

Estado del arte de los biorreactores de membrana^[1]

Membrane bioreactors' state of the art

MARTHA PATRICIA GALVIS CASTIBLANCO¹ - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

1. Maestría en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil. MEEE. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

martha.galvis@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/12/2016 Aceptado: 12/03/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

Los biorreactores de membrana (BRM) constituyen una alternativa de tratamiento de aguas residuales con capacidad de proveer excelentes efluentes. En el artículo se resumen sus características principales, su configuración, criterios de diseño, operación, mantenimiento y contraste con el proceso convencional de tratamiento.

Palabras claves: membranas de filtración, biorreactor de membrana, tratamiento de aguas residuales.

Abstract

Membrane bioreactors (MBR) are an alternative wastewater treatment capable of providing excellent effluent. The article summarizes the main features of MBR, their configuration, design criteria, operation, maintenance, and contrast to the conventional treatment process.

Keywords: membrane filtration, membrane bioreactor, wastewater treatment.

INTRODUCCIÓN

La tecnología del biorreactor de membrana (BRM) se puede definir como la combinación de dos procesos: degradación biológica y separación por membrana, en el que los sólidos en suspensión y los microorganismos responsables de la biodegradación son separados del agua tratada mediante una unidad de filtración por membrana.

ANTECEDENTES

Los procesos de separación de materia disuelta y suspendible por medio de membranas, bajo el efecto de una presión, se conocen desde hace más de cien años. Sin embargo, la primera utilización de biorreactores con membrana (BRM), para el tratamiento de aguas residuales, data de los años sesenta.

En la década de los setenta, la tecnología entró por primera vez en el mercado japonés, gracias a un acuerdo entre las compañías Dorr-Oliver y Sanki Engineering. También en esa década, Thetford Systems (actualmente parte de Zenon Environmental) lanzó su versión de un sistema externo para el tratamiento aeróbico de las aguas residuales, al proceso llamado "Cycle-Let". A finales de los años ochenta y principios de los noventa, Zenon Environmental desarrolló este proceso con membranas sumergidas en el licor mezclado, obteniendo dos patentes del sistema: Zenon's sistema comercial y ZenoGem [1].

Las primeras plantas con BRM aparecieron en América del norte a finales de la década de los setenta y en Japón a principios de los años ochenta, en la misma época en que los procesos anaerobios de tratamiento de agua residual industrial empezaron en Sudáfrica. La introducción en Europa de los BRM aerobios sólo se produjo hasta mediados de los noventa.

En la década de los ochenta, Yamamoto desarrolló el primer módulo de membrana inmerso en el biorreactor para la depuración de aguas residuales industriales. En 1989, el gobierno japonés, junto con una serie de importantes compañías, acordó invertir en el desarrollo de un sistema que fuese compacto y produjera un efluente de buena calidad, de modo que permitiese la reutilización del agua. La compañía Kubota desarrolló un sistema BRM en el que la membrana de placas estaba inmersa en el reactor.

Durante el año 1993, treinta y nueve de estos biorreactores de membrana con configuración externa

se habían difundido y tenían diversas aplicaciones para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. Recientemente, aplicaron los BMR para la depuración de aguas residuales hospitalarias.

MEMBRANAS DE FILTRACIÓN

La filtración con membranas es una técnica que consiste en separar partículas de un líquido para purificarlo. En la filtración con membranas, un disolvente atraviesa una membrana semipermeable. El tamaño de los poros de las membranas está directamente vinculado a su eficiencia de retención, y es una variable de importancia a la hora de analizar el residual que hay que tratar y la evolución del proceso de colmatación.

Las membranas se deben soportar estructuralmente para resistir las presiones a las que se trabaja. La unidad operacional en la que se colocan se llama módulo. Esta unidad está compuesta por membranas, estructuras de soporte de la presión, puertas o puertos de entrada de la alimentación, distribuidores de caudal y puntos de salida y drenaje del permeado y concentrado. Una entidad de membrana se llama elemento, y éstos son los que se emplean para construir el módulo.

Al diseñar un módulo se debe asegurar, en la membrana, una circulación suficiente del fluido que se va a tratar, para limitar los fenómenos de concentración - polarización y depósito de partículas, y producir un módulo compacto, que proporcione una máxima superficie de intercambio por unidad de volumen, con el fin de reducir los costos del módulo para un volumen determinado de fluido tratado, teniendo en cuenta que, a una velocidad de circulación alta y secciones de paso pequeñas, se produce una gran cantidad de pérdida de carga. Además, se deben evitar fugas entre los compartimientos de alimentación y permeado, haciendo un cuidadoso montaje del módulo para evitar pérdidas.

