

Tecnologías de biopelícula innovadoras para la depuración de aguas residuales: veinticinco años de investigación del Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria

JUAN IGNACIO TEJERO MONZÓN (*), ANA LORENA ESTEBAN-GARCÍA (**), LOREDANA DE FLORIO (***), RUBÉN DÍEZ MONTERO (****), AMAYA LOBO GARCÍA DE CORTÁZAR (*****) y LETICIA RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ (*****)

RESUMEN En los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales la biomasa, o conjunto de organismos que se encargan de llevar a cabo la eliminación de los contaminantes, puede encontrarse en suspensión en el seno del líquido (como en la tecnología de fangos activos) o fijada en un soporte (tecnología de biopelícula). A pesar de que históricamente la tecnología de biopelícula fue inicialmente la dominante, a partir de los años 50 del siglo XX la balanza se inclinó hacia los fangos activos, debido a su supuesta facilidad de operación y mejor calidad del efluente. En los últimos años nuevos avances han conseguido recuperar la popularidad de los procesos de biopelícula. En ese marco, el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria, desde su nacimiento hace más de dos décadas, ha trabajado en la investigación y desarrollo de tecnologías de depuración basadas en procesos de biopelícula. El presente artículo resume la experiencia del grupo en este ámbito, que incluye el desarrollo de reactores innovadores de lecho aireado sumergido con y sin membranas de (micro)filtración, procesos de biopelícula soportada y oxigenada por membranas y sistemas integrados, híbridos y combinados, para la eliminación de nutrientes. La tecnología de lecho aireado sumergido, especialmente en configuración híbrida, así como los lechos de fangos (combinados con procesos biopelícula) permiten incrementar la concentración de biomasa y proporcionan una solución atractiva para ampliación de plantas existentes. En combinación con membranas de filtración se consigue un efluente apto para la reutilización o para vertidos muy exigentes. Por otro lado, la posibilidad de airear directamente (por difusión) a través de membranas hidrófobas la biomasa adherida a ellas, constituye una ventaja energética revolucionaria. Se describen las tecnologías desarrolladas en este campo y los resultados de su evaluación, tanto experimental como por modelización, desde el trabajo con reactores de laboratorio y de bancada hasta plantas piloto tratando agua residual real.

LATEST DEVELOPMENTS IN BIOFILM TECHNOLOGIES FOR WASTEWATER TREATMENT: TWENTY FIVE YEARS OF RESEARCH OF THE ENVIRONMENTAL ENGINEERING GROUP (UNIVERSITY OF CANTABRIA, SPAIN)

ABSTRACT Biological wastewater treatments are based on the use of active biomass, or set of organisms, in charge of carrying out the removal of contaminants. The biomass can be dispersed in suspension within the bulk liquid (activated sludge processes) or attached to a support media (biofilm processes). Biofilm technology was historically the first to be spread and applied. Nevertheless, since the 1950s, activated sludge technology gained more and more popularity given the supposed operation simplicity and higher quality of the effluent. Recently, new developments pushed forward the biofilm technology again. In this context, the Environmental Engineering Group of the University of Cantabria, since its foundation more than 2 decades ago, has been working on research and development of innovative wastewater treatment technologies based on biofilm. In this article, the know-how of the Group is illustrated, including the development of innovative submerged fixed bed reactors with and without (micro)filtration membranes, processes of biofilm supported by and aerated through membranes, as well as integrated systems (hybrid or combined) aimed at nutrient removal. Submerged aerated fixed film technologies, especially in hybrid configuration, as much as sludge blanket reactors (combined with biofilm processes) allow for increasing biomass concentration and may provide an attractive solution to upgrade existing WWTP. In combination with membrane filtration, they produce an effluent suitable for reuse or discharge in sensitive areas. On the other hand, the possibility of aerating (diffusing the gas) directly through the membrane lumen into the biomass thereby grown, without need of oxygenating the whole wastewater flow to be treated, may be a real energetic paradigm shift. The developed technologies are here described alongside their experimental and modeling assessment, ranging from laboratory and bench scale up to pilot scale systems treating real municipal wastewater.

(*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de Ingeniería Ambiental. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. E-mail: juan.tejero@unican.es

(**) Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Profesora del Área de Tecnologías del Medio Ambiente. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. E-mail: analorena.esteban@unican.es

(***) Dra. en Ingeniería Ambiental. Investigadora Contratada Post-doctoral. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. E-mail: loredana.deflorio@unican.es

(****) Ingeniero Industrial. Máster en Ingeniería Ambiental. Investigador Contratado Pre-doctoral. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. E-mail: ruben.diezmontero@unican.es

(*****) Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Profesora del Área de Tecnologías del Medio Ambiente. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. E-mail: amaya.lobo@unican.es

(***** Licenciada en Ciencias Ambientales. Máster en Ingeniería Ambiental. Investigadora Contratada Pre-doctoral. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. E-mail: leticia.rodriguez@unican.es

Palabras clave: Aguas residuales, Depuración, Biopelícula, Lechos sumergidos, Membranas de filtración, Membranas permeables a gases, Procesos biológicos híbridos, Tecnología innovadora.

Keywords: Wastewater, Wastewater treatment, Biofilm, Submerged bed bioreactor, Membrane filtration, Gas permeable membranes, Hybrid biological processes, Innovative technology.

BECAS, AYUDAS, SOPORTE FINANCIERO PARA EL TRABAJO

Los trabajos descritos aquí son el fruto de varios proyectos de investigación, entre ellos los proyectos AMB96-0549 "Proceso biopelícula de lecho aireable sumergido de soporte fijo (rígido y de membrana permeable a gases) BLASF para la eliminación de carbono, nitrógeno y fósforo: desarrollo de nuevos procesos optimizados", CTM2004-03348/TECNO "RBpM, Reactores Biopelícula con Membranas: Tecnología avanzada de depuración para la regeneración de aguas residuales para su reutilización" y el proyecto Consolider CSD2007-00055 NOVEDAR ("Conception of the sewage treatment plant of the XXI century: development, implementation and evaluation of technologies for the treatment and resources recovery from wastewaters") financiados por el Ministerio de Educación y Ciencia; el proyecto SOE1/P2/F236 "Water and Territories-WAT", financiado por el programa Interreg-SUDOE de la Comunidad Europea y los proyectos CTM2008-06877-C02-01/TECNO "Procesos híbridos para la ampliación de EDAR existentes para la eliminación de nutrientes: lecho fijo y membranas de fibra hueca (HIBREDAR)" e IPT-2011-1383-060000 "Desarrollo de un sistema de recirculación para plantas de acuicultura de gran tonelaje (SRA)", financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PROCESOS DE BIOPELÍCULA VERSUS PROCESOS DE FANGOS ACTIVOS

La depuración biológica de las aguas residuales consiste en la eliminación de la contaminación biodegradable por una biocenosis o comunidad de organismos vivos (generalmente microorganismos), que es mantenida en un ambiente técnicamente controlado (reactor biológico). Esta biocenosis o biomasa puede encontrarse en forma de cultivo en suspensión en el seno del agua o bien adherida a diferentes materiales o soportes. El proceso más representativo de los de cultivo en suspensión es el de fangos activos. Los procesos de biomasa adherida se denominan de película fija, de película biológica o procesos de biopelícula.

Los procesos metabólicos básicos de los sistemas de fangos activos y los de biopelícula son los mismos. Las principales diferencias se basan en la forma de retener la biomasa en los reactores y en los fenómenos de transporte de los sustratos.

En los sistemas de fangos activos es preciso separar la biomasa en suspensión del agua efluente y devolverla al reactor para mantener en él una determinada concentración. Por el contrario, en los reactores de biopelícula no se requiere un decantador para retener la biomasa, ya que ésta no es arrastrada por el paso del agua.

Los cultivos en suspensión están compuestos por flóculos biológicos, de un tamaño tan reducido que en teoría los sustratos disueltos (oxígeno, carbono, amonio, etc.) están disponibles para todas las células. Por ello, las cinéticas de los procesos de fangos activos están en general caracterizadas por las concentraciones en el seno del líquido. En los procesos de biopelícula los sustratos deben atravesar la capa líquida estanca junto a la superficie de la biopelícula y luego transportarse a través de

ella, fundamentalmente por difusión, hasta la zona en que son consumidos. Asimismo, los productos de las reacciones biológicas se difunden en sentido contrario. Por lo tanto, las tasas globales de eliminación de sustrato en un proceso de biopelícula dependen de las velocidades de transferencia de masa y las concentraciones de sustrato en los diferentes puntos de la biopelícula. La otra consecuencia de estos fenómenos de transporte es que dentro de una misma biopelícula pueden coexistir distintos ambientes (aerobio, anóxico o anaerobio) lo que puede aprovecharse, por ejemplo, para conseguir nitrificación y desnitrificación simultáneas.

