

Utilización de Membranas en el Tratamiento de A.R Domésticas

Estado del Arte

Laura Daniela Alvarado Niño

Liseth Natalia Delgado Barajas

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Civil

Director

Mario García Solano

Ingeniero Civil

Especialista en Ingeniería Sanitaria

Msc. En Informática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2017

Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. Metodología	13
2.1 Búsqueda de la información	14
2.2 Clasificar y analizar la Información	14
2.3 Compendiar la Información	15
3. Desarrollo del mercado de sistemas MBR	15
4. Membranas	17
4.1 Clasificación de las Membranas	17
4.1.1 Tipos de flujos de filtración	17
4.1.2 Tipos de filtración y diámetro de poro	19
4.1.3 Morfología de los poros	20
4.1.4 Geometría de la membrana	21
4.2 Materiales de las Membranas	24
4.2.1 Membranas Poliméricas	25
4.2.2 Membranas Cerámicas	26
4.2.3 Membranas Compuestas	27
5. Descripción del sistema MBR	27
5.1 El Pretratamiento	27
5.2 Clarificación Primaria	28
5.3 Reactor Biológico	28

5.4 Sistema de Membrana	28
6. Manejo del fouling	34
6.1 Tipos de fouling	35
6.2 Métodos de limpieza	35
7. Adquisición del sistema MBR	36
7.1 Garantía	38
7.2 Pruebas de Aceptación	39
8. Economía del sistema MBR	39
9. Casos de implementación del sistema MBR	41
9.1 Caso 1	41
9.2 Caso 2	42
9.3 Caso 3	43
9.4 Caso 4	44
9.5 Caso 5	45
10. Conclusiones	47
Referencias bibliográficas	49

Lista de Figuras

Figura 1. Descripción de la metodología	14
<i>Figura 2.</i> Clasificación de las membranas	18
Figura 3. Esquema de los tipos de flujo de filtración y tasa de filtrado	19
Figura 4. Clasificación de las membranas de filtración según el diámetro de poro	20
<i>Figura 5.</i> Clasificación de las membranas según la filtración y remoción de partículas	21
Figura 6. Esquema de la membrana tipo Flat Sheet	22
Figura 7. Esquema de la membrana tipo Hollow Fiber	23
Figura 8. Esquema de la membrana tipo tubular	23
Figura 9. Flujo a través de los tipos de membranas. a) Flat Sheet FS b) Multitubular MT c) Hollow fibre HF	24
Figura 10. Esquema de las configuraciones de membranas a) inmersa iMBR b) externa sMBR	29
Figura 11. Reducción del espacio al instalar el sistema MBR	32
<i>Figura 12.</i> Esquema del proceso de tratamiento del caso de estudio 4	45
Figura 13. Esquema del proceso de tratamiento del caso de estudio 5	46

Lista de Tablas

Tabla 1. Descripción de los materiales poliméricos	25
Tabla 2. Características de la configuración inmersa y externa.	29
Tabla 3. Parámetros de comparación entre los sistemas convencionales y MBRs	30
Tabla 4. <i>Parámetros de calidad del efluente después del tratamiento con MBR.</i>	31

RESUMEN

TITULO: UTILIZACIÓN DE MEMBRANAS EN EL TRATAMIENTO DE A.R DOMÉSTICAS. ESTADO DEL ARTE_{*}

AUTORES: LAURA DANIELA ALVARADO NIÑO_{**}
LISETH NATALIA DELGADO BARAJAS_{**}

PALABRAS CLAVE: AGUA RESIDUAL, BIORREACTOR DE MEMBRANA, TRATAMIENTO.

DESCRIPCIÓN:

Debido a la evidente afectación del medio ambiente por el vertimiento desmedido de las aguas residuales en fuentes hídricas como ríos, lagos, océanos y demás, sin ningún control ni tratamiento, las poblaciones han tomado conciencia y han ideado métodos para reducir significativamente los agentes contaminantes en las aguas que son desechadas de las viviendas y las industrias; esto también con el fin de prevenir malos olores o enfermedades a comunidades cercanas debido a la acumulación de aguas residuales. En la actualidad existe una amplia variedad de estas tecnologías de tratamiento de aguas residuales como el sistema de biorreactores de membrana MBR el cual permite obtener una alta calidad de efluente pudiendo ser reutilizados en la irrigación u otras actividades; el MBR puede ser implementado con procesos aerobios y anaerobios, que para los dos casos las membranas tienen dos configuraciones: inmersas o externas al reactor biológico. Una de las principales desventajas de este sistema de tratamiento es el ensuciamiento de la superficie o poros de la membrana, haciendo que la limpieza y mantenimiento de estas juegue un papel importante debido a la reducción del flujo permeado (tratado), la aplicación de los métodos de limpieza (físicos y químicos) incrementa los costos operacionales, al igual, que la energía requerida para el tratamiento aunque esto no ha sido ningún obstáculo para su amplia aplicación en las plantas de tratamiento de algunos países.

_{*} Trabajo de grado

_{**} Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Mario García Solano, Ingeniero Civil, Especialista en Ingeniería Sanitaria, Msc. En Informática.

ABSTRACT

TITLE: MEMBRANE UTILIZATION IN DOMESTIC WASTEWATER
TREATMENT. STATE OF ART*

AUTHORS: LAURA DANIELA ALVARADO NIÑO**
LISETH NATALIA DELGADO BARAJAS**

KEYWORDS: WASTEWATER, MEMBRANE BIOREACTOR, TREATMENT.

DESCRIPTION:

Due to the environmental pollution associated to sewage discharge in water sources like lakes, rivers, oceans and other, without previous control or treatment, communities have taken conscience and developed new methods to reduce significantly various pollutants present in domestic water and industrial water. This in order to prevent bad smells and disease in near communities due to accumulation of wastewater. Currently exist a wide range of technology to wastewater treatment as the membrane bioreactor system (MBR), with this system is possible obtain a high quality effluent for reuse in irrigation and other human activities. The MBR could be implemented with aerobic and anaerobic processes, for the two process membranes have two configurations: immersed or external to biological reactor. One of the most important and principal disadvantage of this treatment system is fouling trained on the membrane surface or inside pores, making clean-up and maintenance of these play an important step, because of flow permeated (or treated) could be reduced, application of cleaning methods (physical an chemical) increase the operational cost as well as the cost of energy required for treating the sewage water although this has not been a barrier to apply the MBR in several plants of some countries.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Mario García Solano, Ingeniero Civil, Especialista en Ingeniería Sanitaria, Msc. En Informática.

Introducción

La gestión del agua residual garantiza la protección del medio ambiente bajo medidas económicas, sociales y políticas. El tratamiento que se le da a las aguas residuales, procedentes de las actividades humanas, evita la acumulación de agentes contaminantes que pueden provocar olores desagradables, desequilibrio en la vida ecológica de las fuentes hídricas e incluso enfermedades. (Metcalf & Eddy INC, 1995).

Los sistemas como UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), lodos activados, filtros anaerobios, lagunas de oxidación, entre otros, hacen parte de la amplia variedad de métodos aerobios y anaerobios utilizados en el tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo con el paso del tiempo los estándares y requerimientos de calidad de efluentes han llevado a nuevas investigaciones y desarrollos basados en nuevas tecnologías, buscando mejorar sus eficiencias de remoción de contaminantes. (Metcalf & Eddy INC, 1995).

Entre estos nuevos sistemas está el sistema de biorreactores de membrana MBR el cual ofrece una eficiencia de remoción de demanda química y biológica de oxígeno mayor al 90% y un efluente libre de sólidos suspendidos, el cual ha venido implementándose con procesos anaerobios y aerobios cumpliendo con estándares como los establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). (Verrecht B. et al, 2012, p.594-600).

El MBR es un tratamiento que utiliza dos procesos, uno biológico y otro físico (la filtración), con el fin de depurar las aguas residuales; el auge de esta tecnología ha tomado fuerza en las últimas dos décadas y ha sido participe de investigaciones en países como Japón, Europa y Estados Unidos.

En este documento es presentada la investigación literaria del desarrollo, funcionamiento del sistema, componentes, manejo del fouling (desventaja del sistema frente a otros tratamientos), las experiencias prácticas y los costos para la implementación del tratamiento; con la información teórica y práctica, tomada de documentos extraídos de bases de datos y catálogos de empresas comercializadoras de sistemas MBR.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Elaborar un estado del arte sobre la teoría, las aplicaciones y avances tecnológicos que ha tenido el sistema de membranas en conjunto con las tecnologías aerobias y anaerobias (de lodos y sistemas UASB) para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

1.2 Objetivos específicos

- Buscar y seleccionar en diversas fuentes teóricas de investigación, experiencias prácticas y catálogos, la información correspondiente a los sistemas de membranas en conjunto con procesos aerobios y anaerobios utilizados para el tratamiento de aguas residuales domésticas; haciendo uso de herramientas bibliométricas.
- Evaluar y clasificar la información reunida sobre el tratamiento de aguas residuales domésticas con la utilización de membranas.
- Describir las tendencias del uso del sistema de membranas en el tratamiento de aguas residuales domésticas con enfoques ambientales.
- Elaborar una comparación objetiva entre el sistema de membranas con lodos activados, el sistema de lodos activados y sistemas anaerobios (UASB); identificando sus ventajas y desventajas en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

2. Metodología

Para el desarrollo de los objetivos de este proyecto fue implementada la metodología planteada en la Figura 1 y descrita a continuación:

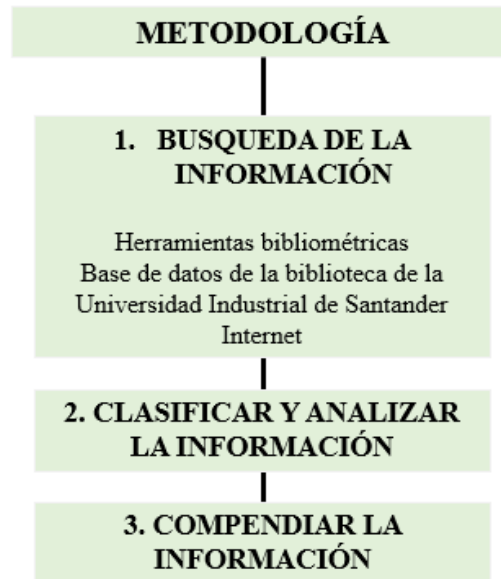


Figura 1. Descripción de la metodología

2.1 Búsqueda de la información

La búsqueda de la información se realizó en la base de datos de la Universidad Industrial de Santander, así como en Scopus y Web of Science. Los términos de búsqueda utilizados fueron: membrane bioreactor, environment, wastewater, economical evaluation of MBR, membrane bioreactor configuration, wastewater treatment, membrane materials, system MBR y otros. La selección de la información se redujo a libros y artículos exclusivamente.

