

BIOREACTORES DE MEMBRANA: ESTADO DE LA TECNOLOGÍA. APLICACIÓN AL TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE EFLUENTES TEXTILES

M. Crespi, M.C. Gutiérrez, M.Vilaseca
Laboratorio de control de la Contaminación
INTEXTER, Universidad Politécnica de Catalunya

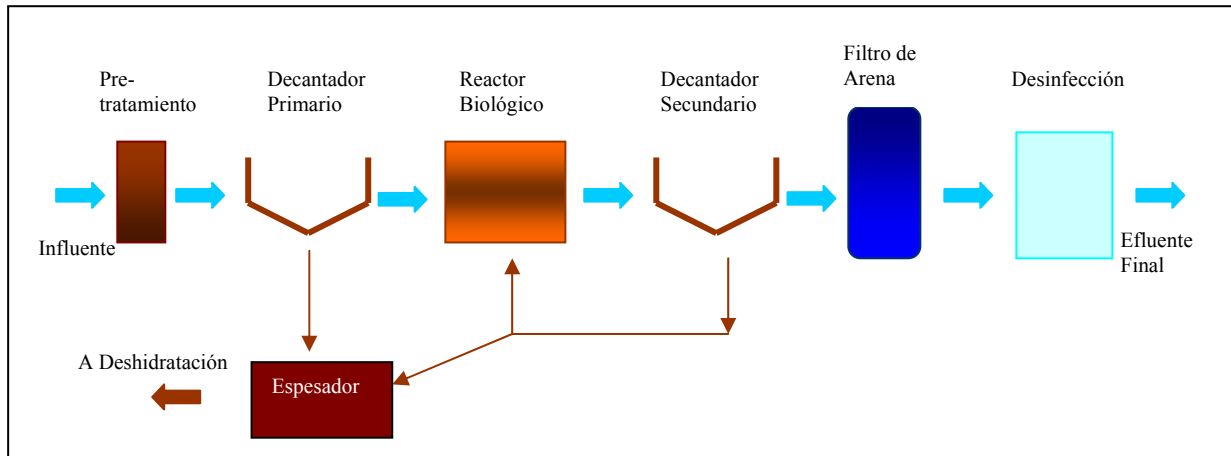
21st IFATCC INTERNATIONAL CONGRESS
Barcelona 6-8 may 2008

- 1.- EVOLUCIÓN DESDE UN SISTEMA CONVENCIONAL HASTA UN BRM**
 - 2.- SITUACIÓN ACTUAL**
 - 3.- BIOREACTOR PARA LA SEPARACIÓN DE BIOMASA**
 - 4.- VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS BRM**
 - 5.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA OPERACIÓN DE UN BRM**
 - 6.-PRINCIPALES BIORREACTORES DE MEMBRANA COMERCIALES**
 - 7.-POSIBILIDADES DE REUTILIZAR EL AGUA TRATADA EN UN BRM**
 - 8.-CONCLUSIONES**
-

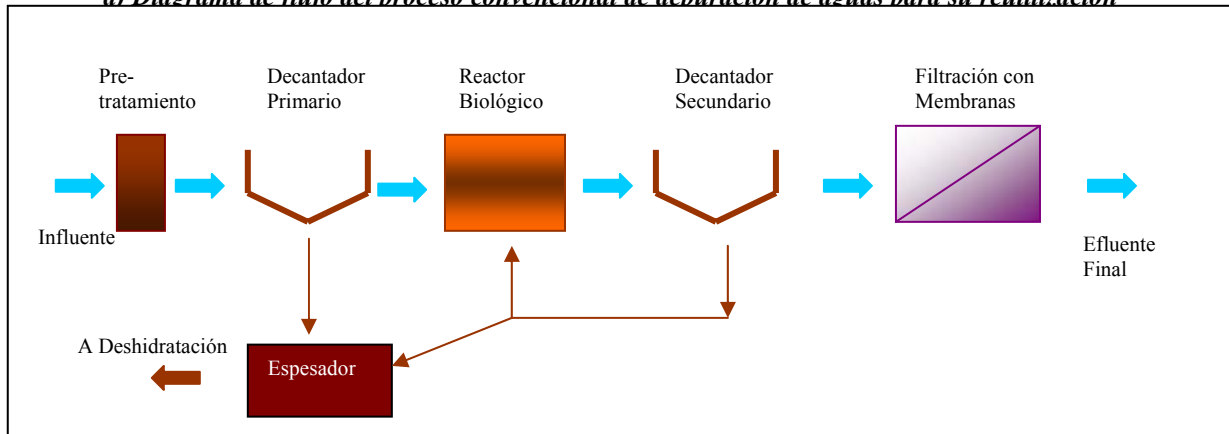
1.- EVOLUCIÓN DESDE UN SISTEMA CONVENCIONAL HASTA UN BRM

El tratamiento de las aguas residuales mediante sistemas biológicos se aplica desde hace más de cien años. El proceso de fangos activados es el más utilizado, fig. 1-a. Cuando se desea reutilizar el agua es necesario aplicar un tratamiento terciario que elimine los sólidos y desinfecte el efluente. En un principio las membranas se utilizaban sustituyendo al tratamiento terciario convencional (filtro de arena y desinfección), fig. 1-b. La micro filtración, ultra filtración y ósmosis inversa se han utilizado en zonas donde los límites de vertido son más exigentes o se exigía la reutilización del agua.

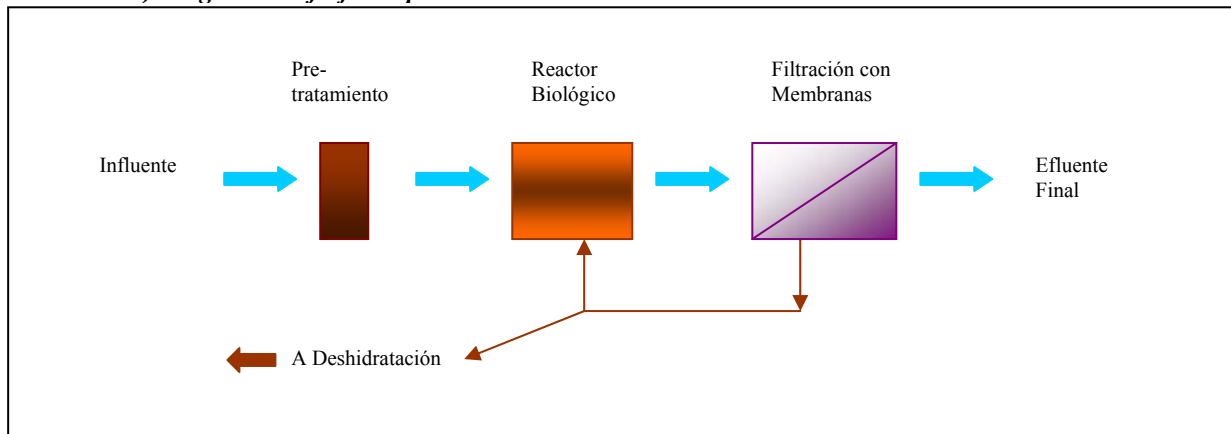
En los años sesenta se integra la membrana al proceso de depuración biológico. La separación fango-efluente se realiza con membranas de micro filtración y ultra filtración, eliminando así el paso de la sedimentación. El proceso de depuración queda mucho más simplificado, fig. 1-c. El BRM emerge como una alternativa al proceso de fangos activados convencional, especialmente cuando el espacio y los recursos de agua son limitados y se requiere una elevada calidad del agua tratada. En el campo de las aguas residuales industriales también es una opción cuando las aguas son difíciles de degradar y requieren edades de fango elevadas. También en aquellas aguas que favorecen la formación de flóculos biológicos que decantan mal o que tienden a flotar.