Existe una amplia variedad de tecnologías basadas en procesos de biopelícula, cada una con sus características específicas. En general (WEF 2010) se pueden incluir, entre sus ventajas frente a los procesos de fangos activos convencionales, unos costes de operación y energéticos reducidos, volúmenes menores de los reactores, necesidades mínimas de capacidad de decantación y simplicidad de operación. Entre los inconvenientes figuran la posibilidad de atascamiento del sistema, bien debido a un pretratamiento insuficiente o a un exceso de crecimiento de la biopelícula, más dificultad para conseguir una mezcla homogénea del seno del líquido y mayor complejidad para la modelización, y por tanto el control, del proceso.

1.2. EVOLUCIÓN DE LOS PROCESOS DE BIOPELÍCULA Y TECNOLOGÍAS INNOVADORAS

La historia del tratamiento biológico de las aguas residuales se inicia a finales del siglo XIX precisamente con un proceso de biopelícula, un filtro biológico (Peters and Alleman 1982). Durante la primera mitad del siglo XX los sistemas de tratamiento basados en biopelícula, como los lechos bacterianos (filtros percoladores) dominaron la tecnología del tratamiento de aguas. Posteriormente, los sistemas de fangos activos, una vez caducada la vigencia de su patente, desplazaron en preferencia a los de biopelícula, en gran parte debido a un conocimiento más amplio de su funcionamiento y a un estancamiento en el desarrollo de la tecnología de biopelícula. En las últimas décadas, una serie de factores como el incremento en el volumen de agua residual, la limitación de espacio disponible y la promulgación de normativas ambientales cada vez más exigentes han promovido el desarrollo de nuevas tecnologías (Lazarova and Manem 2000).

1.3. TIPOS DE REACTORES DE BIOPELÍCULA

Existen varios criterios de clasificación de los reactores de biopelícula, por ejemplo, según el tipo de soporte (soporte fijo, giratorio o móvil) o su combinación con fangos activos (reactores híbridos) o no (reactores de biopelícula puros). Atendiendo al grado de saturación del medio, y considerando sólo los reactores aerobios, se obtiene la tipología incluida en la Tabla 1.

Entre las soluciones innovadoras basadas en procesos de biopelícula destacan los biofiltros y los reactores de lecho móvil (ver ejemplos de aplicaciones a escala industrial en Tabla 2), así como los reactores híbridos.

El concepto básico del biofiltro es utilizar soportes de pequeño tamaño con una alta superficie específica, de forma que se produce tanto biodegradación (en condiciones aerobias, anóxicas o anaerobias) como retención de sólidos.

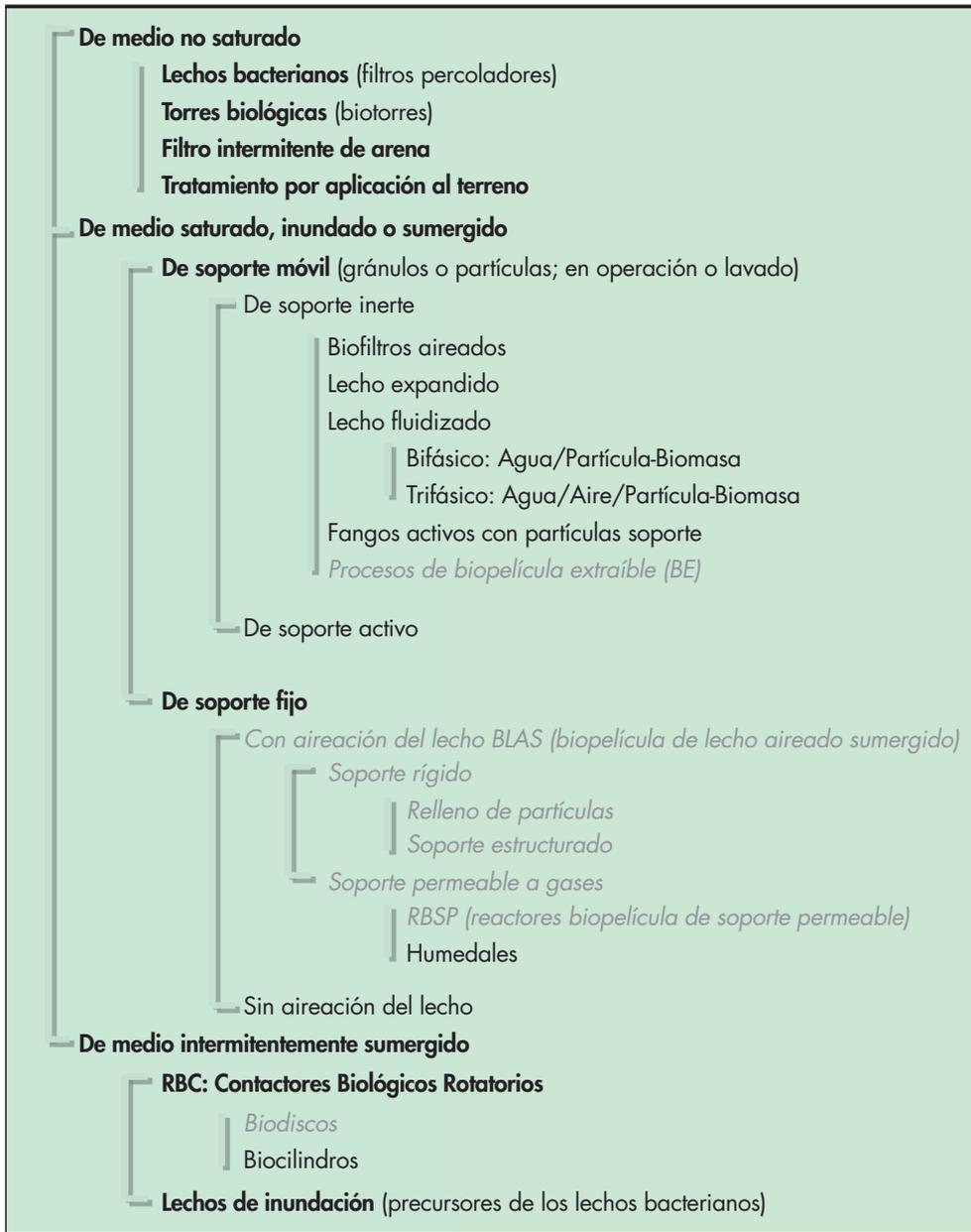


TABLA 1. Tipos de reactores de biopelícula aerobios. Nota: En gris y cursiva, procesos en los que ha investigado el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria.

En los lechos móviles (agitados, expandidos, fluidizados, turbulentos o circulantes) el soporte de la biopelícula se mantiene en constante movimiento. El objetivo es controlar así el espesor de la biopelícula, evitar los problemas de atascamientos de los lechos fijos y mejorar los procesos de transferencia de masa.

El término híbrido se emplea generalmente para describir los procesos que combinan en un mismo reactor biomasa en suspensión y biopelícula en soportes fijos o móviles. La idea es incrementar la cantidad de biomasa disponible por unidad de volumen, lo que permite diseñar reactores biológicos más pequeños o bien conseguir que un reactor dado tenga mayor capacidad de depuración, por lo que han encontrado un importante campo de aplicación cuando es preciso adaptar depuradoras existentes para soportar mayores cargas o eliminar nutrientes.

Ejemplos de tecnologías emergentes, todavía no contrastadas suficientemente a escala industrial, son los reactores de

fango o lodo granular, los reactores de biopelícula anammox y los reactores de biopelícula sobre membranas (WEF 2010).

Los gránulos de fango o lodo son en realidad flocúlos de biomasa grandes en cuyo interior se producen precipitaciones que hacen que su densidad aumente mucho. Por ello puede considerarse que el gránulo es una partícula (soporte) cubierta con biopelícula en la cual, debido a su espesor, también tienen gran importancia los fenómenos de transporte de sustratos. Su comportamiento es similar al de las biopelículas de lecho móvil.

Las bacterias anammox utilizan amonio y nitrito para producir nitrógeno gas, lo que reduce la necesidad de aportar oxígeno y carbono para la eliminación del nitrógeno de las aguas residuales. Al ser de crecimiento lento, resulta apropiada su inmovilización en forma de biopelícula.

Los reactores de biopelícula sobre membranas utilizan este material, además de como soporte de la biopelícula, para proveer un gas (p.ej. oxígeno o hidrógeno) a la biomasa.