La investigación específica de los sistemas comercializados por las diferentes empresas se realizó en Internet obteniendo los catálogos de los fabricantes y las experiencias de la implementación de la tecnología de membranas en el tratamiento de agua residual doméstica.

2.2 Clasificar y analizar la Información

Una vez recopilados y leídos los libros, artículos y catálogos, se realizó un filtro con el fin de descartar la información no relevante, así como textos en los que se encontrara información similar para no recurrir en la redundancia.

2.3 Compendiar la Información

La organización de la información se realizó bajo términos específicos según los criterios optados para la estructuración del documento final, tales como: desarrollo en el tiempo del sistema, desarrollo del mercado de sistemas MBR, clasificación de las membranas, descripción del sistema MBR, manejo del fouling, adquisición del sistema y casos de implementación de la tecnología.

3. Desarrollo del mercado de sistemas MBR

La primera implementación del sistema MBR data de los años sesenta, utilizado para tratar las aguas residuales de un crucero, fue comercializado por Dorr-Oliver, y para la misma época aparece el tratamiento de membranas en conjunto con el sistema de lodos activados. Los procesos fueron basados en membranas no inmersas y con membranas de ultrafiltración que trabajan a altas presiones de entrada 3.5 bar y a bajas flujos. (Judd & Judd, 2006, p. 2-19).

En los años de 1980 en Estados Unidos, y en Japón con las investigaciones de Yamamoto y sus colaboradores, comenzó el desarrollo de las membranas huecas (HF), que para el año de 1993 fueron comercializados por Zenon. (Judd & Judd, 2006, p. 2-19).

Para comienzos de 1990, la empresa estadounidense Thetford Systems desarrolló un proceso para el reciclaje de agua Cycle-Let y la empresa Zenon Environmental desarrolla el sistema ZenoGem de membrana inmersa. Igualmente, en Japón era promovido el programa gubernamental

Aqua Renaissance que apoyaba el desarrollo de membrana planas de microfiltración (MF) sumergidas, de la empresa Kubota, que para 1990 instala la primera planta fuera de Japón en Inglaterra. Para el año 2000, comienzan a desarrollarse nuevos productos pensados en mejorar la eficiencia energética de los sistemas y la implementación de plantas a pequeña escala para el tratamiento y reúso de las aguas residuales. Aparecen nuevas empresas que comienzan a desarrollar diferentes productos como lo es Toray, Mitsubishi, Huber entre otras. (Judd & Judd, 2006, p. 2-19).

En cuanto al desarrollo de los sistemas anaerobios en conjunto con membranas (AnMBR); el concepto de este tipo de sistema fue introducido en 1978 por Hans Grethlein, en el que se utilizó un sistema de membranas externas de ultrafiltración UF y ósmosis inversa OR para el tratamiento de aguas de un tanque séptico. (Huu Hao Ngo, Wenshan Guo Rao Y. Surampalli Tian C. Zhang, 2016, p. 867-871).

En los años 80s ocurren varios avances como, el propuesto en base a la patente de Dorr Oliver, empleando membranas de ultrafiltración UF aparte del reactor biológico, las cuales trabajaban bajo condiciones anaeróbicas. En Japón para 1985 nace el programa de investigación y desarrollo R&D con el cual se buscaba el desarrollo de modelos pilotos de tratamiento AnMBR con diferentes configuraciones y tipos de membranas. A finales de los 80s el sistema AnMBR fue implementado para el tratamiento de aguas industriales, como ocurrió en Sudáfrica para una empresa de vinos. (Huu Hao Ngo, Wenshan Guo Rao Y. Surampalli Tian C. Zhang, 2016, p. 867-871).

En la última década, el reactor biológico anaerobio de membrana sumergida (KSAMBR), producido y propuesto por la empresa japonesa Kubota, ha sido aplicado exitosamente en 15 plantas a nivel mundial; el sistema AnMBR más grande, desarrollado en el mundo es el ADI-

AnMBR desarrollado por las empresas ADI Systems INC y Kubota en 2010. (Huu Hao Ngo, Wenshan Guo, Rao Y. Surampalli & Tian C. Zhang, 2016, p. 867-871).

En los últimos años las investigaciones han estado en basadas en buscar soluciones para el manejo del fouling, la reducción de la energía necesaria para la operación, factores que ayuden a reducir los gastos operacionales y de mantenimiento con el fin de mejorar los beneficios ofrecidos por el tratamiento MBR. (Judd & Judd, 2006, p. 2-19) [3] (Huu Hao Ngo, Wenshan Guo Rao & Surampalli Tian C. Zhang, 2016, p. 867-871).

4. Membranas

Una membrana es una lámina porosa de material polimérico u otro material que puede permitir el paso de un fluido con restricciones a específicas partículas en base a sus propiedades químicas, propiedades físicas y tamaño molecular. En otras palabras, una membrana es una barrera selectiva que separa dos fases tal como remover sal del agua salada donde la permeabilidad y selectividad depende del tamaño de poro y partículas. (Maddah & Chogle, 2015, p. 477-488).

4.1 Clasificación de las Membranas

Como puede apreciarse en la Figura 2 las membranas pueden clasificarse teniendo en cuenta diferentes aspectos los cuales son descritos a continuación.

4.1.1 Tipos de flujos de filtración. Hay dos modos de filtración que dependen de como sea el flujo con respecto al medio de filtrante. Con el esquema de la Figura 3 puede entenderse como es el proceso de filtrado con los 2 tipos de flujo que son: Dead-End y Cross-Flow; definidos a continuación. La mayoría de aplicaciones de filtración de membrana tiende a operar con flujo tangencial de filtración “cross-flow”. (Sparks & Chase, 2016, p. 283-288).

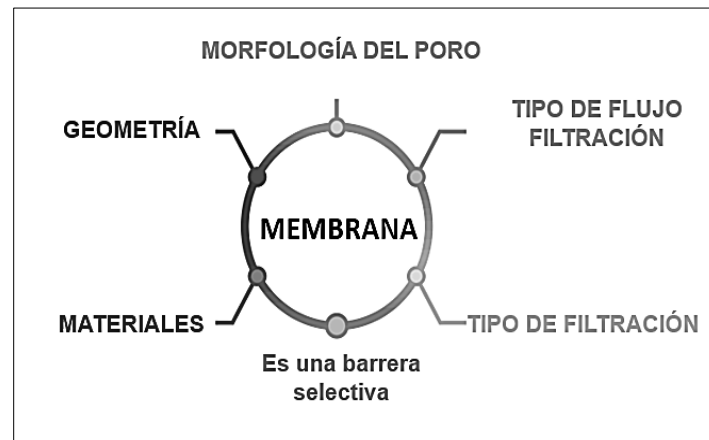


Figura 2. Clasificación de las membranas

- Dead-end o filtración por impacto: La alimentación del sistema es hecha con un flujo perpendicular al medio filtrante, que se encuentra a lo largo de toda la corriente a filtrar. Este tipo de filtración se caracteriza porque en la superficie del medio filtrante conforme pasa el tiempo va formándose una capa de sólidos, aumentando la resistencia a la filtración y por lo tanto incrementa la energía requerida para realizar el proceso. (Judd & Judd, 2006, p. 63-69; Sparks & Chase, 2016, p. 283-288).
- Cross-flow o flujo transversal: el sistema es alimentado con flujo paralelo a la configuración de membranas, parte de la fase líquida pasa a través del medio filtrante por la diferencia de presión con el medio, este líquido se denomina flujo permeado. Parte de los sólidos separados tienden a adherirse en la superficie de las membranas que con el tiempo se convierte en fouling, lo cual se traduce un flujo constante permeado. (Judd & Judd, 2006, p. 63-69; Sparks & Chase, 2016, p. 283-288).

Como puede observarse en la Figura 3, la tasa de flujo filtrado o permeado para el caso de filtración por impacto disminuye con el tiempo llegando a no dejar pasar líquido, mientras que en la condición de flujo transversal tiende a estabilizarse con el tiempo; en los dos casos cuando la

condición ya es crítica debe realizarse una limpieza o cambio del medio filtrante que para el caso de los sistemas MBR son las membranas.

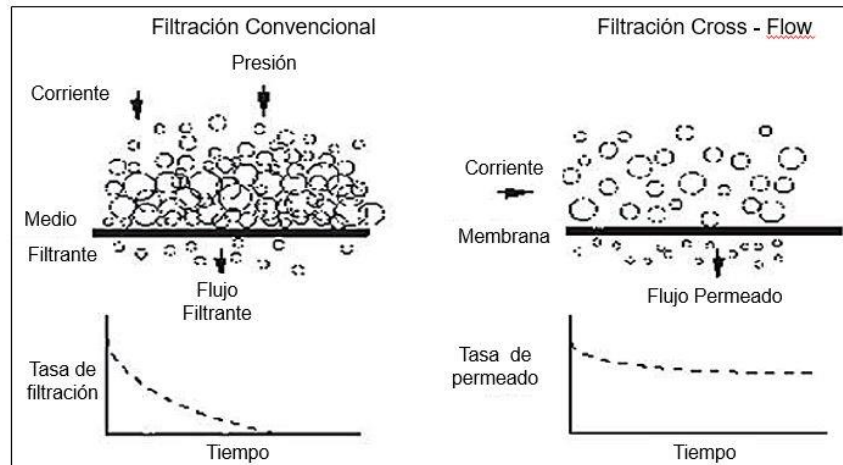


Figura 3. Esquema de los tipos de flujo de filtración y tasa de filtrado. Adaptado de “Filtration Handbook”, de Sparks T. y Chase G. Filters., 2016, El Sevier: Oxford, U.K., 6ª. Edición., Figura 4.69., p. 283.

4.1.2 Tipos de filtración y diámetro de poro. La filtración por membranas tiene cuatro procesos claves, bajo los cuales puede realizarse la filtración; su clasificación se basa en el tamaño de las partículas a remover, o del diámetro del poro, en las Figuras 4 y 5 pueden identificarse los tipos de membranas.

Los biorreactores de membrana utilizan en su mayoría membranas de microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF). En la MF y UF las membranas retiran partículas coloides y macromoléculas, con tamaño de poros entre 0.1 y 0.4 micrómetros (para la microfiltración) y 0.01 a 0.05 micrómetros (para la ultrafiltración).

