

Avances en el diseño y la operación de los biorreactores de membrana: La experiencia española

RAQUEL IGLESIAS ESTEBAN (*), ENRIQUE ORTEGA DE MIGUEL (**), MARÍA ADELA MARTÍNEZ TARIFA (***), PEDRO SIMÓN ANDREU (****), LUCAS MORAGAS BOUYAT (****), EMILIA GARCÍA FERNÁNDEZ (*****), JORDI ROBUSTÉ CARTRO (******) e IGNASI RODRÍGUEZ-RODA LAYRET (******)

RESUMEN Un biorreactor de membranas (MBR) es una modificación del proceso de fangos activos convencional (FAC) donde se sustituye la decantación secundaria por un sistema de membranas de ultra (UF) o microfiltración (MF) de baja presión, obteniéndose un efluente prácticamente libre de sólidos en suspensión y microorganismos. Desde la primera instalación de MBR en el 2002, el número y capacidad de este tipo de sistemas ha incrementado de forma exponencial, motivados por la buena calidad del efluente, que permite la reutilización directa y el vertido en zonas sensibles, la compacidad y automatización del sistema y la posibilidad de remodelar depuradoras que, con el tiempo, no alcanzan los niveles de calidad exigidos. España contaba en 2011 con 45 sistemas MBR en funcionamiento para el tratamiento de aguas residuales urbanas que junto a futuros proyectos supondrán en el 2014 una capacidad total de tratamiento de unos 90 hm³ al año. Actualmente, tanto entidades públicas como privadas, consideran a los MBR una alternativa más de depuración, no sin antes haber pasado por un complejo periodo de aprendizaje que ha permitido conocer y mejorar la explotación y el diseño de estos sistemas. Dentro de las mejoras realizadas, la eficiencia energética es un factor en continuo desarrollo. Los avances en el control del ensuciamiento de las membranas a través de mejores diseños de los sistemas de membranas en cuanto a materiales, disposición de los módulos dentro del bastidor y sobre todo, en el tipo de aireación y frecuencia de la misma, han supuesto alcanzar consumos más competitivos frente a otros sistemas de tratamiento más habituales. Los avances en la operación y el diseño de estos sistemas están siendo recogidos en una Guía para la implantación de MBR coordinada por el CEDEX, en la que participan los principales gestores y operadores de este tipo de sistemas en España, cuyos trabajos previos constituyen la base de este artículo.

MEMBRANE BIOREACTORS DESIGN AND OPERATION IMPROVEMENTS: THE SPANISH EXPERIENCE

ABSTRACT A Membrane BioReactor (MBR) is a modification of a conventional activated sludge (CAS) plant where the secondary settling is replaced by a low pressure ultrafiltration (UF) or microfiltration (MF) membrane separation process, in order to obtain an effluent almost free of suspended solids and microorganisms. Since the first MBR installation in 2002, the number and capacity of these systems have exponentially increased in Spain, driven by the high quality of the effluent which allows direct reuse and discharge into environmentally sensitive areas, the compactness and automation of these plants and the possibility of upgrading existing wastewater treatment plants (WWTP) which no longer reach the required effluent quality levels. There were 45 operating MBR systems in 2011 and the total municipal wastewater treatment capacity by this type of plants will be about 90 hm³ in 2014 when the current projects have been implemented. Today, Spanish public and private wastewater management agencies consider MBR plants as an alternative of treatment but first they had to face a complex learning period to operate and design this kind of system. A significant progress has been made over the last years, but especially energy efficiency responds to the challenge of continuous improvement. Membrane fouling control consumes most of the energy involved in the process, therefore, antifouling materials and better membrane air-scour systems that allow the frequency and intensity of air flow to be controlled in realtime, are being investigated. This brings MBR closer to the CAS process in terms of energy efficiency. Breakthroughs in the design and operation of MBR plants are being collected in a guide for the implementation of MBR led by CEDEX, in which the main managers and operators are involved. This paper presents some of these improvements.

Palabras clave: MBR, Aguas residuales, Operación, Recomendaciones de diseño.

Keywords: MBR, Wastewater treatment, Operation, Design, Guidelines.

(*) MSc Ingeniera agrónomo. Directora de programa. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Área de Tecnología del Agua. C/ Paseo Bajo Virgen del Puerto 3, 28005. Madrid. E-mail: raquel.iglesias@cedex.es

(**) Ingeniero Técnico industrial. Director de programa. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Área de Tecnología del Agua. C/ Paseo Bajo Virgen del Puerto 3, 28005. Madrid. E-mail: enrique.ortega@cedex.es

(***) MSc Ingeniera Química. Técnico I+D. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Área de Tecnología del Agua. C/ Paseo Bajo Virgen del Puerto 3, 28005. Madrid. E-mail: adela.martinez@cedex.es

(****) Ingeniero Industrial. Director Técnico ESAMUR. Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia. E-mail: pedro.simon@esamur.es

(*****) Ingeniero Industrial. Jefe del Departamento de Gestión de Acometidas. Agencia Catalana del Agua (ACA). E-mail: amoragas@gencat.cat

(******) Ingeniera Química. Jefe de unidad del Departamento de Explotación de Sistemas de Saneamiento. Agencia Catalana del Agua (ACA). E-mail: ebgarcia@gencat.cat

(******) Dr. Ciencias químicas. Jefe de unidad del Departamento de Explotación de Sistemas de Saneamiento. Agencia Catalana del Agua (ACA). E-mail: jrobuste@gencat.cat

(******) Dr. Ingeniero Industrial. Catedrático de Ingeniería Química, Universitat de Girona. Responsable del Área de Tecnologías y Evaluación del ICRA. Instituto Catalán de Investigación del Agua (ICRA) y LEQUiA - Universidad de Girona (UdG). E-mail: irodriguez@icra.cat

1. INTRODUCCIÓN

Un biorreactor de membranas (MBR) es una modificación del proceso convencional de fangos activos (FAC) donde la separación del fango del agua tratada se realiza mediante una filtración con membranas en vez de un decantador.

El uso de membranas elimina los problemas de decantabilidad del fango frecuentes en los procesos FAC, permitiendo trabajar a concentraciones elevadas de sólidos en el licor mezcla (MLSS), hasta 18 g L^{-1} (Judd, 2006) (CWA 15897, 2008), y con edades del fango (θ_c) superiores a los 15 días, lo que se traduce en un ahorro sustancial de espacio pero con un mayor coste energético debido fundamentalmente a la disminución de la transferencia de oxígeno en el reactor biológico y al aire necesario para realizar la limpieza del sistema de membranas.