Tipo		Proceso	Fabricante	Soporte	Aplicaciones
Lecho fijo	Biofiltros con soportes pesados	Biofor	Degrémont	Biolite (arcilla expandida)	ARU; C,NF,postDN
		Biocarbone	OTV-Veolia	Biodamine (arcilla expandida)	ARU; ARI; C,NF
		B2A	OTV-Veolia	3 capas de distintos medios	ARU; C, NF, NF/DN
		Nitrazur	Degrémont	Biolite (arcilla expandida)	AP; DN
		Biodenit		Biodagene	AP; DN
	Biofiltros con lavados continuos	DynaSand	Parkinson CO	Arena	ARU; postDN, NF
			SOGEA	Arena	ARU; postDN
	Biofiltros con medio flotante	Biostyr	OTV-Veolia	PS expandido	ARU; C, NF/DN
		Denitropur	Sulzer	Plásticos Mellapak	AP; DN
		Denipor	Preussag AG	PS expandido	AP; DN
Biobead		Brightwater Eng.	PE o PP	ARU; NF	
Lecho móvil	Lecho fluidizado aerobio	Sistema Oxitron	Dorr-Oliver/Ecolotrol	Arena/CAG	ARU; NF
		Rex	Envirex/Ecolotrol	Arena	ARU, ARI; NF
	Lecho fluidizado anaerobio o anóxico	Sistema Anitron	Dorr-Oliver/Ecolotrol	Arena/CAG	ARU-DN; ARI-C
		Rex	Envirex/Ecolotrol	Arena	ARU-DN; ARI-C-DN
		Anaflux	Degrémont	Biolite (arcilla expandida)	ARI; C
		Biobed	Gist-Brocades	Arena	ARU; C
	Lechos móviles y turbulentos	Linpor	Linde AG	Cubos de PU	ARU-C/NF; ARI-C
		Captor	Simon-Hart., Ltd.	Cubos de PU	ARU; C, NF
		MBBR	Kaldnes-Veolia	PE	ARU-NF/DN;ARI-C
		Pegasus/Pegasur	Hitachi/Degrémont	Pellets de PEG	ARU; NF
	Air-lifts y lechos circulantes	Circox/BAS	Pacques/Gist-Brocades	Basalto	ARU-C/NF; ARI-C
		Turbo N	Degrémont	Gránulos de PE	ARU; NF
		Mixazur	Degrémont	Arcilla	ARU; DN

ARU: agua residual urbana; ARI: agua residual industrial; AP: potabilización de aguas. C: eliminación de carbono; NF: nitrificación; DN: desnitrificación; postDN: post-desnitrificación; PS: poliestireno; PE: polietileno; PP: polipropileno; PU: poliuretano; PEG: polietilén glicol; CAG: carbón activado granular.

TABLA 2. Resumen de algunos procesos innovadores de biopelícula desarrollados a escala industrial (adaptado de Lazarova and Manem 2000).

2. EL GIA Y LA INVESTIGACIÓN EN BIOPELÍCULAS

Desde su creación, a finales de los años ochenta del siglo pasado, el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria (GIA) apostó por la investigación en procesos de biopelícula. En un momento de plena hegemonía de los procesos de fangos activos, el grupo considera que las biopelículas pueden aportar importantes innovaciones en el campo de la depuración de aguas. Pero para ello es preciso profundizar en sus mecanismos de funcionamiento, más complejos que los de los cultivos en suspensión, y proponer nuevas tecnologías y estrategias de operación.

Los siguientes apartados describen con mayor detalle el enfoque y los resultados de las líneas de investigación desarrolladas dentro del Grupo de Biopelícula del GIA. Se incluye aquí una breve reseña sobre la evolución de los trabajos en este ámbito.

En 1987, coincidiendo con la primera promoción del Máster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de

Cantabria, se inicia el trabajo con biopelículas en el GIA, con el estudio del funcionamiento de sistemas como los contactores biológicos rotatorios (RBC) ante diferentes cargas orgánicas y salinidades y diferentes estrategias de explotación. Asimismo se desarrolla y patenta (Tejero y Amieva 1993) el concepto de reactor de “biopelícula extraíble” (BE). El objetivo es conseguir que el reactor trabaje en régimen transitorio de crecimiento de masa mediante la extracción directa de soporte del reactor y su posterior secado. Así se consigue un mejor control de la biopelícula y la simplificación del proceso de separación sólido-líquido posterior a los reactores biopelícula.

También se estudia la potencialidad del uso de nuevos soportes para la biopelícula, lo que abre dos líneas de trabajo diferenciadas. La primera línea de investigación (1988) se basa en el desarrollo de reactores de biopelícula con un soporte muy innovador. El GIA se convierte en uno de los primeros grupos a nivel internacional que investiga sobre los

procesos en los que la biopelícula está adherida a un soporte permeable a gases, generalmente una membrana. El oxígeno se aporta a esta biomasa sin necesidad de disolverlo en el seno del líquido, directamente por difusión a través de la cara opuesta de la membrana. A este reactor lo denominamos RBSP (reactor de biopelícula con soporte permeable) o, posteriormente, RBSOM (reactor de biopelícula con soporte y oxigenación a través de membranas), dando lugar a diferentes patentes (Tejero y Eguía 1991; Tejero, Osa y Gómez 1997; Tejero y Castillo 1998).

En la otra línea de investigación se desarrolla el BLAS (1991), un soporte de diseño específico, de tipo reticular, que permite una mínima utilización de material, el incremento de la superficie de biopelícula a medida que ésta crece y una alta transferencia de oxígeno. Este soporte puede utilizarse para diferentes configuraciones de procesos de biopelícula (lechos aireados sumergidos, lechos bacterianos, biodiscos), pero los esfuerzos del grupo se centran en los reactores de Biopelícula de Lecho Aireado Sumergido de soporte Fijo, denominados reactores BLASF. El principal objetivo es desarrollar un proceso de soporte fijo que obtenga mejoras respecto a los biofiltros aireados. El sistema quedó patentado (Tejero y Santamaría 1996).

A partir del año 2000 se incorpora al GIA el estudio de los reactores de biopelícula con membranas, especialmente en su aplicación a la regeneración de aguas. Se trata de una variante de los reactores biológicos de membrana (RBM) en los que la biomasa en vez de encontrarse en suspensión está en forma de biopelícula. Así, se desarrolla y patenta (Tejero y Cuevas 2002) el RBpM, reactor de biopelícula con membranas.

En 2008 el grupo consigue financiación para investigar diversos procesos integrados (híbridos y combinados) para la eliminación de nutrientes, en los que coexisten biombras suspendidas y fijas en soportes, tanto convencionales como permeables a gases. Como resultado se desarrolla y patenta (Tejero *et al.* 2010) un reactor de lecho de fangos perturbado anóxico – anaerobio al que denominamos AnoxAn.

Las líneas de trabajo más recientes incluyen el desarrollo de procesos integrados para la eliminación de carbono y nutrientes (en los que reactores de biopelícula, tanto BLASF como RBSOM, complementan a un reactor tipo lecho de fangos) y la evaluación de una nueva tecnología de biopelícula para reutilización de aguas en acuicultura.

3. TECNOLOGÍAS DE LECHO SUMERGIDO

3.1. INTERÉS DEL PROCESO

La mayor innovación del GIA en el desarrollo de tecnologías de lecho fijo es el diseño del soporte BLASF, constituido por mallas planas o retículas separadas entre ellas una distancia igual o mayor que la luz mínima de la malla. Las retículas se solapan una sobre otra de manera ordenada hasta completar el volumen del lecho de relleno dentro del reactor biológico. La invención es aplicable tanto para el tratamiento de aguas residuales urbanas como industriales, sin requerir ningún dispositivo electromecánico.

El objetivo principal de la geometría del soporte BLASF es proporcionar una elevada superficie para el crecimiento de la biopelícula sin generar excesiva pérdida de carga ni dar lugar a atascamiento. Por ello la luz mínima de la malla tiene que ser mayor del doble del espesor de la biopelícula para la que está diseñada la aplicación. De esta forma se consigue también maximizar la superficie específica de la biopelícula y no la del soporte: frente a superficies específicas nominales muy elevadas de otros materiales soporte, en el BLASF la superficie real en contacto con el agua a depurar aumenta con el crecimiento de la biopelícula, llegando a valores de superficie específica mucho mayores que la nominal.

Además, gracias a la geometría específica y a la manera en que se solapan las mallas dentro del reactor, se consigue que los nudos de una malla coincidan con los huecos de la malla inferior y superior (Figura 1). Así se dificulta la circulación ascendente de las burbujas de aire proporcionadas por el difu-



FIGURA 1. Medio Soporte BLAS: detalle del solapamiento entre mallas y montaje en prototipo a escalas de bancada (60 l) y piloto (1 m³). [Las fotografías tienen distintas escalas].

sor colocado debajo del relleno y se optimiza la utilización del oxígeno. El lecho obliga a un recorrido tortuoso y aumenta el contacto entre las burbujas y la biopelícula, permitiendo una mayor captación del oxígeno necesario para la actividad biológica. Al contrario que en los soportes móviles, el choque de las burbujas de aire no mueve el soporte BLASF por lo que éstas están obligadas a atravesarlo. Esto también evita el escape del soporte del reactor en caso de rebose.