Con la MF pueden removerse partículas, bacterias, protozoos, macro-solutos y con menor eficiencia algunos virus, se retienen los sólidos suspendidos (SS) y promueve una retención parcial de la demanda biológica de oxígeno (DBO) soluble. La UF también tiene la capacidad de remover

estas partículas, pues tiene una alta tasa de remoción de coloides y se incluyen algunos compuestos orgánicos y una alta tasa de remoción de coloides. Las membranas de UF tienden a tener una presión de transmembrana TPM mayor que las membranas de MF.

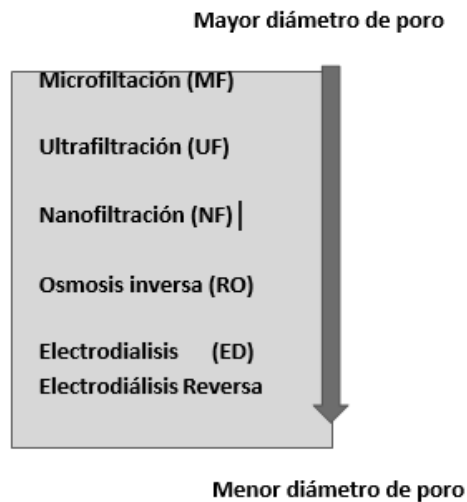


Figura 4. Clasificación de las membranas de filtración según el diámetro de poro.

La osmosis inversa RO y la electrodiálisis ED/EDR (trabajan bajo un campo eléctrico) son implementadas en la remoción de iones, su mayor uso está en las plantas de desalinización para agua potable.

4.1.3 Morfología de los poros. Las membranas también son clasificadas según la morfología de los poros que pueden ser de dos tipos:

- Simétricas: El diámetro de poro no varía en la sección de la membrana. La sección es uniforme.
- Asimétricas: En este caso la sección de la membrana no es uniforme, aumentando a lo largo de la sección recta, van de un poro fino a un más grueso y poroso. Una ventaja es la de combinar la selectividad de una membrana densa con la velocidad de permeado de membrana fina [10] [11]. Las estructuras asimétricas están asociadas con flujos de permeado altos, por la efectividad del

espesor de la membrana que puede ser menor al de las membranas simétricas. (Basile, Cassano. & Rastogi, 2015, p. 43-82; Da Silva, 2008).

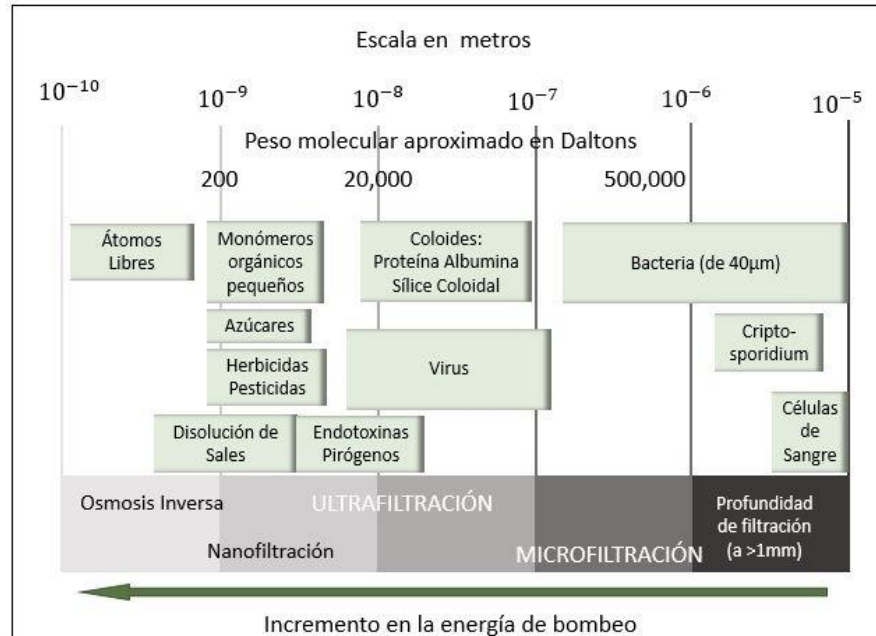


Figura 5. Clasificación de las membranas según la filtración y remoción de partículas. Adaptado de “The MBR Book”. Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment, de Judd S. y Judd C., 2011, El Sevier: Gran Bretaña, 2ª. Edición, Figura 2.1., p. 56.

Las membranas de UF son comúnmente asimétricas y las membranas de MF pueden ser tanto asimétricas como simétricas. Las capas superiores de las membranas de UF son más densas que las de las membranas; por lo tanto requieren mayor TPM (presión de transmembra) y generalmente tienen baja permeabilidad. (Basile, Cassano. & Rastogi, 2015, p. 43-82; Da Silva, 2008).

4.1.4 Geometría de la membrana. Los tres tipos de membranas más utilizados en el tratamiento con membrana MBR son:

- Flat Sheet (FS): la mayoría de membranas planas son rectangulares como se ve en la Figura 6, instaladas verticalmente con un espaciado específico medio entre cada hoja y utilizadas para la Microfiltración con alta permeabilidad. (Judd & Judd, 2006, p. 63-69; Water Environment Federation [WEF], 2012).

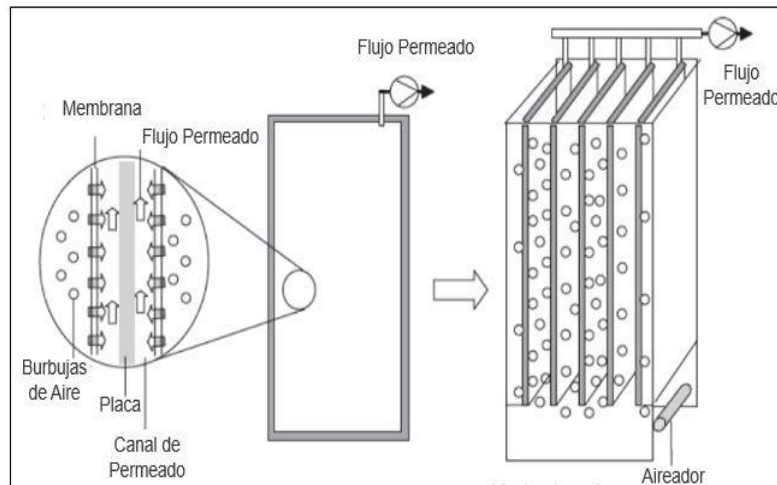


Figura 6. Esquema de la membrana tipo Flat Sheet. Adaptado de “Membrane Bioreactors”. Membrane Fundamentals, de Water Environment Federation., 2012, Editorial: McGraw-Hill, Figuras 2.4, 2.4 y 2.5., p. 14.

- Hollow Fibre (HF): son membranas huecas y son la configuración más común utilizada en las tecnologías MBR, con diámetro exterior que varía de 0,5 a 3 mm, estos elementos se agrupan en bastidor o marco, que funcionan como una unidad; la orientación principal es vertical, su fabricación, en la mayoría de casos, es para la utilización en sistemas de ultrafiltración, en el diagrama de la Figura 7 puede observarse su funcionamiento. (Judd & Judd, 2006, p. 63-69; WEF, 2012).

- Tubular o multitubular (MT): estas membranas se encuentran reunidas en una carcasa cilíndrica sellada completamente, en el interior de estos cilindros existe un número variable de membranas tubulares de diámetro entre 5 y 13 mm, por lo tanto el alimento de la biomasa es

llevado al interior del módulo por bombeo, produciéndose un flujo de permeado a través de las paredes de la membrana. En la Figura 8 puede apreciarse que las membranas tubulares están agrupadas en un cilindro de mayor diámetro (comúnmente plástico). (Judd & Judd, 2006, p. 63-69; WEF, 2012, p. 14-15).

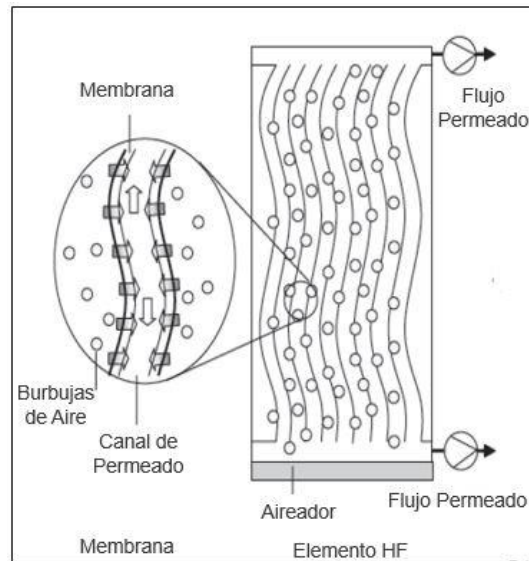


Figura 7. Esquema de la membrana tipo Hollow Fiber. Adaptado de “Membrane Bioreactors”. Membrane Fundamentals, de Water Environment Federation., 2012, Editorial: McGraw-Hill, Figuras 2.4, 2.4 y 2.5., p. 14.

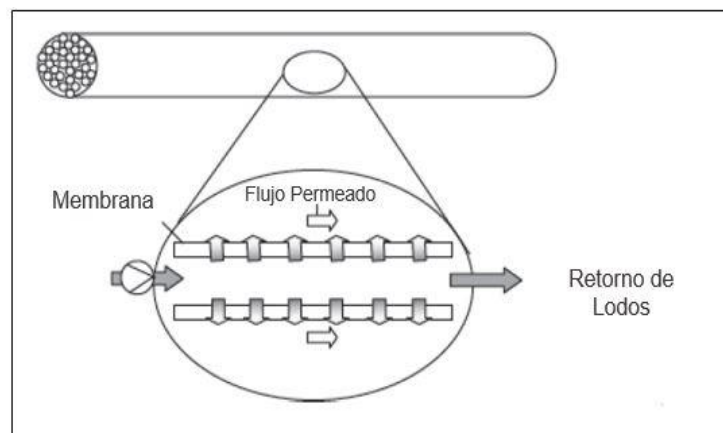


Figura 8. Esquema de la membrana tipo tubular. Adaptado de “Membrane Bioreactors”. Membrane Fundamentals, de Water Environment Federation., 2012, Editorial: McGraw-Hill, Figuras 2.4, 2.4 y 2.5., p. 15.

Igualmente existen otros tipos de membranas como Spiral- wound (SW), tubo capilar (CT) o filtro plisado (FC). (Sparks & Chase, 2016, p. 283-288; Verrecht B., 2012, p. 594-600). En la figura 9 se observa como es el flujo de permeado en los tres principales tipos de membranas usadas en los sistemas MBR.

