



BIORREACTORES DE MEMBRANA (MBR) EN EL TRATAMIENTO DE LAS
AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES, COMO ALTERNATIVA
TECNOLÓGICA AL TRATAMIENTO CONVENCIONAL

ESTUDIANTE

EDWIN ANTONIO SÁENZ PEÑALOSA

1121866165

MONOGRAFÍA

TUTOR

PHD. JACIPT ALEXANDER RAMON VALENCIA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

INGENIERÍA AMBIENTAL

PAMPLONA NORTE DE SANTANDER

2019



AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por darme la vida, la oportunidad de realizar mis estudios con el mayor éxito posible, por ser mi guía en este largo camino. A mis padres que siempre han sido un apoyo incondicional en cada logro de mis objetivos y me han formado de la mejor manera. Agradezco inmensamente a los profesores quienes me orientaron impartiendo sus conocimientos en los momentos precisos, también a mis amigos que me han acompañado en los buenos y malos momentos y a todas aquellas personas que fueron un apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Sin la ayuda y colaboración de todos ustedes nada de esto hubiese sido posible.

DQS is member of:





DEDICATORIA

Dedico esta monografía inicialmente a Dios, porque gracias a su compañía durante este proceso arduo y lleno de sacrificio siempre me ha conducido y me llenado de sabiduría y de conocimiento para no perderme de mi meta, también quiero dedicarle este mérito a mi señor padre quien hoy no está acá en la tierra conmigo, pero sé que desde el cielo se siente orgulloso porque fue quien en compañía de madre me formaron para poder ser la persona que soy hoy, además, ellos han sido ese ejemplo que quiero seguir y mi motivación cada día.

También sé que debo tener presente a las personas que de una u otra manera estuvieron en mi proceso de formación, para ellos también dedico este estudio que me acerca hoy a la meta que nos propusimos con mis padres hace unos años.

Por último, quiero dedicarle este estudio a las personas que me formaron y me dieron el conocimiento, gracias a ellos hoy es posible entregar este estudio de monografía.



Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 7 |
| 1. CAPÍTULO 1 | 9 |
| AGUAS RESIDUALES | 9 |
| 1.1. DEFINICIÓN GENERAL DE LAS AGUAS RESIDUALES | 9 |
| 1.2. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES..... | 11 |
| 1.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES | 12 |
| 1.3.1. Olor..... | 12 |
| 1.3.2. Densidad..... | 14 |
| 1.3.4. Color:..... | 15 |
| 1.3.5. Turbiedad | 15 |
| 1.3.6. Temperatura | 16 |
| 1.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES | 17 |
| 1.4.1. Materia orgánica..... | 17 |
| 1.4.2. Oxígeno disuelto | 17 |
| 1.4.3. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) | 18 |
| 1.4.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO) | 18 |
| 1.4.5. Sólidos | 18 |
| 1.5. CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES | 19 |
| 1.5.1. Bacterias..... | 19 |
| 1.5.2. Hongos | 19 |
| 1.5.3. Protozoos | 20 |
| 1.5.4 Actinomicetos | 21 |
| 1.6. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES | 21 |
| 1.6.1. AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS | 21 |
| 1.6.2. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES | 23 |
| 1.6.3. AGUAS URBANAS | 27 |



| | |
|--|----|
| 2. CAPÍTULO 2 | 30 |
| 2.1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE MEMBRANAS..... | 30 |
| 2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS MEMBRANAS | 31 |
| 2.2.1. Factores de separación por tamaño | 32 |
| Filtración..... | 32 |
| 2.2.2. Microfiltración..... | 33 |
| 2.2.3. Nanofiltración | 34 |
| 2.2.4. Ultrafiltración | 35 |
| 2.3. TAMAÑO/DIFUSIVIDAD..... | 36 |
| 2.3.1. Ósmosis Inversa | 36 |
| 2.4. CARGA/DIFUSIVIDAD | 38 |
| 2.4.1. electrodiálisis | 38 |
| 2.4.2. electrodiálisis reversible..... | 39 |
| 2.5. CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS | 40 |
| 2.5.1. cartuchos membranas..... | 40 |
| 2.5.2. membranas en espiral..... | 40 |
| 2.5.3. membrana tubular | 41 |
| 2.5.4. filtro de placa y marco..... | 42 |
| 2.5.5. fibra hueca | 43 |
| 3. Capítulo 3 | 44 |
| 3.1. LOS BIORREACTORES DE MEMBRANA (MBR) | 44 |
| 3.2. DESARROLLO HISTÓRICO | 46 |
| Tabla 1..... | 47 |
| 3.3. ¿QUÉ ES UN BIORREACTOR DE MEMBRANA? | 49 |
| 3.4. ¿CÓMO ESTÁ COMPUESTO? | 50 |
| 3.6. COSTOS..... | 51 |
| 3.7. TIPOS DE MBR | 54 |



| | | |
|--|--------------------------------|----|
| 3.7.1. BIORREACTORES CON MEMBRANA INTEGRADA O SUMERGIDA | 54 | |
| 3.7.2. MEMBRANAS EXTERNAS O CON RECIRCULACIÓN AL BIOREACTOR | 55 | |
| 3.8. COMPLICACIONES EN LOS MBR POR EL ENSUCIAMIENTO DE LA MEMBRANA..... | 56 | |
| 3.9. PARÁMETROS DE DISEÑOS DEL MBR..... | 57 | |
| 3.10. VENTAJAS | 3.10 DESVENTAJAS/LIMITES | 60 |
| 4. CAPÍTULO 4 | 65 | |
| 4.1. EL USO DE LOS BIORREACTORES DE MEMBRANA (MBR) EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES..... | 65 | |
| 4.2. APLICACIONES | 68 | |
| CONSIDERACIONES FINALES | 77 | |
| CONCLUSIONES | 82 | |
| REFERENCIAS..... | 84 | |

DQS is member of:



INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas de este siglo, el mundo ha venido observando con inquietud, analizando y tratando de resolver una serie de problemas relacionados con la disposición de los residuos líquidos procedentes del uso doméstico, agrícola e industrial. Este problema ha ido en un crecimiento descontrolado y afectando las aguas potables.