El módulo debe ser de volumen pequeño, fácil de limpiar, de ensamblar y montar.

MATERIALES DE LAS MEMBRANAS

Membranas orgánicas

Generalmente, son de polímeros hidrófilos; los más usados son la celulosa y sus derivados. Estos polímeros presentan poca tendencia a la absorción y se utilizan

en todos los procesos de presión (MF, UF, NF, OI), hemodiálisis y permeado gaseoso. Para la desinfección y clarificación de aguas se utilizan las membranas de ésteres de la celulosa (di y triacetato), por su resistencia al cloro.

Membranas inorgánicas

Los materiales inorgánicos poseen mayor estabilidad química, mecánica y térmica que los polímeros orgánicos, pero son más frágiles y más costosos que los orgánicos. De allí que su uso se limite a la industria química, en el tratamiento de fluidos agresivos o de alta temperatura y a las industrias farmacéutica y láctea.

PROCESOS DE FILTRACIÓN CON MEMBRANAS

En un principio, la tecnología de membrana se utilizaba únicamente como tratamiento terciario de procesos convencionales. Cuando se llegó a un punto en el que se exigían requerimientos más rigurosos de vertido, se emplearon los siguientes procesos:

- Microfiltración (MF).
- Ultrafiltración (UF).
- Ósmosis inversa (OI).

El éxito en cuanto a eficiencia de las membranas de filtración está directamente relacionado con el tamaño de los poros. Las membranas de microfiltración (MF) tienen tamaños de poro de $0,1 \mu\text{m}$. Las membranas de ultrafiltración (UF) tienen tamaños de poro que van de $0,1 \mu\text{m}$ hasta menos de 5 nm ($0,005 \mu\text{m}$). Las membranas de nanofiltración (NF) tienen poros de un tamaño inferior a $0,01 \mu\text{m}$, lo que permite la eliminación de la mayoría de las especies, excepto de ciertos iones monovalentes y moléculas de bajo peso molecular.

La ósmosis inversa es un proceso físico natural basado en el fenómeno de la difusión; dos soluciones separadas, en dos compartimientos, por una membrana semipermeable.

La difusión se da cuando dos soluciones de concentración diferente entran en contacto y la solución que contiene más soluto se mueve hacia la que contiene menos, mientras que el disolvente se dirige en sentido contrario.

La membrana semipermeable tan sólo permite la difusión del disolvente de las soluciones, de manera

que el soluto (sales) es absorbido por la membrana, lo que permite que el agua (disolvente) se difunda a través de la membrana, haciendo aumentar el nivel del compartimiento que tiene una concentración de sales superior (figura 1).

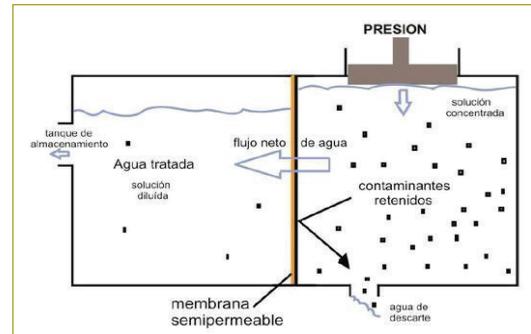
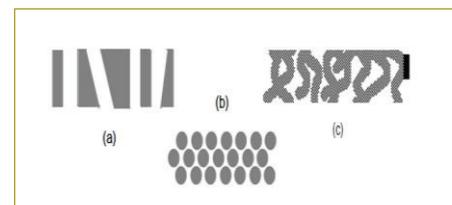


Figura 1. Fenómeno de ósmosis.

En algunas instalaciones de ósmosis inversa, el control de salida de fluido, en vez de hacerse con una válvula, se hace con una turbina. La energía recuperada por la turbina es inversamente proporcional a la tasa de conversión y puede llegar a ser de un 50 %.

La microfiltración utiliza membranas porosas. Los materiales membranarios correspondientes se fabrican con polímeros orgánicos o con materiales inorgánicos y presentan geometrías de poros diferentes, según su concepción (figura 2).



a) Poros cilíndricos; b) y c) Poros de geometría compleja.

Figura 2. Geometría de poros en función de la estructura de la membrana.