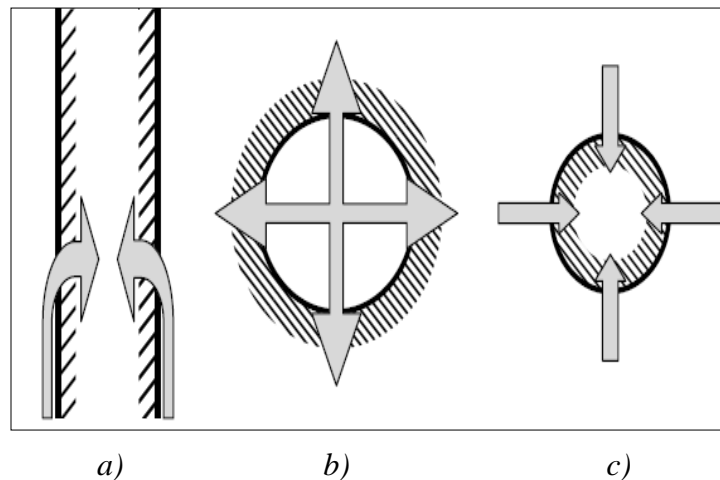


Figura 9. Flujo a través de los tipos de membranas. a) Flat Sheet FS b) Multitubular MT c) Hollow fibre HF. Adaptado de “The MBR Book”. Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment, de Judd S. y Judd C., 2011, El Sevier: Gran Bretaña, 2ª. Edición, Figura 2.7., p. 65.

Las membranas son colocadas en módulos, cumpliendo la función de soporte estructural para resistir las presiones a las que se trabaja. El módulo debe ser de volumen pequeño, fácil de limpiar, de ensamblar y montar. Esta unidad está compuesta por membranas, estructuras de soporte de presión, puntos de entrada del agua de alimentación, distribuidores de caudal y puntos de salida y drenaje del permeado y concentrado. (Galvis, 2014, p. 19-21).

4.2 Materiales de las Membranas

Los materiales más comunes en la fabricación de las membranas son los polímeros (orgánicos), aunque en los últimos avances se han venido incorporando las membranas cerámicas (inorgánicas). (Da Silva, 2008).

Para que las membranas sean funcionales deben cumplir con ciertas características, como:

- Resistencia química
- Estabilidad mecánica
- Resistencia a la temperatura
- Resistencia al fouling (baja tendencia al ensuciamiento superficial u obstrucción de poros por partículas)

4.2.1 Membranas Poliméricas. Actualmente existen diversos tipos de polímeros incluyendo polyacrylonitrile, polyethersulfone (PES), polysulfone, fluoruro de polivinilideno (PVDF), polipropileno y polietileno, la característica más destacada en la selección del polímero son las propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas, esfuerzos y elongación. (Judd & Judd, 2006, p. 63-69; WEF, 2012).

Cada uno de estos polímeros son, naturalmente, hidrofóbicos, pero pueden mezclarse con aditivos para crear una mezcla moderadamente hidrofílica. En la Tabla 1 se presentan las características principales, las ventajas y desventajas de los materiales poliméricos.

Tabla 1. *Descripción de los materiales poliméricos*

MATERIAL	CARACTERISTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Polietersulfona (PES)	Moderadamente hidrofílico, alta resistencia, baja elongación.	Fuerza, alta permeabilidad.	Aplicación de presión limitada para el barrido de aire, menor tolerancia al cloro.
Polisulfona	Moderadamente hidrofílico con aditivos, alta resistencia, baja elongación.	Fuerza, permeabilidad.	Aplicación de presión limitada para el barrido de aire, menor tolerancia al cloro.

Polivinilideno	Relativamente hidrofóbico, alta resistencia, alta elongación.	Resistencia química, fuerza, alta resistencia al cloro, larga vida de la membrana, adecuado para su uso con aire, permeable.	Más costoso, permeabilidad ligeramente inferior a PES.
Polipropileno	Hidrofóbico	Resistencia química, resistencia a la biodegradación.	Susceptible a la oxidación.
Polietileno	Hidrofóbico	Resistencia química, resistencia a la biodegradación.	Susceptible a la oxidación.

Nota: Adaptado de “Membrane Bioreactors”. Membrane Fundamentals, de Water Environment Federation., 2012, Editorial: McGraw-Hill, Tabla 2.2., p. 9.

4.2.2 Membranas Cerámicas. Las membranas cerámicas son de alta resistencia y de bajo costo operacional, pero no son tan usadas en el tratamiento de aguas debido a los altos costos de fabricación con respecto a las membranas poliméricas. Por lo que para aplicaciones a gran escala, el mercado ha sido dominado por las membranas de polímeros.

Los principales materiales con los que son fabricadas son: titania, alumina y zirconia, que son materiales caracterizados por ser hidrofílicos (que atraen fácilmente las moléculas de agua); las membranas cerámicas tienen una menor tendencia a generar fouling. (Lorente-Ayzaa, 2016, p 29-38).

Las membranas inorgánicas pueden resistir solventes orgánicos, cloro y otros oxidantes, son menos susceptibles a los ataques microbianos a comparación de las membranas poliméricas, las

membranas cerámicas pueden utilizarse con valores de pH entre 0 y 14 y tienen una resistencia mecánica alta, pudiendo operar largos tiempos y bajo altas presiones, aunque pueden ser frágiles y fracturarse fácilmente. (Basile, Cassano. & Rastogi, 2015, p. 43-82).

Las geometrías utilizadas comúnmente en las membranas cerámicas son tipo placa plana (FS), tubular (MT) o elementos monolíticos, con las cuales se obtiene un mayor flujo de permeado que las membranas huecas (HF). Las geometrías FS y MT son las más apropiadas para trabajar en sistemas MBR, los módulos pueden ser operados inmersos o externos al reactor biológico. (Basile, Cassano. & Rastogi, 2015, p. 43-82)

La presión requerida para MF es de 0.1 a 2 bares y es mayor para UF. La empresa Hyfluxmembranes recomienda una presión máxima especificada para membranas cerámicas tipo HF de 6 bares, mayor que los 2.5 bares permitidos para las membranas de PES. (Judd & Judd, 2011, p. 63-69).

4.2.3 Membranas Compuestas. Las membranas compuestas son fabricadas a partir de dos o más materiales, por lo general uno de los materiales constituye la superficie activa que es típicamente una capa delgada y densa utilizada como filtración, mientras que otro se considera la capa soporte.

5. Descripción del sistema MBR

5.1 El Pretratamiento

El pretratamiento es crítico para prolongar la vida de la membrana de manera que el rendimiento de una planta MBR podría extenderse a un rendimiento a largo plazo, el pretratamiento abarca desde la eliminación de arenas hasta la eliminación de grasas. (WEF, 2012).

5.2 Clarificación Primaria

Para grandes plantas de MBR, la tendencia es adicionar clarificadores primarios para reducir la carga en el MBR, las razones principales para el uso de un clarificador primario ha sido la reducción de carga para reducir el uso de potencia en la aireación y reducir el volumen del tanque biológico. (WEF, 2012).

5.3 Reactor Biológico

Los reactores biológicos pueden funcionar a altas concentraciones de licor mezcla de sólidos suspendidos (MLSS) y tiempos de retención hidráulicos más cortos, logrando un proceso biológico en el que se minimiza el ensuciamiento de la superficie de la membrana y proporciona una alta tasa de filtración. La mayoría de diseños de sistemas MBR incluyen una zona anóxica para realizar remoción de nitrógeno en el reactor biológico y obtener un efluente de mejor calidad. (WEF, 2012).

5.4 Sistema de Membrana

Las membranas tienen dos tipos de configuraciones, sumergidas o inmersas en el reactor biológico (iMBR) y módulos externos (sMBR) como se ve en la Figura 10; ya sea en un sistema aerobio o anaerobio. La filtración en los módulos de membrana puede realizarse por dos métodos: por bombeo y bombeo por elevación de aire (air-lift), que en el caso de los reactores anaerobios se realiza con gas, más comúnmente con el biogás generado del proceso.

La configuración inmersa emplea un bombeo no líquido para realizar el permeado, basándose en la aireación promueve la transferencia de masa de líquido a través de la membrana. (Basile, Cassano & Rastogi, 2015, p. 150-175). En la Tabla 2 se hace una descripción de las principales características de las dos configuraciones de los sistemas MBR tanto aerobio como anaerobio.

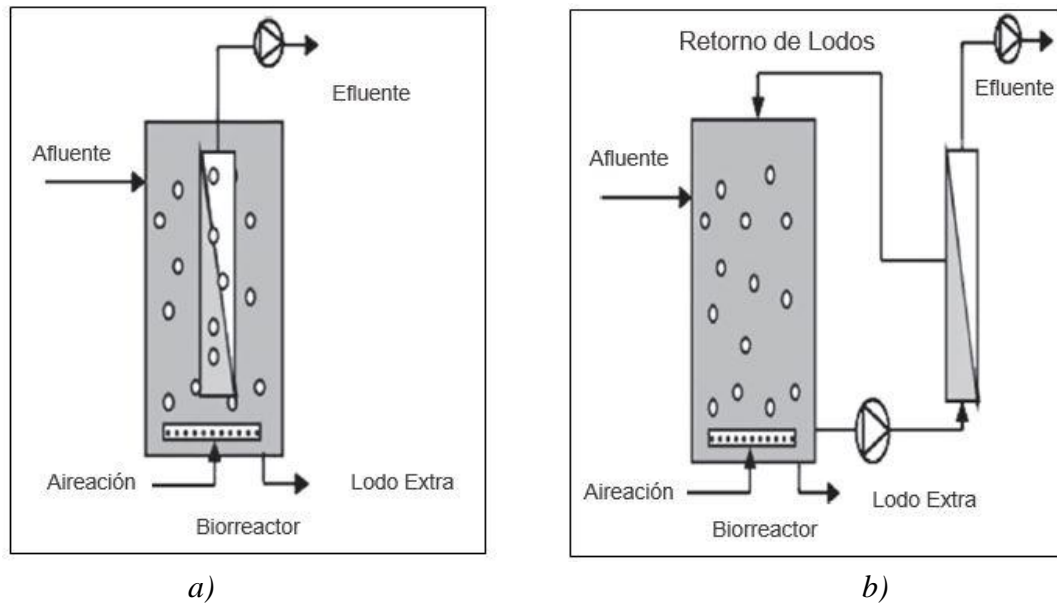


Figura 10. Esquema de las configuraciones de membranas a) inmersa iMBR b) externa sMBR. Adaptado de “Advances in Membrane Technologies for Water Treatment. Materials”, Processes and Applications, de Basile, Cassano y Rastogi, 2015, Woodhead Publishing. Reino Unido, Figura 5.1., p. 157.