Por otra parte, la problemática que existe con las aguas residuales ha radicado desde el momento en que aparecieron las primeras poblaciones estables, quienes en su necesidad de eliminar los residuos producidos por ellos mismos ha constituido un problema primordial para las sociedades humanas.

A partir de los años 60 empezó a existir una preocupación para controlar las aguas que ya han prestado un servicio y que no pueden tener un nuevo uso debido a sus niveles de contaminación, por esta razón, se han creado y propuesto alternativas que permitan dar un tratamiento a estos residuos líquidos y así darles una reutilización apropiada reduciendo sus niveles contaminantes.

Una nueva alternativa para llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales ha sido la implementación de Biorreactores de Membrana (MBR) en plantas de tratamiento, la cual consiste en la combinación de dos procesos; degradación



biológica y separación por membrana, en uno único en el que los sólidos en suspensión y microorganismos responsables de la biodegradación son separados del agua tratada mediante una unidad de filtración por membrana y de esta manera permitir que los elementos pesados y contaminantes se separen de los líquidos y crear un elemento tratado reutilizable para diferentes campos, pero no para el consumo humano.

Por esta razón, este estudio de monografía pretende indagar sobre el uso del biorreactor de membrana en el tratamiento de aguas residuales y sus aplicaciones en el sector industrial, del mismo modo, se procura recolectar información de estudios hechos a este sistema moderno alrededor del mundo, puesto que es un procedimiento que ha revolucionado actualmente en los sistemas de tratamiento convencionales, considerándose un sistema avanzado y tecnológico en el mundo actual.

1. CAPÍTULO 1

AGUAS RESIDUALES

1.1. DEFINICIÓN GENERAL DE LAS AGUAS RESIDUALES

De acuerdo a Ramalho, R. S. (1996), las aguas residuales son aquellas que se encuentran contaminadas con elementos tóxicos tales como materia fecal y orina de seres humanos, e incluso de animales, considerándose también como el producto sobrante de las actividades cotidianas de subsistencia humana. Estos tipos de agua representan un peligro y deben ser desechadas debido a su alta concentración de sustancias y microorganismos virulentos.

Las aguas contaminadas, no solo poseen presencia de agentes contaminantes orgánicos sino también disponen de otras sustancias residuales provenientes del ámbito doméstico, industrial, agua de lluvia, y la típica infiltración de agua en el terreno, las cuales resultan nocivas para los seres vivos, así como lo afirma Romero Rojas, J. A. (1999) las aguas residuales pueden variar dependiendo la fuente de origen, puesto que existen aguas residuales que tienen más contaminantes que otras y sin embargo, todas son categorizadas como las mismas.

Las aguas residuales no son aguas limpias, están sucias y contaminadas por ese uso que revisten, conteniendo presencia de elementos tales como detergentes,



grasas, materia orgánica, residuos agro ganaderos e industriales, sustancias tóxicas, entre otros, los cuáles son procedentes de las actividades cotidianas de subsistencia de la vida humana. No obstante, desde hace varios años se ha planteado la posibilidad de la reutilización de aguas residuales en el desarrollo de diversas actividades humanas, considerando el tipo de tratamiento y el nivel de depuración, según el uso y/o aplicación destinado.

Es por esta razón, durante los últimos años los tratamientos de aguas residuales ha sido el eje de estudio en muchos países puesto que la naturaleza no es capaz por sí sola de realizar el proceso de auto purificación de los cursos de agua, por lo que se han desarrollado numerosos métodos y sistemas de tratamientos, los cuales han funcionado en una gran perfección. Sin embargo, Orozco, A. (2005). menciona en su libro de bioingeniería de las aguas residuales que a medida que el mundo va evolucionando, van apareciendo nuevos contaminantes en las aguas residuales que no son fáciles de tratar usando estos métodos convencionales creados en un principio para el tratamiento, por lo que se hace una necesidad diseñar nuevos sistemas de tratamiento que permitan eliminar en su totalidad todos los agentes patógenos, contaminantes y virulentos que presentan las nuevas aguas residuales.

1.2. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

La composición de las aguas residuales se refiere a las cantidades de constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en las aguas residuales. Además, las aguas residuales se componen, básicamente, de un 99,9% de agua en su estado conocido como de agua potable o de consumo humano y de, un 0,1% por peso de sólidos, sean éstos disueltos o suspendidos. Este 0,1% referido es el que requiere ser removido para que el agua pueda ser reutilizada, porque al ser consumida sin remover este mínimo porcentaje de sólidos, puede provocar enfermedades y/o infecciones que el cuerpo los rechaza en lo absoluto. El agua sirve o actúa como medio de transporte de estos sólidos, los que pueden estar disueltos, en suspensión o flotando en la superficie del líquido.

| AGUA POTABLE | SÓLIDOS | GASES DISUELTOS | COMPONENTES BIOLÓGICOS |
|--------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------|
| 99% | 0,1 % (por peso) suspendidos | O ₂ | Bacterias |
| | Disueltos | CO ₂ | Microorganismos |
| | Coloidales | H ₂ S | Virus |
| | Sedimentales | N ₂ | |

1.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Con el desarrollo de la urbanización y con la diversificación de los procesos industriales, un sinnúmero de elementos químicos elaborados y producidos por la sociedad junto a una mayor cantidad de materias orgánicas son arrojados en los cursos normales de agua, los cuales se depositan en lagunas, lagos, ríos y mar. La DBO aumenta y el limitado oxígeno disuelto no es suficiente para posibilitar la recuperación de dichos elementos.