Con este soporte, el GIA desarrolló la tecnología específica de reactores BLASF, Biopelícula de Lecho Aireado Sumergido Fijo, conocido en la literatura científica internacional como SFFBR (submerged fixed-film bioreactor). Como alternativa a los biofiltros, los reactores BLASF no precisan un tratamiento primario aunque sí han de ir acompañados de un decantador secundario. Además, el exceso de biomasa se desprende mediante un lavado diario con aire, sin necesidad de interrumpir la operación como en el caso general de los biofiltros aireados.

3.2. TECNOLOGÍAS DESARROLLADAS

Este tipo de reactores ha sido objeto de diversas investigaciones, que estudian sus rendimientos de depuración tanto con agua residual sintética como real, en diferentes configuraciones, cargas y estrategias de aireación, para eliminar carbono y/o nitrógeno, o bien como reactor de prefermentación. También se han caracterizado sus pérdidas de carga, así como la actividad y microfauna de la biopelícula.

El funcionamiento se ha investigado en prototipos a distintas escalas. El primer modelo del soporte BLASF fue realizado en retículas de polietileno (20 x 20 cm) con barras de sección circular, luz de malla de 11 mm y separación entre mallas de 10 mm (mediante separadores de acero), llegando a una superficie específica de 76 m²/m³. Este soporte fue utilizado en reactores BLASF de laboratorio a escala de bancada (60 L), que reunían un conjunto de 58 mallas ensambladas horizontalmente en un lecho de 80 cm de alto de sección cuadrada de 20 cm de lado. Los reactores se alimentaron con agua residual a muy alta carga para evaluar su capacidad de eliminar materia orgánica y su comportamiento hidráulico (pérdidas de carga a través del lecho) en estas condiciones (Santamaría 1998 y Mihovilovic 2010).

Posteriormente se construyó otro prototipo, también en polietileno, de aproximadamente las mismas dimensiones (19,8 x 19,8 cm con luz de malla de 10 mm) pero con barras de sección cuadrada y dotado de un marco perimetral que proporciona la separación entre mallas de 10 mm. Este soporte ofrece una superficie específica nominal de 122 m²/m³, y fue diseñado con la finalidad de reducir los costes de inversión (producción del material de soporte) y optimizar la geometría y el sistema de montaje dentro del reactor. La mejora de la transferencia de oxígeno producida por este soporte se evaluó en ensayos de caracterización física (a diferente velocidad de aireación) a escala de bancada con los reactores vacíos, con relleno y con relleno colonizado por la biopelícula. Los ensayos demostraron que aumenta la capacidad de transferencia de oxígeno en agua limpia hasta 2,5 veces respecto al reactor sin soporte, y llega a incrementarla hasta 12 veces en presencia de biopelícula (Gómez 2010). Comprobadas sus ventajas, el medio soporte se ha mantenido en otras tecnologías desarrolladas por el grupo posteriormente, en combinación con membranas de filtración, en procesos híbridos y combinados (ver apartados siguientes).

Por otro lado se han realizado varias experimentaciones del proceso BLASF a escala bancada con agua residual urbana, tanto para eliminación de materia orgánica trabajando en alta carga (Gómez 1999), como para eliminación de materia orgánica y nitrógeno en media carga (Gómez 2010). A esta escala y

sin decantación primaria, se comprobó un funcionamiento adecuado, sin problemas de atascamiento incluso trabajando a cargas orgánicas elevadas. Con cargas orgánicas entre 5 y 14 kgDQO/m³·d (y tiempos de retención hidráulico muy reducidos, entre 42 y 110 min) se alcanzaron rendimientos de eliminación de DQO entre 49 y 58%, con suministro específico de aire de tan sólo 12 m³aire/kgDQO_{aplicado}. Operando a media carga (1,2–2,8 kgDQO/m³·d) se alcanzó una eliminación de DQO entre 78 y 96% y de nitrógeno total entre 70 y 76%.

En todo caso, incluso con cargas elevadas, el exceso de biomasa fue eliminado mediante un lavado diario con aire, sin necesidad de interrumpir la operación del sistema. Este mismo resultado se ha obtenido trabajando a escala piloto (con sección transversal al flujo de 60 x 60 cm y 1 m³ de volumen total).

4. TECNOLOGÍAS DE BIOPELÍCULA CON MEMBRANAS

4.1. INTERÉS DEL PROCESO

Los reactores biológicos con membranas convencionales (RBM) consisten en un proceso de fangos activos en el cual la decantación secundaria es sustituida por un módulo de membranas de filtración. Una innovación de los RBM, que reduce considerablemente la concentración de biomasa suspendida en el sistema sin afectar al tiempo de retención celular, es la introducción de soportes de biopelícula en el reactor, lo que denominamos RBpM (reactor de biopelícula con membranas). Algunos desarrollos de este proceso los realizaron Garrido *et al.* (2002), Tejero y Cuevas (2002) y Leiknes and Odegaard (2007). Dentro del reactor RBpM coexisten dos biombras, una adherida al medio soporte y otra en suspensión, de concentración controlable mediante purga del reactor. Con esta tecnología se pretende reducir los problemas de taponamiento y crecimiento del "biofouling" en la membrana, para conseguir una menor frecuencia de limpieza de la misma y un aumento del flujo transmembrana, en comparación con los RBM convencionales. Asimismo, debido a los altos tiempos de retención de sólidos que permite la biopelícula, se pueden desarrollar microorganismos de lento crecimiento específicos para el tipo de agua residual a tratar y reducirse la producción de lodos. Por otra parte, la presencia de la biopelícula favorece la creación de ambientes anóxicos y anaerobios en el mismo reactor, lo que posibilita la desnitrificación simultánea con procesos de nitrificación, a pesar de que el ambiente general tenga concentraciones apreciables de oxígeno disuelto. La coexistencia de estos ambientes puede también facilitar la degradación de ciertos contaminantes orgánicos.

Los tiempos de retención celular de las biombras coexistentes son independientes. En función de la purga del fango en suspensión del sistema, se puede llegar a un proceso biológico con mayor incidencia de los fenómenos biopelícula o con mayor participación de ambas poblaciones, biopelícula y en suspensión, obteniendo un proceso híbrido. La tecnología RBpM puede ser utilizada para la degradación de compuestos orgánicos, nitrificación y desnitrificación simultáneas, eliminación de sólidos y desinfección del efluente, así como acumulación y digestión de sólidos. Por tanto, consigue una baja producción de lodos y un efluente de alta calidad óptimo para su reutilización.

4.2. TECNOLOGÍAS DESARROLLADAS

El GIA comenzó sus desarrollos de este tipo de tecnologías con un reactor aerobio de lecho sumergido fijo y membranas de microfiltración (RBLSFyMM) alimentado con agua residual proveniente de un prefermentador (Cuevas 2003). La unidad expe-

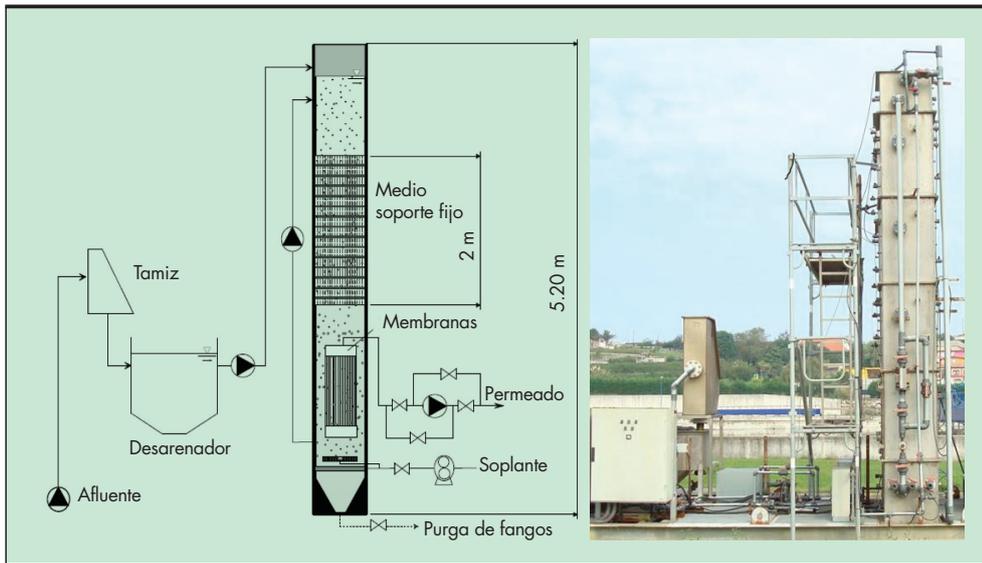


FIGURA 2. Prototipo RBpM a escala piloto: esquema y fotografía de la planta.

rimental, de 70 L, estaba formada por cinco partes principales: medio soporte fijo, módulo de membranas, sistema de aireación, electronivel y tolva de fangos. Posteriormente, también a escala de bancada, se desarrolló otro prototipo con medio soporte de partículas flexibles formando un lecho fijo y membranas comerciales de microfiltración. En este caso, la unidad experimental fue ensayada con agua residual urbana pretratada (tamizada y desarenada) (Rodríguez-Hernández *et al.* 2012a).