Existen tres tipos de membranas: de placa plana (PP), de fibra hueca (FH) y tubulares (Figura 1), con pasos de UF o MF. Las primeras trabajan sumergidas mientras que las tubulares son todas externas.

En España todos los sistemas de MBR para el tratamiento de aguas residuales urbanas son sumergidos, es decir, las membranas están dentro del licor mezcla frente a los externos que tienen los módulos de membrana fuera del reactor biológico.

El diagrama de flujo más habitual es el presentado en la Figura 2, consistente en un sistema sumergido no integrado, donde las membranas están ubicadas en un tanque aparte del reactor biológico. El proceso de filtración de las membranas se realiza mediante bombas de aspiración. La diferencia de presión que se crea entre uno y otro lado de la membranas durante el filtrado es la presión transmembrana (PTM) que en este tipo de sistemas está entre 0,03-0,3 bar y el caudal que

atraviesa las mismas, denominado flujo (F), se encuentra entre 18 y $30 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en función del tipo de membrana.

Las membranas precisan de un sistema de aireación propio con caudales de aire entre $0,3$ - $0,6 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ por m^2 de membrana y de una recirculación (Qr) externa que permita mantener las concentraciones adecuadas dentro de la zona de membranas.

Respecto a un tratamiento convencional, un MBR precisa de un mejor control de los caudales a tratar y un pretratamiento más completo para proteger y garantizar el buen funcionamiento de las membranas. Estos requerimientos, junto al coste de las membranas y el mayor consumo energético, proporcionan un sistema de depuración más costoso en implantación y explotación pero con calidad de agua suficiente para ser reutilizada en prácticamente todos los usos citados en el Real Decreto 1620/2007 o poder alimentar directamente tratamientos como la ósmosis inversa (Tabla1).

Parámetro	Rangos
Sólidos en Suspensión (mg L^{-1})	1-5
Turbidez (NTU)	0,5-1
<i>E.coli</i> (ufc 100mL^{-1})	10-100
Virus (Ulog eliminadas)	3-6
Silt Density Index (SDI)	2-4

TABLA 1. Calidades del efluente tratado por un sistema de MBR según casas comerciales.



FIGURA 1. Ejemplos de configuraciones y módulos de membrana. De izquierda a derecha: Placa plana, fibra hueca (sumergidas) y tubular (externa).

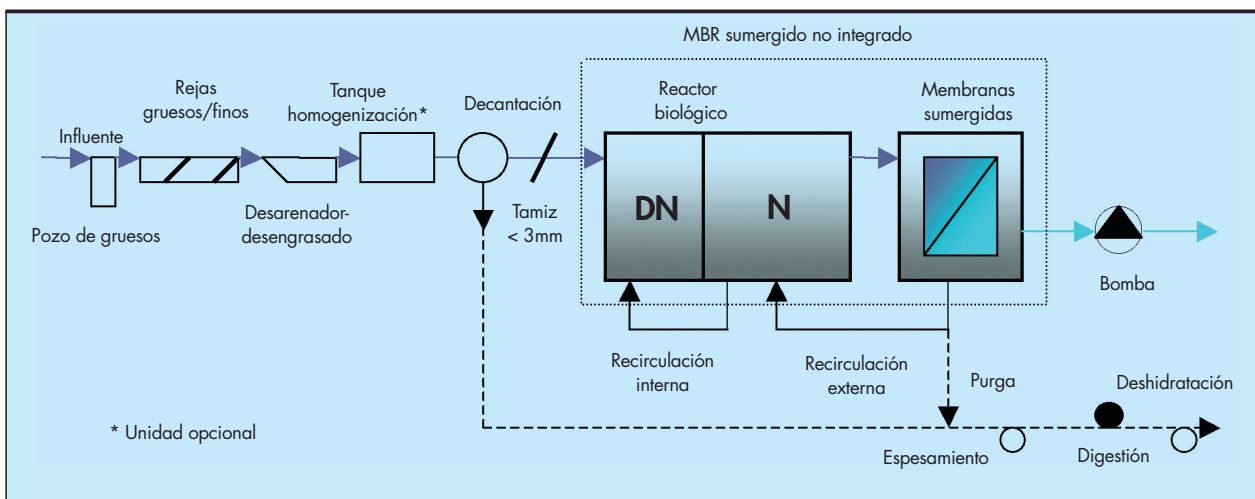


FIGURA 2. Diagrama de flujo de un MBR sumergido no integrado y con eliminación biológica de nitrógeno (N-DN).

En estos momentos la optimización del proceso respecto al consumo energético y al control del ensuciamiento de las membranas constituyen las principales líneas de desarrollo e investigación. En los últimos años han salido al mercado modelos que cuentan con materiales más resistentes y menos vulnerables al ensuciamiento, sistemas de limpieza que permiten aireación intermitente e incluso mecánica, o diseños que ofrecen flujos más elevados y mejoras en la estabilidad mecánica del sistema.

2. EVOLUCIÓN DE LOS MBR EN ESPAÑA

En España el uso de MBR para el tratamiento de aguas residuales urbanas se ha extendido significativamente en los últimos cinco años.

Este tipo de instalaciones se han implantado en la mayoría de los casos para verter en zonas de elevada sensibilidad ambiental (cerca de captaciones de agua potable, ríos con alto valor ecológico o recuperación de acuíferos), depuración en áreas

con grandes limitaciones de espacio o por la posibilidad de reutilizar el efluente en zonas con escasos recursos hídricos.

Los MBR permiten además ampliar la capacidad de tratamiento de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) que, con el tiempo, no dan los estándares de calidad requeridos para vertido. Este hecho ha sido valorado en algunos casos frente a otros sistemas como los lechos móviles (MBBR) o los biofiltros que también permiten hacer este tipo de remodelaciones en espacios reducidos pero que no proporcionan un efluente de tanta calidad.

En 2011 había 45 MBR en funcionamiento con una capacidad total de tratamiento de $64,6 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$, tal y como muestra la Figura 3. La primera instalación española de MBR se realizó en Lanzarote en el 2002, y desde entonces hay unas 55 plantas, entre proyectadas, construidas y en funcionamiento, que proporcionarán una capacidad total de tratamiento de unos $90 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ en 2014, distribuidas principalmente en el arco mediterráneo y el archipiélago canario.