Por consiguiente, al no ser tratados y controlados estos contaminantes generan unas características particulares a las aguas residuales, que pueden variar dependiendo del lugar, temperatura, y fuente de contaminación. Estas características más frecuentes son:

1.3.1. Olor

los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica Lapeña, M. R. (1989). El agua residual reciente tiene un olor peculiar, algo desagradable, que resulta más tolerable que el del agua residual séptica. El olor más característico del agua residual séptica es el debido a la presencia del sulfuro de hidrógeno que se produce al reducirse los sulfatos a sulfitos por acción de microorganismos anaerobios. Las aguas residuales industriales

pueden contener compuestos olorosos en sí mismos, o compuestos con tendencia a producir olores durante los diferentes procesos de tratamiento.

Por otra parte, esta es una característica muy notable en el proceso de tratamiento de las aguas porque según Lapeña, M. R. (1989) en este procedimiento se generan subproductos que pueden causar malos olores en los alrededores de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), hecho por el cual se puede generar un rechazo de las poblaciones aledañas a la instalación de PTAR en sus locaciones. Por ello el conocimiento de la fuente de los olores y de las tecnologías para su control toma importancia. Normalmente los malos olores están asociados a la generación y tratamiento de residuos sólidos como el lodo biológico o químico, así como con el manejo del agua residual misma y con la degradación de la materia orgánica dentro de la planta de tratamiento.

La problemática de los olores es una de las principales causas de rechazo a la implantación de instalaciones de tratamiento de aguas residuales en las poblaciones. En los últimos años, con el fin de mejorar la opinión pública respecto a la implantación de los sistemas de tratamiento, el control y la limitación de los olores han pasado a ser factores de gran importancia en el diseño y proyecto de redes de alcantarillado, plantas de tratamiento y sistemas de evacuación de aguas residuales. En muchos lugares, el temor al desarrollo potencial de olores ha sido causa del

rechazo de proyectos relacionados con el tratamiento de aguas residuales. A la vista de la importancia de los olores dentro del ámbito de la gestión de las aguas residuales, resulta conveniente estudiar los efectos que producen, cómo se detectan, y cómo caracterizarlos y medirlos.

1.3.2. Densidad

Según Gómez, E. G. (1993) se define la densidad de un agua residual como su masa por unidad de volumen, expresada en kg/m^3 . Es una característica física importante del agua residual dado que de ella depende la potencial formación de corrientes de densidad en fangos de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento. La densidad de las aguas residuales domésticas que no contengan grandes cantidades de residuos industriales es prácticamente la misma que la del agua a la misma temperatura. En ocasiones, se emplea como alternativa a la densidad el peso específico del agua residual, obtenido como cociente entre la densidad del agua residual y la densidad del agua. Ambos parámetros, la densidad y el peso específico, dependen de la temperatura y varían en función de la concentración total de sólidos en el agua residual.

1.3.4. Color:

De acuerdo a la historia, en el proceso de identificación y descripción de un agua residual, se empleaba el término condición junto con la composición y la concentración. Este término se refiere a la edad del agua residual, que puede ser determinada cualitativamente en función de su color y su olor, por lo tanto, de acuerdo a Delgadillo, O. (2010), el agua residual reciente suele tener un color grisáceo. Sin embargo, al aumentar el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado y al desarrollarse condiciones más próximas a las anaerobias, el color del agua residual cambia gradualmente de gris a gris oscuro, para finalmente adquirir color negro. Llegado este punto, suele clasificarse el agua residual como séptica. Algunas aguas residuales industriales pueden añadir color a las aguas residuales domésticas. En la mayoría de los casos, el color gris, gris oscuro o negro del agua residual es debido a la formación de sulfuros metálicos por reacción del sulfuro liberado en condiciones anaerobias con los metales presentes en el agua residual.

1.3.5. Turbiedad

Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F. (2014). Mencionan que la turbiedad como medida de las propiedades de transmisión de la luz de un agua, es otro parámetro que se emplea para indicar la

calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. La medición de la turbiedad se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones. La materia coloidal dispersa o absorbe la luz, impidiendo su transmisión. Aun así, no es posible afirmar que exista una relación entre la turbiedad y la concentración de sólidos en suspensión de un agua no tratada. No obstante, sí están razonablemente ligados la turbiedad y los sólidos en suspensión en el caso de efluentes procedentes de la decantación secundaria en el proceso de fangos activados.

1.3.6. Temperatura

La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, hecho principalmente debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. Dado que el calor específico del agua es mucho mayor que el del aire, las temperaturas registradas de las aguas residuales son más altas que la temperatura del aire durante la mayor parte del año, y sólo son menores que ella durante los meses más calurosos del verano. En función de la situación geográfica, la temperatura media anual del agua residual varía entre 10 y 21 °C, pudiéndose tomar 15,6 °C como valor representativo.

1.4. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

1.4.1. Materia orgánica

Son fracciones relevantes que se dan de los elementos contaminantes en las aguas residuales domésticas y municipales debido a esto se refleja como la causante del agotamiento de oxígeno de los cuerpos de agua.

La Materia Orgánica está compuesta principalmente por CHONS (Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre) constituyendo las proteínas (restos de origen animal y vegetal), los carbohidratos (restos de origen vegetal), los aceites y grasas (residuos de cocina e industria) y los surfactantes (detergentes).

1.4.2. Oxígeno disuelto

Es un parámetro fundamental que se contempla en el ecosistema acuático y su valor debería estar por encima de los 4 mg/L para así mismo asegurar la sobrevivencia de los organismos superiores. El oxígeno se usa como indicador de la contaminación para los cuerpos hídricos. Para el correcto funcionamiento de los tratamientos aerobios de las aguas residuales, es necesario asegurar una concentración mínima de 1 mg/L.