a) Diagrama de flujo del proceso convencional de depuración de aguas para su reutilización



b) Diagrama de flujo del proceso convencional con membranas como tratamiento terciario



c) Diagrama de flujo del biorreactor de membrana

Figura 1. Diagramas de flujo de un sistema de lodos activados y de un BRM

La primera idea de sustituir el decantador de un proceso biológico de fangos activados por una membrana de ultra filtración fue de *Smith et al.* en 1969. La primera compañía que se interesó por la nueva tecnología fue Dorr-Oliver Inc. en la década de los 60, que desarrollaron el sistema "Membrane Sewage Treatment" (MST). El sistema funciona enviando el agua a presión al módulo de membrana, tipo

placa y bastidor. En los años 70 se estableció un acuerdo entre Dorr-Oliver Inc. y Sanki Engineering Co. Ltd, para potenciar la implantación de los BRM en Japón. El resultado fue la construcción de más de 39 bioreactores con membranas externas, principalmente para el tratamiento de aguas sanitarias. Al mismo tiempo Thetford Systems, actualmente Zenon Environment, lanzó su versión de BRM externo llamado "Cycle-Let", también para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Posteriormente las investigaciones se orientaron hacia las aguas residuales industriales. Finalmente en el año 1982 Zenon patentó su sistema ZenoGem[®] basado en membranas de fibra hueca sumergidas en el bioreactor.

En el año 1989 el Gobierno Japonés impulsó un programa para el desarrollo de tecnologías de depuración compactas que permitieran la reutilización del agua tratada. Kubota desarrolló una membrana de estructura plana sumergida en el bioreactor (*Churchouse and Wildgoose, 1999*).

La primera generación de BRM era cara de construir y de mantener, el recambio de membranas tenía un coste elevado. También se necesitaba operadores cualificados, y el coste energético era elevado. La última generación de BRM con membranas sumergidas, ha resuelto la mayoría de los problemas operacionales de los BRM de primera generación. El coste de las membranas y el consumo de energía se ha reducido drásticamente.

2.- SITUACIÓN ACTUAL

Los primeros BRM comerciales aparecieron en Norte América a finales de los 70 y se extendieron a Japón a principios de los 80. La introducción en Europa de los bioreactores de membrana no se produjo hasta mediados de los 90. Actualmente existen más de 3000 BRM operando en diferentes partes del mundo y numerosas instalaciones en proyecto o construcción. Los BRM están muy extendidos en Japón y Norte América, y en menor medida en Europa. La mayoría de los procesos BRM son aerobios y de membrana sumergida dentro del bioreactor. Las mayores depuradoras BRM de Europa se encuentran en Brescia (Italia) con un caudal diario de 42.000 m³ de aguas domésticas e industriales, y San Pedro del Pinatar (España) con un caudal diario máximo de 52.875 m³ de aguas domésticas, utilizando ambas plantas membranas GE Zenon. En Brighwater (King County, Washington State, U.S.A) hay un MBR con membranas GE Zenon que trata 142.500 m³ / día, actualmente se está procediendo a su ampliación a 495.500 m³ / día que estará en funcionamiento el año 2010.

En España existen varias instalaciones industriales y domésticas la mayoría utiliza membranas GE Zenon o Kubota. Actualmente hay alrededor de 30 suministradores de tecnología para sistemas MBR a nivel mundial. Entre los mas importantes por el número de plantas suministradas están: GE ZENON (forma parte de GE Water Technologies), KUBOTA que tiene licenciarios en todo el mundo, US Filter (forma parte del grupo SIEMENS) y Mitsubishi Rayon.

La tecnología de los BRM se ha convertido en la mejor opción cuando se quiere obtener un efluente de alta calidad, con un bajo contenido de contaminantes químicos y con reducciones muy altas de bacterias y virus.

La creciente demanda de agua de calidad, para satisfacer la demanda a nivel mundial, y en especial en los países ribereños de Mediterráneo ha impulsado la desalación de agua de mar.

Recientes estudios realizados en UK, demuestran que se puede tratar el agua residual municipal hasta niveles de calidad superiores a los exigidos por las regulaciones mas recientes sobre agua potable. Para lo cual trataremos el efluente secundario con los nuevos sistemas de ultrafiltración, seguido de un tratamiento de O.I. de baja presión. O bien trataremos directamente el efluente de un BRM con un proceso de O.I. de baja presión. Este modo de obtener agua de calidad es más sostenible que la desalación de agua de mar. Se puede realizar con inversiones de capital un 34 % inferior a la desalación del agua de mar, y costes de explotación un 50 % inferiores. Los costes totales del ciclo de vida del tratamiento del agua residual municipal hasta niveles de agua potable, son un 40 % inferior a los de la desalación del agua de mar.

3.- BIOREACTOR PARA LA SEPARACIÓN DE BIOMASA

Un bioreactor de membrana para el tratamiento de las aguas residuales se diferencia básicamente de un sistema de lodos activos en la forma de realizar la separación sólido-líquido. En un proceso de lodos activados, la separación de los lodos se realiza normalmente por decantación y excepcionalmente por flotación. En un bioreactor de membrana (BRM), la separación agua / fango se realiza con una membrana de micro filtración / ultra filtración. Al no depender de la decantabilidad del fango se puede aumentar la concentración de biomasa hasta unas cinco veces, respecto al proceso convencional de lodos activados, con lo que podemos reducir el volumen del reactor manteniendo la carga másica del proceso biológico.

Los bioreactores de membrana pueden ser de membranas sumergidas en los lodos activados o de membranas externas. Inicialmente la separación sólido-líquido se conseguía bombeando la biomasa a elevadas presiones hasta el módulo de membranas, el permeado pasaba a través de las membranas y el concentrado era devuelto al reactor, este sistema es conocido como BRM de circuito externo (*Hard et al. 1970*). El diagrama de flujo se muestra en la figura 2. La fuerza conductora es la presión creada por la elevada velocidad tangencial a lo largo de la membrana (*Cicek et al. 1998; Urbain et al. 1998*). Las membranas empleadas en los BRM de circuito externo, pueden ser planas, tubulares o en espiral. El coste energético es elevado ya que se suele trabajar a presiones de 4-5 Bar, lo que suele representar consumos de 4-4,5 Kw/m³.