Con el fin de transferir esta nueva tecnología a la industria, el prototipo RBpM se escaló a una planta piloto demostrativa de volumen total 1,8 m³, con BLASF como medio soporte (Rodríguez-Hernández *et al.* 2012b). Esta planta (Figura 2) se utilizó para una evaluación comparativa con un reactor biológico con membranas (RBM) de dimensiones similares, bajo condiciones equivalentes de alimentación con agua residual real pretratada y funcionamiento en paralelo.

Las investigaciones realizadas con estos prototipos a diferentes escalas muestran que el sistema RBpM es capaz de tratar agua residual real pretratada a diferentes cargas orgánicas, sin decantación previa, con una fácil puesta en marcha y sin producirse fenómenos de sobrecarga. Las campañas experimentales mostraron un funcionamiento óptimo en rangos de carga orgánica entre 0,9 y 2,7 kg DQO/m³.d, obteniendo rendimientos superiores al 84% y 95% en términos de DQO y DBO, respectivamente.

Se ha comprobado que, frente a los objetivos alcanzables por un RBM (calidad del efluente para reutilizar), el RBpM permite además la eliminación de nitrógeno por nitrificación – desnitrificación simultánea, sin incorporar reactores anóxicos previos, alcanzando rendimientos del 97% y 76% en términos de amonio y eliminación de nitrógeno total. Por otro lado se consigue mantener una concentración de MLSS en la zona de membranas entre 1000 y 3000 mg/L, lo que se traduce en un menor ensuciamiento potencial de la membrana, con el consiguiente menor consumo de reactivos y de energía.

El sistema se caracteriza por su compacidad y elevada eficiencia energética, gracias a la transferencia de oxígeno mejorada con el soporte. Además la presencia del lecho fijo disminuye la producción de lodos y también mejora sus características, tales como el índice volumétrico del lodo (se han obtenido valores del índice volumétrico de fangos IVF por debajo de 50) y su filtrabilidad.

5. TECNOLOGÍAS DE BIOPELÍCULA SOPORTADA Y OXIGENADA POR MEMBRANAS

5.1. INTERÉS DEL PROCESO

Existen desde hace tiempo numerosas aplicaciones de membranas para separaciones fluido/fluido en campos tales como la medicina, hidrometalurgia y el tratamiento de aguas. Sin embargo, hasta finales de los años 1980 (Timberlake *et al.* 1988, Eguía 1991) no se desarrolló el concepto de emplear membranas para transferir un gas a una biopelícula adherida en la otra cara de la misma. En tratamientos aerobios el objetivo es aportar aire u oxígeno a la membrana, dando lugar a los reactores de biopelícula soportada y oxigenada mediante membranas, RBSOM (Esteban y Tejero 2007).

En las investigaciones sobre RBSOM se han utilizado distintos tipos de configuraciones respecto al tipo de membrana, su geometría, la tipología del módulo de membranas, el tamaño del reactor, el tipo de gas de alimentación, el modo de suministro del gas, el tipo de contaminante objetivo, etc.

El uso de membranas como medio de transferir oxígeno a los microorganismos y la forma en que los diferentes sustratos penetran en la biopelícula configuran las dos principales singularidades de un RBSOM: una estratificación especial de la biomasa y características excepcionales de transferencia de oxígeno (Esteban *et al.* 2012).

El comportamiento de los perfiles de oxígeno y sustratos dentro de la biopelícula determina la existencia de varias capas con ambientes distintos, en las que se producen por ende distintos tipos de reacciones (Figura 3). En una biopelícula sobre soporte permeable, los microorganismos nitrificantes tienden a crecer junto a la membrana, donde la concentración de oxígeno es alta, la concentración de material carbonoso baja (porque se habrá ido consumiendo en las capas externas) y el nitrógeno amoniacal puede estar disponible. En la zona inmediata aún penetrada por el oxígeno, los heterótrofos pueden consumir el carbono transferido desde el líquido. Si el oxígeno es consumido antes de alcanzar la interfase biopelícula-agua, se desarrolla una zona con suministro de nitratos desde el interior de la biopelícula y carbono desde el exterior, y por tanto las condiciones ideales para producirse la desnitrificación. Finalmente, si el espesor

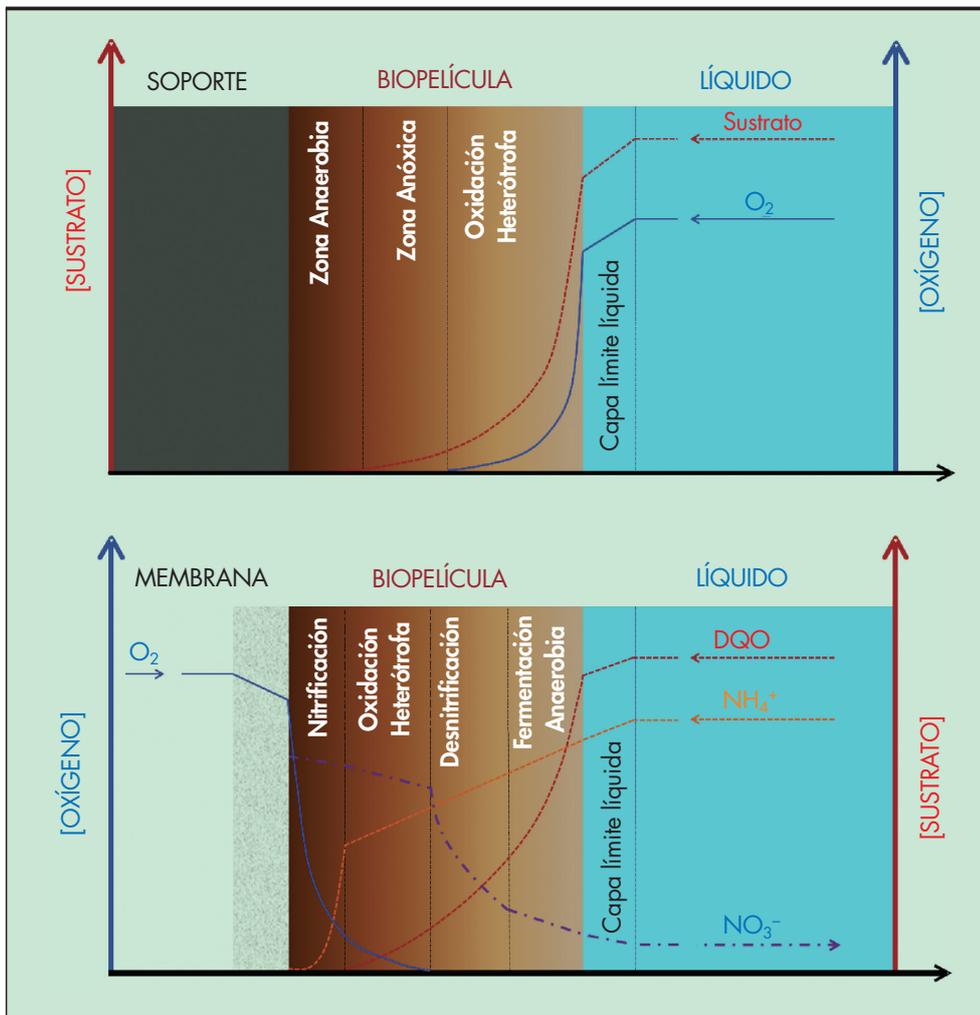


FIGURA 3. Zonificación de una biopelícula gruesa sobre a) soporte convencional b) membrana permeable a gases.

de la biopelícula lo permite y el seno del líquido es anóxico, en la capa más externa pueden darse condiciones para el desarrollo de bacterias anaeróbicas. Por lo tanto, en este tipo de biopelícula es posible la eliminación de carbono, nitrificación y desnitrificación de forma simultánea.

La otra característica sustancial de los RBSOM es la posibilidad de reducir de forma importante los gastos energéticos asociados a la aireación. En este tipo de reactores el aire u oxígeno es suministrado a un extremo de la membrana, pudiendo controlar el volumen de gas que sale por el otro extremo. Esto permite que se alcancen muy altas eficiencias en la utilización del oxígeno, hasta del 100% en configuraciones cerradas. Otra forma de ahorrar energía es la reducción de las pérdidas de carga. En la aireación convencional con burbujas, los compresores deben superar las pérdidas de rozamiento en las tuberías, la presión hidrostática del agua en función de su profundidad y las pérdidas de carga en el difusor. En un RBSOM, las únicas pérdidas de presión son debidas a la resistencia friccional del aire al circular en el interior de las membranas. Algunas estimaciones indican que el consumo de energía podría ser entre cuatro y cincuenta veces inferior que en un sistema de fangos activos convencional (Semmens 2005, Lackner 2009). Además, al realizar la aireación sin burbujas, se minimiza la formación de espumas y la emisión de volátiles y olores.