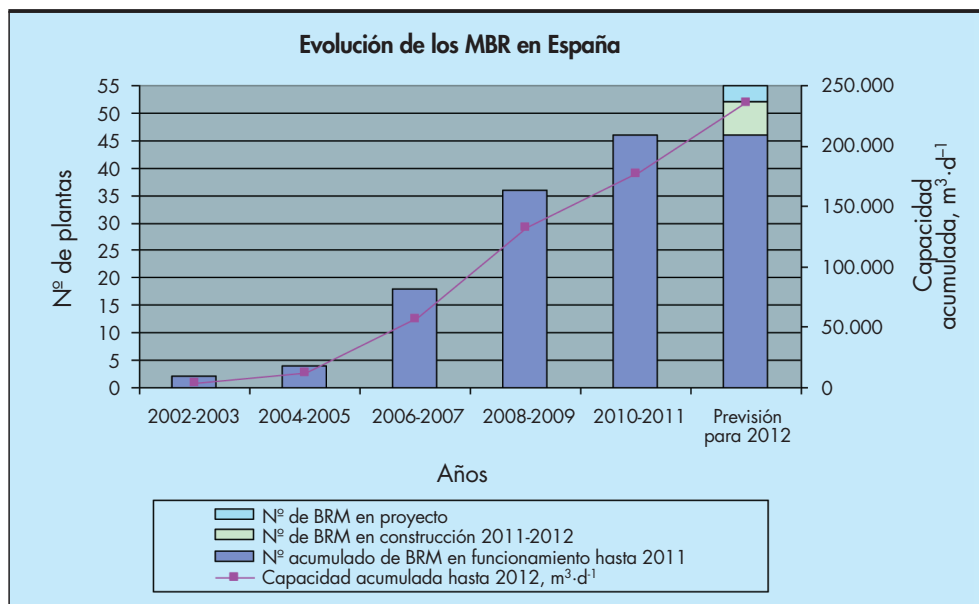


FIGURA 3. Evolución de los MBR en España: número de plantas y capacidad.

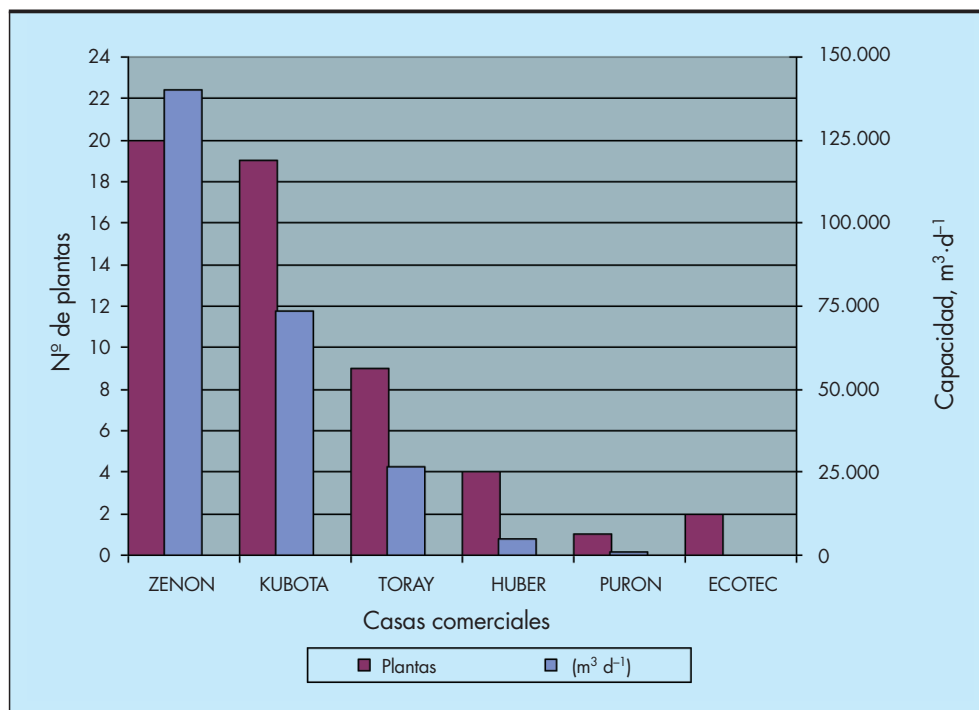


FIGURA 4. Capacidad y nº de instalaciones de MBR por casas comerciales en España. Fuente: Elaboración propia, CEDEX 2012.

En el 2006 los MBR españoles tenían un tamaño medio por debajo de los $5.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ mientras que en 2012 se cuenta con plantas por encima de los $20.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$.

El incremento producido, tanto de la capacidad de tratamiento como del número de instalaciones, se justifica por el aumento de la confianza en esta tecnología, el abaratamiento de las membranas y los menores gastos energéticos, debido a la mejora de los diseños de los sistemas de membrana y a la optimización del proceso.

Las casas comerciales con mayor número de instalaciones en España son GE Zenon con membrana de FH y Kubota de PP, que supone el 70% del total de las instalaciones. Les siguen otras compañías como Toray, Huber, Ecotec y Koch-Puron que también cuentan con instalaciones en funcionamiento (Figura 4), y otras empresas como Siemens o Alfa Laval que empiezan a estar presentes en los proyectos de licitación.

A continuación se resumen algunos avances significativos en la operación y en el diseño de los MBR. Dichos avances están siendo recogidos en una Guía para la implantación de MBR cuyos trabajos previos constituyen la base de este artículo.

3. DIEZ AÑOS DE EXPERIENCIA EN LA OPERACION DE MBR

En 2012 se cumplen diez años de la primera instalación de MBR en España, y desde entonces, los gestores y operadores han acumulado una valiosa experiencia en la operación de este tipo de instalaciones, consiguiendo optimizar el proceso aún estando en muchas ocasiones fuera de los rangos de funcionamiento previstos en el diseño.

El desconocimiento inicial en determinados aspectos de la operación, la falta de apoyo en algunas ocasiones por parte de las casas comerciales, así como problemas con el diseño de algunos elementos, llevaron a una gran desconfianza inicial respecto a las potencialidades de este sistema de depuración. Esta desconfianza se ha ido diluyendo con el paso de los años y actualmente es considerado como un sistema de depuración más con ciertas particularidades en la operación y el control.

Los gestores y operadores de MBR españoles han tenido un papel fundamental en las mejoras que las distintas casas comerciales han ido incorporando tanto en el diseño de sus módulos como en los modos de operar con los mismos.

En este apartado se recogen algunos de los avances conseguidos en la operación de MBR en base a la experiencia de los autores de este artículo, centrándose principalmente en instalaciones con membranas de las casas comerciales Zenon y Kubota, aunque muchas de las recomendaciones que aquí se presentan son de aplicación a otros sistemas de membranas tanto de FH como de PP.

