

ESTADO DEL ARTE BIORREACTORES DE MEMBRANA

MARTHA PATRICIA GALVIS CASTIBLANCO

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA “JULIO GARAVITO”
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
2014**

ESTADO DEL ARTE BIORREACTORES DE MEMBRANA

MARTHA PATRICIA GALVIS CASTIBLANCO

Trabajo de grado para optar el título de Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en
Ingeniería Ambiental

Director
ING. JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA “JULIO GARAVITO”
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
2014**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. ANTECEDENTES	7
3. MEMBRANAS DE FILTRACIÓN	10
3.1 Ósmosis Inversa	11
3.2 Microfiltración	15
3.3 Ultrafiltración	16
3.4 Nanofiltración	18
3.5 MATERIALES DE LAS MEMBRANAS	19
3.6 CONFIGURACIÓN DE MÓDULOS DE MEMBRANAS	20
4 CRITERIOS DE DISEÑO DE UN PROCESO DE FILTRACIÓN CON MEMBRANA	26
4.1 Flujo de Filtrado	26
4.4 Transporte de Masa	28
4.5 Fuerza de Filtración	28
4.6 Bioensuciamiento de las membranas	29
4.7 Tipo de proceso	33
4.8 Consumo de energía	34
4.9 Sistemas Comerciales de Biorreactores de Membrana	37
5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS BRM	38
6 CONTRASTE ENTRE EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL Y EL PROCESO CON MEMBRANAS	42
7. CASOS DE BIORREACTORES DE MEMBRANA	45
8. CONCLUSIONES	51
9. REFERENCIAS	52

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fenómeno de ósmosis	12
Figura 2 Selección de la presión de operación.....	14
Figura 3 Geometría de poros en función de la estructura de la membrana.....	15
Figura 4 Membrana orgánica de ultrafiltración (imagen con microscopio electrónico de barrido) ^[20]	17
Figura 5 Membrana inorgánica de ultrafiltración (imagen con microscopio electrónico de barrido) ^[20]	17
Figura 6 Módulos de membranas (a) placa y bastidor; (b) espiral; (c) tubular; (d) fibra hueca ^[21] ...	22
Figura 7 Diagrama de corrientes en la membrana ^[21]	26
Figura 8 Operación con PTM constante (a) y operación con flujo constante (b)	29
Figura 9 Bioensuciamiento de los BRM	30
Figura 10 Factores que afectan al Bioensuciamiento	31
Figura 11 a) BRM sumergido; b) BRM en lazo externo	33
Figura 12 Limpieza mecánica.....	39
Figura 13 Limpieza Química.....	39
Figura 14 Diagrama de flujo de un BRM sumergido.....	40
Figura 15 Proceso de Lodos Activados Convencional y con membranas	43
Figura 16 Tren de tratamiento Planta San Pedro del Pinatar.....	46
Figura 17 Membrana Tipo ZENON ZW500D	46
Figura 18 Vista general Planta San Pedro del Pinatar – España	47
Figura 19 Vista general Sabadell / Riu Sec (Barcelona -España)	47
Figura 20 Módulos BRM tipo Kubota EK400	48
Figura 21 Biorreactor de membranas planas rotativas HUBER-VRM	49
Figura 22 Diagrama de flujo HUBER –VRM ^[14]	50

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Configuración de BRM.....	35
Tabla 2 Caudales típicos para membranas ^[9]	36
Tabla 3 Tipos de biorreactores de membranas comerciales ^[1]	37
Tabla 4 Criterios de Operación y Rendimiento de un BRM ^[1]	38

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo incluye una recopilación de los fundamentos técnicos que determinan la aplicabilidad del biorreactor de membrana (BRM), como alternativa en el tratamiento de aguas residuales. En el segundo capítulo se presentan los antecedentes históricos de esta tecnología y como, en el transcurso de los años, fueron mejorando hasta evolucionar a la tecnología encontrada actualmente.

En el capítulo tres, se describen los tipos de procesos de filtración con membranas, los materiales empleados para su fabricación y las configuraciones de los módulos utilizados.

En el cuarto capítulo se contemplan los criterios de diseño para construir un BRM: fundamentos microbiológicos, flujo de filtrado, transporte de masa, parámetros de operación, criterios de carga, aireación, producción de lodos y se describe un procedimiento para el diseño de los BRM.

En el capítulo quinto se incluyen las consideraciones para el mantenimiento de los BRM. En el capítulo seis se presenta un contraste entre el proceso de lodos activados convencionales y el proceso con membranas.

Finalmente, se presentan casos de biorreactores de membrana en plantas optimizadas con esta tecnología, las cuales han demostrado una calidad del efluente garantizada.

2. ANTECEDENTES

El tratamiento del agua permite mantener este recurso esencial disponible y adecuado para su uso. La falta de recursos hídricos, ha llevado a algunos países a la reutilización de sus aguas residuales. Con la tecnología BRM, se logran retener bacterias, virus y componentes orgánicos e inorgánicos que frecuentemente son encontrados en los efluentes de los tratamientos biológicos convencionales, sin tratamiento terciario.

Los procesos de separación de materia disuelta y suspendida 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 60 y es en la década de los 70 que la tecnología entra al mercado ^[1].

En la década de los 70, la tecnología entró por primera vez en el mercado japonés, gracias a un acuerdo entre las compañías Dorr-Oliver y Sanki Engineering. También en la década de los 70, Thetford Systems, actualmente parte de Zenon Environmental, lanzó su versión de un sistema externo para el tratamiento aeróbico de las aguas residuales, el proceso fue llamado "Cycle-Let". A finales de los 80 y a principios de los 90, 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 70 y en Japón a principios de los 80. En esta misma época los procesos anaerobios de tratamiento de agua residual industrial empezaron en Sudáfrica. La introducción en Europa de los BRM aerobios no se produjo hasta mediados de los 90.

En 1982, Dorr-Oliver introdujo el sistema de reactor anaeróbico de membrana (RAM) para el tratamiento del efluente de una industria alimentaria. El proceso contaba igualmente con una unidad de ultrafiltración externa al reactor. Casi al mismo tiempo, se desarrolló en el Reino Unido dos sistemas BRM con procesos

de microfiltración y ultrafiltración^[2].

En la década de los 80 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 forma 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^[1].

Durante el año de 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^[1]. Recientemente aplicaron los BRM para la depuración de aguas residuales hospitalarias.

Los BRM aerobios han tratado con éxito efluentes de diversas industrias como las cosméticas, farmacéuticas, metálicas, textiles, alimenticias, papeleras y químicas. El interés en la tecnología para el tratamiento de aguas residuales mediante un biorreactor de membrana se ha incrementado, debido a las estrictas regulaciones de calidad del agua, la necesidad de reutilización y reciclaje y el incremento de la eficiencia en los costos de las tecnologías de membrana. El uso de membranas sumergidas ha reducido significativamente los consumos energéticos en los BRM y ha afianzado el incremento potencial de las membranas en el tratamiento del agua residual. Comparando con las tecnologías tradicionales de depuración de aguas residuales, la tecnología de BRM puede ser implementada en una superficie menor y produce un efluente depurado de mejor calidad, lo que hace que las plantas con BRM estén particularmente adaptadas para:

- I. Aplicación en áreas de elevada sensibilidad ambiental.
- II. Tratamiento de efluentes industriales que requieren un sistema que permita operar a edades del lodo elevadas.
- III. Aplicaciones específicas donde el proceso convencional de lodos activados no puede producir un efluente de calidad adecuada a costos razonables.
- IV. Aplicación en áreas donde existen limitaciones espaciales.

V. Ampliaciones de plantas convencionales.

Actualmente existen más de 1000 BRM comerciales operando en diversas partes del mundo con muchos otros en fase de proyecto o construcción. Los países en los que más se ha extendido esta tecnología son Japón (que cuenta con el 66% de los procesos a nivel mundial), Norte América y Europa. Más del 98% de los sistemas complementan el proceso de separación de membrana con un proceso biológico aerobio. Aproximadamente el 55% de estos sistemas comerciales tienen la membrana sumergida dentro del bioreactor, mientras que el otro 45% presenta una configuración de membrana externa al biorreactor ^[3].

3. MEMBRANAS DE FILTRACIÓN

La tecnología de membrana, en un principio, tenía un uso muy limitado y solamente se empleaba como tratamiento terciario en los procesos convencionales. La microfiltración (MF), ultrafiltración (UF) y la ósmosis inversa (OI) se utilizaron en áreas donde había requerimientos de vertido muy rigurosos o donde se pretendía reutilizar el agua depurada.

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 a tratar y la evolución del proceso de colmatación. En cuanto a la escala de filtración a utilizar los trabajos reportados que comparan la UF (ultrafiltración) con la MF (microfiltración) muestran que la UF, o al menos la MF próxima a la escala de ultrafiltración, conlleva a una menor colmatación de la membrana. El tamaño de los poros en esas condiciones permite evitar la acumulación de algunas partículas en el interior de la membrana.

Las membranas de Microfiltración (MF) tienen tamaños de poro de $0,1\mu\text{m}$ y proporcionan una elevada eliminación de sólidos en suspensión, incluyendo la mayoría de bacterias, así como la eliminación parcial de virus y macromoléculas. La presión de trabajo se mantiene baja.

Las membranas de Ultrafiltración (UF) tienen tamaños de poro que van de $0,1\mu\text{m}$ hasta menos de 5 nm ($0,005\mu\text{m}$). Este tipo de membranas rechazan las macromoléculas y todo tipo de microorganismo como virus y bacterias. La presión de trabajo se mantiene baja (50 a 500 kPa).

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 cierto iones monovalentes y moléculas de bajo peso molecular. Este tipo de membranas no son muy utilizadas en BRM, por su alta resistencia hidráulica ^[10], pero pueden ser de interés en muchos otros procesos, como el ablandamiento del agua (eliminación de iones polivalentes de calcio y magnesio).

3.1 Ósmosis Inversa

La ósmosis inversa es un proceso físico natural basado en el fenómeno de la difusión. El fenómeno de la ósmosis fue descubierto por el francés J.A. Nolle, cuyos trabajos sobre la difusión a través de membranas animales fueron publicados en 1748. El primer intento de utilizar la ósmosis inversa para desalar agua fue llevado a cabo entre 1953 y 1959 por C.E. Reid y J.E. Breton en la Universidad de Florida. Ambos descubrieron varias membranas sintéticas que presentaban un elevado porcentaje de rechazo de sales, pero debieron abandonar el proyecto debido a los bajos caudales de agua que producían.