Tabla 2. Características de la configuración inmersa y externa.

Membranas Externas sMBR

Demanda de energía alta (2-10 kW h/m³). Filtración por bombeo. Flujo de permeado alto (40-100 L/m²h) Alta producción de fouling pero se tiene mayor control sobre el fouling. Fácil manejo de módulos y limpieza. La limpieza química no afecta la biomasa del reactor. Recirculación a alta velocidad de flujo tangencial para la limpieza de la membrana.

Membranas Internas iMBR

Demanda de energía baja, incluso un 50% menor a la sMBR (0.2-0.4 kW h/m³) Sistema de filtración por aireación de la membrana con burbuja gruesa. Flujo de permeado menor al del sMBR (10-30L/m²h) Opera a baja velocidad de flujo. Requiere de mayor área de membrana. Puede realizarse limpieza preventiva con aireación de la membrana.

El tratamiento de aguas residuales empleando membranas puede realizarse tanto con procesos aerobios como anaerobios. Cada proceso ofrece ventajas respecto a los tratamientos convencionales empleados como se muestra en la Tabla 3.

La tecnología MBR ofrece ventajas como una reducción en la producción de lodos debido a que el tiempo de retención de sólidos puede aumentarse, una calidad alta del efluente obtenido libre de coloides, bacterias y sólidos, por lo que el agua tratada es reutilizada en actividades como irrigación. (Ambrona, 2017).

Tabla 3. *Parámetros de comparación entre los sistemas convencionales y MBRs*

INDICADOR	AEROBICO CONVENCIONAL	MBR AEROBIO	ANAEROBIO CONVENCIONAL	MBR ANAEROBIO
Tasa de carga orgánica	<i>Moderada</i>	<i>Alta a moderada</i>	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>
Eficiencia de remoción de materia orgánica	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>
Calidad del efluente	<i>Alta</i>	<i>Excelente</i>	<i>Moderada</i>	<i>Alta</i>
Producción de lodos	<i>Alta</i>	<i>Alta a moderada</i>	<i>Baja</i>	<i>Baja</i>
Impacto ambiental	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto a moderado</i>	<i>Bajo</i>
Energía requerida	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>	<i>Baja</i>	<i>Baja</i>
Recuperación de bioenergía	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>

Nota: Adaptado de “Green Technologies for Sustainable Water Management”, de Huu Hao Ngo, Wenshan Guo, Rao Y. Surampalli y Tian C. Zhang., 2016, American Society of Civil Engineers: Estados Unidos, Tabla 25.2., p. 867-871.

A continuación se hace una descripción de los sistemas aerobios y anaerobios de membrana utilizados en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

a. MBR aerobio: En el desarrollo de esta tecnología se evidenció que para implementar esta tipología de procesos se requiere menor espacio de instalación y puede integrarse a plantas ya existentes, mejorando las eficiencias de tratamiento. En las plantas de lodos activados, puede eliminarse el sedimentador secundario, disminuyendo la superficie requerida para tratar el agua.

En la Figura 11 puede verse a manera gráfica la reducción de espacio y etapas y en la Tabla 4 se presentan los parámetros de calidad obtenidos generalmente al aplicar un sistema de membranas, los cuales muestran efectividad de aplicar el tratamiento con membranas, ya que puede pensarse en la reutilización del efluente para otras actividades.

Tabla 4. *Parámetros de calidad del efluente después del tratamiento con MBR.*

PARÁMETROS	VALORES TÍPICOS
DOB5 mg/L	< 5
TSS mg/L	<1
Turbidez UNT	<0.2
Nitrógeno total (Zona anóxica previa) mg/L	<10
Nitrógeno total (Zona anóxica previa y posterior) mg/L	<3
Fosforo total mg/L	<0.5
Fosforo total (remoción biológica y química) mg/L	<0.1

Nota: Adaptado de “Membrane Bioreactors”. Biological Process Fundamentals, de Water Environment Federation., 2012, Editorial: McGraw-Hill, *Tabla 3.1.*, p. 15.

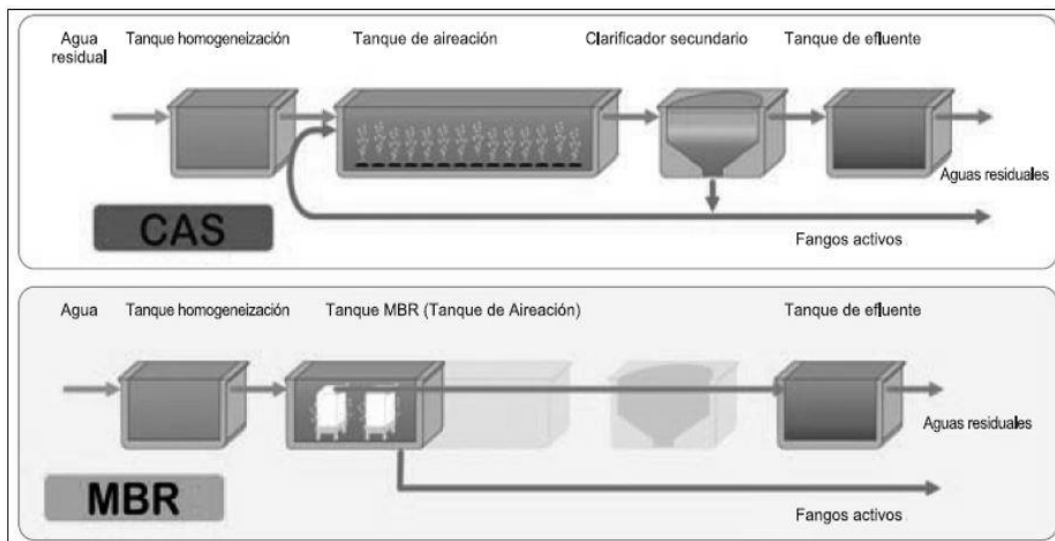


Figura 11. Reducción del espacio al instalar el sistema MBR. Adaptado de “Biorreactores de membrana”. Catálogo, de Hidrowater., 2017, Disponible en: <http://hidrowater.com/productos/industrial/plantas-mbr-de-aguas-residuales-urbanas/>.

b. MBR anaerobio (AnMBR): Los sistemas convencionales de tratamiento anaerobio pocas veces cumplen con los requerimientos de efluente para descarga, lo que ha hecho que sean utilizados en menor proporción con respecto a otros; a pesar de tener ventajas como el ahorro energético y baja producción de lodos. Pero con la inclusión de membranas en el tratamiento anaerobio se consigue un incremento en el tiempo de retención de sólidos (SRT) favoreciendo el mayor crecimiento de bacterias con tasas bajas de crecimiento. Comparado con MRB aeróbico, el AnMBR puede de hecho lograr un enfoque ecológico de recursos de energía renovable (producción de metano), baja producción de lodos y el no uso de energía extra para aireación. (Huu Hao Ngo, Wenshan Guo, Rao Y. Surampalli & Tian C. Zhang, 2016, p 873- 901).

Las membranas comúnmente utilizadas en el proceso anaerobio son las de microfiltración MF y ultrafiltración UF, al igual que para los sistemas aerobios se utilizan geometrías HF, MT y FS en los últimos años han sido empleadas membranas de material cerámico debido a su mejor comportamiento hidráulico, baja tendencia al fouling y poco daño a la vida de membrana al realizar lavados. (Basile, Cassano. & Rastogi, 2015, p. 43-82).

Las investigaciones de Xing et al en el año 2000 evidenciaron que con el uso de membranas cerámicas en el sistema MBR puede lograrse una reducción de hasta el 97% de DQO, con módulos de membranas externas, el efluente obtenido puede ser usado directamente. (Basile, Cassano. & Rastogi, 2015, p. 43-82).

Los reactores AnMBR son operados usualmente bajo condición de temperatura mesofílica (30°C-37°C) o termofílica (50°C-55°C) para garantizar una óptima actividad biológica, y maximizar la eficiencia económica. (Huu Hao Ngo, Wenshan Guo, Rao Y. Surampalli & Tian C. Zhang, 2016, p 873- 901). En los últimos años estudios de Ho & Sung (2009) han mostrado que los AnMBR pueden ser eficientes en el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico a temperatura ambiente en zonas de clima templado o tropical. (Vera, 2014).

Los sistemas AnsMBR generalmente operan a velocidad tangencial de flujo (CFV) y TPM de 1 a 5 m/s y de 2 a 7 bares, respectivamente, para proveer un flujo aceptable. Presiones menores (0.2 a 1 bares) se plantean en sistemas inmersos, siendo mayores que en los sistemas iMBR. La velocidad CFV en sistemas inmersos han sido reportadas en menos de 0.6 m/s. (Judd & Judd, 2011, p. 63-69).

Comparado con la configuración externa, los módulos sumergidos pueden tener un ahorro substancial de energía porque el bombeo de recirculación no es requerido. Así el iAnMBR ha llegado a ser una alternativa prometedora debido a su bajo consumo de energía, procesos de limpieza menos rigurosos, y condiciones operacionales flexibles con bajas velocidades tangenciales. (Huu Hao Ngo, Wenshan Guo, Rao Y. Surampalli & Tian C. Zhang, 2016, p 873-901).

De las experiencias prácticas y de laboratorio ha podido concluirse que la eficiencia de remoción de DQO y DBO de las aguas residuales tratadas con AnMBR está alrededor del 90%-97% en comparación al valores obtenidos en el tratamiento convencional anaerobio que oscila entre el 65%-70%; la inclusión de membranas en el proceso mejora la calidad del efluente cumpliendo con estándares más estrictos.

La tecnología de AnMBR juega un papel importante en futuros procesos verdes ya que es más estable y mejora la sustentabilidad de consumo de la energía. En los estudios llevados a cabo por Van Zyl et al. (2008) obtuvo que con el sistema AnMBR puede convertirse el 98% aproximadamente de la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente en biogás el cual tiene mejor calidad que el obtenido en reactores convencionales. (Huu Hao Ngo, Wenshan Guo, Rao Y. Surampalli & Tian C. Zhang, 2016, p 873- 901). El biogás producido en el proceso de tratamiento anaerobio puede ser utilizado como suplemento de energía y en investigaciones se ha evidenciado que puede ser utilizado en la aireación de las membranas para evitar el ensuciamiento de la superficie de las membranas. (Vera, 2014).

