ciclos resultó ser de 12 horas.

Dockhorm et al. (2000) estudiaron la eliminación de la DQO de una agua residual municipal en un periodo de dos años y medio, comparando tres tipos de reactor con el fin de determinar la influencia del modelo de flujo. El SBR consiguió muy buenos resultados. Por otra parte, se concluyó que el rendimiento de eliminación de la DQO es mejor cuanto más se acerca el modelo de flujo al de pistón.

Conviene también mencionar que la tecnología SBR no sólo se ha utilizado para tratar efluentes líquidos (aguas residuales municipales), sino también para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos. Como ejemplo, están los experimentos realizados por Chang et al. (1994), que estudiaron la digestión de los residuos sólidos urbanos en un SBR anaerobio, con un tiempo de residencia hidráulico de 10 días y una velocidad de descarga de sólidos volátiles de 0.8 a 1.5 g SV//d a 35°C. Los ciclos constaban de tres o cuatro días y la eliminación de materia orgánica fue superior al 90%. El tratamiento tuvo lugar en un reactor SBR anaerobio, y no según los métodos convencionales, ya que, en éstos, los microorganismos anaerobios son muy susceptibles a las condiciones ambientales. Así, con la tecnología SBR el proceso permitió mantener una elevada concentración de bacterias metanogénicas, evitando los problemas operacionales que se dan en el método convencional.

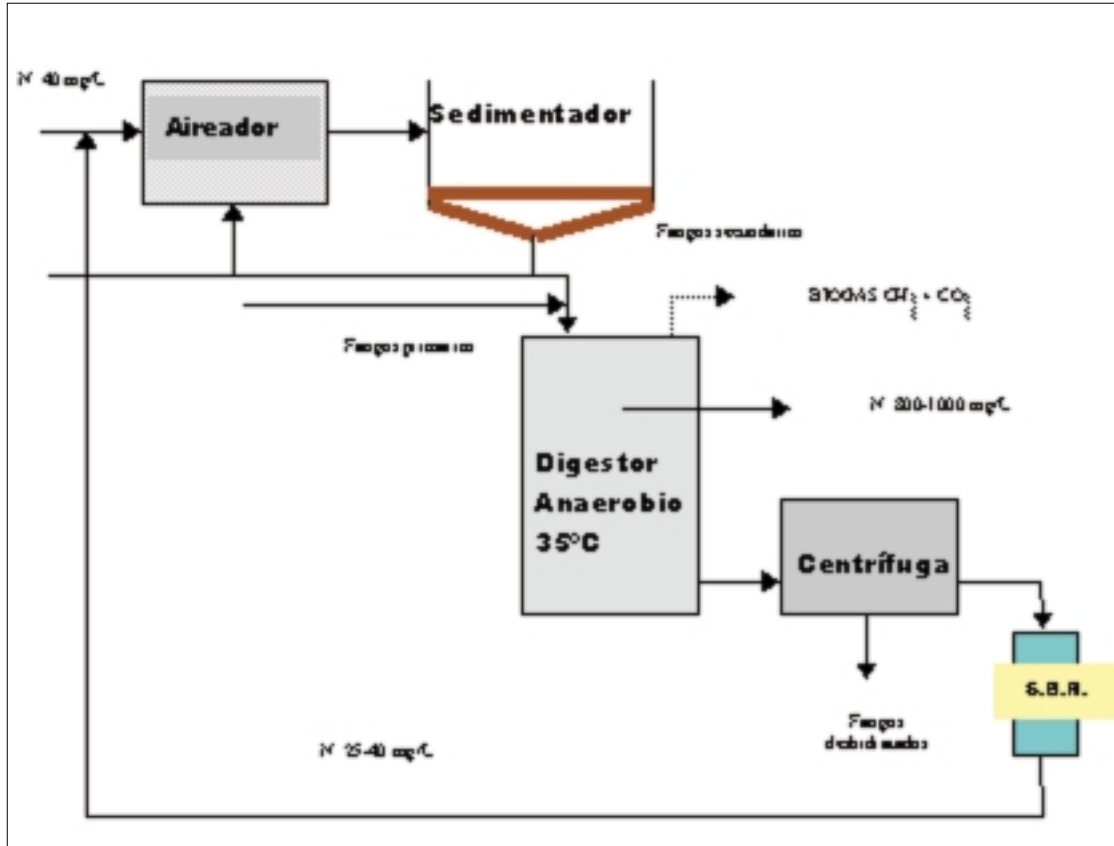


Figura 3

## Experimentos a nivel de planta piloto

La eficacia de esta tecnología no sólo ha sido demostrada a través de experimentos en laboratorio, sino que también se han conseguido tratamientos eficaces en experimentos a nivel de planta piloto.