1.4.3. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Es una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica contenida en una muestra de agua, se usa para determinar el consumo de oxígeno que hacen los microorganismos para degradar los compuestos biodegradables.

Una curva característica de la DBO evidencia que a los 5 días se ha degradado cerca del 70% de la materia orgánica y que a partir del día 10 ésta curva se hace asintótica, como se muestra a continuación:

1.4.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

También una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica contenida en una muestra. A diferencia de la DBO, esta prueba emplea un oxidante fuerte (dicromato de potasio – $K_2Cr_2O_7$) en un medio ácido (ácido sulfúrico – H_2SO_4) en vez de microorganismos.

1.4.5. Sólidos

La materia orgánica se presenta en forma de sólidos. Estos sólidos pueden ser suspendidos (SS) o disueltos (SD), los que también pueden ser volátiles (SV), los cuales se presumen orgánicos, o fijos (SF) que suelen ser inorgánicos. Parte de los sólidos suspendidos pueden ser también sedimentables (SSed). Lo anterior ellos se determinan gravimétricamente (por peso).

1.5. CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales presentan diferentes características con las Microbiológicas, las cuales aportan gran cantidad de materia orgánica que sirve de alimento para hongos y bacterias encargados de la descomposición.

A continuación, se deben tener en cuenta:

1.5.1. Bacterias

Responsables de la degradación y estabilización de la materia orgánica contenida en las aguas residuales. Su crecimiento ocurre a pH entre 6,5, y 7,5. De lo cual algunas de las bacterias son patógenas, como la *Escherichia coli*, indicador de contaminación de origen fecal.

El papel que desempeñan las bacterias en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica, tanto en el marco natural como en las plantas de tratamiento de aguas residuales, es amplio y de gran importancia.

1.5.2. Hongos

Los Hongos predominan en las aguas residuales de tipo industrial debido que resisten a valores de pH bajos y a la escasez de nutrientes.

Los hongos son organismos eucariotas, multicelulares, aerobios y no fotosintéticos. Muchos de ellos son saprofitos, basan su alimentación en la materia orgánica muerta. Junto con las bacterias, los hongos son los principales responsables de la descomposición del carbono en la biosfera.

Desde el punto de vista ecológico, los hongos presentan ciertas ventajas sobre las bacterias: pueden crecer y desarrollarse en zonas de poca humedad y en ambientes de pH bajo. Sin la colaboración de los hongos en los procesos de degradación de la materia orgánica el ciclo del carbono se interrumpiría en poco tiempo y la materia orgánica empezaría a acumularse.

1.5.3. Protozoos

son microorganismos eucariotas cuya estructura está formada por una sola célula. Los protozoos que se encuentran más frecuentemente en las aguas residuales son: amebas, flagelados, y ciliados libres, fijos y reptantes. Juegan un papel muy importante en los procesos de tratamiento biológico, especialmente en los filtros percoladores y fangos activados.

Se alimentan de bacterias y materia orgánica, para mejorar la calidad microbiológica de los efluentes de las PTAR.

1.5.4 Actinomicetos

Son bacterias filamentosas conocidas por causar problemas en reactores de lodos activados, generando la aparición de espumas y la pérdida de sedimentabilidad del lodo, hinchamiento o filamentosos, incrementando los sólidos del efluente y la disminución de la eficiencia del TAR.

1.6. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales siendo aquel tipo de agua cuya calidad se vio afectada por contaminantes, formando una combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua que proviene de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y de actividades agrícolas, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual, se clasifican de la siguiente manera:

1.6.1. AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Basado en Gómez, E. G. (1993), las aguas residuales domésticas son aquellas que son utilizadas con fines higiénicos, es decir: en los baños, cocinas, lavanderías, etc. Estas consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación también en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares.

Según estudios realizados por Mara, D. Cairncross, S (1990), se constató que cada persona genera 1.8 litros de material fecal diariamente, correspondiendo a 113.5 gramos de sólidos secos, incluidos 90 gramos de materia orgánica, 20 gramos de nitrógeno, añadiendo otros nutrientes, principalmente fósforo y potasio. Por otra parte, se dice que en América Latina la cantidad de aguas tratadas es muy baja y se estima que menos de 2% de las aguas residuales de la región reciben algún tipo de tratamiento adecuado, por lo que se hace cada vez una problemática que es necesario tratar a tiempo.

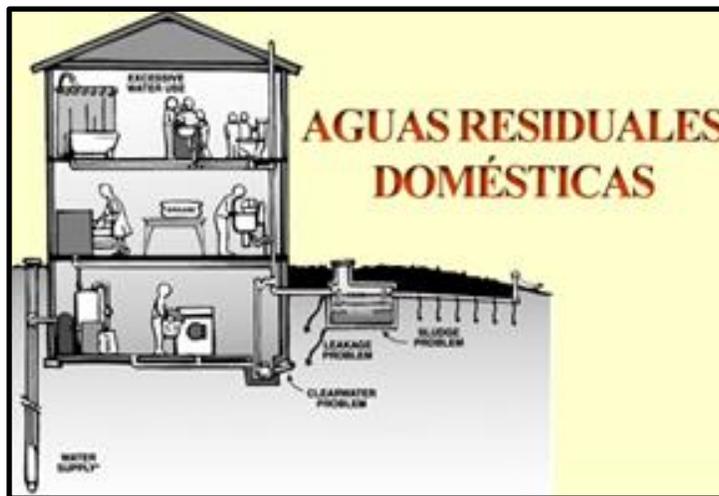


Imagen: aguas residuales domésticas

Por otra parte, dentro de esta clasificación encontramos otra fuente de aguas residuales, en las cuales hay también una gran cantidad de contaminantes.