La existencia de diversas geometrías de poros ha generado el desarrollo de diferentes modelos para describir correctamente el transporte de materia a través de los poros. Estos modelos de transporte permiten determinar los parámetros estructurales importantes y cómo las prestaciones de las membranas pueden mejorarse mediante la modificación de sus características.

La ultrafiltración es la continuación lógica de la microfiltración cuando se quieren detener fragmentos de materia aún más pequeños. Las diferencias principales con la microfiltración son las siguientes:

- La presión de trabajo es más elevada, típicamente entre 4 y 8 atmósferas, por el hecho de que el tamaño de poros de la membrana de ultrafiltración es más pequeño.
- Las especies que hay que separar no son en realidad partículas en suspensión sino compuestos de tipo macromolecular o coloidal, susceptibles de tener fuertes interacciones fisicoquímicas con el material de la membrana.

Con el propósito de reducir la serie de pérdidas de carga y de limitarla a la capa activa, las membranas de ultrafiltración poseen una estructura asimétrica. Están compuestas por un soporte macroporoso y una o varias capas, según el tipo de membrana; la última capa, llamada capa activa, presenta una estructura mesoporosa. Existen actualmente dos categorías o dos tipos de membranas de ultrafiltración, las cuales tienen una estructura asimétrica (figuras 3 y 4).

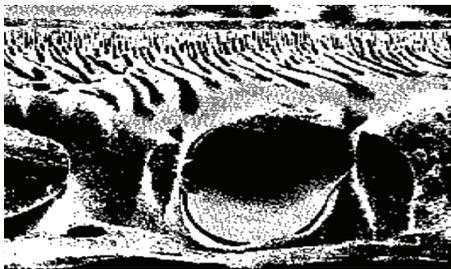


Figura 3. Membrana orgánica de ultrafiltración (imagen con microscopio electrónico de barrido)[3].



Figura 4. Membrana inorgánica de ultrafiltración (imagen con microscopio electrónico de barrido)[3].

La nanofiltración puede clasificarse como un proceso intermedio entre la ósmosis inversa y la ultrafiltración, con base en características propias:

- Una estructura microporosa con un diámetro de poro típicamente inferior a 2 nm.
- Materiales membranarios que llevan, en la mayoría de los casos, cargas eléctricas; en consecuencia, los mecanismos de transferencia y los campos de utilización de esas membranas son bien particulares.
- Punto de corte para solutos de masa molecular inferior a 1000.
- Presiones de trabajo inferiores y flujo de solvente más elevado que en el caso de la ósmosis inversa.
- Toma en cuenta a la vez los fenómenos de difusión y de convección para describir el flujo de solvente y de soluto.
- Intervención del mecanismo de Donnan para la retención de solutos eléctricamente cargados.

La nanofiltración es una alternativa válida a la ósmosis inversa para endulzar el agua y para desalinizar parcialmente las salmueras, ya que permite trabajar con una presión más baja de cinco a diez atmósferas, con mejores tasas de rechazo (80-90 %) que la ósmosis inversa.

CONFIGURACIÓN DE BRM

A continuación se muestra que los caudales típicos para membranas de forro interno son de 0,5 a 2,9 m/d, mientras que los de membranas de forro externo son de 0,2 a 0,9 m/d (tabla 1).

Tabla 1
Configuración de los BRM [4]

Aplicación	Material de membrana	Tipo de membrana	Superficie de filtración (m ²)	Velocidad (m/s)	Flujo a 20°C, (m ³ /d)	PTM (bar)
Membrana de forro interno						
ARI	Orgánica	T	195		1,5	
Aguas residuales urbanas sintéticas	Cerámica	T		3,8	0,5-0,7	1,1-1,4
ARU	Cerámica	T	1,10	3	1,4-2	0,5-1,5
AP	Orgánica	FH	7,20	0,90	1,4-1,7	0,5-0,8
DF	TPT	T		2	0,48-1,0	2
ARI	PES	T	668	1,6	0,14-0,6	2-3
ARU	TPT	T		2,2-3,6	0,5	2-2,5
ARU	PAN	PM		2,5	2,4-2,9	
Membrana de forro exterior						
Aguas residuales urbanas sintéticas	PE	FH			0,2-0,6	-0,2-0,8
ARU	PE	PM			0,2-0,9	-0,1-0,5
Aguas residuales urbanas sintéticas	PE	FH	0,3		0,2-0,5	-0,4-0,8
ARI= agua residual industrial		TPT= tubo de poliéster tejido		T= tubular		
ARU= agua residual urbana		PES= polietilensulfona		FH= fibra hueca		
AP= agua potable		PAN= poliacrilonitrilo		PM= placa y marco		
DF= digestión de fango		PE= polietileno				
PSI= polisulfona						

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS BRM

A renglón seguido se presentan los criterios típicos de operación y rendimiento de un BRM (tabla 2).