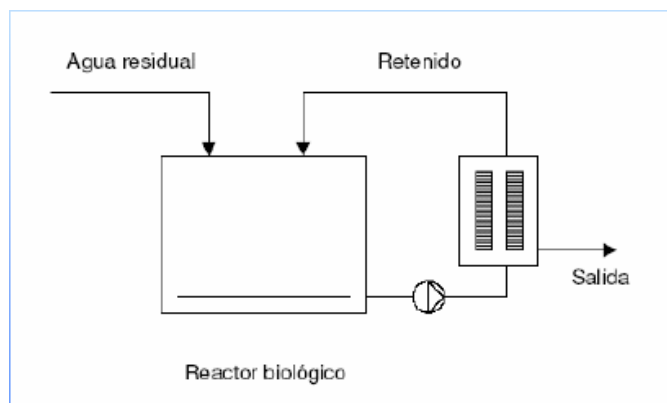


Figura 2. BRM de circuito externo

Con el fin de reducir el consumo de energía, en 1989 *Yamamoto et al.* sumergió las membranas directamente en el reactor biológico para extraer el agua tratada a través de ellas por succión, sistema denominado BRM de segunda generación o de circuito interno. Las membranas sumergidas se pueden introducir en el reactor biológico, o en un depósito anexo con el fin de facilitar los procesos de limpieza de las membranas, figura 3a y 3b.

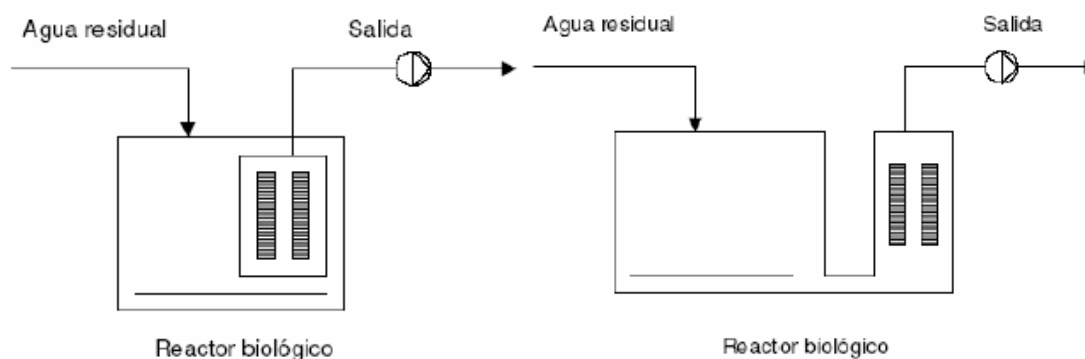


Figura 3a, BRM de membranas sumergidas en el reactor biológico

Figura 3b, BRM de membranas sumergidas en depósito anexo

Las membranas se sitúan encima de difusores para que las burbujas de aire retrasen el ensuciamiento de la membrana al disminuir la deposición de sólidos en la superficie de la membrana, gracias a la agitación que se crea. La fuerza conductora se consigue presurizando el bioreactor o creando una depresión en el interior de las membranas (*Buisson et al. 1998; Côté et al. 1997; Rosenberger et al. 2002*). Normalmente se utiliza una membrana de piel exterior, ya sea de fibra hueca o tipo placa y bastidor. Estas dos opciones están bien representadas a escala comercial por Zenon y Kubota, respectivamente. La membrana de Zenon resulta ser más innovadora ya que se trata de membranas dinámicas, las cuáles se mantienen en movimiento, gracias a la agitación que generan las burbujas de aire, por lo que se dificulta la deposición de sólidos en la superficie de la membrana. En la figura 4, se ve una imagen del sistema de placa y bastidor de Kubota, y del sistema de fibra hueca ZenoGem de Zenon.

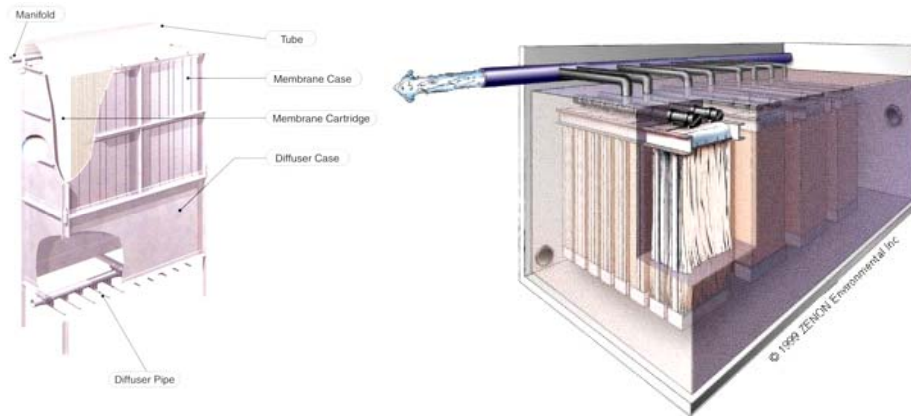


Figura 4 , Interior de un BRM de membranas sumergidas, con membrana de placa y bastidor (izquierda) y membrana de fibra hueca (derecha)

A pesar de que inicialmente la membrana de circuito externo era la más extendida por ser la primera configuración con la que se empezó a trabajar, actualmente los BRM de circuito interno (membrana sumergida) son los más frecuentes. La aparición de membranas orgánicas más económicas junto con los bajos costes energéticos ($<0,2 \text{ Kw/m}^3$) y mayores flujos de filtración han acelerado en todo el mundo el uso comercial de los BRM de circuito interno (*Adham et al. 2001*). Sea cual sea la membrana escogida, cada una de las dos configuraciones presenta sus ventajas e inconvenientes:

BRM DE MEMBRANA SUMERGIDA	BRM DE MEMBRANA EXTERNA
Bajos costes de bombeo de biomasa	Altos costes de bombeo de biomasa
Flujo de permeado bajo	Flujo de permeado alto
Limpiezas menos frecuentes	Limpiezas más frecuentes
Costes de operación bajos	Costes de operación más altos
Costes de inversión más altos	Costes de inversión inferiores

4.- VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS BRM

Las ventajas más destacadas de los BRM son: la calidad del agua tratada, el tamaño compacto de la instalación, la menor producción de lodos y la flexibilidad de operación.

Calidad del agua tratada

El mayor problema del sistema de fangos activos convencional es la correcta sedimentación del fango y el contenido de sólidos en suspensión que afecta a la calidad del efluente. En cambio en un BRM la calidad del agua permeada no depende de la decantación del fango. Este factor es especialmente importante en la depuración de efluentes industriales donde es muy común la aparición de microorganismos filamentosos o la desnitrificación en el decantador secundario. El agua atraviesa las membranas de micro o ultra filtración donde quedan retenidos los sólidos suspendidos, coloides y microorganismos. La ausencia de estas partículas

en el efluente aumenta la calidad del agua tratada al mismo tiempo que posibilita su reutilización directamente o después de un proceso de O.I. En la figura 5, se aprecia el aspecto del efluente de un MBR.