1.6.2. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Las aguas residuales industriales según el estudio realizado Lapeña, M. (1989), son todas aquellas que se originan en instalaciones comerciales e industriales por sus procesos de fabricación, producción, transformación, consumo, limpieza o mantenimiento. Por otra parte, se considera la industria como una enorme fuente de contaminación del agua, puesto que produce contaminantes que son extremadamente perjudiciales para las personas y para el medio ambiente.



Imagen: aguas industriales y urbanas

En este caso, se ha evidenciado que muchas instalaciones de uso industrial de agua dulce suelen verter los residuos de la planta en los ríos, lagos y océanos, lo cual

está haciendo que el problema con las aguas residuales industriales crezca de una forma descontrolada, afectando todo lo que está a su paso.

De acuerdo a unos análisis, las principales causas de contaminación con metales pesados están asociados con la minería y la fundición, dado que estas prácticas emplean compuestos que son bastante pesados para poder sacar el producto que están deseando, sin fijarse del daño que se está ocasionando a las principales fuentes hídricas que están cerca. Otros sectores que están provocando exageradas porciones de aguas residuales contaminadas son: las fábricas de pasta, las cuales utilizan los cloros fenoles y fungicidas en su proceso; las industrias químicas también tienen gran influencia con esta contaminación, ya que tienen insecticidas que no son fáciles de eliminar con sistemas de tratamientos convencionales y finalmente se encuentra las centrales nucleares, a causa de las sustancias radiactivas empleadas en sus industrias.

Estos residuos radiactivos utilizados en las practicas diarias en las centrales nucleares se vierten en el mar en grandes barriles con el propósito de mantenerlos alejados de los centros urbanos y no causar una problemática en la población, sin embargo, está estrategia empleada por esta industria no es muy efectiva, ya que los barriles utilizados para envasar estos residuos, tienen una vida de uso muy limitada, lo que provoca un deterioro en poco tiempo y sean mezclados con el agua marina.



Los contaminantes más utilizados en las industrias están compuestos de múltiples elementos que contienen:

Amianto

Este contaminante es un grave peligro para la salud y cancerígeno. Las fibras de amianto pueden ser inhaladas y provocar enfermedades como la asbestosis, mesotelioma, el cáncer de pulmón, cáncer intestinal y cáncer de hígado.

Plomo

Este es un elemento metálico y puede causar problemas de salud y problemas ambientales. El plomo es nocivo para la salud de muchos animales, incluidos los seres humanos, ya que puede inhibir la acción de las enzimas corporales.

Mercurio

Este es un elemento metálico y puede causar problemas de salud y problemas ambientales. El mercurio es también perjudicial para la salud de los animales, ya que puede causar enfermedades a través de envenenamiento por mercurio. Nitratos y fosfatos:

El aumento del uso de fertilizantes significa que los nitratos son más a menudo arrastrados hasta ríos y lagos. Esto puede provocar la eutrofización, que puede ser muy problemático para el medio marino.

Azufre

El azufre en aguas residuales es el ion sulfato que se encuentra, de forma natural, tanto en la mayoría de las aguas de abastecimiento como en el agua residual.

El sulfuro de hidrógeno liberado a la atmósfera en redes de alcantarillado que no circulan en presión, tiende a acumularse en la clave de las tuberías. Perjudicial para la vida marina.

Aceites

No se disuelve en el agua, sino que forma una gruesa capa sobre la superficie del agua. Esto puede impedir el crecimiento a las plantas marinas que reciben insuficiente luz para la fotosíntesis. También es perjudicial para los peces y las aves marinas.

Petroquímicos

Este está formado por gas o la gasolina y puede ser tóxico para la vida marina.

Plaguicidas y herbicidas

El uso creciente de plaguicidas y herbicidas en la agricultura se nota también en el agua que bebemos. La lluvia y el riego llevan estos letales productos químicos hacia las aguas subterráneas. Estos productos químicos pueden causar problemas circulatorios, respiratorios y trastornos del sistema nervioso.

Radiactividad

Los niveles que plantean graves riesgos para la salud son bastante raros de encontrar en el agua. La mayor amenaza se plantea por accidentes nucleares, plantas de procesamiento nuclear, y la eliminación de residuos radiactivos

1.6.3. AGUAS URBANAS

Teniendo como referencia el estudio realizado por Sastriques, F. & Gallego, R. (2007) donde menciona que las aguas urbanas están compuestas de aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial, y esto es debido a que es en la zona urbana donde puede existir más unión de diferentes flujos de agua, las cuales no son necesariamente industriales, sino la combinación de las dos. Todas ellas habitualmente se recogen en un sistema colector y son enviadas mediante un emisario terrestre a una planta EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales). Este es un proceso que permite arrojar

y, por tanto, en España, especialmente tras la promulgación de la Ley 16/2002 de prevención y control integrado de la contaminación y la puesta en marcha del EPER-España, en el cual se planteó empezar a tener sistemas de tratamientos aptos para las aguas residuales producidas, además, de prohibir el uso de algunos elementos tóxicos y difícil de tratar con plantas de tratamiento convencionales.

Los compuestos o elementos que entraron a regir para ser prohibidos en esta ley fueron los siguientes:

- Compuestos órgano-halogenados y sustancias que puedan generarlos en el medio acuático.
- Sustancias y preparados cuyas propiedades cancerígenas, o mutagénicas, que puedan afectar a la reproducción en el medio acuático.
- Hidrocarburos persistentes y sustancias orgánicas tóxicas persistentes y bioacumulables. · Cianuros.
- Biocidas y productos fitosanitarios.
- Sustancias que ejercen una influencia desfavorable sobre el balance de oxígeno (computables mediante parámetros agregados tales como DBO, DQO).

Se tuvieron que prohibir estos compuestos contaminantes procedentes de diferentes industrias, dado que poseen una gran concentración química que hace que las plantas de tratamiento deban buscar alternativas más avanzadas para poder eliminarlos y así darles una reutilización.