Aunque C.E. Reid ha sido reconocido como el inventor de la ósmosis inversa, el primer gran avance en este terreno tuvo lugar el año 1960, con la puesta a punto por parte de S. Loeb y S. Sourirajan de membranas semipermeables, de acetato de celulosa.

A partir del año 1962, en la Universidad de Los Ángeles, California (UCLA), se construyeron y ensayaron las primeras plantas piloto. En junio de 1965 el agua suministrada por una de las plantas piloto se incorporó a la red de agua potable de la ciudad de Coalinga (California), siendo la primera planta del mundo que suministró agua potable con este proceso ^[3].

En 1963 H.I. Mahon propuso una membrana de fibra hueca de acetato de celulosa y, al año siguiente, R. Riley, puso de manifiesto la existencia de una capa superficial extremadamente densa y fina en las membranas de acetato de celulosa fabricadas según la técnica de Loeb y Sourirajan. En el mismo año, P.S. Francis estableció el concepto de membrana compuesta de capa fina y U. Merten propuso las expresiones matemáticas que gobiernan los flujos de soluto y solvente en la ósmosis inversa.

La investigación en este campo sufrió un nuevo impulso en 1968, cuando J. Westmoreland, y posteriormente, D. T. Bray inventaron y patentaron la configuración espiral para los módulos.

En 1971 H.H. Hoehn y J.E. Richter patentaron una membrana de fibra hueca fabricada con una poliamida aromática ^[2].

En 1981 se produjo otro considerable adelanto con la puesta a punto por parte de J.E. Cadotte, mediante la técnica de policondensación interfacial de las membranas compuestas de capa fina fabricadas con una poliamida totalmente

aromática [5].

Las primeras plantas industriales que permitieron obtener agua potable a partir de agua de mar con este proceso, en un solo paso, se instalaron en la segunda mitad de la década de los años setenta.

Fundamento teórico

La ósmosis es un proceso basado en el principio de la difusión, pero con la diferencia que las dos soluciones están separadas, en dos compartimentos, por una membrana semipermeable.

La difusión se da cuando dos soluciones entran en contacto, una que contiene una concentración de soluto C1 y otra que contiene una mayor concentración de éste. El fenómeno de la difusión se da cuando 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 solo permite la difusión del disolvente de las soluciones, de manera que el soluto (sales) es retenido por la membrana permitiendo que el agua (disolvente) se difunda a través de la membrana haciendo aumentar el nivel del compartimento que tiene una concentración de sales superior.

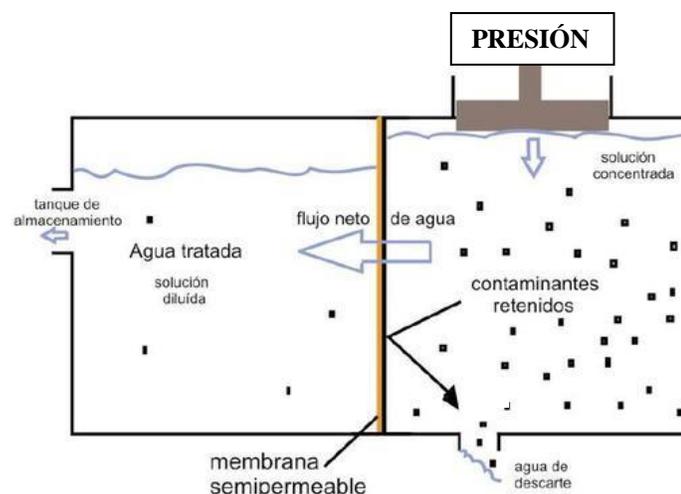


Figura 1 Fenómeno de ósmosis

Operación

La selección de una membrana y de un módulo adaptado a una aplicación específica constituye parte esencial para mantener constante, durante el mayor tiempo posible, un funcionamiento óptimo, es decir una permeabilidad lo más alta posible y la selectividad deseada.

Proceso discontinuo o de cochada. Se utiliza este proceso en experiencias de laboratorio y en la industria cuando los volúmenes a tratar son pequeños o cuando los volúmenes de las soluciones pueden variar. Es el método más rápido para concentrar un volumen dado con un mínimo de superficie de membrana. Sin embargo, este proceso es difícil de operar en las grandes instalaciones industriales.

Proceso continuo con recirculación. En este proceso la solución a tratar fluye en circuito cerrado gracias a una bomba de recirculación. Este circuito es alimentado por una bomba de alimentación cuyo flujo es muy inferior al de la bomba de recirculación. La bomba de alimentación fija la presión al valor deseado y una válvula de escape, permite la salida de una parte del líquido del circuito y así regula la presión a través de la membrana.

Este sistema es relativamente flexible. Además consume menos energía que el proceso discontinuo porque se eleva la presión sólo a una pequeña parte de líquido y no a todo el fluido que atraviesa los módulos. Sin embargo, se requiere de una superficie de membrana superior a la del proceso discontinuo, disminuyendo el flujo de permeato con la concentración.

Proceso Continuo. Se usa cuando se desea obtener una tasa de conversión alta. En este caso el efluente de la primera etapa pasa a la segunda y así sucesivamente. En la primera etapa se coloca una serie de módulos en paralelo, mientras que en las etapas siguientes el número de módulos disminuye gradualmente a medida que la concentración de la solución aumenta. Esto permite aumentar progresivamente la velocidad del fluido y minimizar el fenómeno de la polarización. Se utiliza para la desalinización del agua de mar.

Condiciones operativas

La presión de funcionamiento debe ser superior a la presión osmótica (25 atm. para una solución de 25 g/l de NaCl). La selectividad de una membrana de ósmosis inversa aumenta al aumentar la presión, por lo que se puede ajustar la presión en función de la tasa de retención deseada. Actualmente las presiones máximas toleradas por las membranas comerciales es alrededor de 75 atm. Por encima de esta presión las membranas se compactan y caen los flujos.

La velocidad de circulación se fija con el objeto de minimizar el fenómeno de la polarización, responsable de una disminución del flujo de solvente. La temperatura de operación es generalmente impuesta por la resistencia de las membranas y de los módulos.

Consideraciones económicas

Como en todo proceso de separación, la escogencia de la presión de operación debe ser el resultado de una optimización entre el costo del consumo energético y el costo de la superficie de las membranas a utilizar. En efecto, cuando la presión aumenta el consumo de energía también, mientras que la superficie de las membranas disminuye, (figura 2).

El segundo factor de consumo de energía es la velocidad de circulación del fluido que debe ser lo suficientemente alta para minimizar el fenómeno de polarización.

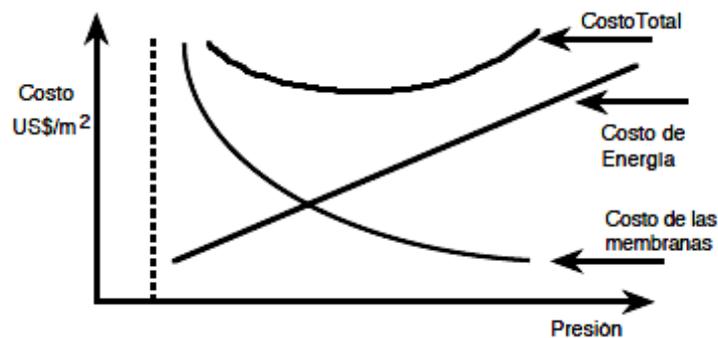


Figura 2 Selección de la presión de operación

El consumo de energía es proporcional a la presión de funcionamiento, inversamente proporcional a la tasa de conversión e inversamente proporcional al

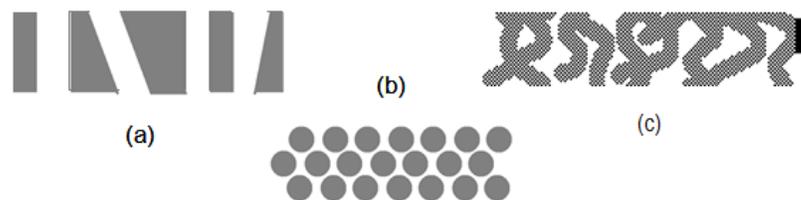
rendimiento de la bomba y su motor ^[6].

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 un 50%.

3.2 Microfiltración

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 como lo indica la figura 3.

En general la membrana de microfiltración presenta una misma estructura en todo su espesor, y la totalidad del espesor de la membrana determina la resistencia a la transferencia.



a) poros cilíndricos, b y c. poros de geometría compleja.

Figura 3 Geometría de poros en función de la estructura de la membrana

La existencia de diferentes 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 como las prestaciones de las membranas pueden mejorarse mediante la modificación de sus características.

La microfiltración es una técnica semejante a las otras técnicas de filtración con membranas como la ósmosis inversa y la ultrafiltración. Es la respuesta a varios tipos de problemas en los cuales los aparatos existentes de separación líquido-sólido convencional no tienen una prestación suficiente. Es en particular el caso cuando las partículas que se quieren separar tienen un tamaño inferior a la micra,

en cuyo caso se requiere aparatos técnicamente muy avanzadas como ultracentrífugas o elutriadores de gran velocidad, o con un flujo de filtración muy limitado y un cambio muy frecuente del medio filtrante.

En la microfiltración existe, en la vecindad del medio filtrante y paralelamente a este medio, un campo de cizallamiento que impide la deposición de las partículas a separar.

Aplicaciones de la microfiltración

El campo de aplicación de la microfiltración es muy amplio entre otros:

- En tratamiento de aguas, en que se puede concebir como una filtración directa después de una floculación.
- En depuración de aguas usadas.
- En descontaminación de aguas residuales industriales.
- En biotecnología para separar los substratos, y concentrar la biomasa.
- En química fina para recuperación de sales metálicas cristalizadas, concentración de suspensiones de látex y recuperación finas.

3.3 Ultrafiltración

La ultrafiltración es la continuación lógica de la microfiltración cuando se quiere 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 a separar no son en realidad partículas en suspensión sino compuestos de tipo macromolecular o coloidal susceptibles de poseer fuertes interacciones fisicoquímicas con el material de la membrana.