El principal inconveniente de los RBSOM es el crecimiento excesivo de una biopelícula de elevada densidad, lo cual puede reducir el rendimiento del sistema debido al incremento de la resistencia difusional, como el GIA ha observado en experimentaciones específicas (Osa *et al.* 1997).

5.2. TECNOLOGÍAS DESARROLLADAS

El GIA inició sus investigaciones con varios reactores a escala de laboratorio empleando diferentes tipos de membrana y configuraciones plana, tubular y de fibra hueca (Figura. 4). Los principales resultados fueron los siguientes (Osa *et al.* 1997): a) al aumentar el espesor de la biopelícula disminuye su capacidad de depuración, b) la capacidad de oxigenación del sistema, con biopelícula, es mucho mayor que la medida sin biopelícula (esto se atribuye al fenómeno de la “transferencia biológica de oxígeno”), c) en las condiciones estudiadas, estas biopelículas tienen mayor concentración de sólidos que las convencionales, disminuyendo además la producción de fangos debido a la digestión simultánea aerobia-anaerobia de la propia matriz de la biopelícula y d) la eliminación de carbono es mayor alimentando con oxígeno puro en vez de con aire, mientras que la eliminación de nitrógeno es mejor con aire, debido a una posible inhibición de los organismos nitrificantes con altas concentraciones de oxígeno.



FIGURA 4. Plantas piloto para el estudio de RBSOM con membranas planas (a), tubulares (b) y de fibra hueca (c).

En un estudio posterior (Jácome *et al.* 2006) se evaluó la capacidad para eliminar carbono y nitrógeno en una configuración autoaireada. En este reactor los extremos de las membranas quedan expuestos a la atmósfera, de donde toman directamente el oxígeno. Se demostró que la transferencia de oxígeno una vez desarrollada la biopelícula es 7 veces superior a la medida con las membranas limpias. Los rendimientos son menores que con aireación forzada, pero a cambio el coste de la oxigenación es nulo.

En un RBSOM también es factible eliminar fósforo y materia orgánica carbonosa, consiguiendo además nitrificación y desnitrificación simultáneas. En este proceso la alternancia entre condiciones aerobias y anaerobias se consigue alimentando o no las membranas con oxígeno (Tejero y Castillo 1998).

Otro campo de aplicación de los RBSOM es el tratamiento de compuestos tóxicos, debido a la capacidad de estos reactores para mantener y proteger junto a la membrana a las bacterias de lento crecimiento capaces de degradar xenobióticos. En el GIA se aplicó a la depuración de PCBs, obteniéndose, tras un pretratamiento de aminación, rendimientos globales del 85% (Hernández 1998).

Por otro lado, el mismo principio de una biomasa fija sobre un soporte permeable puede aplicarse al desarrollo de un dispositivo para realizar medidas respirométricas de líquidos conteniendo materia orgánica. Esta idea fue desarrollada en la patente de Tejero *et al.* (1997).

El GIA siempre ha apostado por la elaboración y uso de modelos matemáticos como fuente de conocimiento y complemento de la investigación en laboratorio y plantas piloto. Y también ha trabajado en este ámbito en relación a los RBSOM (Jácome 1999, Esteban 2009). Una de las áreas en las que se precisa profundizar para el desarrollo de la tecnología basada en RBSOM es la dinámica de la fase gaseosa en el sistema, y el efecto de las diferentes estrategias de oxigenación (membrana cerrada o semiabierta, caudal de gas de paso, empleo de aire u oxígeno) sobre el comportamiento del reactor. Los modelos desarrollados, por ejemplo, han permitido detectar errores cometidos por la comunidad científica a la hora de caracterizar las propiedades de oxigenación de las membranas. También ayudan a seleccionar las mejores estrategias para la ventilación de las membranas, de forma que se maximice su capacidad de oxigenación manteniendo a la vez altas eficiencias en la transferencia de oxígeno.

6. TECNOLOGÍAS INTEGRADAS PARA LA ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES

6.1. INTERÉS DEL PROCESO

Frente a la aplicación individual de procesos de biomasa única (fango activo o biopelícula), se ha planteado históricamente la utilización de procesos combinados en que se disponen en serie procesos de uno u otro tipo, o bien procesos híbridos que utilizan conjuntamente ambos tipos de biomasas en un mismo reactor. Al conjunto de ambos tipos de procesos (combinados e híbridos) se les ha denominado procesos biológicos integrados.

Uno de los principales retos de la depuración de aguas residuales a corto y medio plazo es la necesidad de incorporar la eliminación de nutrientes (N y P) en un gran número de estaciones depuradoras con vertido a zonas sensibles. Se hace necesario plantear soluciones que consigan este objetivo, bien para el diseño de nuevas depuradoras o en su caso aprovechando al máximo las instalaciones existentes y el espacio disponible.

Una alternativa para alcanzar tal propósito es la utilización de procesos híbridos, en que las distintas biomasas que intervienen en la depuración pueden estar en suspensión y en biopelícula en diferentes proporciones. Para ello se puede introducir algún tipo de soporte para biopelícula en los tanques de fango activo, permitiendo la coexistencia entre biopelícula y fango en suspensión. Por lo tanto, las ventajas de los reactores híbridos se basan en el incremento de la biomasa disponible y en la interacción y diferenciación entre ambas biomasas.

En los últimos tiempos se ha desarrollado el empleo de procesos híbridos orientados tanto a la eliminación de materia orgánica como de nutrientes. Los procesos biológicos para eliminación de nitrógeno operan normalmente con un elevado tiempo de retención de sólidos (TRS) requerido para la nitrificación, mientras que la eliminación biológica de fósforo precisa un menor TRS. Esto supone una dificultad para los procesos de eliminación conjunta de nitrógeno y fósforo, que se trata de resolver con un control minucioso del TRS de operación. Los procesos híbridos permiten desvincular el TRS de la biomasa en biopelícula y en suspensión, favoreciendo las condiciones óptimas para la eliminación conjunta de ambos nutrientes. En estos procesos la introducción del soporte permite especializar la biomasa adherida a la biopelícula como nitrifi-

cante, ya que el TRS de dicha biomasa puede crecer sin incrementar el tiempo de retención hidráulico en el reactor. La eliminación de fósforo es realizada principalmente por la biomasa en suspensión. Particularmente innovador es el empleo de reactores híbridos en condiciones anóxicas, en los que se lleva a cabo la desnitrificación bien en suspensión o bien en biopelícula.

Otra alternativa para conseguir configuraciones compactas para la eliminación de nutrientes es unificar las zonas anaerobia y anóxica, ambas en suspensión, dentro un único reactor de lecho de fango (patente de Tejero *et al.* 2010) seguido por un reactor biopelícula aerobio nitrificante. Se trata de un proceso integrado que combina las ventajas de ambos sistemas, fango activo y biopelícula, en reactores en serie (proceso combinado), en vez de en un único reactor (proceso híbrido).

6.2. TECNOLOGÍAS DESARROLLADAS

El GIA ha desarrollado varias experiencias a escala de banda de procesos integrados, híbridos y combinados. Algunas de ellas siguen en desarrollo.

En concreto se ha estudiado la configuración P-HD-HN, tipo UCT híbrido modificado, compuesta por tres reactores en serie anaerobio (P) de 40 L, anóxico (HD) de 80 L y aerobio (HN) de 180 L, seguido por un decantador secundario (Figura 5), tratando agua residual urbana pretratada, sin decantación primaria (Presmanes *et al.* 2012). Tanto el reactor anóxico (HD) como el aerobio (HN) son híbridos, rellenos con soporte fijo BLASF en un 50 y 62% de su volumen total, respectivamente. Ambos reactores disponen de sistemas de aireación para el lavado diario de la biomasa en exceso. En el reactor HN el sistema de aireación además proporciona la mezcla y agitación y el oxígeno requerido por la actividad biológica, mientras que para mezclar y agitar el reactor HD manteniendo condiciones anóxicas se utiliza aireación intermitente.

Este sistema se operó con un tiempo de retención hidráulico híbrido de 9,4 horas, estableciendo, mediante purga, un TRS en suspensión bajo, de 5 días, con la finalidad de evitar

el desarrollo de biomasa nitrificante en suspensión. La carga orgánica aplicada media fue de 0,43 kgDBO₅/m³.d y la carga de nitrógeno de 72,5 gNT/m³.d en los reactores híbridos. La carga aplicada de fósforo fue de 8,3 gPT/m³.d respecto del volumen total. Con una temperatura media del agua de 16°C se obtuvieron unos rendimientos de eliminación de DBO₅, NH₄, NT y PT de 95%, 97%, 65% y 77%, respectivamente. Las buenas eficiencias de eliminación se consiguieron a pesar de la baja concentración de sólidos en suspensión (aproximadamente 1100 mgSST/L) mostrando además una muy buena sedimentabilidad (IVF 53 mL/g). Para conocer el “grado de hibridez” del proceso (contribución de cada tipo de biomasa, fija o en suspensión, a la degradación), se determinaron las tasas de consumo de amonio y la distribución de la biomasa nitrificante mediante ensayos de actividad biológica de cada biomasa por separado. El resultado mostró que un 82% de la nitrificación se lleva a cabo en la biopelícula.