2. CAPÍTULO 2

2.1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE MEMBRANAS

Entre los procesos que más han evolucionado en las últimas décadas se encuentran los de filtración a través de membrana.

De forma general partiendo del estudio llevado a cabo por Era, L., Ruigómez, González., Bodelón, P., & Rodríguez-Sevilla, J. (2014), éstos consisten en forzar el paso del líquido a filtrar a través de una membrana colocada sobre un soporte sólido, lo que conlleva a un proceso de eliminación de los compuestos contaminantes del agua residual que se esté tratando. Además, estos sistemas funcionan debido a que determinadas clases de membranas permiten el paso a través de ellas de partículas con unas características particulares, mientras que impiden el paso de aquellas que no poseen esas mismas características.

Debido a que este sistema con membranas necesite cada vez mayores flujos de permeado, producidos a menores presiones de operación, ha llevado a un constante avance en el diseño y fabricación de las membranas, es por esta razón que se encuentran diversas clasificaciones de membranas las cuales son adaptadas dependiendo el tipo de agua que se quiere tratar y/o a los agentes que se van a eliminar en su totalidad.

Las operaciones de separación mediante membrana son ampliamente utilizadas y su uso es superior a los métodos convencionales por la capacidad de producir separaciones de forma muy eficiente a temperatura ambiente y por la relación coste/eficiencia.

A continuación, se describen las principales las clasificaciones de membranas que se pueden encontrar, y su función dependiendo el agua residual

2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS MEMBRANAS

Los sistemas con membrana están clasificados de diferentes formas, pues según Iorhemen, Hamza, & Tay. (2016), las membranas pueden estar clasificadas dependiendo el sistema de biorreactor que se quiera implementar y a la efectividad en la que se quieran obtener los resultados.

Por consiguiente, los sistemas de membranas se dividen en:

2.2.1. Factores de separación por tamaño

Filtración

La filtración convencional utiliza como medio filtrante un medio poroso formado por material granular (grava, arena, antracita, etc.).

El líquido a filtrar se hace pasar a través del lecho poroso, por gravedad o mediante presión, quedando los sólidos atrapados en los espacios intersticiales que quedan entre las partículas que conforman el lecho filtrante.

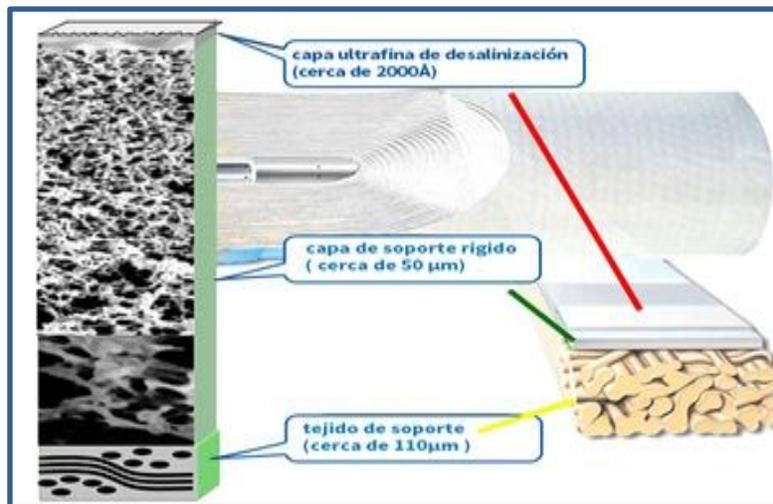
La alternativa a la filtración mediante lechos porosos es la utilización de filtros formados por aglomerados de fibras sintéticas de policarbonato o de celulosa. En función del material utilizado y su disposición, el diámetro medio del poro del filtro varía, siendo éste el parámetro que determina el tamaño mínimo de las partículas que quedarán retenidas (cut off o valor de corte del filtro).

Estos filtros se repliegan en el interior de un cartucho y son capaces de retener partículas con un tamaño superior a 10 mm (partículas de arena, de polvo fino, etc.). Permiten trabajar a unas densidades de flujo de 4 a 8 m³/(m²·h), que, aunque las densidades de flujo de los filtros granulares sean similares, éstos últimos requieren mucho más espacio físico para ofrecer la misma superficie de filtración.

No obstante, los filtros granulares pueden ser sometidos a lavados a contracorriente, los cuales son muy efectivos. Así, para filtrar un efluente con un alto contenido de sólidos, la opción más conveniente son los filtros granulares. Y cuando el contenido en sólidos es bajo o moderado, los cartuchos de filtración son más competitivos y requieren menos espacio.

2.2.2. Microfiltración

Las membranas de microfiltración separan partículas que tienen un tamaño de entre 0,1 μm y 10 μm (baterías, polvo de carbón muy fino, amianto, etc.). Estas membranas pueden ser de nylon, polietileno, polipropileno, etc.

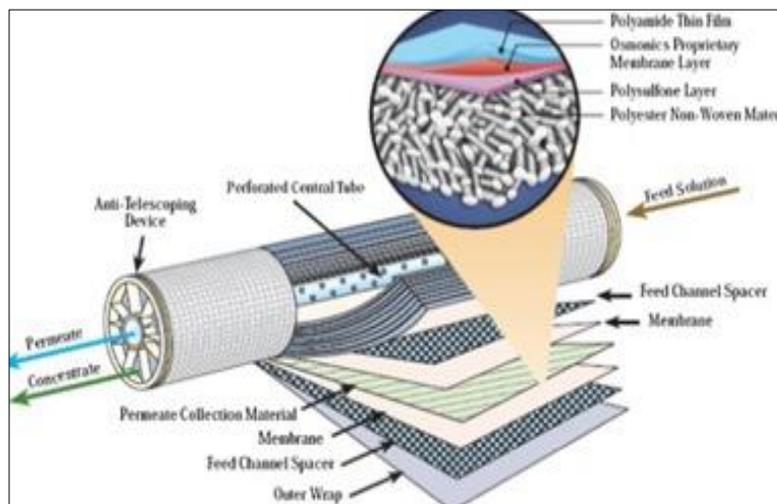


Recuperado de: <http://www.deleml.com/es/weilvmo.html?fbclid=IwAR0nQWN7-EXAwWHVXOI2-LYHsM52k7sOXEQXnRsdQK29RT4tN4r8IYX6Rqg>

2.2.3. Nanofiltración

Dado que en los procesos de microfiltración y ultrafiltración se separan partículas en suspensión del líquido, mediante la nanofiltración se pueden separar moléculas disueltas en el líquido (azúcares, proteínas, moléculas de colorante, etc.).