Con el fin de reducir la serie de pérdidas de carga y de limitarla a la capa activa,

las membranas de ultrafiltración poseen todas, una estructura asimétrica. Están compuestas de un soporte macroporoso y de 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 que presentan ambas una estructura asimétrica. (Figura 4 y Figura 5)

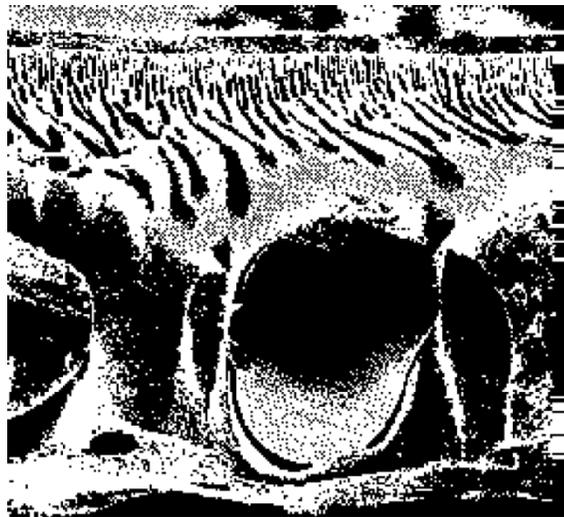


Figura 4 Membrana orgánica de ultrafiltración (imagen con microscopio electrónico de barrido)^[20]

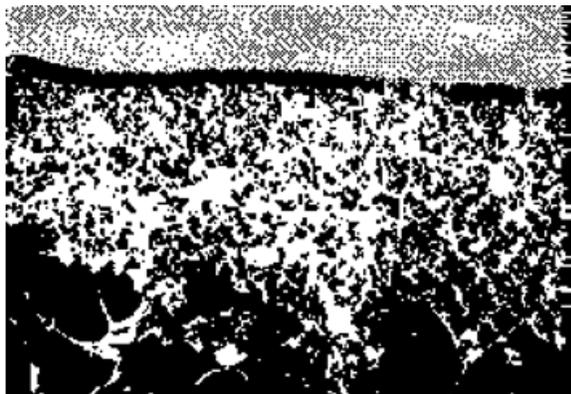


Figura 5 Membrana inorgánica de ultrafiltración (imagen con microscopio electrónico de barrido)^[20]

La segunda generación de membranas de ultrafiltración se prepara a partir de materiales cerámicos. Las capas sucesivas se producen por un fritado de granos cerámicos que generan poros residuales cuyo tamaño depende del tamaño de los granos. Para obtener una capa activa de ultrafiltración es necesario usar suspensiones coloidales de óxidos que luego se depositan sobre un material macroporoso y se fritan.

La ultrafiltración se ha vuelto una técnica importante en el tratamiento de las aguas y de los efluentes industriales. Puede utilizarse directamente en la producción de agua potable gracias a su capacidad de retener las bacterias y los virus. Puede utilizarse como pretratamiento antes de la nanofiltración o de la ósmosis inversa.

En el caso de la industria de la leche, la ultrafiltración ha sido utilizada para la concentración del lactosuero y, en la fabricación de queso, para concentración de proteínas. En las industrias del tratamiento de superficie, la ultrafiltración se utiliza para la regeneración de los baños de pintura utilizados en la industria automovilística.

En el campo de la bioquímica, la ultrafiltración sirve para separar y concentrar enzimas, virus o principios activos que sirven a la fabricación de vacunas. La ultrafiltración puede igualmente utilizarse para separar emulsiones de aceite en agua. Las gotículas de aceite quedan retenidas mientras que el agua pasa a través de la membrana.

3.4 Nanofiltración

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

- ✓ 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.

Cuando se examinan en forma muy detallada sus mecanismos de transporte, es posible darse cuenta que estas membranas presentan un desempeño bien específico tal como una selectividad de separación entre iones monovalentes y iones multivalentes, así como también entre moléculas del mismo tamaño pero presentando carga eléctrica o no. Actualmente se está comercializando la primera generación de membranas orgánicas que se desarrollaron de acuerdo a los criterios anteriormente definidos. Tienen aplicación en la biotecnología, el agroalimentario, la producción de agua potable, y el campo de las ciencias ambientales; sin embargo, el crecimiento del mercado de nanofiltración todavía está ligado a la puesta en práctica de nuevas membranas con mejores prestaciones.

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 5 a 10 atmósferas, con mejores tasas de rechazo (80-90%) que la ósmosis inversa.

Las membranas de nanofiltración utilizadas actualmente se conciben para reducir la salinidad total (50 a 70% de rebaja) y para eliminar una parte importante de iones divalentes (hasta 95%) principalmente los sulfatos, el calcio y el magnesio que contribuyen a endurecer las aguas.

3.5 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. Este material también se utiliza para desalación, desendurecimiento, desinfección y clarificación; a pesar de su sensibilidad a los ácidos, a la hidrólisis alcalina, a la temperatura y a la degradación biológica.

Otras membranas poliméricas hidrófilas son las que están hechas con poliamidas,

utilizadas principalmente en desalación, por su propiedad de selectividad al permeado y su buena estabilidad térmica, química e hidrofílica. Sin embargo estas membranas son muy sensibles a la degradación oxidativa y no toleran su exposición al cloro.

Las membranas de ultrafiltración y hemodiálisis también se fabrican en poliacrilonitrilo (PAN), que es menos hidrófilo que otros polímeros como la celulosa y sus derivados o las poliamidas, pero no tiene la propiedad de permeabilidad selectiva y por lo tanto no se utiliza en ósmosis inversa.

Otra clase de polímeros son las polisulfonas (PSf) y las polietersulfonas (PES), estos polímeros no son hidrófilos y tienen una tendencia alta a la adsorción, y una buena estabilidad química, mecánica y térmica. Estos polímeros se usan en membranas de ultrafiltración, como soporte de membranas mixtas, o en hemodiálisis. Las membranas PES y PSf se modifican mezclándolas con polímeros hidrófilos para mejorar las propiedades antiensuciamiento.

Los polímeros hidrófobos más utilizados como membranas macroporosas, por su alta estabilidad química y térmica son, el politetrafluoretileno (PTFE), polifluoruro de vinilideno (PVDF), polietileno (PE), policarbonato (PC) o isopolipropileno (PP). El PP se usa como membrana de microfiltración en el tratamiento de aguas, aunque es sensible al cloro.

Membranas inorgánicas

Los materiales inorgánicos poseen mayor estabilidad química, mecánica y térmica que los polímeros orgánicos; la desventaja es que 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. Las membranas de cerámica son las más representativas de esta categoría, los materiales cerámicos son óxidos, nitruros o carburos de metales como aluminio, zirconio o titanio.

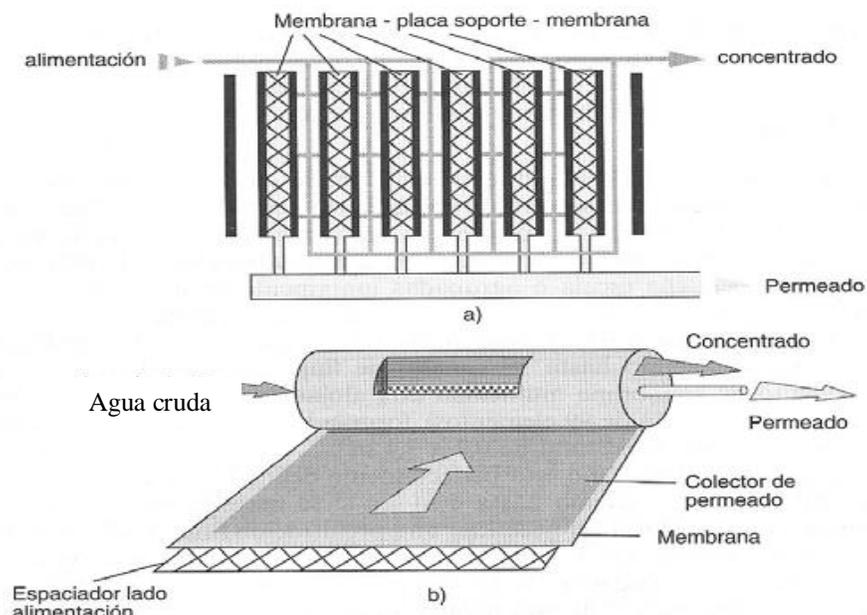
3.6 CONFIGURACIÓN DE MÓDULOS DE MEMBRANAS

Las membranas deben estar soportadas 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 estos son los que se emplean para construir el módulo ^[11].

Al diseñar un módulo se debe asegurar, a nivel de la membrana, una circulación suficiente del fluido que va a ser tratado, 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 compartimentos 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. Los módulos pueden ser de cuatro clases: placa y bastidor, arrollamiento espiral, tubular y de fibra hueca, como se observa en la figura 6.



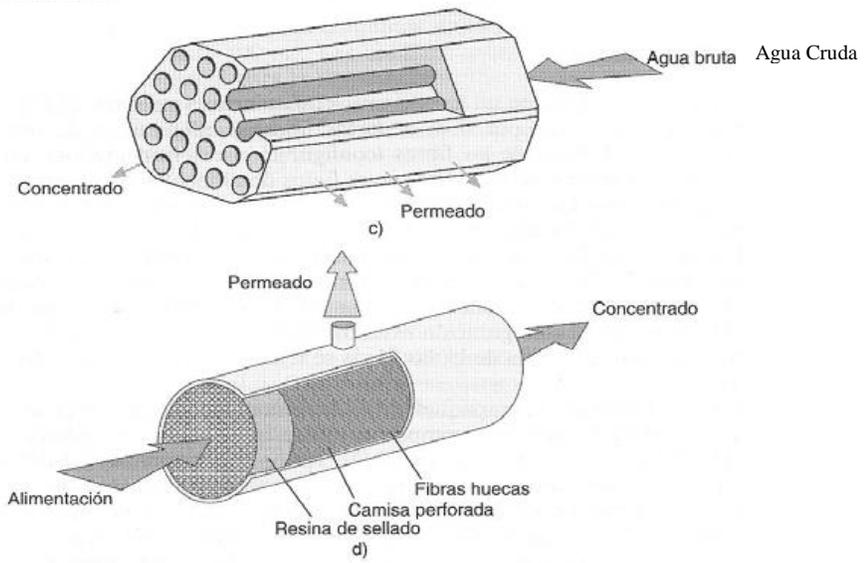


Figura 6 Módulos de membranas (a) placa y bastidor; (b) espiral; (c) tubular; (d) fibra hueca ^[21]

Módulos de placa y bastidor

Están hechos de membranas de hoja plana y placas de soporte. La alimentación circula entre las membranas de dos placas adyacentes, atravesando los conjuntos de membranas que se ensamblan a partir de membranas intercambiables, ya sea individuales o por paquetes. El espesor de la lámina líquida es de 0,5 a 3 mm. La densidad de compactación de las unidades de placa y bastidor es de 100 a 400 m^2/m^3 . Las placas aseguran el soporte mecánico de la membrana y el drenaje del permeado y deben ser corrugadas en el lado de la alimentación para aumentar la transferencia de masa. La circulación se puede disponer en paralelo o en serie. Las unidades pueden desmontarse fácilmente para realizar la limpieza o el cambio manual de las membranas.