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE ENTRADA

En cualquier instalación de depuración es importante que el influente sea adecuado para ser tratado por la EDAR. Esto si cabe es más importante en los MBR puesto que comporta los mismos problemas que un FAC sobre tóxicos e inhibidores en el proceso biológico, pero además, hay ciertos productos que son dañinos para las membranas, como los hidrocarburos, acetonas o disolventes.

La tipología exacta y la concentración de los compuestos que pueden ser perjudiciales para las membranas no siempre es conocida, y las casas comerciales no dan información detallada al respecto, por lo que es importante llevar a cabo una analítica previa del tipo de compuestos que contiene el agua residual a tratar, realizar controles frecuentes e incluso prever depósitos para derivar algún vertido puntual. Este aspecto es fundamental y puede limitar el uso de esta tecnología.

3.2. ESTRATEGIAS DE OPERACIÓN HIDRÁULICA

Para definir la estrategia de operación se debe elegir la variable que regulará el funcionamiento de la bomba de permeado, determinando el caudal a aspirar y el modo de funcionamiento. Los sistemas que suelen utilizarse son: 1) trabajar a flujo constante, 2) a PTM constante, 3) en función del caudal de llegada a planta y 4) para instalaciones pequeñas, trabajar como si la cuba de filtración fuera un bombeo.

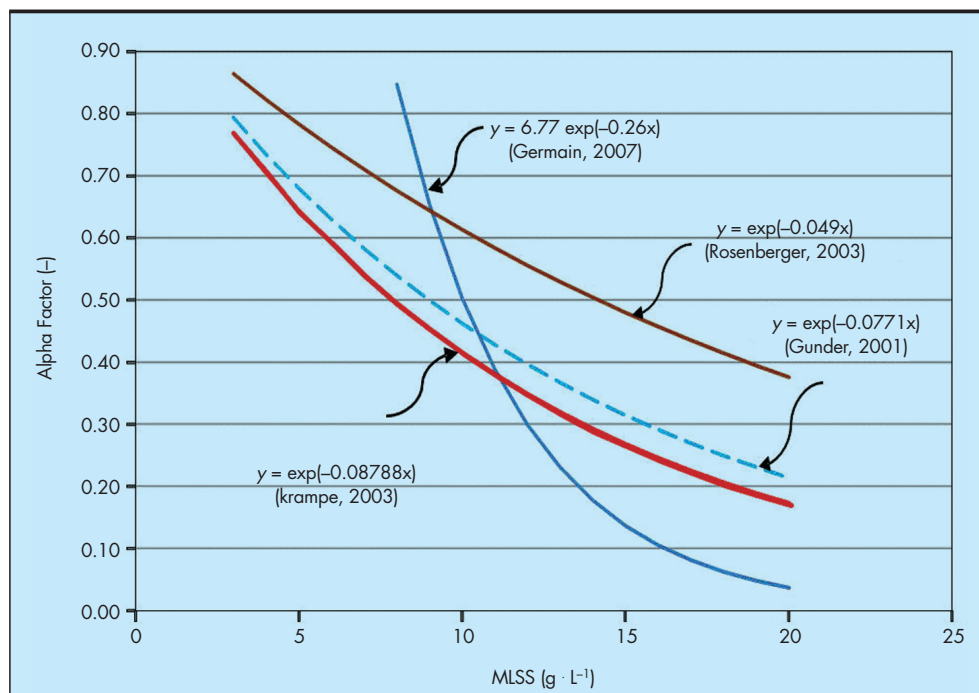


FIGURA 5. Influencia de los MLSS en el factor alfa. Fuente: www.onlinembr.info.

La determinación del flujo de trabajo es una decisión clave dentro de la operación de los MBR. Esta elección va a afectar directamente a la vida útil de las membranas, ya que a mayor flujo mayor será el ensuciamiento, y por tanto, será necesario aumentar el número de limpiezas químicas y los caudales de aireación de la limpieza física con el consiguiente aumento del gasto energético.

Lo recomendable sería trabajar con la mínima superficie de membrana posible y a un flujo próximo al de diseño (habitualmente unos 25 L h⁻¹ m⁻²). Para conseguir este equilibrio entre eficiencia energética del proceso y el ensuciamiento de las membranas, hay que tener una planta que permita el reparto de caudales diarios y estacionales entre las distintas líneas donde se ubican las membranas, ajustando convenientemente la parada y entrada en funcionamiento de las distintas unidades funcionales o bastidores de membranas que componen estas líneas.

3.3. PARÁMETROS DEL PROCESO

Trabajar con concentraciones de MLSS elevadas en el reactor biológico penaliza significativamente el factor alfa y por tanto la transferencia de oxígeno lo que se traduce en un aumento del consumo energético del proceso. Esta tendencia se muestra en la Figura 5, donde se recogen los estudios realizados por diferentes autores sobre la influencia de los MLSS en el factor alfa. Es por este motivo que el rango de concentraciones de MLSS en el reactor biológico se ha situado entre 6 y 8 g L⁻¹ con recirculaciones desde el tanque de membranas de 3 a 5 veces el caudal medio de entrada

En general lo recomendado sería trabajar al mínimo de MLSS que el sistema admitiera, en función de la carga contaminante de entrada y la edad de fango adoptada para obtener el rendimiento de depuración deseado, con objeto de evitar concentraciones elevadas en el tanque de membranas y de prevenir una disminución de la permeabilidad tal y como muestra la Figura 6.

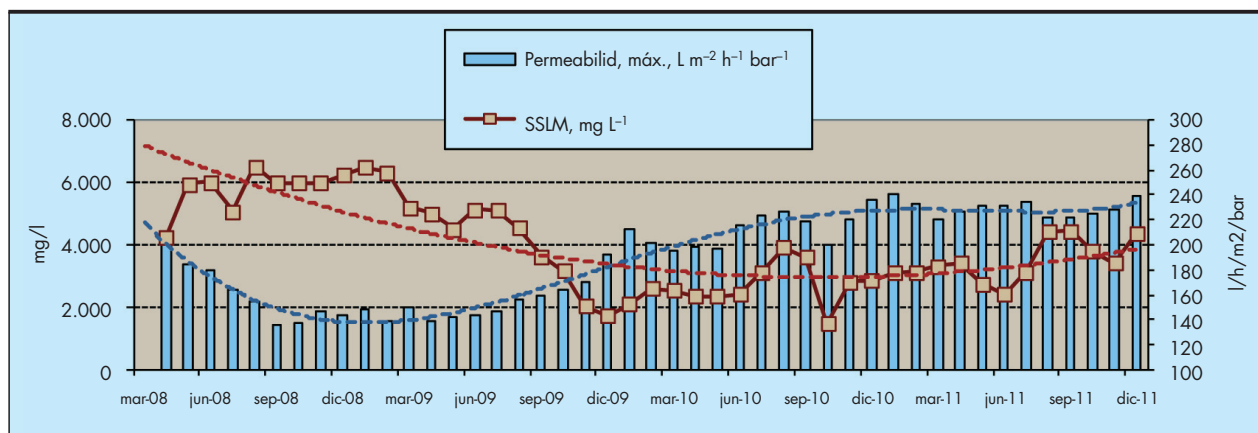


FIGURA 6. Influencia de los MLSS en la permeabilidad de las membranas (ESAMUR, 2011).