Las membranas de nanofiltración tienen un valor de corte de entre 0,1 nm y 1 nm, tamaño típico de la mayoría de moléculas que no tienen un peso molecular elevado, incluso quedan retenidos iones como el Ca^{2+} y el Mg^{2+} , hecho que hace posible utilizar estas membranas para eliminar la dureza del agua, sin haber de dosificar reactivos químicos.



Recuperado de: [https://www.researchgate.net/figure/Spirally-wound-](https://www.researchgate.net/figure/Spirally-wound-membrane_fig3_328854732?fbclid=IwAR1N_tQbOLjhbR_Sndif5UtUA-9rqYKj-kIUtSqydh16Dd_gpPZ_lSrG5eg)

membrane_fig3_328854732?fbclid=IwAR1N_tQbOLjhbR_Sndif5UtUA-9rqYKj-kIUtSqydh16Dd_gpPZ_lSrG5eg

Las plantas de nanofiltración se utilizan generalmente para ablandar. Las plantas de nanofiltración difieren de las plantas de ósmosis inversa para el tipo de membrana instalada. La membrana de nanofiltración tiene poros más grandes y no detiene todas las sales, sino solo las moléculas con dimensiones más grandes. La nanofiltración se utiliza principalmente para eliminar soluciones orgánicas (sustancias coloreadas, nitratos, etc.) e iones multivalentes. Las plantas de ósmosis inversa y nanofiltración funcionan a altas presiones.

2.2.4. Ultrafiltración

Otro proceso de membranas es la ultrafiltración. Estas membranas tienen un tamaño de filtración de entre aproximadamente 0,1 y 0,01 micrones. Esto permite la retención de proteínas, ácidos grasos, macromoléculas, bacterias y sólidos suspendidos en un líquido. En el tratamiento de agua, el proceso de ultrafiltración tiene la capacidad de eliminar bacterias, protozoos y ciertos virus del agua.



Recuperado de: <https://www.fibrasynormasdecolumbia.com/terminos-definiciones/ultrafiltracion-definicion-caracteristicas-ventajas-desventajas/>

2.3. TAMAÑO/DIFUSIVIDAD

2.3.1. Ósmosis Inversa



Recuperado de: https://es.123rf.com/photo_70457128_la-%C3%B3smosis-inversa-ro-es-una-tecnolog%C3%ADa-de-purificaci%C3%B3n-de-agua-que-utiliza-una-membrana-semipermeable-para-.html

En la ósmosis inversa la presión se utiliza para forzar el paso del agua contaminada a través de una membrana que captura los contaminantes y permite que el agua se purifique al pasar a través de ella.

El proceso de ósmosis inversa está basado en lo que se denomina ósmosis. Jean-Antoine Nollet, un científico francés, fue el primero que observó la ósmosis en el año 1748. La palabra francesa fue acuñada en base a los términos “endosmosis” y

“exosmosis”, provenientes del idioma griego. La ósmosis es más conocida por ser el proceso que utilizan las células para transportar el agua.

La ósmosis inversa invierte el proceso. La presión se usa para forzar un solvente puro a través de una membrana semipermeable. El agua normalmente pasa a través de las membranas debido a que sus moléculas son de menor tamaño. El tamaño del poro en un filtro de ósmosis inversa es generalmente de 0,0001 micrones.

La ósmosis inversa es más frecuentemente utilizada para desalinización de agua de mar y de agua salobre con el objeto de obtener agua potable y agua apta para aplicaciones industriales, pero también se la utiliza en el tratamiento de aguas residuales y para reúso de agua. La ósmosis inversa puede utilizarse además para eliminar del agua trazas de fosfatos, calcio, metales pesados y otras sustancias.

Las plantas de ósmosis inversa utilizan la membrana de forma selectiva para obtener la desmineralización del agua. Este proceso no consiste solo en un obstáculo físico (producido por las dimensiones de los poros de la membrana) para el paso de las moléculas, sino que utiliza la afinidad química diferente de las soluciones con la membrana, lo que permite que las moléculas hidrófilas (o similares al agua) pasen.

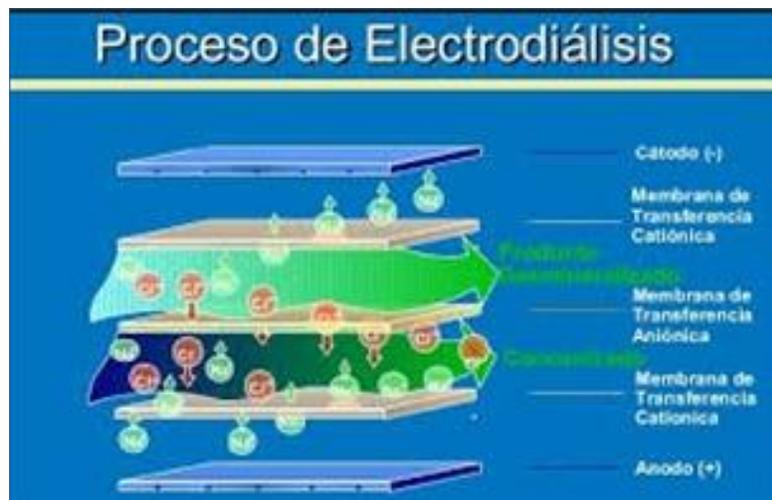
2.4. CARGA/DIFUSIVIDAD

2.4.1. electrodiálisis

Consiste en la eliminación de iones cargados eléctricamente y que se encuentran disueltos en el agua. Para llevar a cabo esta eliminación se introduce en el agua alimento un par de electrodos de distinta carga eléctrica de manera que los iones disueltos serán atraídos por los electrodos de distinto signo al suyo propio.