Bernardes y Klapwijk (1996), por ejemplo, llevaron a cabo una investigación para eliminar el nitrógeno y el fósforo de una agua residual doméstica, presedimentada y procedente de la planta depuradora de Bennekom (Holanda), con capacidad equivalente a 22.000 habitantes. El experimento tuvo lugar a nivel de planta piloto, con un sistema SBR formado por dos tanques cilíndricos de volúmenes de  $0.35 \text{ m}^3$  y  $1.3 \text{ m}^3$ , respectivamente. La composición del influente era la siguiente:  $443 \text{ mg/l}$  de DQO,  $71 \text{ mg/l}$  de N total y  $7 \text{ mg/l}$  de P total. Con el fin de incrementar el contenido en DQO fácilmente biodegradable en  $100 \text{ mg/l}$ , se añadió ácido acético. La operación con el reactor SBR duró cinco meses, con ciclos de cua-

***La eficacia de esta tecnología no sólo ha sido demostrada a través de experimentos en laboratorio, sino que también se han conseguido tratamientos eficaces en experimentos a nivel de planta piloto.***

tro horas para optimizar la oxidación de la materia orgánica, la nitrificación, la desnitrificación y la eliminación biológica de fósforo. El primer reactor era operado según tres etapas (alimentación con mezcla, reacción con mezcla y vaciado) y el segundo reactor según siete etapas (reacción con mezcla, alimentación con mezcla, reacción aireada, sedimentación, reacción aireada, sedimentación y vaciado). Se obtuvo un efluente con una concentración de fósforo inferior

a  $1 \text{ mg/L}$  y una concentración de nitrógeno inferior a  $12 \text{ mg/L}$ . Los buenos resultados obtenidos por estos autores se hubieran podido mejorar aún más a nivel económico, si en lugar de añadir ácido acético como fuente de carbono biodegradable, hubieran empleado una fuente de carbono residual, tal como lo hicieron Beccari et al (1998) con una agua residual urbana procedente de la planta de tratamiento de Fusina (Venecia). Estos autores estudiaron la posibilidad de utilizar la DQO obtenida a partir de la fermentación

acidogénica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, tal que los ácidos orgánicos producidos actuaran como donadores de electrones en el proceso de desnitrificación. El estudio, al igual que en el caso anterior, se realizó con un SBR a nivel de planta piloto. Los resultados obtenidos demostraron una mejora en la velocidad de desnitrificación y en la flexibilidad del sistema en frente a descargas elevadas, y, lo más importante, mostraron la posibilidad de utilización de efluentes residuales como sustitutos del ácido acético u otras fuentes de carbono fácilmente biodegradable, para eliminar cantidades importantes de nutrientes a través de los procesos de desnitrificación y defosfatación. Este ahorro de reactivos también puede conseguirse acoplando el reactor SBR a otros reactores: en el estudio de Rustrián et al. (2000) se ha tratado agua residual municipal mediante un digestor anaerobio de dos etapas (acidogénesis + desnitrificación y metanogénesis) seguido de un SBR. Así, los ácidos grasos volátiles producidos en el

reactor acidogénico se usaron como fuente de carbono para la defosfatación biológica en el SBR. Los beneficios de este sistema fueron, de nuevo, el ahorro de una fuente de carbono externa para la desnitrificación y la defosfatación.

## Escala industrial

En lo relacionado con experimentos a escala industrial, cabe decir que en Alemania la tecnología SBR se aplica en un 1,3% de las plantas de tratamiento (Teichgräber et al, 2001). Por ejemplo, en Baviera, una gran cantidad de plantas depuradoras de pequeño tamaño utilizan esta tecnología. En el artículo de Teichgräber et al, se describe una especie de guía creada para hacer más fácil el diseño de las plantas SBR.