FIGURA 7. Tamices rotativos de malla de 2 mm en EDAR de Sabadell-Riu Sec, Cataluña.

Con los actuales rangos de funcionamiento de las plantas españolas, se consiguen efluentes con calidades similares a las indicadas por las casas comerciales (Tabla 1), así como producciones de fangos parecidas a un proceso de fangos activos en las mismas condiciones de trabajo. Además, la durabilidad de las membranas está siendo mayor a lo indicado por las casas comerciales, con plantas que superan los 8 años de funcionamiento sin haber tenido que sustituir las membranas por envejecimiento.

3.4. ENSUCIAMIENTO Y CONTROL DEL PROCESO

El ensuciamiento de las membranas se puede definir como la deposición de microorganismos, coloides, precipitados orgánicos (“fouling” orgánico) e inorgánicos (“scaling”) fundamentalmente por carbonato de calcio y sulfato de magnesio.

La primera medida para controlar el ensuciamiento de las membranas es instalar un tamizado previo al MBR de al menos 1 mm de paso para FH y 2 mm para PP (Figura 7).

En segundo lugar, para evitar que las membranas lleguen a alcanzar un ensuciamiento permanente, se deben seguir unos protocolos de limpieza, marcados por los fabricantes, y mantener caudales adecuados de aireación en función del flujo de operación. Además, dentro del ciclo de filtración las membranas de FH disponen de contralavado y las de PP de ciclos de re-

lajación donde no se filtra agua pero se mantiene la aireación. En función de la carga y el caudal a tratar hay plantas trabajando a 10 minutos de filtración y 30 segundos de contralavado, y otras con 16 minutos de filtración y 2 minutos de contralavado. El caudal de contralavado suele oscilar entre el caudal habitual de permeado y hasta un 150% de dicho valor.

En la Figura 8 se clasifican los principales puntos de control del proceso de filtración de un MBR (Ferrero et al, 2012).

En general las plantas españolas siguen los protocolos de limpieza química con frecuencias parecidas a las indicadas por los fabricantes, y en los últimos años han conseguido disminuir el caudal de aireación de las membranas de FH al funcionar con ciclos de aireación en discontinuo y periodos de parada de la aireación cada vez más dilatados en función de la concentración de MLSS que se tenga en el tanque de membranas.

Los sistemas de control existentes en MBR a escala real son muy sencillos y poco flexibles. Existe, sin embargo, un número significativo de patentes de las principales casa comerciales de membranas (Siemens, GE, IIT, Eimco, Polymem, Zenon, Kruger, Degremont), así como artículos de investigación que detallan distintas propuestas de control, principalmente encaminadas a reducir el consumo energético del proceso. Aunque la tendencia de futuro es la de integrar biología y filtración (Monclús, 2011), todavía se controla de un modo independiente ambos procesos.



FIGURA 8. Puntos de control del proceso de filtración de un MBR (Ferrero et al, 2012).

	Fibra Hueca			Placa Plana		
	San Pedro	Calasparra	Vallvidrera	Mar Menor	Hacienda Riquelme	Riells i Viabrea
Caudal diseño (m ³ ·d ⁻¹)	20.000	2.000	1.100	1.880	1.575	2.160
Caudal real (m ³ ·d ⁻¹)	8.500	1.793	850	700	279	1.116
Nº de líneas	4	1	2	2	2	2
MLSS biológico (g·L ⁻¹)	3,25	5,43	7,3	10	9,85	8,8
% Recirculación	300	400	300	90	180	140
Edad fango (días)	43	38	16	40	> 50	13
CONSUMO TOTAL EDAR (kWh·kg DBO eliminado ⁻¹)	3,9	1,7	7,05	12,7	16,4	5,9
CONSUMO TOTAL EDAR (kWh·m ³)	0,75	0,98	1,13	1,27	1,64	0,69

TABLA 2. Parámetros de funcionamiento y consumos energéticos de MBR españoles, 2011.

3.5. AVANCES EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL PROCESO

El consumo energético de un MBR es 1,5-2 veces superior a un proceso de fangos activos en aireación prolongada lo que supone una de las principales barreras a la hora de implantar este tipo de tecnología.

En la Tabla 2 se exponen los consumos de algunos MBR españoles con sistemas de membranas tanto de FH y PP en unas determinadas condiciones de funcionamiento.

La variabilidad de los datos se debe en primer lugar al tipo de membrana utilizada y en segundo lugar a los rangos de funcionamiento respecto a PTM, Qr, F, y sobre todo en MLSS tanto en el tanque de membranas como en el reactor biológico de cada una de las EDARs, lo que sin duda afecta al consumo energético, aparte de estar algunas plantas tratando caudales muy por debajo del de diseño. A estas circunstancias habría que añadir además la carga contaminante que reciben, el diseño de la planta (poca flexibilidad, soplantes sobredimensionadas, diferencias de cotas, etc.) y plantas con una línea en paralelo o parte de las instalaciones compartidas con otra tecnología de proceso.

Se observa que el elemento con más influencia energética son las soplantes de aireación de las membranas, que junto a la aireación necesaria para el proceso biológico supone más del 60% de la energía consumida por la totalidad de la EDAR.

En general todas estas plantas han ido reduciendo sus consumos energéticos por medio de alguna de las siguientes estrategias:

- Trabajar con concentraciones de MLSS lo más bajas posibles. Repartir la masa de sólidos necesarios en el sistema en varios reactores biológicos.
- Bajar el caudal de recirculación teniendo precaución de no alcanzar valores límite de concentración máxima de MLSS en el tanque de membranas.
- Trabajar con flujos lo más elevados posibles para poder parar alguno de los bastidores o líneas de filtración, siempre que exista posibilidad de regulación del aporte del aire de membrana y de aspiración del permeado. En caso de no existir esta posibilidad reducir el flujo en las líneas en funcionamiento.
- Ajustar los ciclos de aireación de las membranas, bajando el caudal en continuo cuando las cargas y la con-

centración de MLSS así lo permitan, o incluso haciendo ciclos discontinuos en membranas de FH.