6. Manejo del fouling

El bioensuciamiento o más conocido como fouling, es generado por la acumulación de sólidos suspendidos, coloides o macromoléculas en la superficie de la membrana o dentro de los poros; por lo que la permeabilidad de la membrana se ve reducida. Como las cargas de fouling declinan la presión de transmembrana (TMP) y el flujo de permeado la limpieza, el remplazo y el mantenimiento de los módulos de membranas se hacen más frecuente incrementando los costos operacionales de las plantas. (Chang, Clech, Jefferson & Judd, 2002, p. 1018-1029; WEF, 2012).

La naturaleza y grado de ensuciamiento en los sistemas MBR dependen de tres factores: las características de la biomasa (concentración del MLSS, el tamaño de partículas, la estructura y la presencia de material extracelular), las características la membrana (tamaño de poro, material, hidrofobicidad y geometría), las condiciones de operación y alimentación (velocidad de flujo,

TMP, configuración de los módulos y tiempos de retención hidráulica y de sólidos). (Chang, Clech, Jefferson & Judd, 2002, p. 1018-1029; WEF, 2012).

6.1 Tipos de fouling

- Fouling reversible: solo se ve afectada la superficie de la membrana, por lo que puede ser tratado con métodos físicos de limpieza como el lavado.
- Fouling irreversible: los sólidos obstruyen los poros y quedando dentro de estos, solo es tratable con lavados químicos.

6.2 Métodos de limpieza

Las membranas necesitan una limpieza periódica y rigurosa, la elección del método de limpieza depende del tipo de fouling que se esté presentando y del tipo de membrana. (Chang, Clech, Jefferson & Judd, 2002, p. 1018-1029).

Existen dos tipos de métodos de limpieza de membranas presentados a continuación:

a) Métodos físicos: Utilizados cuando el fouling es reversible, normalmente es aplicado intermitentemente. Para limpieza se utiliza el flujo de aire o de agua con la velocidad tangencial de operación. Con la limpieza física no se genera contaminación por químicos, pero requiere mayor energía.

-Lavado de la membrana o Backwashing: se aplica agua en el sentido del flujo o a contraflujo a velocidades tangenciales o a presiones mayores a las de operación de modo que el flujo permeado pasa por los poros, limpiándolos de las partículas acumuladas.

-Air Scour: la aireación puede ser intermitente, cíclica o variando los índices de flujo; este método de limpieza es utilizado en la superficie de la membrana, aunque un exceso de aireación causa tensión en la membrana generando la ruptura o quiebre y puede disminuir así la vida de la membrana.

- Air sparing: Consiste en airear la membrana periódicamente para eliminar las partículas que puedan acumularse en la superficie de la membrana y reducir la formación de fouling.

Se han desarrollado métodos físicos mejorados, estos utilizan el campo ultrasónico, eléctrico o magnético para remover el fouling, son considerados ambientalmente más amigables y más eficientes. Otros métodos de control de fouling son la vibración o agitadores de membrana mecánicos. (Judd & Judd, 2011, p. 69-74).

b) Métodos Químicos: utilizados cuando el fouling es irreversible, con estos métodos se disuelven las partículas causantes de fouling para eliminarlas de la membrana sin causar daños en esta. Pueden hacerse un mantenimiento periódico que normalmente es anual. (Chang, Clech, Jefferson & Judd, 2002, p. 1018-1029; Judd & Judd, 2011, p. 69-74; WEF, 2012).

Son utilizados químicos cáusticos o detergentes como el hipoclorito sódico y el ácido cítrico, por lo que se genera contaminación. El uso de carbón activo (PAC) es utilizado para reducir el grosor de la capa de fouling y reducir el fouling interno. El cloruro férrico, el cloruro de aluminio y el alumbre son usados también en el retiro del fósforo presente en las aguas residuales, por lo tanto proporcionan una ventaja adicional si son añadidos en el sistema MBR. (WEF, 2012).

Los métodos químicos y físicos son combinados en ocasiones para obtener una limpieza efectiva y en el caso de los métodos químicos para aplicar la solución de limpieza a las membranas, por ejemplo por medio del backflushing. Lo que se busca con el mantenimiento y limpieza de los módulos es que las membranas recuperen en mayor porcentaje la permeabilidad reducida debido al fouling y pueda operar nuevamente.

7. Adquisición del sistema MBR

Cuando se desea realizar un proyecto que incluya la tecnología MBR se tienen en cuenta algunos aspectos generales que sirven como guía a la hora de realizar la adquisición, tales como:

- Ingeniería preliminar: en algunas ocasiones se dispone de ingeniería preliminar con el fin de presentar una propuesta de diseño que incluya: el flujo de diseño, el objetivo del tratamiento y la descripción de las instalaciones; según se estipula en WEF (2012) este procedimiento establece la adecuada selección de la tecnología; no obstante, este aspecto presenta complicaciones debido a las especificaciones únicas y representativas de los fabricantes, estableciendo la utilización de más de una membrana.

- Selección de factores de costos: si bien los costos son importantes a la hora de tomar la decisión de que sistema MBR se desea adquirir estos varían dependiendo del proveedor. (WEF, 2012) establece algunos de los costos a tener en cuenta:

- Gastos de capital
- Gastos de funcionamiento
- Sustitución de la membrana
- Consumo de energía
- Limpieza uso de productos químicos
- Costo del ciclo de vida

- Preselección y compra: el propietario recurre a varios proveedores antes de seleccionar la tecnología MBR, permitiéndole optar por la que más se ajusta a los objetivos del proyecto.

- Única fuente: el propietario escoge una única fuente de proveedor y realiza un diseño específico que garantiza un sistema más acorde con las preferencias del propietario. Este proceso tiende a requerir menor tiempo de finalización del proyecto y permite que el enfoque sea menos complicado. (WEF, 2012).

- **Diseño, licitación y construcción:** el propietario establece un diseño preliminar, realiza una licitación y una vez elegido el proveedor procede a la construcción. Este procedimiento es realizado únicamente cuando el propietario desea adquirir los equipos. (WEF, 2012).
- **Diseño de construcción:** este aspecto es visto como una prestación de servicio por parte del proveedor, permitiéndole participar en la modificación o refinamiento del diseño preliminar presentado por el propietario.
- **Diseño, construcción y operación:** el proveedor se compromete a participar en el diseño, construcción y operación del sistema MBR, mediante un acuerdo contractual con el propietario, el contratista general y el ingeniero de diseño. (WEF, 2012).

7.1 Garantía

Las garantías varían y son estipuladas por los fabricantes, se pueden considerar dos tipos de garantías generales: garantía de equipos con un periodo entre 1 y 5 años y una garantía total (todo el sistema) con un periodo de 1 a 10 años. Se pueden encontrar garantías más específicas como:

- **Equipo del sistema:** estas garantías se dan por defecto y mano de obra, con un periodo de tiempo de 1 o 2 años; algunas limitantes de esta garantía es el daño físico del equipo debido a la manipulación incorrecta y mantenimiento inadecuado según se estipula en el catálogo del fabricante. (WEF, 2012).
- **Módulo de membranas:** esta garantía se da por defecto y mano de obra, con un periodo comprendido entre 5 a 8 años; una limitante de esta garantía es el desgaste anormal de la membrana a causa de las altas concentraciones de químicos utilizados en la limpieza química. (WEF, 2012).
- **Rendimiento del sistema MBR:** esta garantía está sujeta a las condiciones de la calidad del efluente con un periodo de tiempo de 1 a 5 años. (WEF, 2012).

- Proceso biológico: esta garantía se establece específicamente para la remoción de agentes contaminantes en el proceso biológico, tales como: la demanda química y demanda biológica de oxígeno (DQO y DBO, respectivamente), nitrógeno y fósforo. Esta garantía comprende todo el diseño de la planta y para verificar esta se realizan pruebas de rendimiento y de estrés. (WEF, 2012).

7.2 Pruebas de Aceptación

Cuando el proyecto es terminado y entregado, se realizan unas pruebas de aceptación para verificar el funcionamiento completo del sistema. Antes de someter la planta a un flujo de agua residual se realiza la prueba de agua limpia para asegurar la operación del sistema hidráulico, se debe efectuar una prueba de aceptación para verificar los requisitos de rendimiento del sistema MBR ya cuando la planta sea sometida a flujo con agua residual, esta prueba de aceptación tiene una duración de 30 días. (WEF, 2012).

El sistema MBR debe sujetarse a una prueba de rendimiento del sistema a largo plazo para demostrar la capacidad de operación cuando se presente el flujo crítico, y para finalizar se lleva a cabo la prueba de esfuerzo para confirmar definitivamente el funcionamiento del sistema MBR. (WEF, 2012).

8. Economía del sistema MBR

En el mercado global para el año 2005 la tecnología de membranas comenzó a tener un incremento en sus aplicaciones, el mercado del Lejano Oriente para ese año contaba con más de 500 instalaciones de MBR; con miras a un crecimiento en el mercado de esta tecnología y una

disminución de los costos de las membranas para aumentar la implementación del tratamiento en más lugares. (Judd & Judd, 2011).

Los costos operacionales OPEX de los sistemas MBR son altos, debido al mantenimiento que debe realizarse por manejo y control del fouling. En el cálculo de los costos operacionales se tiene en cuenta el mantenimiento de las membranas, incluyendo los agentes químicos utilizados para la limpieza, la energía para llevar a cabo el proceso de tratamiento y el reemplazo de las unidades de membranas. (Galvis, 2014, p. 34-42).

Los análisis técnico-económicos de los biorreactores de membrana MBR demuestran que la instalación de filtración (bloqueo de membranas) y la energía asociada requerida para la operación, representan los principales costos de inversión y operación (Galvis, 2014, p. 34-42). Los costos energéticos son altos debido a la potencia de la bomba requerida para lograr la presión de permeado, para el bombeo del agua de alimentación del sistema, la succión de permeado y la aireación del reactor en el caso de los sistemas aerobios.

Para evidenciar el costo por energía requerida de un sistema MBR a pequeña escala en el estudio económico llevado a cabo por Verrecht B. et al (2012) para el reciclaje de agua en una edificación en Inglaterra los costos operacionales totales por el sistema MBR fueron de $0.64 \text{ USD}/\text{m}^3$ con un valor de energía del 87% ($0.55 \text{ USD}/\text{m}^3$), el análisis fue realizado para tratar un caudal de $25 \text{ m}^3/\text{d}$ de agua y obtener en promedio los mismos $25 \text{ m}^3/\text{d}$ de agua reciclada, concluyendo que los costos para una planta a pequeña son mayores a los de una planta a gran escala estimados en $0.012 \text{ USD}/\text{m}^3$ para un caudal del $38000 \text{ m}^3/\text{d}$. (Verrecht B. et al, 2012, 594-600).