Figura 5, Agua tratada en un proceso convencional (izquierda) y bioreactor (derecha)

Las sustancias poliméricas con elevados pesos moleculares no pueden atravesar la membrana (su tamaño es superior al diámetro de poro) y son retornadas al bioreactor. En el caso de ser biodegradables se descomponen aumentando la calidad del permeado. Por otro lado, las sustancias orgánicas con pesos moleculares bajos y que no se eliminarían sólo con la membrana, son biodegradadas por los microorganismos o bien convertidas en polímeros formando parte de las células bacterianas. La suma de los efectos producidos por la degradación biológica y la filtración hacen superar en muchos casos porcentajes de depuración del 99% en eliminación de DBO_5 y 95 % de eliminación de la DQO. En la tabla 1, se indican como referencia algunos rendimientos que se alcanzan en plantas depuradoras BRM que tratan aguas residuales industriales.

Industria	Aerobio (A) / Anaerobio (ANA)	Influente (mg/l)			Efluente (mg/l)		
		DQO	DBO_5	SS	DQO	DBO_5	SS
Láctea	A	4.200	2.600	650	40	<5	4,2
Téxtil	A	1.600			90		
Zumos	A	2.250			24		
AR aceitosas	A	4.300 - 6.900	919 - 1.360	253 - 889	180 - 669	3 - 34	1 - 11
Cosmética	A	35.000	18.000	3.000	130	<10	<5
Acido láctico	A	2.000	900	700	60	<10	<5

Tabla 1, Rendimientos de BRM para aguas residuales industriales

Flexibilidad de operación.

En los BRM la edad del fango es independiente del tiempo de retención hidráulico. Es posible mantener una edad del fango muy elevada que favorece, entre otras cosas, el desarrollo de microorganismos de crecimiento lento como los nitrificantes. De este modo aumenta la eliminación de productos lentamente biodegradables, lo que es una gran ventaja en efluentes industriales.

Tamaño de las instalaciones

Los BRM trabajan a cargas volumétricas elevadas, ya que la concentración de fango en el bioreactor es mucho mayor que en un sistema convencional. Las concentraciones típicas de un sistema aerobio convencional están entre 2 y 6 Kg/m^3 , a concentraciones mayores no se consigue decantar todo el fango. En un BRM se puede llegar hasta 20-30 Kg/m^3 (Yamamoto y Win., 1991). Sin embargo existe un

límite, ya que cuando la concentración de fango sobrepasa estos valores, la viscosidad aumenta considerablemente, dificultando en gran medida la filtración a través de las membranas. Además la transferencia de oxígeno disminuye por lo que las necesidades energéticas de aireación son más elevadas (*Praderie, 1996*). En los modernos BRM se suele trabajar a concentraciones de biomasa de 8-12 Kg/m³.

El volumen de un BRM suele ser de 2 y 5 veces inferior al del sistema convencional, manteniendo la misma carga másica de trabajo. Se consigue de esta manera una carga volumétrica superior. Además, el BRM ahorra el espacio que supone el decantador. Tampoco es necesario un sistema terciario para llegar a la misma calidad del efluente.

Elevada tasa de degradación.

A causa de la alta concentración del fango y a que la reacción de degradación es exotérmica, la temperatura en el bioreactor se mantiene elevada incluso en tiempo frío. Estudios cinéticos han demostrado que la tasa de crecimiento de los microorganismos llega a ser 5 veces superior en los BRM. De la combinación de una alta tasa de utilización del sustrato, junto con una alta concentración de biomasa, resulta una tasa de conversión por metro cúbico de volumen de reactor de 10 a 15 veces superior a la obtenida en un proceso convencional (*Buisson et al. 1997*). Este aspecto hace a los BRM especialmente interesantes en climas fríos.

El tamaño de los flóculos en el sistema convencional se encuentra entre 0,5 y 1000 μm (*Zhang et al., 1997*). En los BRM el tamaño se encuentra alrededor de las 100 μm ., figura 6. El pequeño volumen de los flóculos favorece el acceso del oxígeno y de la materia orgánica a los microorganismos, aumentando el nivel de actividad del sistema. Mediante la suspensión total de los microorganismos en el medio es posible un índice de absorción de oxígeno teórico de 75 mg O₂/l x h, hasta un máximo de 200 mg O₂/l x h. Este valor es muy elevado respecto a las plantas convencionales.

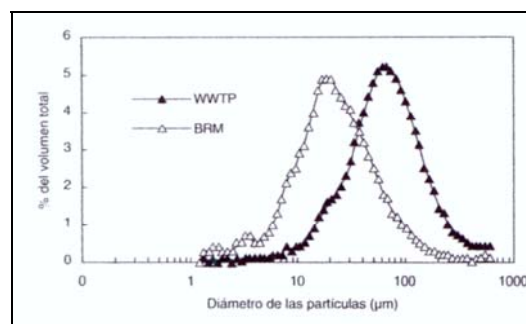


Figura 6, Diámetro de los flóculos del licor mezcla de un agua residual urbana en un sistema convencional (WWTP) y un BRM

Menor producción de fango

Estudios realizados por *Chang y Huyard, 1.991* sobre BRM indican que la producción de fangos es menor que en un sistema convencional de lodos activados. Se ha demostrado que edades de fango superiores a 50 y 100 días reducen significativamente la producción de fango. Además en los BRM se obtienen tasas

de utilización de sustrato " μ_m " y ctes. de velocidad media " K_s " muy superiores a los sistemas convencionales, lo que implica que la mayor parte del sustrato se utiliza para obtener energía en lugar de producir biomasa. Normalmente la producción de lodos está entre un 30 y un 50 % inferior a la del sistema convencional.

Desinfección y control de malos olores

La configuración del sistema MBR, permite que pueda cubrirse evitando la dispersión de malos olores. La filtración a través de la membrana permite una reducción en la presencia de bacterias y virus sin la utilización de reactivos químicos (*Pouet et al., 1994, Langlais et al., 1992, Kolega et al., 1991*). Este factor es de gran importancia para la reutilización. La membrana actúa como una barrera para los microorganismos, reducciones en bacterias y virus entre 4 y 8 logaritmos han sido descritas por diferentes autores (*Kolega et al., 1991; Chiemchaisri et al., 1992; Gander et al; Jefferson et al., 1994*). El descenso de los virus se atribuye al hecho de encontrarse adheridos a los sólidos en suspensión que no atraviesan la membrana, esta misma hipótesis se confirma en la eliminación de trazas de VOC.