Para ilustrar la eficacia del SBR a escala industrial, se han seleccionado dos ejemplos: el primero, en el que Steinmetz (2000) demuestra la eficacia de dos plantas SBR municipales, diseñadas para poblaciones equivalentes de 15.000 y 25.000, respectivamente. Los resultados obtenidos demuestran que la tecnología SBR produce efluentes de concentraciones muy estables, aun en periodos de altas cargas orgánicas. El segundo, también ilustrativo, es el estudio de Keller et al (2001), donde se describe una eliminación completa de nutrientes en una planta SBR a escala industrial que trata agua residual urbana.

## Sobrenadantes de digestores anaerobios

En las plantas depuradoras, el centrado resultante de la centrifugación de los fangos utilizados en el digestor anaerobio contiene normalmente un 25% del nitrógeno total descargado en la entrada de la planta, y en la mayoría de los casos este sobrenadante se recircula a cabecera de planta para su tratamiento. Esta recirculación es necesaria puesto que estas aguas acostumbran a tener entre unos 800 y 1000 mg/l de nitrógeno amoniacal y una concentración considerable de DQO.

---

***Un tratamiento separado de este agua residual tan particular puede representar una técnica complementaria que puede dar lugar a un ahorro de costes y superficie significativos con una eficacia de tratamiento muy elevada***

---

Para explicar la elevada concentración de nitrógeno amoniacal de esta agua residual debe tenerse en cuenta que si, por ejemplo, la carga diaria de nitrógeno es de 10 g N por habitante, entre un 30 y un 40% de éste se incorpora en forma de material particulado al tratamiento de fangos. Durante la digestión de éstos, un 50% de N es liberado en forma de ion amonio. Esto provoca que la carga de nitrógeno en el centrado sea de un 15-20% de la carga total de N.

Dependiendo de las condiciones, es relativamente frecuente la presencia de problemas originados por la insuficiente eliminación del nitrógeno en las aguas residuales tratadas en estaciones depuradoras, dotadas de digestores anaerobios de fangos. Esto es así ya que la recirculación a cabecera de planta causa situaciones de sobrecarga de ion amonio. La eliminación de este nitrógeno puede conseguirse alimentando el centrado a la corriente principal solo durante periodos de poca carga, por ejemplo durante la noche. Otra posibilidad es que en la planta se disponga de un volumen adicional de los tanques de aireación, hecho que representa un elevado coste adicional (Ghyoot et al, 1999).

Sin embargo, un tratamiento separado del centrado rico en nitrógeno amoniacal representaría una reducción tanto de los costes como del espacio. Son varias las opciones posibles para su tratamiento. Una de

ellas, por ejemplo, es la precipitación de los nutrientes presentes en forma fosfato de magnesio y amonio (Janus et al., 1997). La precipitación es factible pero costosa debido a la necesidad de productos químicos y al centrifugado y secado del precipitado. El "stripping" con aire es otra posibilidad, también más costosa que el tratamiento biológico, debido a que se trata de un proceso complejo al que hay que sumar el coste de los productos químicos y la conversión de la solución de sulfato de amonio en un producto fertilizante (Siegrist, 1996).

De acuerdo con estas consideraciones, el tratamiento biológico parece ser la mejor opción. Una de las alternativas que merece ser considerada es la utilización del SBR para el tratamiento de esta agua residual altamente concentrada en nitrógeno amoniacal. La Figura 3 representa esquemáticamente los problemas que se solventan con la inserción de un SBR a la salida de la centrífuga.

Por ejemplo, en dos casos encontrados en la bibliografía, en que comparan la utilización de un SBR y de un SBBR (SBR con biofilm) para el tratamiento de sobrenadantes de digestores anaerobios, se describen rendimientos muy buenos (Arnold et al., 2000; Vandaele et al., 2000). Los dos autores afirman que los dos sistemas son aplicables al tratamiento de este tipo de efluentes. En concreto, se describen eliminaciones de nitrógeno amoniacal de más del 90%. Sin embargo, debido al elevado valor inicial de pH del centrado y la rápida pérdida de alcalinidad durante la nitrificación, señalan la necesidad de un control del proceso. Una de las opciones de control podría ser a través del pH con medidas hechas "on-line".

Finalmente señalar que de estos resultados y en general de los distintos estudios realizados en el área de los SBR, se puede afirmar que un tratamiento separado de esta agua residual tan particular, puede representar una técnica complementaria que puede dar lugar a un ahorro de costes y superficie significativos con una eficacia de tratamiento muy elevada.