Módulos de arrollamiento espiral

Está compuesto por envoltentes de membranas planas que van enrolladas por pares encerrando una hoja flexible porosa. Cada par de membranas va sellado por tres de sus bordes y el borde abierto está conectado y enrollado sobre un tubo perforado que transporta el permeado. Cada envoltente va separada en el lado de la alimentación por un espaciador, que mantiene abierto un canal de flujo para la alimentación y permite inducir turbulencias para reducir la concentración de polarización y aumentar la transferencia de masa con baja energía de entrada. El espaciador puede ser una malla o un separador corrugado, que incrementa las características de manejo de sólidos en los módulos tipo espiral. La alimentación fluye paralela al eje del tubo del permeado.

El diámetro de un elemento es máximo de 300 mm y la longitud hasta 1,5 m. En una sola vasija cilíndrica de presión pueden insertarse de dos a seis elementos. Estas son más compactas ($700 \text{ a } 1.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$) y producen una pérdida de carga menor que los módulos de placa y bastidor.

Estos módulos son más sensibles a la obstrucción que los sistemas de lámina plana y canal abierto, debido al espaciador, además no pueden utilizarse directamente con agua turbia sin pretratamiento. Se desarrollaron inicialmente para ósmosis inversa, pero sus ventajas se han aplicado también en operaciones de ultrafiltración.

Módulo tubular

Es la configuración más simple, la membrana se moldea sobre la pared interior de un tubo poroso que sirve de soporte, estos tubos tienen diámetros interiores de 6 a 40 mm, el más usado en el tratamiento de aguas residuales es el de 13 mm. Los tubos individuales se colocan en el interior de mangas de acero inoxidable o de PVC en plantas a pequeña escala, o agrupadas en haces de 3 a 151 tubos en un alojamiento cilíndrico con placas finales adecuadas.

Las membranas tubulares de diámetros mayores son autoportantes sólo a presiones de trabajo bajas, y los elementos de membrana están conectados en paralelo o en serie, en una disposición de cubierta en tubo. Cuando se requiere alta velocidad de circulación (3 m/s), las membranas se disponen en paralelo dentro de la vasija para reducir la pérdida de carga a lo largo de las membranas

individuales. Y cuando se requieren velocidades bajas (1 m/s) las membranas se conectan en serie.

Las membranas inorgánicas pueden disponerse sobre soportes cerámicos multicanales, hasta con 19 canales de flujo paralelo. Cada elemento de membrana multicanal está alojado individualmente o en haces paralelos, hasta de 99 elementos, formando módulos con un área superficial de 0,2 a 7,4 m².

Estos módulos no necesitan una prefiltración fina de alimentación, las membranas son menos propensas al ensuciamiento, debido a que proporcionan al flujo un camino hidrodinámico simple, además se limpian mecánicamente de una forma más sencilla. Se adaptan bien para el tratamiento de fluidos muy viscosos.

La desventaja del diseño tubular es que como tienen una baja densidad de compactación se incrementa el costo de la inversión. Y la ventaja es que las membranas tubulares pueden tolerar cargas de materia en suspensión mucho más grandes que otras configuraciones.

Módulo de fibra hueca

La fibra hueca se asimila a un cilindro poroso de pared gruesa. Las fibras están reunidas en un haz de millones. El flujo de alimentación va por dentro de las fibras (configuración interior-exterior) o por fuera de las fibras (configuración exterior-interior). En el primer caso la hermeticidad de agua entre flujos de alimentación y permeado se asegura por una resina que forma un plato plano en cada final de haz. Después del endurecimiento de la resina el haz se corta de tal manera que los extremos de las fibras aparecen abiertas. En la configuración interior-exterior, el haz tubular se dispone en forma de U; las fibras se sellan sólo por un lado o final.

La densidad del empaquetado es inversamente proporcional al diámetro, y por ello, estas unidades son muy compactas, desde 1.000 m²/m³ en módulos de UF, hasta 10.000 m²/m³ en módulos de OI. Varios haces pueden disponerse en un solo alojamiento obteniendo unidades con áreas superficiales grandes, capaces de producir hasta 220 m³/día en UF y 140 m³/día en OI. Las velocidades de trabajo en módulos de fibra hueca son bajas y los módulos pueden operar incluso sin circulación (modo final ciego). Luego las fibras huecas trabajan en zona de

flujo laminar, aunque los empujes pueden ser altos, debido al flujo pequeño en los canales.

La ventaja que ha llevado al empleo de fibras huecas en MF y UF en el tratamiento de agua, es la capacidad de barrido debido a que las fibras son autosoportantes. En UF el barrido se hace sometiendo el permeado a una presión mayor que la de alimentación. El cambio de dirección del flujo a través de la pared de la fibra hace desprender la capa de partículas depositadas en la superficie. La torta se transporta fuera del módulo por el flujo circulante que la atraviesa. En MF como el diámetro de los poros es mayor se utiliza el barrido por aire.

Membranas Dinámicas

Las membranas dinámicas son un tipo de membranas que se fabrican “in situ”, esto es, en la instalación donde van a utilizarse. Para ello se filtra a través de un soporte poroso una solución que contiene determinadas sustancias coloidales o disueltas. Si el tamaño de los poros del sustrato es adecuado, estas moléculas quedan retenidas en la superficie formando una pequeña película o “capa activa” que puede presentar una alta permeabilidad y un cierto rechazo de los sólidos en suspensión. La utilidad de estas membranas en el campo de los BRM es muy escasa. Se utiliza solamente para aumentar el rechazo de las partículas suspendidas de una membrana convencional. Además este tipo de membranas presenta problemas importantes. El primero es que se van destruyendo con el tiempo, por lo que deben ser formadas de nuevo periódicamente. El segundo es la no reproductibilidad de los distintos parámetros ya que los valores que se obtienen suelen ser con frecuencia aleatorios.

Actualmente tienen aplicación en el reciclado de agua en edificios, en el tratamiento de aguas residuales industriales, aguas residuales domésticas y municipales y también en el tratamiento de lixiviados de vertederos. En función de la aplicación también son más utilizadas unas membranas que otras. Mientras que en las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales son más comunes los BRM en lazo externo y módulos tubulares en las aguas residuales urbanas, los BRM sumergidos con placa plana o fibra hueca son los más utilizados.

4 CRITERIOS DE DISEÑO DE UN PROCESO DE FILTRACIÓN CON MEMBRANA

El diseño de un BRM tiene en cuenta, generalmente, los parámetros de evaluación incluidos a continuación:

4.1 Flujo de Filtrado

El flujo de filtrado es la cantidad de agua que pasa a través de una unidad de área de la membrana por unidad de tiempo, también es llamado velocidad de permeado y se mide en $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$. Como se ilustra en la figura 7 en una operación de membrana coexisten tres tipos de corrientes: la alimentación, el material o partículas retenidas o concentrado y el permeado.

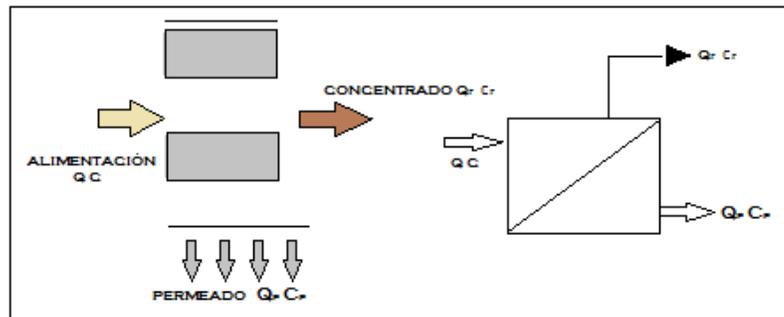


Figura 7 Diagrama de corrientes en la membrana [21]

Si se realiza un balance de masas sobre la unidad de membrana se obtiene:

$$Q = Q_p + Q_r$$

$$Q \cdot C = Q_p \cdot C_p + Q_r \cdot C_r$$

Donde:

Q = caudal de la alimentación (m^3/s)

Q_p = caudal de permeado (m^3/s)

Q_r = caudal del retenido o de rechazo (m^3/s)

C = concentración de la alimentación (kg/m^3)

C_p = concentración de permeado (kg/m^3)

C_r = concentración de agua retenida (kg/m^3)

4.2 Porcentaje de conversión

La conversión es la cantidad de agua de alimentación que es recuperada. El porcentaje de conversión es el cociente, expresado en tanto por ciento, entre el caudal de permeado y el caudal de aportación que llega a las membranas.

$$Y = 100 \left(\frac{1 - Q_P}{Q} \right)$$

Dónde:

Y = Porcentaje de conversión

Q = caudal de la alimentación (m³/s)

Q_p = caudal de permeado (m³/s)

4.3 Porcentaje de rechazo

La membrana realiza un barrido selectivo, permite pasar algunas sustancias a través de ella mientras rechaza a otras. Esta propiedad se expresa como porcentaje de rechazo y representa la cantidad de sales o de químicos que rechaza la membrana. Por ejemplo, un porcentaje de rechazo del 95%, significa que la membrana sólo deja pasar un 5% del material.

$$R = 100 \left(\frac{1 - C_P}{C} \right)$$

Dónde:

R = Porcentaje de rechazo

C = concentración de la alimentación (kg/m³)

C_p = concentración de permeado (kg/m³)

En los BRM la concentración del permeado, C_p, es normalmente muy inferior en comparación con la concentración del agua de alimentación, C. Además, el caudal de producción de lodo, Q_r, es generalmente muy pequeño comparado con el caudal de entrada.

4.4 Transporte de Masa

Los dos mecanismos de transporte más importantes en una operación de membrana para el tratamiento de las aguas residuales son la difusión y la convección.

La convección depende del flujo, el cual permite que algunos componentes se suspendan o disuelvan en él, este flujo depende de la velocidad. Si existe una velocidad alta se habla de flujo turbulento, por el contrario a bajas velocidades se llama flujo laminar. Velocidades elevadas producen mayor eficacia en el transporte de masas por lo que es deseable promover la existencia de un flujo turbulento.

La difusión es el resultado del transporte individual de iones, átomos o moléculas debido a movimientos cinéticos. La ley básica del transporte por difusión define que esta velocidad o flujo es dependiente del gradiente de concentraciones.

4.5 Fuerza de Filtración

Para que haya un paso de flujo a través de la membrana es necesario aplicar una fuerza que conduzca la materia a través de ella, esta fuerza puede ser natural o artificial.