A pesar de las ventajas de los BRM sobre los sistemas convencionales, también presentan algunas limitaciones que actualmente impiden su mayor difusión:

1. Los niveles de calidad exigidos en los vertidos, generalmente pueden alcanzarse con sistemas convencionales seguidos de un sistema terciario.
2. Necesidad de limpiezas de las membranas con reactivos químicos.
3. Mayor coste de instalación respecto a la opción clásica.
4. Coste de sustitución de la membrana al agotarse su vida útil.

No obstante la existencia de estos inconvenientes, a partir del año 2000 su difusión se está acelerando. El desarrollo de la tecnología permite construir BRM más económicos, con costes energéticos muy inferiores y vida útil de las membranas superiores a los 8 años.

5.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA OPERACIÓN DE UN BRM.

A continuación se describen aquellos parámetros que deben tenerse en cuenta para la optimización del sistema BRM.

Tipo de membrana utilizada en el BRM

La selección de la membrana es muy importante para el caudal de filtración que se desea conseguir. Las membranas utilizadas pueden clasificarse según su material (orgánico o cerámico), tamaño de poro (micro o ultra filtración), tipo de módulo (placa y bastidor, fibra hueca...), superficie de filtración (interna o externa) o estado del módulo (fijo o dinámico).

Un módulo de membranas de fibra hueca da el flujo más pequeño (8 - 20 l/m²/h), mientras que una membrana cerámica de micro filtración consigue el más grande (100 l/m²/h). Sin embargo la diferencia de coste hace que las membranas de fibra hueca sean mucho más utilizadas.

Presión de transmembrana (PTM)

En funcionamiento continuo, el flujo conseguido es más alto y estable trabajando a bajas presiones transmembrana. A altas presiones la compresión de los sólidos contra la superficie de las membranas es mayor, formándose más rápidamente la torta y colmatando las membranas en menor tiempo.

Existen unas presiones típicas para mantener un flujo estable con una correcta separación sólidos /líquido. Siendo de -0,0 a - 0,8 bar (en ultra filtración), cuanto más baja más eficientes. El lavado a contracorriente ayuda a mantener controladas las presiones, ya que impide la formación de la capa gel.

Velocidad tangencial, Turbulencia.

En el sistema de membranas sumergidas el agua no se ve forzada a circular paralelamente a la membrana. En este caso es necesario provocar una turbulencia en el reactor que desarrolla funciones similares al flujo tangencial. La turbulencia:

- Ayuda a barrer las materias sólidas que se acumulan en la superficie de las membranas rígidas o por agitación en las membranas dinámicas.
- Provoca la ruptura de los flóculos y mantiene la biomasa dispersa con lo que se incrementa la transferencia de oxígeno y materia orgánica. Esto hace aumentar la eficiencia del BRM.

En figura 7, se observa como al aumentar la velocidad tangencial se consigue un flujo mayor a la misma PTM. En otras palabras el aumento de la velocidad tangencial (en BRM de circuito externo), o la aireación (en BRM de membranas sumergidas) tiene como consecuencia el barrido de los sólidos depositados y el aumento del flujo.

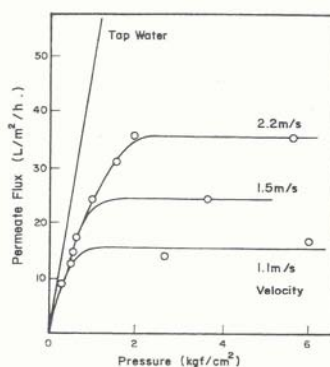


Figura 7, Relación entre la PTM y el flujo de permeado a diferentes velocidades tangenciales.

Aireación

Al igual que en los sistemas de fangos activos su función principal es suministrar el oxígeno necesario para la biodegradación. Pero además cumple otra función

importante, la turbulencia que crea el flujo de aire mueve las membranas dinámicas evitando así, en gran medida su Colmatación, fig.8. Para incrementar la eficiencia de la aireación los módulos de membranas deben estar concentrados en un área pequeña sobre los difusores.



Figura 8, Vista superior de un tanque con membranas sumergidas, se ve una elevada agitación

Densidad de membranas

Los módulos se diseñan para conseguir una elevada densidad de membranas, para evitar que las partículas sólidas se acumulen entre los huecos que dejan las membranas. En el caso de membranas dinámicas (se mueven con la aireación), al estar tan juntas y gracias a la turbulencia creada por la aireación, chocan unas contra otras provocando que se desprendan las partículas sólidas de la superficie.

Modo de operación

La filtración se lleva a cabo de forma intermitente, realizándose lavados a contracorriente para evitar la disminución del flujo de permeado por formación de la torta.

El contra lavado se realiza normalmente haciendo pasar permeado a través de las membranas y siempre en sentido contrario a la del flujo de filtración. El caudal de contra lavado es superior al caudal de filtración aunque su duración debe ser inferior.

Concentración de biomasa

Un BRM permite tener en el reactor una concentración de biomasa superior que en un sistema convencional, al no tener las limitaciones que impone la decantación. A partir de 15-20 g/l de biomasa, la viscosidad del licor mezcla aumenta provocando:

- Una disminución del flujo de permeado.
- La disminución de la turbulencia en las proximidades de las membranas, aumentando la posibilidad de que se depositen más partículas sólidas.
- Aumenta la dificultad de la transferencia de oxígeno a los microorganismos, a causa del aumento de viscosidad.

En los modernos MBR se suele trabajar entre 8-12 g/l de biomasa en el reactor biológico.

6.-PRINCIPALES BIORREACTORES DE MEMBRANA COMERCIALES

En el mercado la tecnología de los BRM sumergidos, esta dominada por dos configuraciones de membrana: membranas de fibra hueca orientadas verticalmente (FH) y membranas planas (MP). Los sistemas de MP tienden a trabajar a altas permeabilidades (generalmente > 200 litros por metro cuadrado por hora y por bar-lmh/bar) y tienen elevadas demandas de aeración (aire por unidad de área de membrana o por unidad de flujo de permeado). La mayoría de sistemas utilizan membranas planas rectangulares entre 1- 1,5 m de longitud. Los sistemas de FH tienden a operar a permeabilidades menores (generalmente < 200 lmh/bar) y las demandas de aeración son menores.

La mayoría de sistemas de membrana de FH en el mercado tienen un tamaño de poro que está entre la UF/MF, el material polimérico más empleado es PVDF y el diámetro de la FH está entre 0,7-2,5 mm, tabla 2. La distinción entre los diferentes sistemas de FH puede encontrarse fundamentalmente en el uso de refuerzos de la membrana.

En los sistemas de membrana sumergida, se emplean tres estrategias para disminuir el ensuciamiento de la membrana: trabajar a flujos reducidos, incrementar la aeración de la membrana y el empleo de limpiezas físicas y químicas.