- Funcionar por gravedad cuando la cota así lo permita. Aprovechar el desnivel entre la lámina de agua en la cuba de filtración y el punto de salida del agua permeada, regulando el caudal filtrado mediante una válvula automatizada. Esta posibilidad es factible aunque el control es más complicado.
- Evitar sobrepresiones por acumulación de aire en tuberías de permeado incorporando sistemas de extracción de aire.
- Aprovechar la sobresaturación de oxígeno del tanque de filtración descargando este caudal al principio de la zona óxica del reactor biológico.

3.6. PROBLEMAS DETECTADOS EN LA OPERACIÓN

Los problemas detectados en los MBR españoles tienen más que ver con fallos mecánicos en bombas, desajustes de válvu-



FIGURA 9. Rotura de membranas de FH.

Problemas	Consecuencias	Posibles soluciones
Acumulación de espumas.	<ul style="list-style-type: none"> - Desbordamiento del tanque. - Pérdida de sólidos. - Errores en medidas de MLSS. 	<ul style="list-style-type: none"> - Instalación de una bomba de extracción de fangos en exceso en la cuba de filtración y a media altura. - Variar la edad del fango θ_c. - Uso de antiespumantes sin base de silicona.
Contaminación bacteriológica del depósito de permeado	<ul style="list-style-type: none"> - Incumplimientos con la calidad establecida para el reuso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dosificación de hipoclorito en el depósito de permeado.
Entrada de oxígeno en la recirculación interna.	<ul style="list-style-type: none"> - Bajos rendimientos en la desnitrificación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Instalar una doble recirculación: una externa desde tanque membranas a reactor óxico y otra desde éste al reactor anóxico.
Rotura de membranas (Figura 9).	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de capacidad de filtración y calidad del efluente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Habilitar grúas y espacios acondicionados para una ocasional limpieza manual (Figura 10). - Controlar las presiones durante los contralavados y limpiezas químicas. - Cubiertas para proteger el tanque de membranas y reactor biológico.
Fallos en el equipamiento de control.	<ul style="list-style-type: none"> - Parada de la planta por alarma. 	<ul style="list-style-type: none"> - Permitir el control manual. - Programación accesible para usuario. - Flexibilidad en el diseño para poder operar con distintas líneas. - Duplicidad del sistema de control.
Acortamiento de fibras.	<ul style="list-style-type: none"> - Ensuciamiento de la membrana al reducirse la movilidad necesaria para su limpieza física. - Rotura de las fibras. 	<ul style="list-style-type: none"> - Control del acortamiento mediante dispositivos que permitan el acercamiento de los cabezales de anclaje cuando sea necesario.

TABLA 3. Problemas detectados en MBR españoles, consecuencias y posibles soluciones.

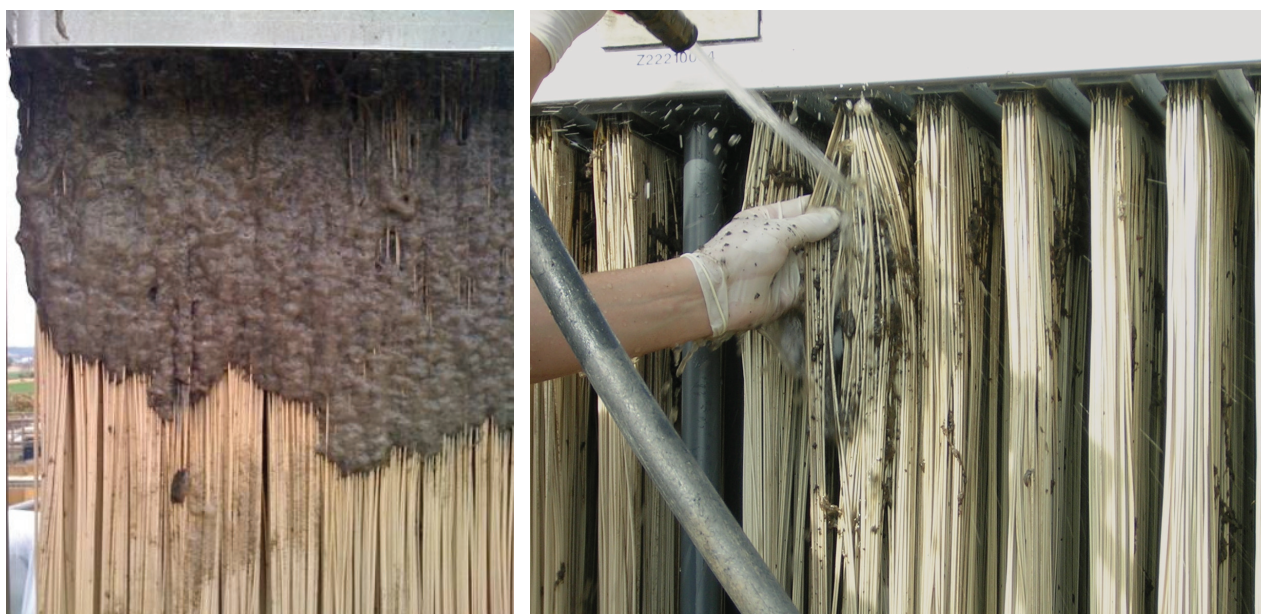


FIGURA 10. Izquierda: Ensuciamiento de membranas de FH; Derecha: Limpieza manual de membranas de FH.

las, fallos en el equipamiento de control e instrumentación, falta de duplicidad de equipos básicos, como compresores o bombas de vacío, etc., que con problemas de ensuciamiento de las membranas o de rotura de las mismas.

En la Tabla 3 se resumen algunos problemas específicos encontrados en MBR operados en España, las consecuencias que produjeron y la solución adoptada o que podría realizarse en plantas en circunstancias similares.