La fuerza empleada para filtrar el agua a través de las membranas es, en el caso de los BRM, un gradiente de presión conocido como presión transmembrana (*transmembrane pressure*), PTM.

La PTM puede definirse como la presión necesaria para hacer pasar el agua a través de la membrana. Cuando el sistema opera en modo de flujo cruzado, la presión media transmembrana se determina por:

$$PTM_m = \frac{P_i + P_o}{2} - P_P$$

- PTM_m: presión media a través de la membrana, bar o Pa.
- P_i: presión a la entrada del módulo de membrana, bar o Pa.
- P_o: presión a la salida del módulo de membrana, bar o Pa.
- P_p: presión de permeado, bar o Pa.

Dado que el flujo y la fuerza conductora están interrelacionados, se puede fijar cada uno de ellos según los objetivos de diseño.

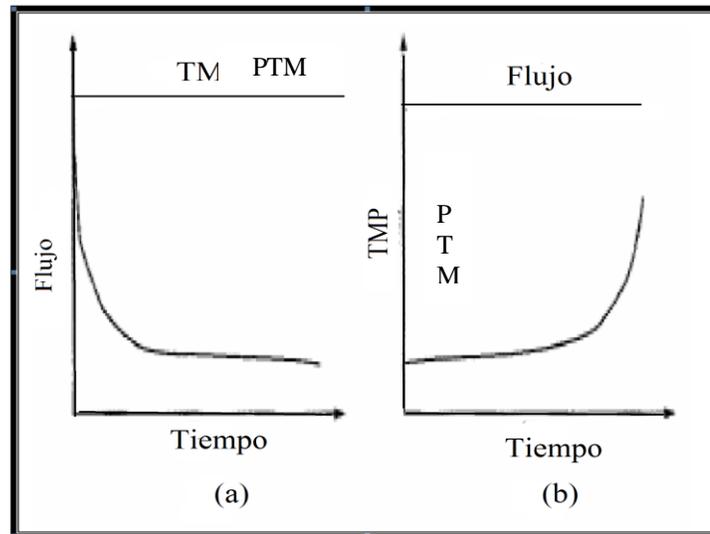


Figura 8 Operación con PTM constante (a) y operación con flujo constante (b)

Como indica la figura 8, operando a PTM constante, la deposición de partículas en la membrana causa inicialmente una disminución rápida del flujo, pero con el tiempo se hace constante. En cambio, trabajando a flujo constante, los efectos de la deposición incrementan la PTM, ya que se debe ejercer una presión mayor para que a través de la membrana pueda pasar la cantidad de agua fijada. Esta PTM es inicialmente baja pero se incrementa hasta cuando la membrana ya necesita ser limpiada.

4.6 Bioensuciamiento de las membranas

El bioensuciamiento en un BRM es la disminución de la capacidad de filtración en la membrana debido a la gran cantidad de partículas presentes en el agua residual. Esto ocurre por la adsorción, deposición e intrusión de estas partículas en los poros de la membrana. La presencia de estas especies (sólidos en suspensión y materia disuelta) tiene una gran importancia sobre el flujo de

permeado. Una primera disminución del flujo de permeado viene causada por concentración - polarización. La presencia de sustancias disueltas en el agua residual puede causar una acumulación de solutos en el lado del retenido de la membrana. Por otro lado, los sólidos en suspensión son transportados hacia la superficie de la membrana formando una torta que reducirá la permeabilidad hidráulica y el flujo de permeado (figura 9).

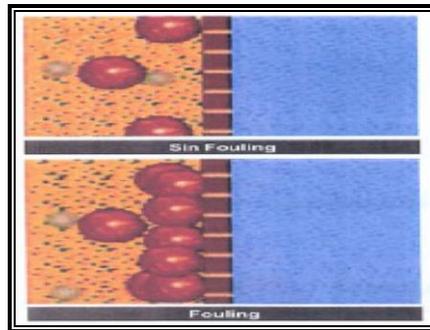


Figura 9 Bioensuciamiento de los BRM

El Bioensuciamiento de los BRM puede ser de forma reversible e irreversible. El ensuciamiento irreversible es el producido por las partículas que penetran en la membrana y quedan retenidas en ella, produciendo una disminución del flujo que no es posible aumentar con lavados físicos de membrana; generalmente es parcialmente eliminado bajo regímenes de limpieza con agentes químicos. El ensuciamiento reversible es el formado por la deposición de partículas sobre la superficie de la membrana, pudiendo ser eliminado mediante protocolos de limpieza físicos.

Los factores más importantes del Bioensuciamiento en un reactor biológico de tratamiento son: la biomasa, las características de la membrana y las condiciones de operación, Figura 10.

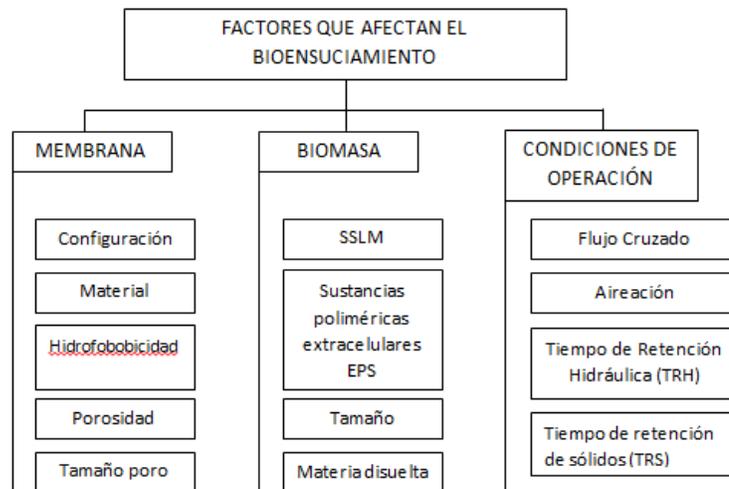


Figura 10 Factores que afectan al Bioensuciamiento

El licor mixto presente en un biorreactor es una mezcla compleja y variable de microorganismos heterogéneos procedentes tanto de la degradación de los sólidos en suspensión del agua de alimentación como de las reacciones biológicas que tienen lugar en el tanque. Toda esta materia tanto si se encuentra disuelta como en suspensión contribuye al bioensuciamiento de la membrana.

Recientemente, muchos investigadores han prestado atención especial al efecto de la concentración de SSML en el bioensuciamiento. Consideran que existe una relación directa con la resistencia de la torta al flujo del permeado.

En los BRM, no es viable eliminar las partículas causantes del bioensuciamiento por medio de un pretratamiento, debido a que estas constituyen una carga importante de materia orgánica necesaria para el tratamiento biológico. La generación de turbulencia mediante el sistema de aireación es la forma más propia de limpieza en los BRM. La reducción del flujo, es una técnica utilizada en los BRM sumergidos, ya que reducir el flujo conlleva operar con PTM inferiores, lo que provoca un menor ensuciamiento de las membranas.

Concentración – Polarización

La concentración – polarización (CP), es el término utilizado para describir la tendencia del soluto a acumularse en la membrana. A medida que el permeado

atraviesa la membrana, los solutos que contenía se quedan en las proximidades de su superficie, formando una capa de líquido estancado cuya velocidad tiende a cero, por lo que el único modo de transporte dentro de esta capa es la difusión; en este caso retrodifusión, ya que el soluto es arrastrado bajo las condiciones de flujo cruzado, dando lugar a una zona o capa límite en la que la concentración de soluto es mayor.

La difusión Browniana es directamente proporcional al flujo de filtración, mientras que el grosor de la capa límite, que se forma en la superficie de la membrana, depende del sistema hidrodinámico; si se aplica flujo turbulento a las membranas, esta capa disminuye.

La velocidad de flujo es uno de los factores operacionales con mayor efecto sobre el bioensuciamiento, ya que influye en el transporte de masa de las partículas, haciendo que fluyan tangencialmente a la superficie de la membrana, reduciendo, así, el grosor de la torta.

En los BRM sumergidos, esta velocidad de flujo cruzado es creada por el sistema de aireación situado justo debajo del módulo de membranas. Esta aireación no sólo proporciona el oxígeno necesario para la biomasa sino que también mantiene los sólidos en suspensión y genera las burbujas gruesas (25 mm de diámetro) que friegan la superficie de la membrana disminuyendo su taponamiento.

En lo referente al tiempo de retención hidráulico (TRH) y al tiempo de retención de sólidos (TRS), es difícil establecer una relación directa entre el bioensuciamiento y éstos, aunque sí existe una relación entre ellos; cuanto mayor es la concentración de SSML en el reactor menor es el TRH y mayor el TRS. Así pues, si el bioensuciamiento está directamente relacionado con la concentración de SSML y ésta a su vez relacionada con el TRS y el TRH; existirá, por tanto, una relación entre el bioensuciamiento y ambos tiempos. En resumen, para mantener un flujo de filtrado constante será necesario ir aumentando la presión transmembranal a medida que el bioensuciamiento aumenta.

El bioensuciamiento puede reducirse de tres formas:

- a. Por eliminación de las partículas causantes del bioensuciamiento, por medio de un pretratamiento o tratamiento in situ.
- b. Provocando turbulencia en las membranas
- c. Reduciendo el flujo

Todas estas operaciones generan costos adicionales al proceso, la operación b genera un costo operacional, las operaciones a y c un costo en la inversión. Es esencial optimizar el sistema para eliminar el bioensuciamiento, o aminorar los problemas producidos por él sin que esto genere costos excesivos.

4.7 Tipo de proceso

Los biorreactores de membranas están compuestos de dos partes: de una unidad biológica responsable de la degradación de los compuestos del agua residual, y de un módulo de membranas que se encarga de la separación líquido-sólido. En función de la situación del módulo de membranas, los BRM pueden clasificarse, en BRM sumergidos y BRM en lazo externo (Figura 11).