Zenon y Kubota son las dos empresas con una cota de mercado superior a nivel mundial. El BRM de Zenon trabaja con membranas de fibra hueca, y Kubota con membranas planas. Los competidores más importantes de estas dos compañías son: Hydranautics-Mitsubishi Rayon, Siemens-US Filter, Huber AG, Koch/Puron, y Segers Keppel/Toray. Los MBR de mayor tamaño los ha producido Zenon. En España las dos compañías que lideran el mercado son Zenon y Kubota. Estas dos compañías tienen más del 70% del mercado mundial de BRM. En la tabla 2 se resumen los productos que ofrecen los principales suministradores de la tecnología BRM a nivel mundial.

Proveedor	Material membrana	Tamaño de poro, μm	Diámetro, mm	Nombre de la membrana o módulo
Berghof	MT,PES	0,08	9	HyPerm-AE
	PVDF	0,12		HyperFlux
Brightwater	MP,PES	0,08		MEMBRIGHT®
Toray	MP,PVDF	0,08		Toray
Kubota	MP,PE	0,4		Kubota
Colloide	MP,PES	0,04		Sub Snake
Huber	MP,PES	0,038		VRM
Millenniumpore	MT,PES	0,1	5,3	Millenniumpore
GE Zenon	FH,PVDF	0,04	1,9	ZW500C-D
Koch Puron	FH,PES	0,05	2,5	Puron
Norit X-Flow	MT,PVDF	0,038	5,2	F4385
			8	F5385
Siemens Memcor	FH,PVDF	0,04	1,3	B10R,B30R
	FH,PE	0,4	0,54	SUR
Mitsubishi Rayon	FH,PVDF	0,4	2,8	SADF™
Asahi Kasei	FH,PVDF	0,1	1,3	Microza
Polymem	FH,PS	0,08	0,7-1,4	WW120
Ultraflo	FH,PAN	0,01-0,1	2,1	SS60
Motimo	FH,PVDF	0,1-0,2	1,0	Flat Plat
Microdyn-Nadir	MP,PES			BIO-CEL

FH fibra hueca, MP membrana plana, MT multi tubo

PAN poliacrilonitrilo, PE polietileno, PES polietilsulfona, PS polisulfona, PVDF difluoruro de polivinilidina

Tabla 2, Especificaciones de las membranas comercializadas para BRM

Descripción del sistema ZENOGEM®

El sistema ZenoGem®, consta básicamente de un reactor biológico aerobio de biomasa suspendida integrado con un sistema de membranas de ultra filtración, fig. 9. El BRM consta de un depósito de aireación (1) en el cual los módulos de membrana se colocan verticalmente (2). Los módulos están contruidos con un marco (3) que sostiene las membranas. El agua filtrada se extrae mediante dos conductos, uno que arranca de la parte superior del marco (4) y otro de la parte inferior (5). Un tercer conducto sirve para suministrar aire a presión (6). Existen dos configuraciones según las membranas se sumerjan directamente en el reactor biológico, o en un contenedor aireado anexo (ZenoBox®) por el que recircula la biomasa. Gracias a que los sólidos quedan retenidos completamente por la membrana, se puede trabajar con concentraciones de biomasa muy altas. El BRM permite trabajar a tiempos hidráulicos cortos y mantener altos SRT, con una extraordinaria capacidad de degradación, una mínima necesidad de espacio y una remarcable calidad del perneado.

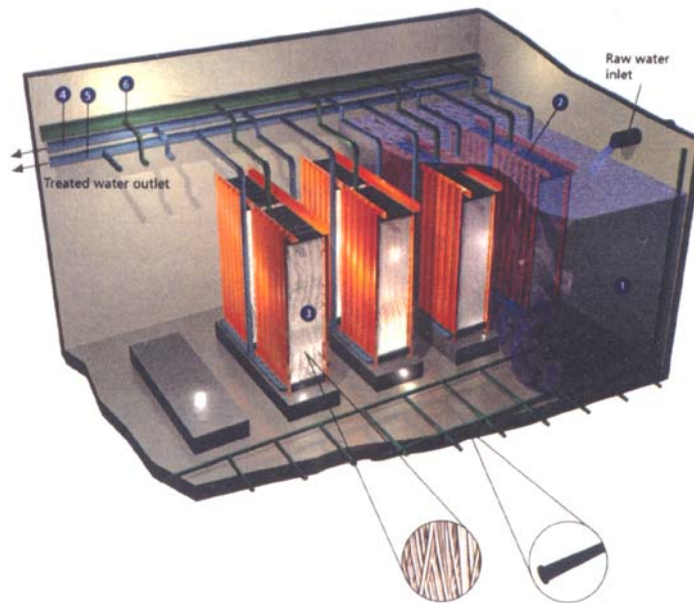


Figura 9, Esquema del sistema ZenoGem

Las membranas **ZeeWeed**[®] son de fibra hueca, figura 10, construidas mediante fibras poliméricas de PVDF con refuerzo textil interno, lo que comporta una gran resistencia mecánica. El diámetro del poro es de 0,04 μm .

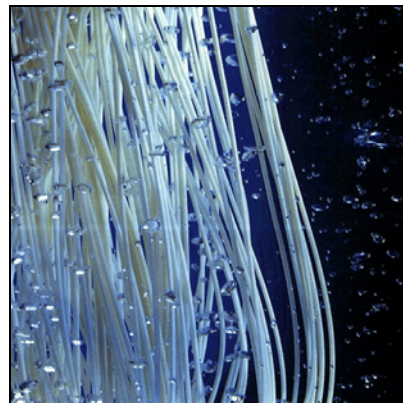


Figura 10, Membranas de fibra hueca ZeeWeed[®]

El agua es filtrada pasando a través de las paredes de la membrana a causa de una depresión de -0,01 á -0,50 bar producida por una bomba centrífuga. Durante el ciclo de proceso el agua filtrada es extraída del sistema mientras que el fango y los compuestos de tamaño superior al poro de la membrana quedan retenidos y se recirculan al reactor biológico. Este ciclo de filtración, se alterna con uno corto de contra lavado en el cuál se invierte el sentido del flujo. Durante el contra lavado se fuerza el paso del agua permeada (almacenada en un pequeño depósito) desde el interior de la membrana al exterior, con el objetivo de limpiarla. La presión de trabajo es inferior a 1 bar.

En la parte inferior de las membranas se insufla aire de forma turbulenta, figura 11, para imprimir un movimiento a las membranas que hace desprender los sólidos de su superficie. El módulo de membranas incorpora unos deflectores plásticos que reparten el aire homogéneamente.

Al mismo tiempo el aire es utilizado por los microorganismos en sus reacciones de degradación de la materia orgánica y evita que en el interior del contenedor de membranas se cree un ambiente anóxico, eliminando el riesgo de generación de malos olores.



Figura 11, Vista inferior de un módulo de membranas con los canales plásticos en color azul para la difusión de aire

La purga del fango se realiza directamente desde la recirculación de fango. La elevada concentración de biomasa en el fango purgado permite prescindir a menudo del espesador en la línea de tratamiento del fango, simplificándose el proceso de deshidratación.