4. BUENAS PRÁCTICAS DE DISEÑO EN FUNCIÓN DE LA EXPERIENCIA ACUMULADA

En general el diseño de los MBR ha venido determinado por las casas comerciales que suministran los sistemas de filtración. Existen algunos manuales de diseño como el elaborado por la Water Environmental Federation (WEF, 2011), los publicados por S. Judd (2006 y 2011) o C. Brepols (2011) que dan los pasos básicos a seguir a la hora de plantearse el diseño de un MBR y que a continuación se exponen de forma resumida:

- Determinación de la configuración elegida para la eliminación simultánea de materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo).
- Cálculo del balance de materia para la eliminación de nutrientes, las recirculaciones y las fracciones de las zonas anóxicas y anaerobias.
- Determinación de la edad del fango de diseño, del caudal de purga y de la concentración de MLSS.
- Determinación de la máxima concentración de MLSS permitida en el tanque de membranas y del caudal de la recirculación externa.
- Cálculo de la concentración de MLSS en las diferentes zonas del biorreactor.
- Dimensionamiento de los respectivos volúmenes de los tanques.
- Verificación de las condiciones de proceso considerando los volúmenes reales, las capacidades de aireación, alcalinidad, etc.
- Dimensionamiento de la filtración con membranas y de los equipos periféricos (especialmente soplantes y equipos de limpieza).

Al margen de este dimensionamiento básico, que erróneamente muchas veces aún se realiza de un modo independiente entre el proceso biológico y la unidad de filtración, hay una serie de consideraciones generales producto de la experiencia de la operación de esta tecnología que deben tenerse en cuenta en esta fase inicial de diseño. A continuación se exponen de un modo sintético algunas de estas consideraciones:

4.1. INTEGRACIÓN DEL MBR CON LAS OTRAS UNIDADES DE LA EDAR

El diseño del MBR se debe llevar a cabo de un modo integrado con otras operaciones unitarias de la EDAR como son el pretratamiento, la decantación primaria, y el tratamiento posterior de lodos.

Los pretratamientos mecánicos necesarios para evitar problemas de ensuciamiento de las membranas por material fi-

broso tienden a ser cada vez más exigentes siendo en estos momentos lo recomendado una luz de paso de los tamices, entre 0,5 y 1 mm para membranas de FH y de 2 a 3 mm para membranas de PP. Asimismo, se considera muy importante poder disponer de un desarenador-desengrasador eficiente para evitar la posible rotura, la colmatación y el ensuciamiento excesivo de las membranas.

La presencia de decantación primaria tiene un impacto significativo sobre el diseño y la operación de los MBR. Aparte de las ventajas análogas a los sistemas convencionales de lodos activos (disminución de la carga orgánica, reducción de los costes de aireación y del volumen del tanque biológico, optimización de la producción de metano por digestión anaerobia), la decantación primaria evita la colmatación del microtamiz con sólidos en suspensión sedimentables. Como principales contrapartidas debemos considerar el espacio ocupado, la posible generación de olores, sus costes de construcción y la posible falta de materia orgánica para garantizar la posterior desnitrificación. Remarcar que los costes debidos a la aireación y la disminución de la carga repercutiría solamente sobre la aireación de la zona aerobia, ya que el aire requerido para la limpieza mecánica de las membranas seguiría siendo el mismo.

La literatura reporta ciertas particularidades de los lodos de un MBR respecto a los de sistemas de lodos activos convencionales, como serían su mayor concentración y viscosidad, la mayor presencia de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) o el menor tamaño medio de sus flóculos, y alerta del posible impacto en las unidades posteriores de tratamiento de lodos. No obstante, la experiencia existente en España no permite identificar impacto significativo alguno en el espesamiento de los mismos, ni en su digestión anaeróbica, ni en el consumo de reactivos para su deshidratación, por lo que el diseño de la línea de fangos de un MBR tendrá que tener las mismas consideraciones que para un FAC.

4.2. GESTIÓN HIDRAULICA

Otro aspecto básico a considerar durante la fase de diseño es el de garantizar la gestión óptima del caudal a tratar. Las membranas están diseñadas para trabajar a un flujo determinado de diseño, y alejarse del mismo provoca problemas de ensuciamiento, por ejemplo cuando se fuerza para absorber picos o periodos de lluvias, o unos costes excesivos cuando el ratio kW h m^{-3} se ve penalizado si la membrana trabaja a flujos menores al de diseño. Para evitar dicho problema el diseño de la EDAR debe permitir una cierta laminación del caudal que facilite el trabajo a flujo constante, bien sea mediante un tanque de laminación (Figura 12) o modificando el volumen del tanque biológico, aunque esta segunda opción puede repercutir sobre el rendimiento del sistema de aporte de oxígeno.



FIGURA 11. Vista general de la EDAR de San Pedro del Pinatar, Murcia.



FIGURA 12. Tanque de laminación de La Bisbal, Cataluña.

Por otro lado, a la hora de gestionar la EDAR es importante poder disponer de una cierta flexibilidad del sistema. Esto se puede lograr mediante la instalación de varias líneas de membranas diferenciadas, en el que se prevea la aspiración de agua tratada independiente y el dimensionamiento de la necesidad de aire a regular para una sola línea. De esta manera, se podrían parar o poner en marcha en función del caudal a tratar.

Una última tendencia para poder trabajar en el MBR con un flujo constante y cercano al de diseño es el de combinarlo con otras tecnologías que traten el agua en paralelo (FAC, decantación secundaria, IFAS, etc.) y que permitan una mayor flexibilidad del caudal a tratar. De este modo se puede derivar el agua del MBR a la otra línea en función de las necesidades globales de la EDAR. Este tipo de instalaciones se denominan plantas de configuración dual, y son habituales en el rediseño de plantas de gran capacidad.

4.3. EQUIPOS PERIFÉRICOS

El diseño de los equipos periféricos también presenta algunas particularidades que se deben tener en cuenta. Por ejemplo, configuraciones innovadoras utilizan bombas sumergibles de baja carga con el fin de minimizar los requerimientos energéticos de la recirculación de nutrientes. El permeado puede ser extraído a través de las membranas con bombas o por gravedad. La mejor configuración de cara al ahorro energético es la extracción por gravedad, pero para garantizar un correcto funcionamiento se necesita una concentración de licor mezcla suficientemente elevada para balancear posibles variaciones de caudal o el ensuciamiento biológico de las membranas.

Por otro lado, el diseño de los sistemas de aireación de los MBR es uno de los principales desafíos técnicos. El caudal de aire debe ser uniforme entre boquillas de modo que las membranas por encima de las toberas estén uniformemente aireadas. Por contra, se produce un ensuciamiento localizado de la membrana cuando el aire no es suficiente. Las áreas afectadas por la colmatación van aumentando ya que el flujo en las zonas que no están colmatadas debe aumentar para compensar la pérdida en el área de filtración. Dado que las tasas de ensuciamiento de la membrana son exponencialmente proporcionales al flujo, el ensuciamiento de la membrana se puede propagar rápidamente a toda la superficie de la membrana. Por lo tanto, mantener una aireación uniforme debajo de los módulos de membrana es crucial para la filtración de membrana estable.