Tabla 2
Criterios de operación y rendimiento

Parámetro	Unidad	Rango
OPERACIÓN	kg/m ³ .d	
Carga	mg/L	1,2 - 3,2
SSLM	mg/L	5000 - 20.000
SSVLM		4000 - 16.000
A/M	gDQO/gSSVLM . d	0,1 - 0,4
Edad de lodos	d	5 -20
Tiempo de retención	h	4 - 6
Flujo	L/m ² .d	600 - 1100
Vacío aplicado	kPa	4 - 35
OD	mg/L	0,5 - 1,0
RENDIMIENTO		
DBO efluente	mg/L	< 5
DQO efluente	mg/L	< 30
NH ₃ efluente	mg/L	< 1
NT efluente	mg/L	< 10
Turbiedad efluente	UNT	< 1

Limpieza de las membranas

En el caso de membranas sumergidas con configuración de fibras huecas y de la membrana plana contralavable de Microdyn Nadir, para reducir la velocidad de ensuciamiento de la membrana, y con ello aumentar su vida operativa, se recurre a procesos de limpieza mecánica periódica a través de un lavado con permeado por inversión de flujo (contralavado) durante cortos periodos. De este modo, se eliminan la capa externa de ensuciamiento de fibra y parte de las partículas que se han introducido en sus poros.

Para provocar alta turbulencia en las proximidades a la superficie filtrante externa de las membranas y reducir así la velocidad de ensuciamiento, se introduce por el fondo de cada módulo de membranas un flujo de aire en forma de burbujas gruesas, en régimen continuo o intermitente.

Limpieza de mantenimiento

Para el procedimiento de limpieza de mantenimiento se usan hipoclorito sódico y ácido cítrico, por si hay la posibilidad de un ensuciamiento inorgánico.

Limpieza de recuperación

La limpieza de recuperación es necesaria para restablecer la permeabilidad de la membrana una vez que la membrana está sucia. Las concentraciones de limpieza química que se utilizan habitualmente para remojar las membranas son de 1000 mg/L de hipoclorito sódico (NaOCl) para la eliminación de los contaminantes orgánicos y de 2000 mg/L de ácido cítrico para la eliminación de los contaminantes inorgánicos. Se recomienda realizarlo dos veces al año.

FILTRACIÓN CON MEMBRANA VS. FILTRACIÓN CONVENCIONAL

De todos los procesos que se han desarrollado para el tratamiento de las aguas residuales, el sistema convencional de lodos activados ha sido el más empleado. En un principio, la tecnología de membrana tenía limitado su uso y solamente se empleaba como un añadido en el proceso convencional. La microfiltración, la ultrafiltración y la ósmosis inversa se utilizaron en áreas donde había requerimientos de vertido muy rigurosos o donde se pretendía reusar el agua depurada. Los principales factores que limitaron el desarrollo de la tecnología de membrana fueron el elevado costo de inversión y de operación y el inadecuado conocimiento de las ventajas potenciales de las membranas en el tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, la aparición de módulos de membrana menos costosos y más efectivos, junto con el endurecimiento de los requisitos de vertido, hizo que se volviera a tener interés en la tecnología de membrana. El balance económico es favorable a los MBR si se toma en cuenta una serie de ventajas importantes, al margen de la excelente calidad de agua tratada que se consigue. De este modo, la tecnología MBR es especialmente valiosa frente a las otras tecnologías por las siguientes características:

- Hay una retención eficaz de los sólidos suspendidos y de los compuestos más solubles dentro del bio-

reactor, lo que proporciona un efluente de excelente calidad y potencialmente reutilizable que cumple los requisitos de vertido más rigurosos.

- Se logra la retención de bacterias y virus, así como un efluente estéril, lo que elimina la necesidad de llevar a cabo procesos de desinfección, al igual que los subproductos de la desinfección.
- La ausencia del clarificador, que actúa como un selector natural de la población bacteriana, permite que se desarrollen bacterias de crecimiento lento que persistan en el biorreactor.
- La mayor parte de las plantas BRM operan a edades de lodo de 40 días o superiores. Estas edades elevadas pueden reducir en un 40 % la producción de lodo, con la consiguiente reducción de los costos de operación.