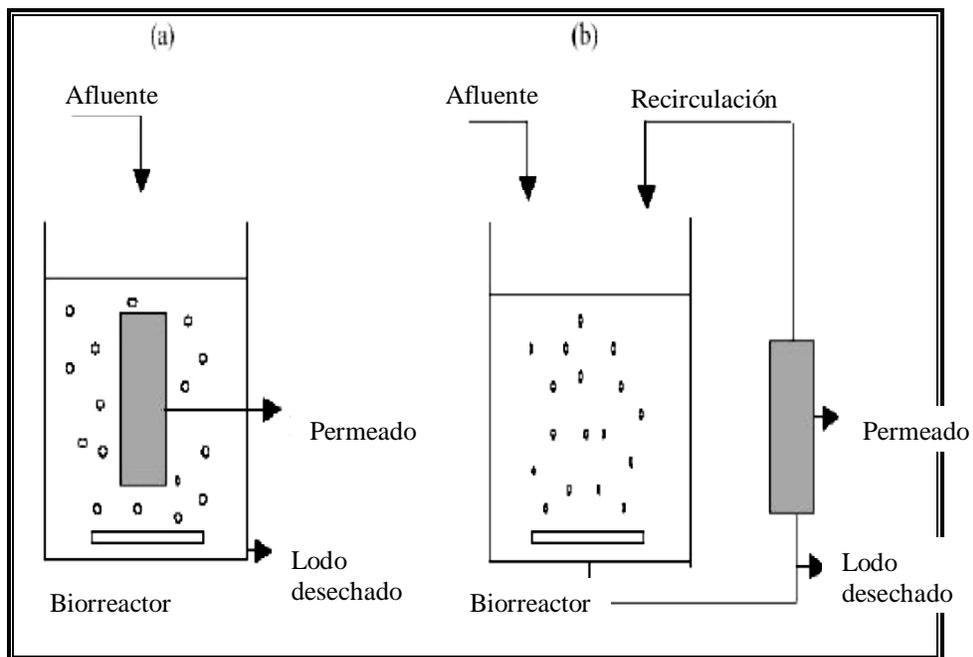


Figura 11 a) BRM sumergido; b) BRM en lazo externo

La aireación en un BRM proporciona el oxígeno necesario tanto para el mantenimiento de la biomasa como para la mezcla del biorreactor. En los BRM sumergidos se utiliza generalmente un difusor de burbuja gruesa. Este sistema no ofrece una eficiente transferencia de oxígeno, 19-37% a 5 m de profundidad ^[18], pero sí crea un flujo cruzado turbulento (aproximadamente 1 m/s) sobre la

superficie de la membranas que ayuda a mantener el flujo a través de la membrana, reduciendo la acumulación de materia en la superficie de ésta, incrementando así el ciclo operacional del sistema. El barrido que se consigue gracias a este tipo de aireación hace que sea requerida una menor frecuencia de limpieza de la membrana para restaurar el flujo operacional, en comparación con la configuración en lazo externo. En la configuración exterior la aireación se realiza a través de un difusor de burbuja fina, el cual ofrece una mejor eficiencia de transferencia de oxígeno, 25-40% a 5 m de profundidad y el flujo cruzado utilizado en estos sistemas es normalmente mayor (2-4 m/s). La desventaja de esta configuración es que el bioensuciamiento es mucho más pronunciado y se requiere una limpieza más frecuente y rigurosa para restaurar el flujo operacional, disminuyendo así la vida útil de la membrana.

4.8 Consumo de energía

Uno de los criterios de diseño para determinar la elección de un tipo de configuración u otro es el consumo de energía. El consumo de energía surge de los requerimientos de potencia del proceso. En un sistema de BRM, los requerimientos de potencia vienen del bombeo del agua de alimentación, de la aireación, de la succión de permeado, y de la recirculación del retenido en el caso de la configuración externa. Se observa por lo tanto, que en los BRM sumergidos el consumo de energía debido al bombeo necesario para recircular la biomasa es nulo, lo que deriva en que el consumo de energía para un sistema en lazo cerrado es normalmente dos órdenes de magnitud mayor que en los sistemas integrados. Se considera que el consumo de energía para unidades de membrana externa es de 2-10 kWh/m³ mientras que para las sumergidas es de 0,2-0,4 kWh/m³. En la tabla 1. se incluye una comparación entre diferentes configuraciones de BRM

Tabla 1 Configuración de BRM

PARÁMETRO	[1]	[19]	[11]	[20]
Configuración	Sumergido	Sumergido	Recirculado	Recirculado
Módulo de Membrana	Placa Plana	Fibra Hueca	Fibra Hueca	Fibra Hueca
Material	Polisulfuro	Polietileno	Ceramica	Polisulfuro
Tamaño Poro	0,4	0,1	0,1	0,1
Areá	0,24	2	1,1	0,39
PTM(bar)	0,1	0,13	2	2,75
Flujo permeado (L/m²h)	7,9	8	77	8,3
Velocidad de flujo Cruzado	0,5	No encontrado	1,5-3,5	No encontrado
Consumo de energía permeado (KWh/m³ producto)	No encontrado	0,0055	32	0,045
Consumo de energía en Aireación (KWh/m³)	4	0,14	9,1	10
Consumo Total de energía (KWh/m³)	4	0,14	41	10

Los análisis técnico-económicos de los BRM demuestran que la instalación de filtración (bloque de membranas) y la energía asociada requerida para la operación, representan los principales costos de inversión y operación.

La tabla 2, 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 2 Caudales típicos para membranas [9]

Aplicación	Material de membrana	Tipo de membrana	Superficie de filtración (m ²)	Velocidad (m/s)	Flujo a 20°C, (m/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= polietersulfona		FH= fibra hueca		
AP= agua potable		PAN =poliacrilonitrilo		PM= placa y marco		
DF= digestión de fango		PE= polietileno				
PSf= polisulfona						

Además del caudal, los factores básicos que afectan al costo de filtración son el precio de la propia membrana y su instalación, incluyendo todos los componentes asociados y costos de operación (energía, recambio y regeneración de membranas), así como la calidad del efluente deseado. Si se tienen en cuenta todos estos parámetros, el análisis técnico-económico tiende a nivelar el costo real de filtración, para las diferentes membranas, a lo largo de los años. Esto explica, en parte, la gran diversidad de membranas utilizadas en la actualidad.

4.9 Sistemas Comerciales de Biorreactores de Membrana

En la tabla 3, se presentan algunos tipos de biorreactores de membrana comerciales. Cuatro de las compañías comerciales tienen unidades de membranas externas al biorreactor mientras que las dos restantes y más conocidas (Zenon y Kubota) tienen unidades de membranas sumergidas.

Los BRM anaerobios presentan configuración en lazo externo ya que la falta de aire en el reactor implica que para aminorar el bioensuciamiento es necesaria la recirculación del agua mediante una bomba.

Tabla 3 Tipos de biorreactores de membranas comerciales ^[1]

PROCESO	BIORREACTOR	TIPO	MEMBRANA	FLUJO PERMEADO (m ³ /m ² h)
Kubota (Japón)	Aerobio	Sumergido	Placa Plana	0.025
Zenón (Canadá)	Aerobio	Sumergido	Fibra Hueca	0.030
Orelis (Japón)	Aerobio	Lazo Externo	Placa Plana	0.10
USF (Australia)	Aerobio	Lazo Externo	Tubular	0.040
Membratex (Sur Africa)	Anaerobio	Lazo Externo	Tubular	0.040
Wehrle Werk (Alemania)	Aerobio	Lazo Externo	Tubular	0.10

5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS BRM

En la Tabla 4 se incluyen los criterios típicos de operación y rendimiento de un BRM.

Tabla 4 Criterios de Operación y Rendimiento de un BRM ^[1]

Parametro	Unidad	Rango
OPERACIÓN	kg/m ³ .d	
Carga	mg/L	1,2 - 3,2
SSLM	mg/L	5.000 - 20.000
SSVLM		4.000 - 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

Limpeza 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 esta forma se elimina la capa externa de ensuciamiento de fibra y parte de las partículas que se han introducido en sus poros. En la figura 12 se muestra un esquema de este tipo de limpieza.

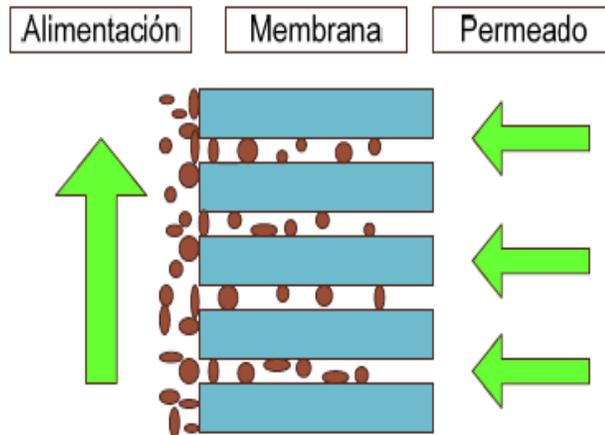


Figura 12 Limpieza mecánica

Por otra parte, cada cierto tiempo es necesario realizar una limpieza de tipo química (figura 13) para recuperar el estado casi inicial de la membrana. Las limpiezas químicas, tanto de las membranas planas como de las de fibras huecas, se realizan prácticamente siempre con hipoclorito sódico. En caso de pérdida de flujo por precipitación de sales se realizará una limpieza ácida.

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.

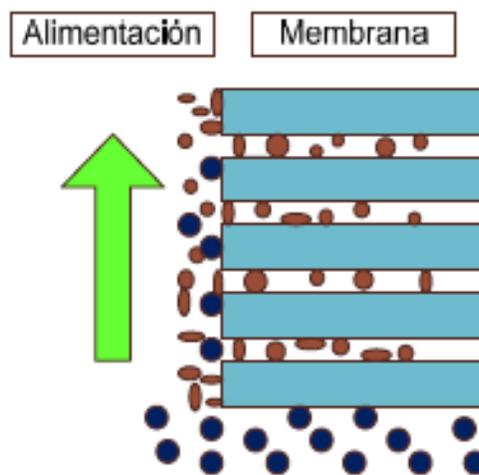


Figura 13 Limpieza Química

La figura 14 muestra el diagrama de flujo de un BRM sumergido con su sistema de limpieza.