Por otro lado se ha estudiado un prototipo integrado compuesto por el reactor anóxico-anaerobio AnoxAn, de 49 L de volumen, seguido de un reactor aerobio híbrido con membranas de filtración, RBpM, de 69 L (Figura 6) (Díez *et al.* 2012). AnoxAn es un reactor de lecho de fango y flujo ascendente que unifica en un único reactor las zonas anaerobia y anóxica de una configuración convencional para eliminación biológica de nutrientes. El agua residual es alimentada por la zona inferior del reactor, donde se encuentra el lecho de fango anaerobio y circula ascendentemente hacia el lecho anóxico, que recibe la recirculación rica en nitratos procedente del reactor aerobio. El RBpM está relleno en un 45% de su volumen con cubos de esponja como soporte para la biopelícula. Por debajo de la biopelícula se dispone un módulo de membranas de fibra hueca de microfiltración.

Esta configuración fue alimentada con agua residual urbana, con un TRH total de 10 h. Las cargas medias fueron de 0,58 kgDBO₅/m³.d, 79,9 gNT/m³.d y 9,8 gPT/m³.d respecto del volumen total. En estas condiciones se obtuvieron unos rendimientos de eliminación de DBO₅, NH₄, NT y PT del 98%, 99%, 74% y 88%, respectivamente.

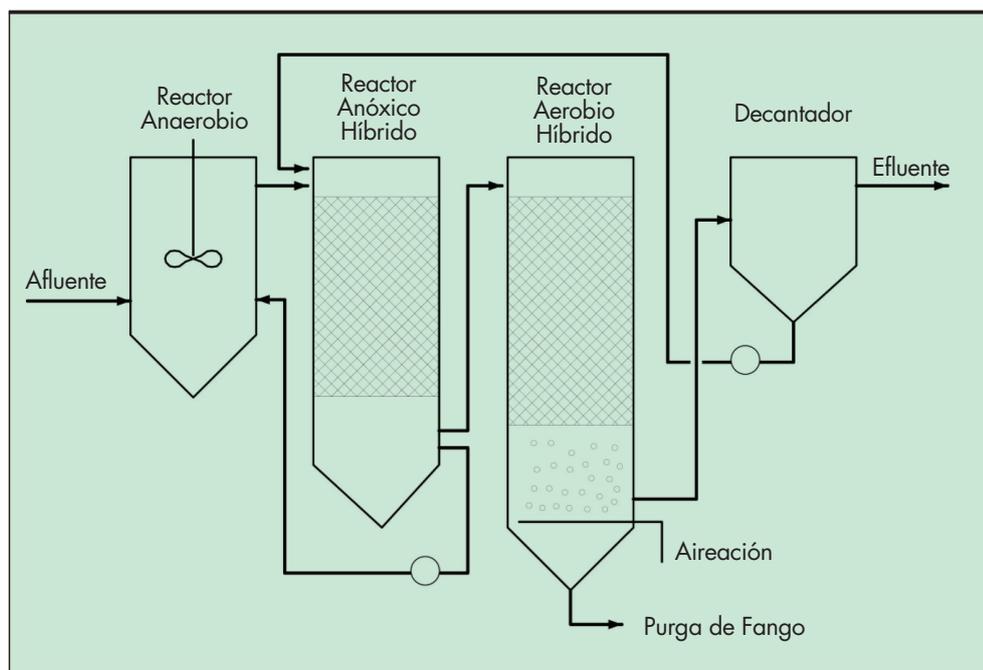


FIGURA 5. Esquema de la tecnología híbrida P-HD-HN.

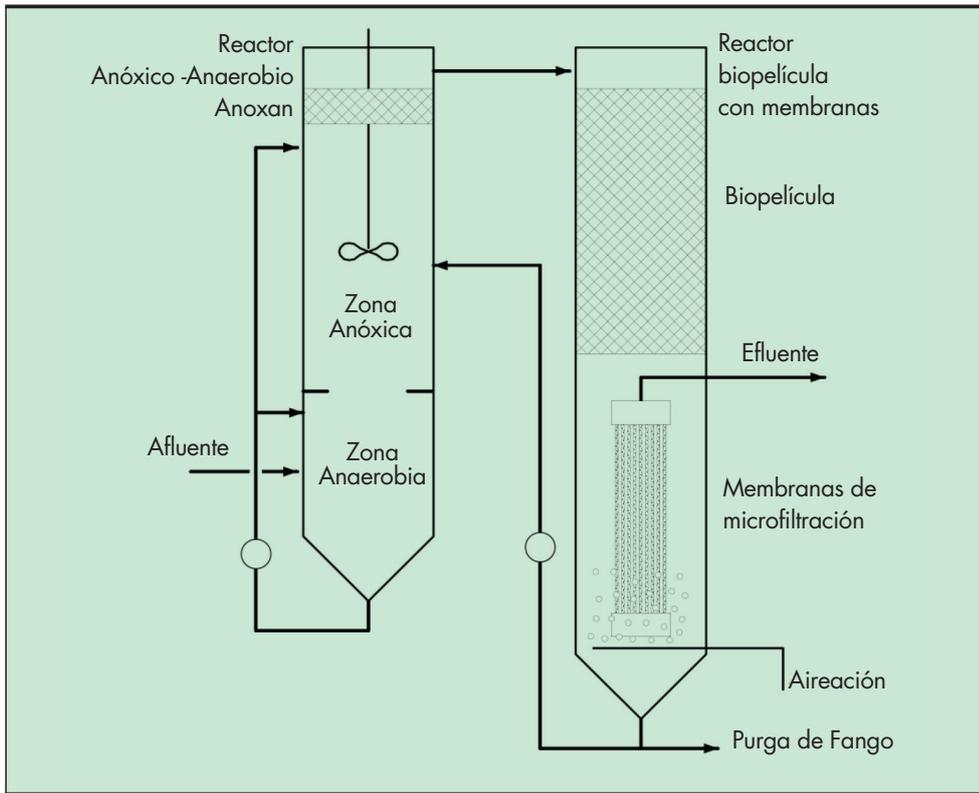


FIGURA 6. Esquema de la tecnología integrada AnoxAn+RBpM.

En estas experimentaciones, las tecnologías integradas desarrolladas, tanto la híbrida como la combinada, han demostrado ser efectivas para obtener un efluente apto para vertido a zona sensible, de acuerdo a la Directiva 91/271.

7. CONSIDERACIONES FINALES Y PROYECCIÓN FUTURA

Como se resume en los apartados anteriores, a lo largo de este cuarto de siglo el GIA ha ido desarrollando y contrastando ideas en busca de la mejora continua de los procesos biológicos de depuración: aumentar la concentración de biomasa, mejorar su sedimentabilidad, reducir la sensibilidad a fluctuaciones de caudal y carga, incrementar la eficiencia energética del sistema o disminuir los costes de inversión. Así, se han ido creando tecnologías innovadoras, algunas ya disponibles como solución transferible: desde tecnologías blandas de gran eficiencia energética para su aplicación en pequeñas poblaciones (reactores BLASF), hasta soluciones optimizadas para la adaptación de procesos existentes a las nuevas necesidades de caudal de tratamiento como los procesos híbridos y de nivel de depuración como el RBpM.

En la actualidad continúa la evaluación experimental de los nuevos procesos integrados, híbridos y combinados, para profundizar en su conocimiento y optimizar el sistema con dos objetivos diferenciados: como proceso de nueva implantación y para ampliación de plantas existentes.

Por otro lado hemos comprobado que el empleo de membranas para transferir sustancias gaseosas (como el oxígeno) ofrece importantes ventajas en relación a otros procesos biopelícula, pero aún quedan por resolver cuestiones para el escalado de la tecnología, como las derivadas de un adecuado control del espesor de la biopelícula y del comportamiento, costes y esperanza de vida de las membranas. Por eso el GIA continúa con su investigación sobre los RBSOM a través de

dos proyectos. El objetivo del primero es analizar el comportamiento de reactores híbridos, en los cuales la biopelícula crece sobre membranas coexistiendo con biomasa en suspensión (Figura 7). En el otro se estudiará el comportamiento de un RBSOM sólo nitrificante, complementario de otro reactor de lecho "perturbado" encargado de la desnitrificación y de la eliminación de carbono y fósforo. Así, en enero de 2013 el GIA inicia el proyecto PBi², Procesos Biológicos integrados innovadores para la eliminación de nutrientes (Tejero *et al.* 2012).

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la contribución de todos los investigadores que participaron en los trabajos descritos y de las entidades que los financiaron.