BIORREACTOR DE MEMBRANA (PTAR SAN PEDRO DEL PINATAR, MURCIA, ESPAÑA) [5]

La planta de tratamiento (figuras 5 y 6) está diseñada para tratar 20.000 m³/d de aguas residuales, con el objetivo de dar servicio a 130.000 habitantes. La planta incorpora un sistema integrado de reactor biológico de lodos activados con membranas, que permite garantizar la calidad del efluente y una reducción importante del volumen del reactor.



Figura 5. Vista general de la planta San Pedro del Pinatar (España).

El sistema cuenta con membranas de tecnología Zenon (figura 6), la cual se basa en la ultrafiltración a través de membranas de fibra hueca reforzada, donde la filtración se realiza mediante succión desde el lado interior de la fibra, de manera que se hace fluir el agua de afuera hacia adentro.

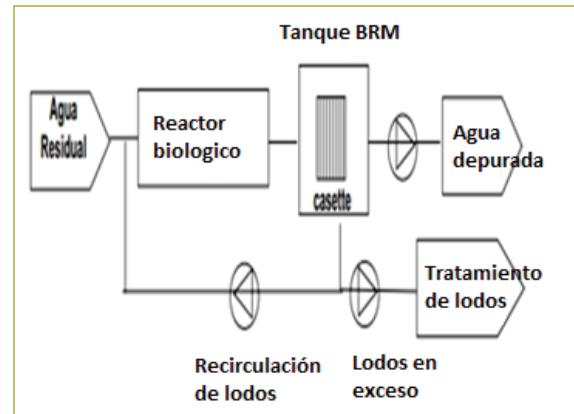


Figura 6. Planta San Pedro del Pinatar.

El diseño de esta planta incluye cuatro trenes de ultrafiltración, aislados individualmente mediante compuertas motorizadas, con una configuración por tren de ocho casetes de membranas, que contienen cada uno 48 módulos de membranas de ultrafiltración ZW500D.



Figura 7. Membrana tipo Zenon ZW500D.

Las características de las membranas de Zenon, suministradas por TB-FLygt, son:

- Modelo: Zeeweed 500 D.
- Configuración: fibra hueca fuera-adentro.
- Propiedades de la membrana: no iónica e hidrofílica.
- Diámetro de poro nominal: 0,04 μm.
- Número total de módulos: 1536.

CONCLUSIONES

- Los BRM constituyen una excelente alternativa de tratamiento cuando se requieren efluentes de alta calidad, libres de sólidos, para reúso.

- Los costos de un BRM limitan su aplicación, ya que superan los costos del sistema convencional de tratamiento.
- El tratamiento de aguas mediante un BRM representa una solución compacta y discreta para establecimientos o lugares donde no se cuenta con el área necesaria para la implementación de un sistema de tratamiento más grande o donde los terrenos son bastante costosos.
- La utilización de un sistema BRM con membrana sumergida suele ser en muchas ocasiones lo más conveniente al representar un menor consumo eléctrico en comparación con la configuración de membrana externa, además de ocupar una menor área y permitir el retrolavado en la membrana, lo cual contribuye a alargar la vida útil de ésta.
- Los BRM permiten obtener un efluente de alta calidad, independientemente de la calidad del afluente.
- Los BRM tienen gran capacidad de desinfección, ya que impiden el paso de virus y bacterias.
- Los BRM tienen mayores tiempos de retención de sólidos, que permiten respiración endógena de los microorganismos presentes en el agua residual, provocando una menor producción de lodos.
- Los BRM tienen la posibilidad de adaptarse fácilmente a las plantas de lodos activados ya existentes, especialmente en aquellos casos de plantas sobrecargadas que necesitan una ampliación.
- Operacionalmente, uno de los problemas más importantes de los BRM es el ensuciamiento por la formación de una capa de lodo, coloides y soluto que se acumulan sobre la superficie de la membrana, impidiendo su adecuado comportamiento.

REFERENCIAS

1. Galvis C., M.P. (2014). Estado del arte de los biorreactores de membrana. Trabajo de grado. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Stephenson, T. (2000). *Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*.
3. Suwa, Y., Suzuki, T., Toyohara, H., Yamagishi, T. & Urushigama, Y. (1992). Single-stage nitrogen removal by an activated-sludge process with crossflow filtration. *Water Res.*
4. Manem, J. & Sanderson, R. (1998). *Biorreactores de membrana. Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones*.
5. Maroto, H. (2007). Comparativa de ampliación EDAR mediante reactor biológico convencional o MBR.