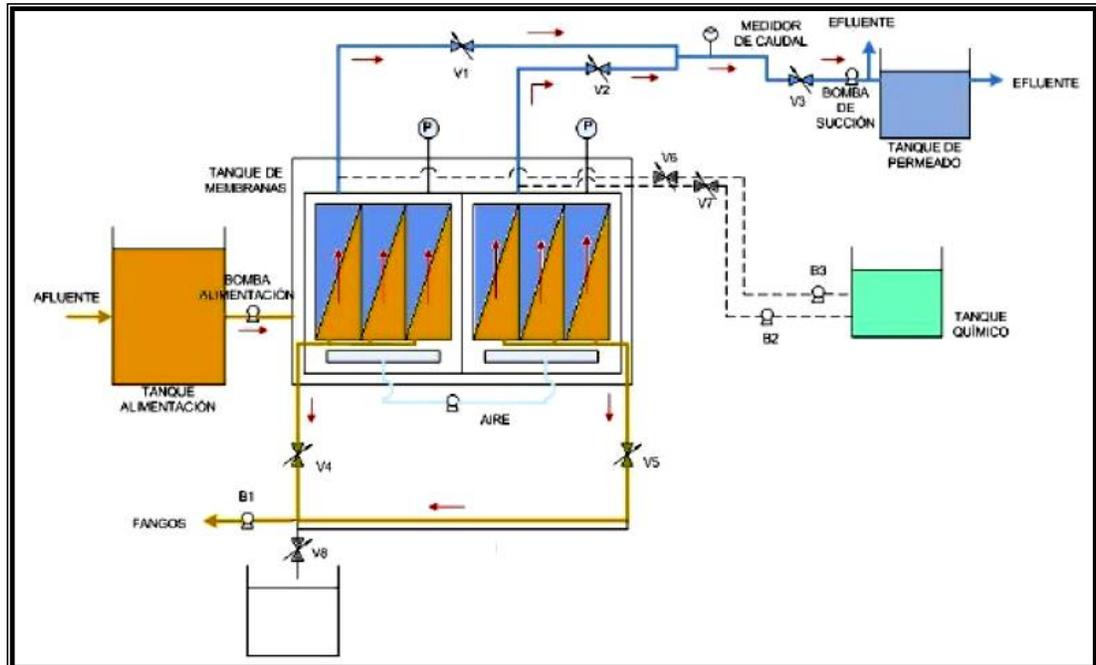


Figura 14 Diagrama de flujo de un BRM sumergido

Junto con el ciclo de filtración normal, una limpieza química regular es esencial para mantener el funcionamiento de la membrana. Hay básicamente dos métodos para la limpieza de la membrana. Uno es permitir que la membrana trabaje durante largos períodos de tiempo, y llegue a estar sucia, y, entonces, llevar a cabo periódicas e intensivas limpiezas de recuperación. El otro método es proporcionar alguna cantidad de limpieza regular y de recuperación poco frecuentes. La última opción mantiene siempre la membrana en un estado de buena disposición para manejar momentos de caudales punta cuando ocurren.

Limpieza de mantenimiento

El procedimiento de limpieza de mantenimiento utiliza hipoclorito sódico y ácido cítrico por si hay la posibilidad de un ensuciamiento inorgánico.

El procedimiento de la limpieza de mantenimiento del tanque vacío es completamente automático: la frecuencia es marcada por el operador y programado para no ocurrir durante las horas pico del día.

Limpieza de recuperación.

La limpieza de recuperación es necesaria para restablecer la permeabilidad de la membrana una vez que la membrana está sucia.

El proceso de limpieza de recuperación consiste en una retropulsación química, seguida por un período de remojo químico.

Las concentraciones de limpieza química que se utilizan habitualmente para remojar las membranas son de 1.000 mg/L de hipoclorito sódico (NaOCl) para la eliminación de los contaminantes orgánicos y de 2,000 mg/L de ácido cítrico para la eliminación de los contaminantes inorgánicos. Se recomienda realizarlo dos veces al año.

6 CONTRASTE ENTRE EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL Y EL PROCESO CON MEMBRANAS

Las técnicas biológicas de tratamiento de aguas residuales son muy antiguas y se vienen usando desde hace aproximadamente cien años. 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 usaba como un añadido en el proceso convencional. La microfiltración, la ultrafiltración y la osmosis inversa se utilizaron en áreas donde había requerimientos de vertido muy rigurosos o donde se pretendía reutilizar 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, hicieron que se volviera a tener interés en la tecnología de membrana. El balance económico es favorable a los BRM si se tiene en cuenta la excelente calidad de agua tratada que se consigue. De este modo, la tecnología con membranas en proceso de lodos activados (Figura 15), es especialmente valiosa frente a las otras tecnologías por las siguientes características:

- 5 Hay una retención eficaz de los sólidos suspendidos y de los compuestos más solubles dentro del biorreactor, lo que proporciona un efluente de excelente calidad y potencialmente reutilizable que cumple los requisitos de vertido más rigurosos.
- 6 Se logra la retención de bacterias y virus y un efluente estéril, lo que elimina la necesidad de llevar a cabo procesos de desinfección, eliminando también los subproductos de la desinfección.
- 7 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.
- 8 La mayor parte de las plantas MBR operan a edades de lodo de 40 días o superiores. Estas edades de lodo elevadas puede reducir en un 40% la producción de lodo, con la consiguiente reducción de los costos de operación.

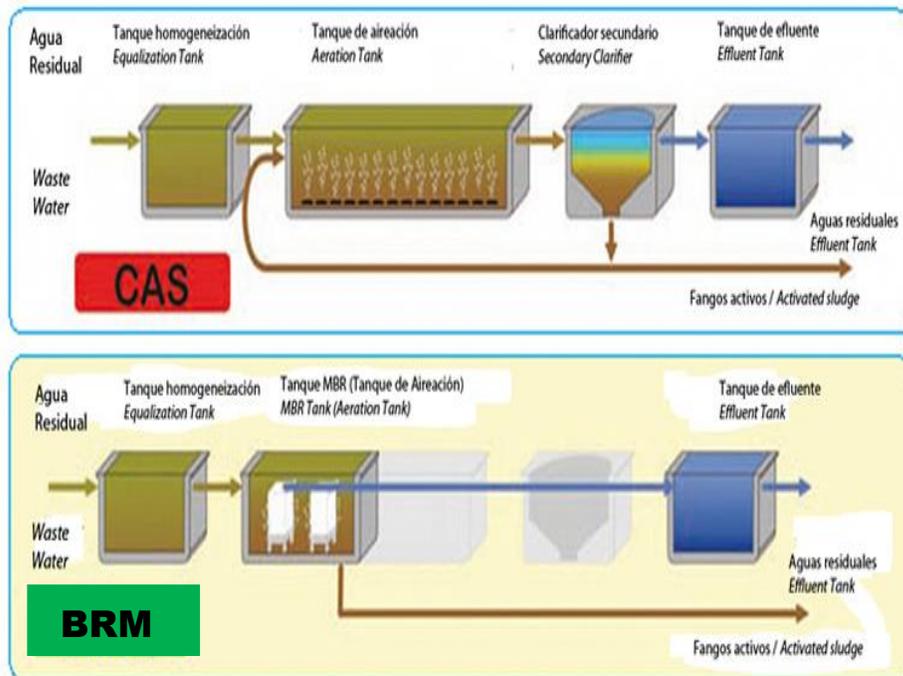


Figura 15 Proceso de Lodos Activados Convencional y con membranas

- Mediante la separación del lodo activo con membranas, se asegura una mayor calidad del agua tratada, libre de sólidos suspendidos.
- Gracias a la retención de las membranas, se opera a elevadas concentraciones de lodos, obteniendo así rendimientos de depuración superiores y mayor edad de lodos.
- Debido a la distribución uniforme de poros en la membrana, se obtiene una elevada calidad de permeado, así como mayor estabilidad frente a vertidos de alta carga contaminante.
- Debido a los elevados rendimientos de depuración obtenidos, permite reducir, considerablemente, los volúmenes de los reactores biológicos.
- Se elimina el sedimentador secundario.
- Las edades de lodos altos permiten menor producción de lodo de desecho y, por consiguiente, menores costos de tratamiento de lodos.

Los BRM trabajan con valores muy bajos de carga orgánica, y la membrana constituye una barrera para la descarga de partículas, la calidad del efluente de un BRM no es vulnerable a los picos hidráulicos u orgánicos que pueden afectar negativamente a la calidad de efluente en el proceso convencional.

Sin embargo, el BRM ofrece las siguientes *desventajas*:

- La tecnología BRM requiere una inversión inicial importante debido al elevado precio de las membranas.
- Las presiones requeridas en el sistema conllevan un gasto energético elevado, el cual se ve incrementado en el caso de los BRM con configuración externa debido a la recirculación de la biomasa.
- La limpieza de las membranas requiere elevados costos de implantación y de operación.
- La viscosidad del lodo aumenta con el tiempo de retención celular, por lo que se recomienda no superar concentraciones de biomasa de 25.000 mg/L.
- La posible acumulación en el biorreactor de compuestos inorgánicos no filtrables, como metales pesados, que a determinadas concentraciones pueden ser dañinos para la población bacteriana o afectar la integridad de la membrana.

7. CASOS DE BIORREACTORES DE MEMBRANA

La compañía Kubota desarrolló un sistema BRM en el que una membrana de placas estaba inmersa en el biorreactor ^[21] .

Actualmente, los biorreactores de membrana están muy implantados en Japón y varias compañías ofrecen procesos para el tratamiento y reutilización del agua para varias aplicaciones industriales principalmente en industrias alimentarias y de bebidas en las que son comunes valores elevados de DQO. Actualmente el mercado está dominado principalmente por dos compañías Zenon (fibra hueca) y Kubota (placa plana).

Aunque existen más de 20 compañías que actualmente comercializan la tecnología, dos son las principales que se imponen en el mercado mundial: GE Water & Process Technologies y Kubota, ambas con tecnologías diferentes. El módulo de GE (ZeeWeed® 500) es de fibra hueca, mientras que Kubota utiliza un módulo de membrana plano (ES, single-deck; EK, double 510).

Desde 1995, ambas compañías han experimentado un aumento exponencial en su capacidad instalada, destacándose Kubota por pequeñas instalaciones y GE-Zenon por aquellas de mayor capacidad. Actualmente, hay más de 2200 instalaciones ^[21], siendo la mayor planta instalada la de Traverse City (Michigan, EEUU) con una capacidad de 64.000 m³/d y estando en fase de construcción otra planta de 375.000 m³/d en Kuwait.

Los sistemas comerciales actuales tienden a la utilización de la configuración sumergida, en la que el módulo se introduce directamente en el biorreactor.

Los países en los que más se ha extendido esta tecnología son Japón (que cuenta aproximadamente con el 66% de los procesos a nivel mundial) y Estados Unidos, seguidos de los países europeos.

PTAR SAN PEDRO DE PINATAR, MURCIA – ESPAÑA

Esta planta de tratamiento 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 no solo garantizar la calidad del efluente, sino también

una reducción importante del volumen del reactor ^[16].