Una de las ventajas de los sistemas anaerobios con membranas AnMBR es la reducción en los costos por energía que se traduce en beneficio, a través de un análisis de costos realizado, Lin H. et al revelo una rentabilidad de $341640 \text{ USD}/\text{año}$ de energía recuperada, lo cual es cerca de 1.5

veces los costos operacionales anuales para un caudal experimental de $20000 \text{ m}^3/\text{d}$. (Huu Hao Ngo, Wenshan Guo, Rao Y. Surampalli & Tian C. Zhang, 2016, p 873- 901; Lin H. et al, 2011, p. 120-126).

En el mismo estudio se obtuvo un costo total OPEX de $235000 \text{ US\$/año}$ tres veces menor al OPEX obtenido para un sistema aerobio MBR con un costo de $822741 \text{ US\$/año}$. (Lin H. et al, 2011, p. 120-126).

9. Casos de implementación del sistema MBR

Debido a los avances y a las tecnologías desarrolladas por diferentes empresas del mercado de membranas, plantas de tratamiento a nivel mundial han implementado esta tecnología con el fin de mejorar sus procesos de tratamiento; a continuación se presentan algunos casos en los cuales se ha utilizado el sistema MBR ofrecido por algunas empresas.

9.1 Caso 1

La empresa General Electric Company con su departamento de GE Power & Water instaló en el año 2013 en Italia una planta MBR con los productos BioPlus y ZeeWeed, con el fin de mejorar la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad con una población de alrededor 60000 habitantes. La municipalidad eligió la tecnología de membranas ya que no podían expandir la planta, y buscaban mejorar la calidad del efluente para generar un bajo impacto ambiental. (GE Water, 2013).

La adaptación de la planta tomo siete días, el proceso de instalación fue progresivo, primero se realizó la instalación del sistema MBR, y en la marcha se instalaron los productos de GE, BioPlus BA2900 (remoción de DQO) y BioPlus BA2912 (remoción de nitrógeno). (GE Water, 2013).

En solo siete días, el MLSS incremento de 1000 mg/l a 9000 mg/l; después de este periodo la nueva planta alcanzó sus objetivos y pudo producir un efluente aceptable para la descarga directa en el mar. Con la nueva planta incremento la capacidad de tratamiento y la eficiencia de remoción de contaminantes. (GE Water, 2013).

9.2 Caso 2

La estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de San Pedro de Pinatar en el municipio de Murcia en España, fue rediseñada en el año 2007 con el fin de mejorar el tratamiento de las aguas residuales, el proyecto fue llevado a cabo por la unión temporal entre las empresas Cadagua S.A. y Ferrovial-Agromán S.A. El proyecto de remodelación hizo parte del Plan de Saneamiento Integral del Mar Menor Norte, con una inversión de 13,41 millones de euros financiado por la Comunidad Autónoma de Murcia y cofinanciada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). (Ferrovial y Cadagua, 2007).

El proceso de tratamiento está diseñado para tratar un caudal de 20000 m^3/d , cuenta con una etapa de pre- tratamiento, en la cual se hace un cribado, eliminación de grasas, desarenador y remoción de fibras. Luego sigue el tratamiento biológico que consiste en una aireación prolongada mediante un proceso de fangos activos con biomembranas, con dimensionamiento adecuado para la nitrificación-desnitrificación y adición de sulfato de alúmina para precipitación química del fósforo. El flujo dentro del reactor es de tipo pistón. Cada una de las dos líneas presenta un volumen de 8.015 m^3 , lo que en total resulta un volumen de reactor biológico de 16.030 m^3 . (Ferrovial y Cadagua, 2007). Y finalmente se hace desinfección del agua tratada con rayos UV con el fin de cumpla con los parámetros establecidos. (Ferrovial y Cadagua, 2007).

La tecnología de membranas utilizada fue la ofrecida por Zenon, con 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 fuera hacia adentro. El poro nominal de la membrana es de 0.04 micrómetros, es no iónica e hidrofílica. Para la limpieza de las membranas se utiliza retrolavado periódico y agitación por aire, igualmente cuando la colmatación de la membrana impide el correcto funcionamiento de planta se hace una limpieza química con hipoclorito sódico y ácido cítrico. (Ferroval y Cadagua, 2007).

Por la ubicación en la zona urbana de la planta tuvieron que adoptarse medidas de desodorización, por medio de ventiladores extractores el aire contaminado, de las diferentes etapas del proceso, es captado y llevado a un sistema de eliminación de olores. Igualmente la arquitectura de la planta fue tomada en cuenta, de modo que se integrara en el ambiente y no causara un impacto visual negativo en los habitantes de la zona. (Ferroval y Cadagua, 2007).

Dos son las razones por las cuales se adoptó este tipo de tratamiento fueron, en primer lugar la obtención de los resultados exigidos de depuración para la contratación del proyecto, como turbidez y sólidos suspendidos; en segundo lugar el diseño y construcción de la planta podía realizarse con el espacio que se contaba de 9000 m^2 logrando tratar una alta concentración de sólidos ($\text{MLSS} = 8 \text{ g/l}$) y un caudal máximo de $20000 \text{ m}^3/\text{día}$. (Ferroval y Cadagua, 2007).

9.3 Caso 3

Para la planta de tratamiento de la ciudad de City of Pooler en Chatham County, Estados Unidos; se decidió realizar una expansión y mejora del tratamiento de laguna de aireación en el año 2004, con el fin de reusar el agua tratada en la planta, para este fin fue instalado el sistema MBR ZeeWeed tratando un caudal de $9.5 \text{ m}^3/\text{d}$ y con capacidad de tratar un caudal de $11.4 \text{ m}^3/\text{d}$. (GE Water, 2011).

El sistema de tratamiento incluye un tanque de igualación de caudal, dos etapas de tamizado y remoción de grasas, un tratamiento biológico con una zona anóxica y otra aerobia; tiene cuatro

trenes de membranas de filtración, y para finalizar el tratamiento desinfección con rayos UV. Después de la desinfección, el efluente es descargado al canal Hardin, al sur de la ciudad de Pooler. (GE Water, 2011).

Para la aireación de las membranas fue implementada la aireación intermitente; en los días de mayor demanda de aire, son aireadas cada 10 segundos por 10 s, y en los días en que la demanda de aire disminuye son aireadas 10s cada 30 s. Con esta configuración puede reducirse a un 50% el aire requerido, lográndose una reducción de 21% de uso de energía. (GE Water, 2011).

La decisión de implementar el sistema MBR fue tomada debido a la reutilización que puede dársele al agua una vez tratada; la planta está adaptada para irrigar zonas de un campo de golf y otras zonas cercanas; y está diseñada con miras a que en un futuro el agua tratada puede ser usada por la comunidad debido al incremento de la demanda de agua potable. (GE Water, 2011).

9.4 Caso 4

La municipalidad de Lesser Slave Lake, Canadá analizó que por las descargas del efluente a las costas podrían presentarse problemas ambientales y de salud pública; debido al bajo rendimiento presentado por el proceso de tratamiento de las aguas residuales, el cual comprendía tanques sépticos con campos de infiltración en cada propiedad.

La planta de tratamiento fue concebida bajo altos estándares ambientales, alcanzados al usar el sistema MBR de membrana sumergida, ZeeWeed de la empresa GE's Water & Process Technologies con un diámetro de poro de 0.04 microns. Incluyendo al final del proceso una etapa de reciclaje de agua a través de bosques húmedos de la zona, evitando la descarga directa en el lago. (GE Water, 2011). La aireación del sistema se hace por aireación difusa desde el fondo de los módulos; el flujo de aire es usado también en la limpieza de las membranas, evitando que se genere una capa de sólidos en la superficie de la membrana. El exceso de lodos del tanque aerobio

es tratado en un digestor aerobio o usados para la tierra (GE Water, 2011).

La planta puede tratar $1200 \text{ m}^3/\text{d}$ de agua residual, y puede ser expandida fácilmente para tratar hasta $1600 \text{ m}^3/\text{d}$ con la instalación de membranas adicionales. El proceso diseño tiene como resultado final un DBO menor a 2 mg/l y un nivel de nitrógeno no detectable, el esquema de tratamiento se muestra en la Figura 12. (GE Water, 2011).

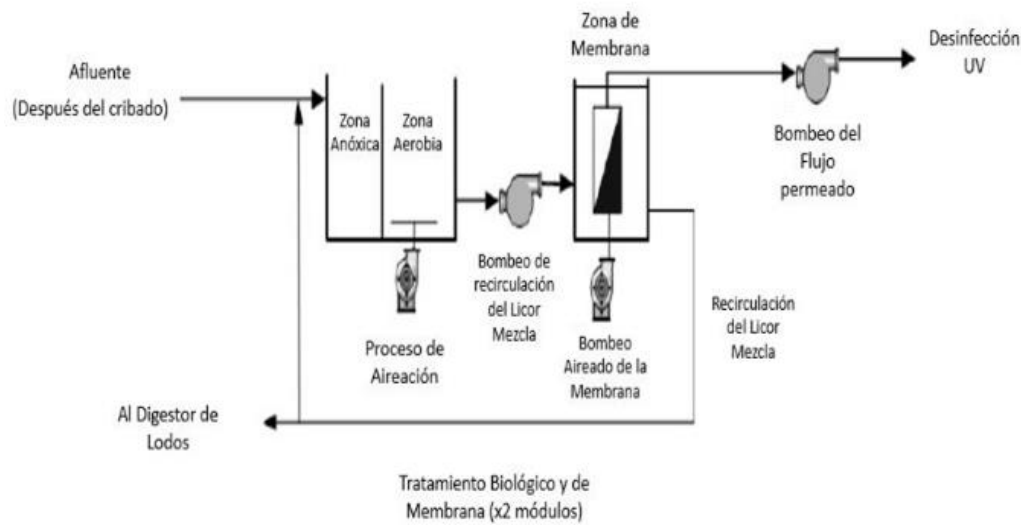


Figura 12. Esquema del proceso de tratamiento del caso de estudio 4. Adaptado de “City of Pooler Wastewater Treatment Plant”, 2017, Disponible en: <https://www.gewater.com/kcpguest/document-library.do>

9.5 Caso 5

En el 2011 entro en operación la planta de tratamiento con sistema MBR y MBBR, en la zona costera del Mar Rojo en Arabia Saudita; con el fin de garantizar el cumplimiento de las fuertes regulaciones locales para la descarga del efluente en la costa, tratando un caudal de $150 \text{ m}^3/\text{d}$ (ItN-Nanovation,2011).