El contenedor de membranas puede colocarse sobre el reactor biológico si queremos ahorrar espacio, o a nivel del suelo si el reactor biológico está más elevado. En cualquiera de las dos situaciones es necesario un bombeo para enviar (o retornar) la biomasa al reactor biológico, figura 12.

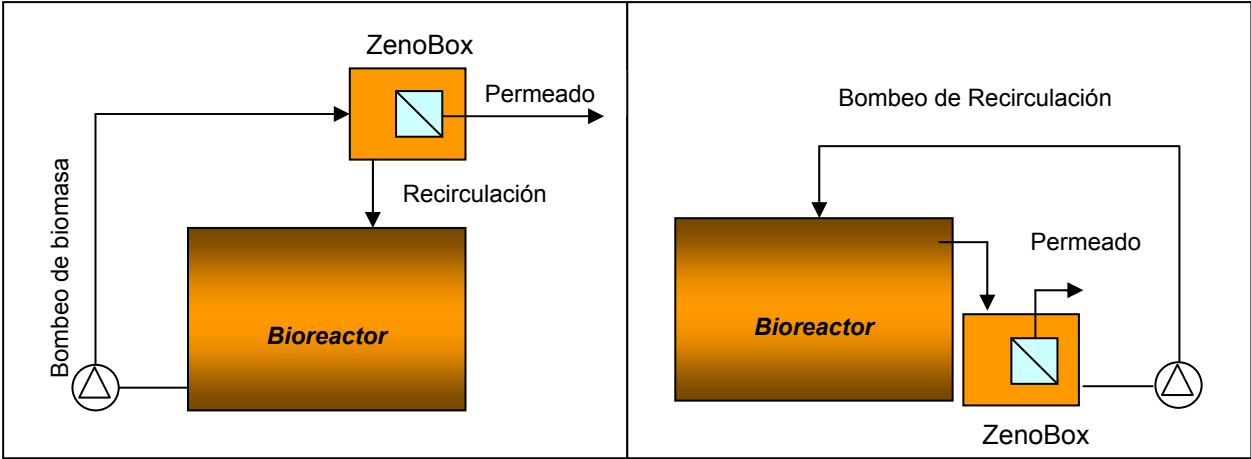


Figura 12, Diagramas de flujo de las dos configuraciones con la ZenoBox

Las membranas también pueden instalarse directamente en el reactor biológico, permitiendo la ampliación de la capacidad de tratamiento de una depuradora, ya existente, de una forma sencilla, figura 13.



Figura 13, Colocación de membranas en un reactor biológico existente

La colocación de las membranas directamente en el reactor biológico hace que no sea necesario el bombeo de alimentación de biomasa o recirculación, por lo tanto supone un ahorro energético en los costes de explotación. El principal inconveniente es la dificultad en las limpiezas con reactivos químicos, ya que obliga a sacar las membranas y limpiarlas en un depósito de limpieza anexo.

Descripción del sistema KUBOTA

El bioreactor de Kubota consiste en una membrana sumergida con la configuración de placa y bastidor, fig. 14. Los módulos se disponen en forma de cassetes verticales que pueden superponerse.

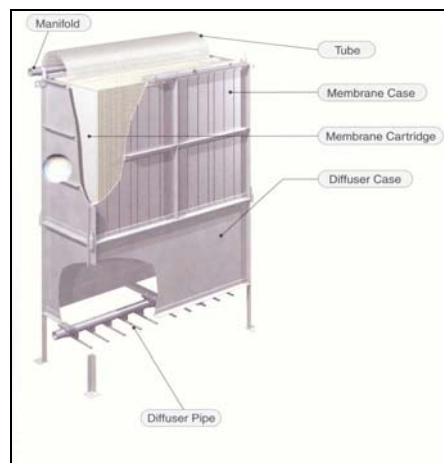


Figura 14, Cassete KUBOTA

Una unidad básica está formada por las placas que están conectadas a la tubería de permeado. El aire se introduce mediante una tubería situada en la parte inferior del módulo. El aire barre la superficie de los paneles efectuando la limpieza de los sólidos evitando que se depositen. Cada panel puede extraerse individualmente para su mantenimiento. Las membranas son de polietileno clorado y el diámetro de poro nominal es de $0,4 \mu\text{m}$. Los paneles se fabrican en dos medidas, tipo 203 (medidas $226 \times 316 \times 6 \text{ mm}$) y tipo 510 ($490 \times 1000 \times 6 \text{ mm}$). La superficie equivalente de cada panel es de $0,1 \text{ m}^2$ (tipo 203) y de $0,8 \text{ m}^2$ (tipo 510). La instalación se diseña con una bomba centrífuga para la extracción de permeado .

Con ambos bioreactores Kubota o Zenon se consiguen calidades muy similares del efluente, excepto quizás en la eliminación de microorganismos debido al diámetro de poro mas pequeño de la membrana ZENON. El modelo de Kubota ocupa algo de más espacio, a causa del diseño de la membrana plana.



Figura 15, Extracción de un cassette KUBOTA

7.-POSIBILIDADES DE REUTILIZAR EL AGUA TRATADA EN UN BRM

La calidad del efluente de un BRM, es comparable a la que se obtiene mediante un proceso biológico convencional seguido de un proceso terciario de coagulación química seguido de una filtración, y a menudo es superior a la que se obtiene con proceso biológico convencional seguido de un proceso de ultrafiltración. Además cuando se requiere un agua de gran calidad y es preciso aplicar un proceso de O.I. por ejemplo para disminuir el contenido salino del agua, el mejor modo de proteger las membranas de O.I. es un pretratamiento con una membrana de UF, lo cual se consigue con una planta de BRM.

Sólo a modo de muestra se indican algunos casos de reutilización en la industria textil, que están en funcionamiento o que han pasado la fase de estudio en planta piloto semi-industrial. En todos los casos después del proceso de depuración con BRM se obtienen valores de DQO inferiores a 100 mg/l , y después de hacer pasar el efluente del BRM por una O.I la DQO es inferior a 10 mg/l .

1. Industria textil algodonera de tintura de género de punto para ropa interior. (Barcelona, España). Dispone de una estación depuradora compuesta de los siguientes procesos: homogeneización, fangos activados con adición de polímero decolorante, filtración sobre silex/antracita, micro filtración seguida de ultra filtración

con membranas en espiral. Parte del agua a la salida de la ultra filtración se somete a un proceso e ósmosis inversa y se reutiliza para el proceso productivo. La industria genera 75 m³/h de aguas residuales que son tratadas por el proceso descrito antes de su vertido al río, de ellos 30 m³/h son conducidos a la O.I. obteniéndose un 50 % de permeado que es reciclado. La reutilización del agua de O.I. lleva 4 años realizándose con excelentes resultados. En la tabla 3 se indican los valores medios de contaminación del efluente antes y después de su depuración.