Finalmente persisten problemas relacionados con la precisión con la cual se puede predecir la transferencia de oxígeno, para calcular el aire necesario para el proceso, ya que varía notablemente dependiendo de la disposición de los difusores, en base al flujo específico de aire por difusor, a la biología del fango, a la carga orgánica, etc. A su vez, la demanda bioquímica de oxígeno incluye un nivel significativo

de incertidumbre. Las ingenierías a menudo intentan obviar este problema combinando su know-how basado en sus experiencias a largo plazo. En casos prácticos, las incertidumbres en el cálculo de la demanda de oxígeno se cubren mediante varios factores de multiplicación y la redundancia de los equipos de aireación.

Con el objetivo buscar la mayor eficiencia energética en la futura planta, es importante flexibilizar y no sobredimensionar, que es una de las prácticas habituales que nos encontramos en las plantas actuales.

4.4. OTRAS CONSIDERACIONES

Resulta de suma importancia la instalación de deflectores (Figura 13) en la entrada a las líneas de membranas para evitar que se dañen los módulos instalados justo delante de la entrada.

Aunque la tecnología MBR se caracteriza por ocupar un espacio muy reducido, es recomendable disponer de una pequeña zona anexa al MBR para poder realizar pruebas externas o inspecciones visuales de los tanques y/o de los módulos. Otra consideración necesaria a la hora de instalar los tanques de membranas es la de facilitar la extracción de los módulos. Por este motivo se recomienda que el tanque de membranas se pueda destapar fácilmente y permita extraer fácilmente los casetes garantizando la seguridad de los operarios. Asimismo, se aconseja disponer de un puente grúa que permita levantar los bastidores de membranas con facilidad.

Finalmente, el sistema de membranas se debería diseñar con una superficie de membranas suficiente para acomodar el caudal punta diario con una línea de membranas no en uso. Además, el sistema de membranas debería tener un 10% de espacio adicional en cada uno de las líneas para poder instalar membranas en caso de que se necesitara un incremento de la superficie de filtración, en caso de aumento de caudal o en episodios de colmatación de las membranas.

5. OBSERVACIONES FINALES

Las estrategias llevadas a cabo para el control del ensuciamiento de las membranas a través de mejores diseños de los sistemas de membranas en cuanto a materiales, disposición de los módulos dentro del bastidor y sobre todo, en el tipo de aireación y frecuencia de la misma, han supuesto alcanzar consumos más competitivos frente a otros sistemas de tratamiento más habituales.

Los principales objetivos a conseguir, a corto o medio plazo, para mejorar la valoración de esta tecnología como alternativa a otros procesos de tratamiento convencionales son:

- Aumentar el grado de fiabilidad de las membranas. Al ser un sistema que basa la separación sólido-líquido en una barrera física (membranas) hay que tener en cuenta el riesgo que existe si esa barrera falla por mala operación, por deterioro, por colapso, etc.



FIGURA 13. Tanque de membranas EDAR Illescas, Toledo.

- Disminuir los costes de inversión y operación a través del abaratamiento de las membranas y mejora de la eficiencia energética del proceso.
- Aumentar la flexibilidad de los MBR para adaptarse mejor a los cambios de caudal.
- Diseños integrados donde se tengan en cuenta la influencia del proceso biológico sobre el sistema de membranas.
- Controles inteligentes que permitan ajustarse en tiempo real a las necesidades de caudal de aireación de las membranas, ajustar los parámetros de funcionamiento en función de la carga o los ciclos de operación (duración fija o en base a otros parámetros de los periodos de filtración, de contralavado y/o relajación).
- Establecer protocolos más específicos de las limpiezas químicas (periodos, dosis y reactivos) y de la adición de aditivos para la mejora de la filtrabilidad de los lodos y/o la disminución del ensuciamiento.

Los MBR son una alternativa frente a tratamientos de depuración convencionales cuando no se dispone de espacio y se tiene previsto reutilizar en usos recreativos, agrícolas o medioambientales. Esta tecnología ya empieza a mostrarse competitiva energéticamente respecto a un tratamiento compuesto por una EDAR convencional más un tratamiento de regeneración que incluya un tratamiento físico-químico, una filtración y una desinfección.

Los avances en la operación y el diseño de estos sistemas, algunos de los cuales han sido introducidos en este artículo, están siendo recogidos en una Guía para la implantación de MBR

coordinada por el CEDEX en la que participan los principales gestores y operadores de este tipo de sistemas en España.

6. BIBLIOGRAFÍA

Brepols C. (2011). Operating large scale membrane bioreactors for municipal wastewater treatment. IWA publishing. CWA 15897:2008 (2008). Submerged membrane bioreactor (MBR) technology, CEN.

Ferrero G., Rodríguez-Roda I., Comas J. (2012). Automatic control systems for submerged membrane bioreactors: a state-of-the-art review. *Water Research*, 46 (11), 3421-3433.

ESAMUR, 2011. Estudio sobre influencia de los MLSS en la permeabilidad de las membranas.

Judd, S. (2006). *The MBR Book, Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*, Elsevier, Oxford, UK.

Judd, S. (2011). *The MBR Book, Second Edition: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*

Monclús, H. (2011). Development of a decision support system for the integrated control of membrane bioreactors. Tesis doctoral, Universidad de Girona (www.colmatar.es).

Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

WEF, 2001. *Membrane Bioreactors Manual of Practice N36*. Water Environmental Federation.

www.onlinembr.info. Fecha de consulta: Noviembre 2012.

APORTAMOS PUREZA A TODO LO QUE HACE

En los últimos 50 años, la filtración con membranas ha surgido como la tecnología líder para todo tipo de tratamiento de aguas. Koch Membrane Systems (KMS) ha estado al frente del desarrollo.

Nuestros ingenieros pueden ayudarle a diseñar soluciones que le permitan obtener los requerimientos, ya sea para la ampliación de una planta existente o un proyecto nuevo.

- » Membranas **PURON®** para MBR y aplicaciones con alto contenido en sólidos.
- » Cartuchos de membrana de fibra hueca **TARGA™ II** para aguas limpias y seguras.
- » OI de **FLUID SYSTEMS TFC™** para membranas espirales de aguas de mar y salobre.



Su línea directa con KMS en España



Matias Amor
Regional Sales Manager Iberia
Water & Wastewater
Tel.: +34 91 7454386
AmorM@kochmembrane.com

www.kochmembrane.com