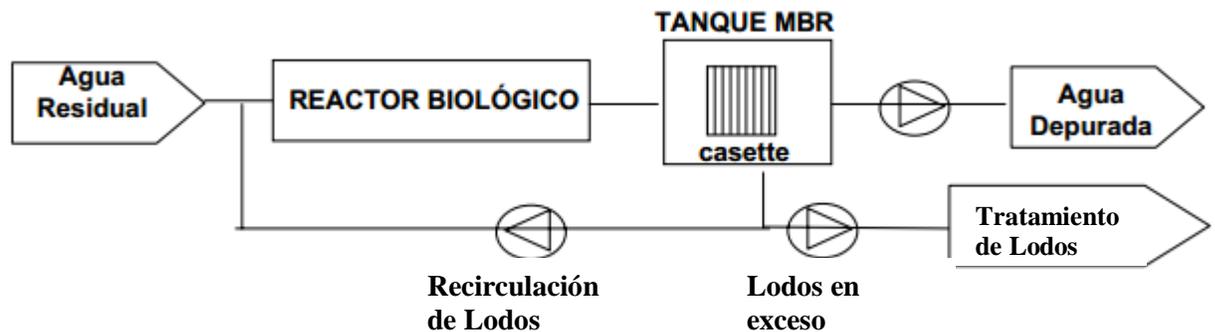


Figura 16 Tren de tratamiento Planta San Pedro del Pinatar

El sistema cuenta con membranas de tecnología Zenon, 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.

El diseño de esta planta incluye 4 trenes de ultrafiltración, aislados individualmente, mediante compuertas motorizadas, con una configuración por tren de 8 casetes de membranas, que contienen cada uno de 48 módulos de membranas de ultrafiltración ZW500D.



Figura 17 Membrana Tipo ZENON ZW500D

Las características de estas 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 : 0,04 μm
- Número total de módulos: 1.536



Figura 18 Vista general Planta San Pedro del Pinatar – España

PTAR SABADELL – RIU SEC (ESPAÑA)

La planta de tratamiento de aguas residuales Sabadell - Riu Sec, permite tratar la totalidad del caudal de 35.000 $\text{m}^3/\text{día}$, dando servicio a una población de 200.000 habitantes, utilizando tecnología BRM, incrementando el caudal de salida como agua regenerada previo tratamiento de desinfección ^[17].



Figura 19 Vista general Sabadell / Riu Sec (Barcelona -España)

Optimizada en el año 2007, mediante remodelación de reactores existentes formados por:

- Cámara anóxica
- Cámara óxica
- Cámara de membrana de placa plana.

La cámara de membrana tiene un volumen de 559 m^3 , compuesta por 24 módulos Kubota EK400 (400 cartuchos por módulo e 2 pisos), divididos en 2 líneas de 12 módulos, para un total de 192 módulos de membranas.



Figura 20 Módulos BRM tipo Kubota EK400

La ampliación con el sistema BRM, permitió disponer de una calidad elevada de agua de salida de una forma garantizada. Permite utilizar un espacio reducido y aprovechar la estructura inicialmente construida.

PTAR ARENAS DE IGUÑA, 20.000 hab., CON VRM® 30 [14]



Figura 21 Biorreactor de membranas planas rotativas HUBER-VRM

El proceso HUBER-VRM® es un sistema de membranas de ultrafiltración sumergidas en el lodo activado. El efluente que se consigue cumple con las más exigentes normativas de vertido actuales y dispone aún de capacidad para cumplir las que vengan en un futuro próximo, representando desde este punto de vista una inversión inteligente.

El proceso HUBER-VRM® combina el proceso de lodos activados con una eficaz separación sólido-líquido. El agua pre-tratada se airea en el reactor biológico. La separación del sólido (partículas, bacterias y virus) se lleva a cabo mediante membranas de ultrafiltración operadas a presión.

Para estas aplicaciones HUBER emplea una membrana hidrofílica de alto rendimiento con una baja afinidad a la colmatación por los componentes del agua residual. El tamaño de poro de 38 nm se sitúa en el rango de la ultrafiltración. Esto permite que sólidos, bacterias y la mayor parte de los virus quedan retenidos. Junto con la fase líquida tan solo iones y compuestos de bajo peso molecular atraviesan la membrana. El lavado para el funcionamiento continuo del equipo de membranas se lleva a cabo mediante una corriente de aire en el lado del concentrado.

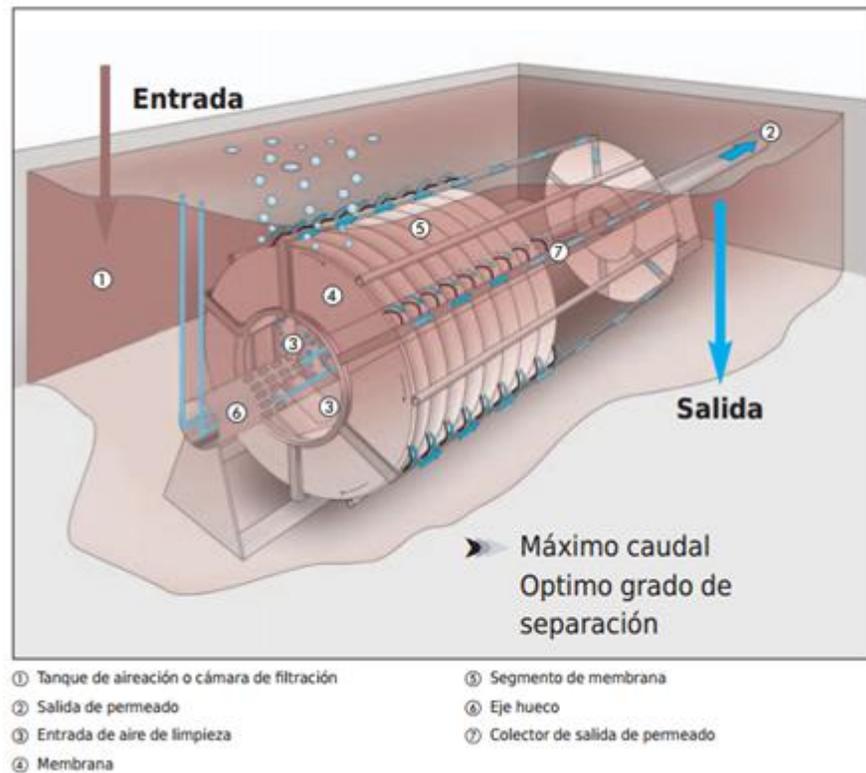


Figura 22 Diagrama de flujo HUBER –VRM ^[14]

El equipo HUBER-VRM® montado sobre un bastidor se coloca sumergido en una cámara de filtración o directamente en la balsa de aireación. El sistema consiste en un eje sobre el que van colocados 6 u 8 módulos de UF manteniendo una distancia determinada entre ellos.

La innovación del sistema HUBER-VRM® se basa en la eficiencia del sistema de limpieza de las membranas haciendo innecesarios los contralavados. El principio de limpieza de las membranas consiste en la creación de una corriente de aire en la superficie de la membrana en combinación con la aceleración radial. Tan sólo un sector de membrana necesita una limpieza intensa lo que se traduce en un sustancial ahorro energético.

8. CONCLUSIONES

1. Los BRM constituyen una excelente alternativa de tratamiento cuando se requieren efluentes de alta calidad, libres de sólidos, para reúso.
2. Los costos de un BRM limitan su aplicación ya que superan los costos del sistema convencional de tratamiento.
3. El tratamiento de aguas mediante un BRM representa una solución compacta y discreta para establecimientos o lugares en 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.
4. 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 ocupa una menor área y permite el retrolavado en la membrana, lo cual contribuye a alargar la vida útil de la misma.
5. Los BRM permiten obtener un efluente de alta calidad, independientemente de la calidad del afluente.
6. Los BRM tienen gran capacidad de desinfección ya que impiden el paso de virus y bacterias
7. Los BRM tienen mayores tiempos de retención de sólidos, permiten respiración endógena de los microorganismos presentes en el agua residual, provocando una menor producción de lodos.
8. Los BRM tienen posibilidad de adaptarse fácilmente a las plantas de lodos activados ya existentes, especialmente en aquellos casos de plantas sobrecargadas que necesitan una ampliación.
9. Operacionalmente, uno de los problemas más importantes de los BRM, se debe al 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.

9. REFERENCIAS

1. Stephenson Tom, Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment, 2000
2. Nazim Cicek, Removal mechanisms of 17 beta-estradiol and 17 alpha-ethinylestradiol in membrane bioreactors, 2003.
3. Albasi, Chang, Principles and applications of membrane bioreactors in water and waste water treatment, 2002.
4. Guizard Christian, Técnicas membranarias de filtración de líquidos Micro-ultra, nano filtración y osmosis inversa. 1999.
5. Zarragoitia- Gonzalez, Desarrollo de modelos dinámicos para la simulación y optimización de biorreactores con membrana sumergida para el tratamiento de aguas residuales. 2009.
6. Romero González Jorge Francisco, Control Avanzado en Procesos Industriales de Microfiltración y Ultrafiltración tangencial. España, 2010.
7. Molina Muñoz Marisa, Estudio de los procesos microbianos implicados en el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante biorreactores de membrana sumergida. Universidad Nueva Granada. España, 2007.
8. Chang, Principles and applications of membrane bioreactors in water and waste water treatment, 2002.
9. Manem, J., Sanderson, R. Biorreactores de Membrana. Tratamiento del Agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones., 1998,
10. González Gálvez Laura , Estudio biológico convencional y un proceso mediante biomembranas para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Septiembre de 2007.
11. Salazar Díaz Claudia, Reducción de disruptores endocrino, microcontaminantes y modificación de características organolépticas de las aguas residuales utilizando técnicas de filtración avanzadas. 2006.
12. Rosenberg et al., Finding MRSA in U.S. Wastewater Treatment Plants, 2002
13. <http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol24num3/articulos/membrana/2011>
14. http://www.huber-technology.cl/fileadmin/01_products/06_mbr/01_HUBER_Membranbebung_VRM/Prospekte/pro_vrm_es.pdf, 2010
15. RAM Overload, Principios de las Osmosis Normal e Inversa, 2008.
16. Maroto Hector, Comparativa de ampliación E.D.A.R. mediante reactor biológico convencional o MBR, 2007.
17. Moragas Bouyat Lucas, Edar de sabadell edar de sabadell riu sec riu sec Ampliación con tecnología BRM 2008
18. Gander M., Jefferson B., Judd S. Aerobic MBRs for domestic wastewater

treatment: a review with cost considerations. Separation and Purification Technology. 2000

19. Visvanathan,C., Ben Aim, R., Paramesh waran, K. "Membrane Separation Bioreactors for Wastewater Treatment", Environmental Science and Technology, 1997.
20. Suwa Y, Suzuki T, Toyohara H, Yamagishi T, Urushigama Y; Single –stage nitrogen removal by an activated – sludge process with crossflow filtration, Water Res. 1992.
21. Churchouse S, Wildgoose D. Membrane bioreactors progress from the laboratory to full-scale use. Memb Technol. 1999.