9. REFERENCIAS

- Cuevas, G. 2003. Prefermentación y depuración de aguas residuales domésticas en reactores mixtos con biopelícula y membranas de separación. Tesis doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Santander.
- Díez, R., De Florio, L., Moreno-Ventas, X., Herrero, M., Pérez, P., Cantera, S. and Tejero, I. 2012. Biological nutrient removal in a novel anoxic-anaerobic reactor followed by a membrane biofilm reactor. *In* Proceedings of the IWA Nutrient Removal and Recovery 2012: Trends in NRR (Book of abstracts), Harbin, China, September 23-25, pp. 206-207.
- Eguía, E. 1991. Desarrollo de la biopelícula en medio soporte permeable. Tesis doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Santander.
- Esteban, A.L. 2009. Modelización de reactores de biopelícula soportada y oxigenada por membranas (RBSOM) para la de-



FIGURA 7. Módulo RBSOM para la investigación de configuraciones híbridas.

puración de aguas residuales. Tesis doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Santander.

Esteban, A.L. y Tejero, I. 2007. Una revisión de las investigaciones sobre el tratamiento de aguas residuales con RBSOM (reactores de biopelícula que emplean membranas como material soporte y medio de oxigenación). *Tecnología del Agua*, **281**: 44-57.

Esteban, A.L., Díez, R., Rodríguez, L., Lobo, A., de Florio, L., Pérez, P. and Tejero, I. 2012. Processes based on the growth of biofilms on gas permeable membranes: Biomembrane reactors. *In Innovative Technologies for Urban Wastewater Treatment Plants (2nd Edition)*. Edited by F. Omil and S. Suárez, pp. 117-145.

Garrido, J., Méndez, R. y Oyanedel, V. 2002. Reactor biológico híbrido de membranas para tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas. Patente: 200200244 de 01.02.02. ES 2 190 895 B2. EP 1 484 287 B1 de 05.04.2006.

Gómez, C. 2010. Desarrollo y modelización de un sistema biopelícula para la eliminación de materia orgánica y nitrógeno. Tesis doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Santander.

Gómez, L.A. 1999. Optimización del proceso Blas II aplicando altas cargas orgánicas con agua residual urbana. Tesis Docto-

ral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Santander.

Hernández, D. 1998. Degradación de Bifenilos Policlorados por Métodos Químicos y Microbiológicos en Aceites Dieléctricos Industriales. Tesis doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Santander.

Jácome, A. 1999. Modelación y cinética de oxidación de materia orgánica y nitrificación simultáneas en biopelículas autoaeradas. Tesis doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Santander.

Jácome, A., Molina, J., Suárez, J. and Tejero, I. 2006. Simultaneous removal of organic matter and nitrogen compounds in autoaerated biofilms. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, **132**(10), pp. 1255-1263.

Lackner, S. 2009. Towards rational design of redox-stratified biofilms: a novel approach for developing robust biotechnologies for nutrient removal from wastewaters. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark.

Lazarova, V. and Manem, J. 2000. Innovative biofilm treatment technologies for water and wastewater treatment. *In*

Biofilms II: Process analysis and applications. Edited by James D. Bryers. Wiley series in ecological and applied microbiology, USA, pp. 159-206.

Leiknes, T. and Odegaard, H. 2007. The development of a bio-film membrane bioreactor. *Desalination*, **202** (1-3): 135-143.

Mihovilovic, B. 2010. Optimización del proceso BLASF® en alta carga: Modelización del atascamiento. Tesis doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Santander.

Osa, J.J., Eguía, E., Vidart, T., Jácome, A., Lorda, I., Amieva, J.J. and Tejero, I. 1997. Wastewater treatment with biofilm membrane reactors. *In Advanced Wastewater Treatment Processes*. Edited by J. Nigel and Horan J. University of Leeds, pp. 11-17.

Peters, R.W. and Alleman, J.E. 1982. The history of fixed-film wastewater treatment systems. *In Proceedings of the First International Conference on Fixed-Film Biological Processes*, Kings Island, Ohio, 20-23 April 1982, Volume I, pp. 80-108.

Presmanes, D., Gutiérrez-Prada, I., González-Viar, M., De Florio, L. y Tejero, I. 2012. Proceso híbrido P-HD-HN para eliminación de nutrientes con lecho fijo. *En Libro de Resúmenes de X Reunión de la Mesa Española de Tratamiento de Aguas*, Almería, 4-6 octubre 2012, pp. 5-8.

Rodríguez-Hernández, L., Esteban-García, A.L., Lobo, A., Temprano, J., Álvaro, C., Mariel, A. and Tejero, I. 2012a. Evaluation of a hybrid vertical membrane bioreactor (HVMBR) for wastewater treatment, *Water Science and Technology*, **65** (6): 1109-1115.

Rodríguez-Hernández, L., González-Viar, M., De Florio, L. and Tejero, I. 2012b. Hybrid membrane bioreactor application for decentralized treatment and reuse, *Desalination and Water Treatment*, (en prensa).

Santamaría, C. 1998. Desarrollo de un reactor biopelícula de lecho aireado y sumergido, con soporte fijo (BLAS II) para la eliminación de carbono orgánico. Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Santander.

Semmens, M.J. 2005. Membrane technology: pilot studies of membrane-aerated bioreactors. *Water Environment Research Foundation Report 00-CTS-11*.

Tejero, I. y Amieva, J. J. 1993. Sistema de depuración de aguas residuales y de los fangos producidos mediante procesos de biopelícula extraíble. Patente de invención ES 2 071 593.

Tejero, I. y Castillo, P. 1998. Proceso de depuración biológica conjunta de fósforo y materia orgánica carbonosa, empleando biopelícula fija sobre soporte hidrófobo y permeable al flujo de gases, y con alimentación de gases de oxigenación a través del soporte. Patente de invención ES 2 145 686.

Tejero, I. y Cuevas, G. 2002. Sistema mixto para la depuración biológica de aguas residuales combinando biopelículas y membranas de filtración. Patente de invención ES 2213461B2.

Tejero, I. y Eguía, E. 1991. Proceso de tratamiento biológico de aguas residuales basado en biopelícula desarrollada sobre un soporte permeable a gases. Patente de invención ES 2 038 556.

Tejero, I. y Santamaría, C. 1996. Proceso de tratamiento biológico de aguas basado en biopelícula sobre soporte de diseño específico. Patente de invención ES 2 128 962.

Tejero, I., Collado, R., Moreno-Ventas, X., Esteban, A., Díez, R. y Pérez, C. 2012. Procesos Biológicos integrados innovadores para la eliminación de nutrientes PBi². Ministerio de Economía e Innovación. Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (preconcedido).

Tejero, I., Díez, R., Esteban, A.L., Lobo, A., Temprano, J. y Rodríguez, L. 2010. Reactor biológico anóxico-anaerobio para la eliminación de nutrientes de aguas residuales. Patente de invención ES 2 338 979.

Tejero, I., Osa, J.J. y Gómez, C. 1997. Respirómetro con biomasa fija sobre soporte permeable a gases, pero no al agua, con alimentación de oxígeno a través del soporte y medida del oxígeno que se transfiere a través del mismo. Patente de invención ES 2 157 135.

Timberlake, D.L., Strand, S.E. and Williamson, K.J. 1988. Combined aerobic heterotrophic oxidation, nitrification and denitrification in a permeable support biofilm. *Water Research*, **22** (12): 1513-1517.

Water Environment Federation (WEF) 2010. *Biofilm Reactors*. WEF Manual of Practice No. 35. WEF Press, Alexandria, Virginia.

NOMENCLATURA

AnoxAn	Reactor de lecho perturbado de fangos Anóxico-Anaerobio.	RBC	Contactores Biológicos Rotatorios (en inglés).
BE	Biopelícula Extraíble.	RBLSFyMM	Reactor de Biopelícula de Lecho Sumergido Fijo y Membranas de Microfiltración.
BLAS	Biopelícula de Lecho Aireado Sumergido.	RBM	Reactor Biológico de Membranas.
BLASF	Biopelícula de Lecho Aireado Sumergido Fijo.	RBpM	Reactor de Biopelícula con Membranas.
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días.	RBSOM	Reactor de Biopelícula con Soporte y Oxigenación mediante Membranas.
DQO	Demanda Química de Oxígeno.	RBSP	Reactor de Biopelícula con Soporte Permeable.
GIA	Grupo de Ingeniería Ambiental.	RPLSF	Reactor de Prefermentación con Lecho Sumergido Fijo.
IVF	Índice Volumétrico del Fango.	SST	Sólidos en Suspensión Totales.
N	Nitrógeno.	TRH	Tiempo de Retención Hidráulico.
NH ₄	Amonio.	TRS	Tiempo de Retención de Sólidos.
NT	Nitrógeno Total.	UCT	University of Cape Town (tipo de proceso biológico de eliminación de nutrientes en aguas residuales).
P	Fósforo.		
PCBs	Bifenilos PoliClorados (en inglés).		
PT	Fósforo Total.		