PARÁMETRO	Agua sin tratar	Salida F.A	Salida U.F.	Salida O.I.
DQO mg/l	1800	140	70-80	<10
MES mg/l	200	20-30	<5	<2
Color mg Pt-Co/l	3000	200	<100	<10

Tabla 3, Valores medios EDAR Industria textil algodonera

2. Industria textil algodonera de tintura de género (Barcelona, España). Dispone de una estación depuradora compuesta de una homogeneización, fangos activados y una flotación (DAF) con adición de polímero decolorante. El caudal de vertido es de 100 m³/h. Se han realizado pruebas de reciclado para el proceso productivo con buenos resultados. En la tabla 4 se indican los valores medios de contaminación del efluente antes y después de su depuración.

PARÁMETRO	Agua sin tratar	Salida F.A	Salida Flotación
DQO mg/l	1000	140-200	80-100
MES mg/l	100	30-50	<15
Color mg Pt-Co/l	2000	500-800	<100

Tabla 4, Valores medios entrada/salida EDAR

3. Industria textil algodonera de tintura de género (Alicante, España). Caudal de vertido 110 m³/h. Dispone de una estación depuradora compuesta de una homogeneización, fangos activados, coagulación/floculación con decantación lamelar, filtración con filtros de sílex/antracita seguido de carbón activado. Durante 8 meses se han tratado 40 m³/h por O.I. obteniéndose 20 m³/h que se reciclaban para el proceso. Después de 8 meses, las membranas de O.I. daban un flujo insuficiente debido a ensuciamiento irreversible. La industria ha decidido instalar un pretratamiento con membranas de U.F. antes de la O.I.

4. Industria textil algodonera de tejidos de fibra sintética (Barcelona, España). Los efluentes contienen productos refractarios ya que una parte importante de la producción es un tratamiento alcalino del poliéster y también realiza procesos de estampación. Se realizó un estudio comparativo durante 6 meses con un BRM (TRH=1,3 días) con adición de carbón activo en polvo al reactor biológico, y un proceso convencional de fangos activados (F.A.) (TRH=2 días) seguido de un proceso fisicoquímico de coagulación química (F.Q.). Los resultados medios se indican en la tabla 5. (TRH= tiempo de retención hidráulico)

Valores Medios	DQOi mg/l	DQOf mg/l	Rdto. DQO %	DBO ₅ i mg/l	DBO ₅ f mg/l	Rdto. DBO ₅ %	Color i mgPt-Co/l	Color f mgPt-Co/l	Rdto. Color %
BRM	1500	90	94	375	<10	97	1200	80	93
FA+FQ	1500	110	93	375	<10	97	1200	100	92

Tabla 5, Valores medios entrada/salida plantas piloto BRM y FA+F.Q

Con un 40 % del efluente del BRM y un 60 % de agua limpia se realizaron ensayos de blanqueo y tintura, y se comparó con procesos realizados con un 100 % de agua limpia. La igualación de las tinturas y diferencias de color estuvieron en todos los casos dentro de los límites aceptados por el mercado, en la fig. 16 se indica una muestra de las tinturas realizadas con agua limpia y efluente tratado.



Figura 16. Muestras teñidas con agua limpia y con un 40% del efluente del BRM

5. Industria textil algodonera de tejidos de algodón y fibra sintética (Barcelona, España). Caudal de vertido 100 m³/h. Se ha realizado un estudio comparativo durante 5 meses con un BRM (TRH=1,6 días) con adición de polímero decolorante al reactor biológico, y un proceso convencional de fangos activados (F.A.) (TRH=2 días) seguido de un proceso fisicoquímico de coagulación química (F.Q.). Los resultados medios se indican en la tabla 6.

Valores Medios	DQOi mg/l	DQOf mg/l	Rdto. DQO %	DBO ₅ i mg/l	DBO ₅ f mg/l	Rdto. DBO ₅ %	Color i mgPt-Co/l	Color f mgPt-Co/l	Rdto. Color %
BRM	1600	140	91	500	<10	98	2500	<200	92
FA+FQ	1600	170	89	500	<10	98	2500	<200	92

Tabla 6, Valores medios entrada/salida plantas piloto BRM y FA+F.Q

6. Industria textil algodonera de tejidos para pantalón vaquero (Valencia, España). Caudal de vertido 60 m³/h. (1440 m³/d). Disponía de una EDAR convencional de lodos activados con problemas de fiabilidad, a menudo se producían vertidos con más de 800 mg/l de materias en suspensión y DQO superiores a 400 mg/l. Se reconvirtió en un BRM con membranas ZW-500d de GE ZENON, en septiembre de 2004 se puso en marcha el nuevo tratamiento. En la tabla 7 indicamos los valores medios obtenidos durante los dos años de funcionamiento. Para la eliminación del color se adiciona un polímero decolorante al reactor biológico.


Parámetro	Agua Bruta	Agua Tratada
DQO (mg/l)	2.000	< 125
SST (mg/l)	600	< 5
 Color	1 / 2.000	1 / 5

Tabla 7, Valores medios entrada/salida EDAR

7. Industria textil de tintura y estampación de tejidos (Dreew Meerane, Alemania). Caudal de vertido 60 m³/h. (1440 m³/d). En octubre de 2002 se puso en marcha la nueva depuradora construida con fondos de la German Ecological Foundation. La EDAR consta de dos líneas, la primera trata el 40 % de los efluentes los que presentan mayor coloración. Son tratados mediante un proceso anaerobio con un TRH=1,5 días, seguido de un proceso aerobio TRH=0,2 días, el agua así tratada se vierte a la depuradora municipal.

El 60 % de las aguas se tratan mediante un proceso anaerobio con un TRH=2,1 días, seguido de un proceso aerobio TRH=0,1 días, y un BRM con membranas ZW 500c de GE ZENON. El proceso anaerobio consigue eliminar un 45 % del color por rotura del grupo cromóforo AZO de los colorantes azoicos. El efluente del BRM se acaba de decolorar con 40 g/l de ozono. Este tratamiento obtiene una eliminación del 89 % de la DQO y del 87 % del color. El agua así tratada (860 m³/d) se recicla para tintura de tejidos de algodón y mezclas con máquinas Jet y sistema Pad-batch.

8.-CONCLUSIONES

La tecnología de los BRM se puede considerar que esta ya plenamente implantada, tanto para el tratamiento de efluentes municipales como industriales. Su grado de fiabilidad es superior a cualquier otro proceso de depuración biológica, lo que lo hace especialmente adecuado cuando se quiere reutilizar el efluente depurado.

Actualmente se dispone de tecnología adecuada para depurar las aguas residuales de la industria textil, y obtener un efluente con calidad suficiente para su reciclado en el proceso productivo.

Probablemente el proceso más adecuado y fiable para obtener un efluente de calidad suficiente para su reciclado en la industria textil, es el Bioreactor de Membrana con adición o no de productos decolorantes al reactor biológico.

El efluente de un BRM se puede tratar con membranas de Osmosis Inversa sin problemas especiales de ensuciamiento.