Para el tratamiento de las aguas residuales se optó por utilizar a tecnología desarrollada por la empresa ItN Nanovation’s MBCR, que como puede observarse en el esquema de la Figura 14,

cuenta con tanque biológico de MBBR seguido del proceso de filtración con membranas planas cerámicas MBR; la primera limpieza química de las membranas fue realizada un año después de entrar en operación la planta (Itn-Nanovation,2011)

El tratamiento MBBR garantiza la máxima reducción de DBO y DQO aun en los caudales picos, y el tratamiento con membranas garantiza una descarga libre de solidos suspendidos y microorganismos, para verificar los niveles de calidad del agua fue instalado un sistema de monitoreo. El sistema MBCR tiene una baja producción de lodos que requiere pocas descargas de exceso de lodos al año. La planta muestra un tratamiento efectivo que ayuda a la reducción de la contaminación en la zona portuaria del Mar Rojo. (Itn-Nanovation, 2011)

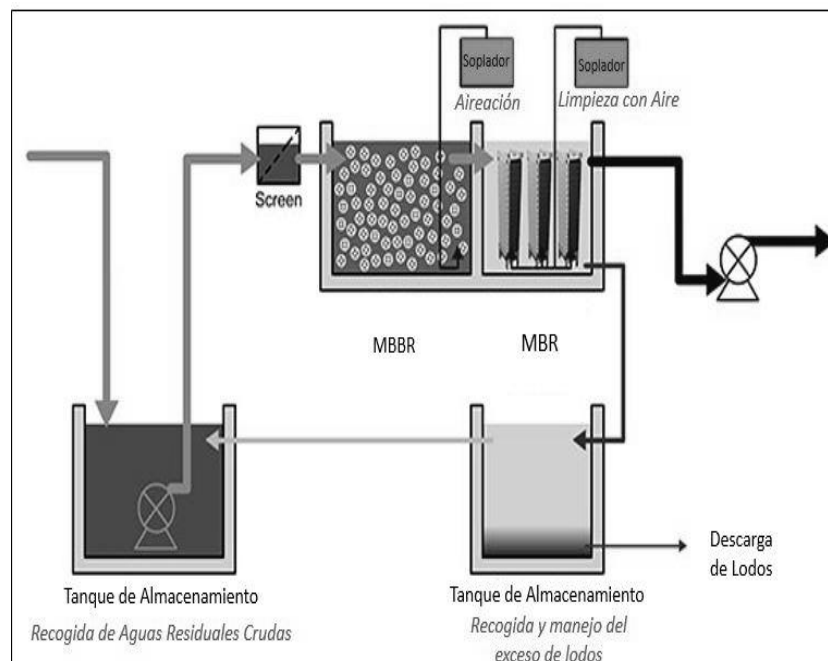


Figura 13. Esquema del proceso de tratamiento del caso de estudio 5. Adaptado de “Sewage Treatment Plant MBCR”, 2017, Disponible en: <http://www.itn-nanovation.com/applications/case-studies/sewage-treatment-plant-mbcr.html>

10. Conclusiones

La tecnología MBR ha tomado gran importancia en la implementación del sistema en el tratamiento de aguas residuales debido a las ventajas que ofrece implementarla, como su bajo requerimiento de espacio, la alta calidad de efluente caracterizada por la remoción en gran porcentaje de sólidos suspendidos, coloides, bacterias y virus; permitiendo reutilizar el agua tratada en actividades como irrigación o para sanitarios.

El sistema MBR puede combinarse con otras etapas o procesos de tratamiento, como por ejemplo la inclusión de cámaras anóxicas que mejoran la eficiencia de remoción de nitrógeno, la adición de químicos para la remoción de fósforo; la implementación del sistema como refuerzo de otras tecnologías de tratamiento como la MBBR, el UASB, o el sistema de lodos activados convencional CAS, obteniendo efluentes de mayor calidad.

Otras de las ventajas que ofrecen respecto a tratamientos convencionales tanto aerobios como anaerobios son la baja producción de lodos ya que puede aumentarse la edad de lodos y su concentración, el tratamiento de afluentes con carga orgánicas mayores, la reducción de espacio para construcción de las instalaciones de la planta y la posibilidad de adaptar el sistema a plantas existentes.

En el desarrollo y mejoramiento de la tecnología MBR se han propuesto nuevos materiales, las membranas cerámicas vienen tomando relevancia ya que ofrecen una mayor resistencia y los costos operacionales por mantenimiento y control de fouling son reducidos. Otra de las tendencias ambientales es la instalación del sistema de membranas en reactores anaerobios, los cuales ofrecen la posibilidad de recuperar el biogás generado para producir energía y airear las membranas con el fin de no permitir el ensuciamiento u obstrucción de la superficie de las membranas; además,

los costos de operación se reducen notablemente al no requerir energía constant para el proceso biológico anaerobio. En cuanto a los sistemas MBR aerobios la reducción de energía puede realizarse con aireación intermitente y con la utilización de configuración de membrana sumergida que requiere de menor energía.

El sistema tiene desventajas económicas por la compra de los módulos de membrana, la energía requerida para el permeado y aireación, ya sea para el proceso biológico o como método preventivo de formación de fouling; el mantenimiento de membranas y de la planta, y reemplazo de las membranas por su tiempo de vida útil. El fouling es una de las desventajas principales que tiene el tratamiento con membranas, pero con los métodos de limpieza físicos y químicos con los que puede restablecerse su funcionamiento para que el permeado vuelva a realizarse con los valores planteados en el diseño.

La tecnología MBR es una tecnología significativa y prometedora en la rama del saneamiento ambiental debido al reúso directo que puede dársele al efluente obtenido dependiendo de su futura utilización, y no como en los sistemas convencionales que requieren de mayor área y de un tratamiento terciario. La amplia aplicación de este sistema en el mundo ha demostrado que este método novedoso brinda una opción sostenible para tratar las aguas domesticas en las comunidades, ya que a futuro podría plantearse el agua residual no como un problema sino como una nueva e importante fuente de agua para múltiples usos y/o abastecimiento de las comunidades.

Referencias bibliográficas

- Ambroña D. Descripción del Sistema Bioreactor de Membranas. Xylem Inc. Recuperado de <http://www.xylemwatersolutions.com/scs/spain/es-es/prensa/Eventos/Eficienciaenergetica/Documents/SISTEMA%20BIOREACTOR%20DE%20MEMBRANAS.pdf>
- Basile A., Cassano A. y Rastogi K. (2015). *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment. Materials, Processes and Applications*. Reino Unido: Editorial Woodhead Publishing. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781782421214>
- Chang I., Clech P., Jefferson B. & Judd S. (2002). Membrane Fouling in Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Engineering*. Recuperado de <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9372%282002%29128%3A11%281018%29>
- Ferroviario y Cadagua. (2007). Remodelación de la EDAR de San Pedro del Pinatar, Murcia. *InfoEnviro*. Recuperado de http://www.cadagua.es/pdf/edar_san_pedro_pinatar.pdf
- Galvis M. (2014). *Estado del Arte Biorreactores de Membrana*. (Tesis de Maestría). Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito. Bogotá. Recuperado de [https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/123/1/DOCUMENTO%20BIOREACTOR%20MEMBRANA%20%20FINAL%20\(1\).pdf](https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/123/1/DOCUMENTO%20BIOREACTOR%20MEMBRANA%20%20FINAL%20(1).pdf)
- GE Water. (2011). City of Pooler Wastewater Treatment Plant. Recuperado de <https://www.gewater.com/kcpguest/document-library.do>

GE Water. (2011). SouthShore Wastewater Treatment. Recuperado de <https://www.gewater.com/kcpguest/document-library.do>

GE Water. (2013). Municipal Plant Meets Discharge Limits Only Days after Start-Up Using ZeeWeed Membrane Bioreactor (MBR) and BioPlus Bioaugmentation Products. Recuperado de <https://www.gewater.com/kcpguest/document-library.do>

Hidrowater. Biorreactores de membrana. Catálogo. Recuperado de <http://hidrowater.com/productos/industrial/plantas-mbr-de-aguas-residuales-urbanas/>

Huu Hao Ngo, Wenshan Guo Rao Y. Surampalli Tian C. Zhang. (Eds). (2016). *Green Technologies for Sustainable Water Management*. Estados Unidos: Editorial American Society of Civil Engineers. Recuperado de <http://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784414422>

Itn-Nanovation. (2011). Sewage Treatment Plant MBCR. Recuperado de <http://www.itn-nanovation.com/applications/case-studies/sewage-treatment-plant-mbcr.html>

Judd S. y Judd C. (2006). *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*. Oxford, Gran Bretaña: Editorial ElSevier. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781856174817>

Judd S. y Judd C. (2011). (Eds). *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*. Oxford, Gran Bretaña: Editorial ElSevier. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780080966823>

Lin H. et al. (2011). Feasibility Evaluation of Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor for Municipal Secondary Wastewater Treatment. *Desalination*, 280(1). Editorial Board. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916411005868>

- Lorente-Ayzaa M. et al. (2016). Comparison of porosity assessment techniques for low-cost ceramic membranes. *Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 56(1). Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0366317516300723>
- Maddah H. & Chogle A. (2015). Applicability of Low Pressure Membranes for Wastewater Treatment with Cost Study Analyses. *Membrane Water Treatment*, 6(6). Estados Unidos. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/284714285_Applicability_of_low_pressure_membranes_for_wastewater_treatment_with_cost_study_analyses
- Metcalf & Eddy INC. (1995). *Ingeniería De Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*. Madrid, España: Editorial McGraw-Hill/Interamericana De España.
- Sparks T. & Chase G. (2016). *Filters and Filtration Handbook*. Solid-Liquid Filtration Oxford, Reino Unido: Editorial Elsevier, p. 199-297. Recuperado de <https://www.elsevier.com/books/filters-and-filtration-handbook/sparks/978-0-08-099396-6>
- Vera L. et al. (2014). Biorreactores de Membrana Anaerobios para Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas. Estudio Preliminar. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5(4). La Laguna, España. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/270576205_BIORREACTORES_DE_MEMBRANA_ANAEROBIOS_PARA_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RESIDUALES_DOMESTICAS_ESTUDIO_PRELIMINAR
- Verrecht B. et al. (2012). Economical Evaluation and Operating Experiences of a Small-Scale MBR for Nonpotable Reuse. *Journal of Environmental Engineering*. Editorial American

Society of Civil Engineers. Recuperado de
<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0000505>

Water Environment Federation. (2012). *Membrane Bioreactors: WEF Manual of Practice No. 36. Membrane Fundamentals*. Editorial McGraw-Hill. Recuperado de
<https://accessengineeringlibrary.com/browse/membrane-bioreactors-wef-manual-of-practice-no-36>