Por este procedimiento se logra desplazar los iones de un lugar a otro de la disolución.

Es fundamental el empleo de membranas selectivas aniónicas y catiónicas alternativamente para que el agua alimento vaya perdiendo iones negativos y positivos tras su paso por la zona de separación.



Recuperado de: <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-autonoma-de-baja-california/ingenieria-sanitaria/apuntes/tratamientos-terciarios/2952830/view>

Lo interesante es colocar las membranas alternativamente de tal modo que en unos canales se concentren los solutos, en un agua que se denomina concentrado, y en otros canales circule el agua alimento que va perdiendo poco a poco sus contaminantes hasta salir del proceso con una concentración de sales muy baja.

2.4.2. electrodiálisis reversible

En este caso se alteran periódicamente las polaridades de los electrodos de manera que los flujos de agua cambian temporalmente de sentido, pasando a recibir agua depurada aquellos conductos que transportaban el concentrado y al revés.

Este método elimina el riesgo de formación de precipitados, incrustaciones y obstrucción de las membranas, ya que el cambio periódico del sentido del flujo del agua colabora en la limpieza de conducciones y membranas, además de evitar la aparición de limos y otros depósitos en la planta.

2.5. CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS

2.5.1. cartuchos membranas

Las membranas están plegadas alrededor del colector de permeado. Son sistemas compactos, ideales para tratar soluciones con una baja concentración de sólidos en suspensión y se suelen utilizar con membranas de filtración y de microfiltración.

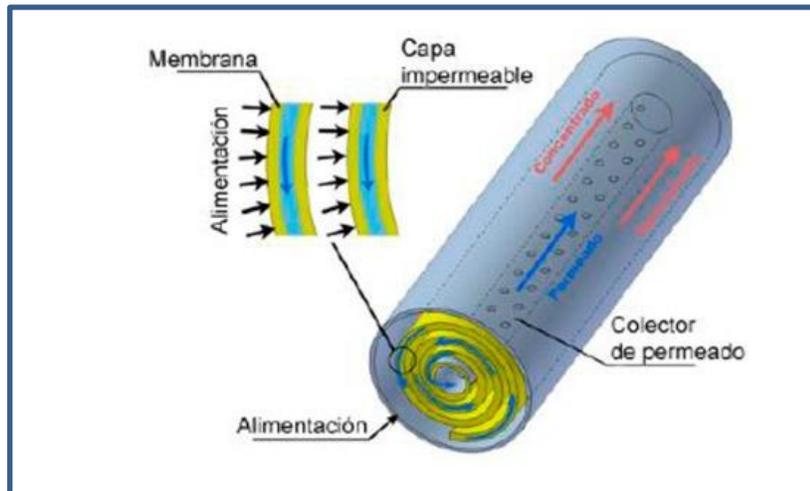


Recuperado de: <https://rotoplas.com.mx/catalogo/cartucho-membrana-osmosis-inversa/>

2.5.2. membranas en espiral

Un conjunto de láminas de membrana, separadas entre sí por un soporte poroso, se enrolla alrededor de un tubo que actúa como colector de permeado. Es un diseño muy compacto, presenta una buena relación coste-eficiencia y es apropiado para aplicaciones de gran volumen.

Generalmente se utiliza con membranas de nanofiltración y de ósmosis inversa.



recuperado de: <https://emontanos.files.wordpress.com/2013/11/3.png>

2.5.3. membrana tubular

Las membranas, de forma tubular, están colocadas en el interior de una carcasa rígida. La alimentación entra por el interior de las membranas y el flujo es en dirección al exterior. Debido al diámetro del tubo de la membrana, de 5 a 10 mm, no es probable que existan problemas de colmatación. Es apropiada para efluentes con una concentración elevada de sólidos en suspensión. Se suele utilizar para aplicaciones de ultrafiltración.

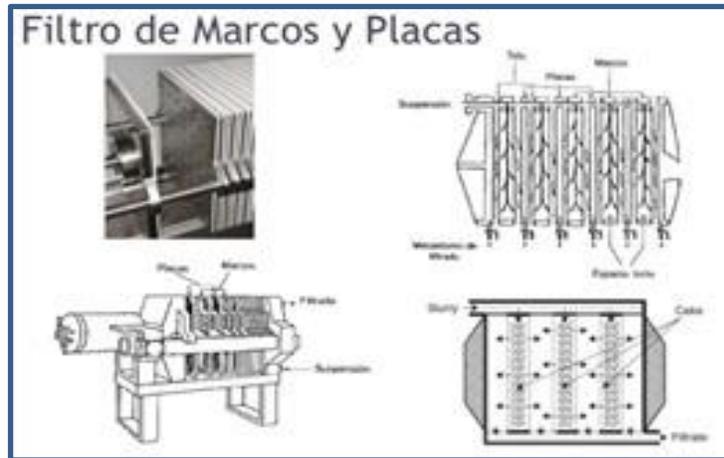


Recuperado de: <https://emontanos.files.wordpress.com/2013/11/1.jpg>

2.5.4. filtro de placa y marco

Se asemeja físicamente a un filtro prensa. Las membranas se colocan sobre los marcos separadas por placas y la alimentación discurre por el espacio entre las placas y las membranas. A un lado de la membrana se concentran los sólidos y en el otro se evacúa el permeado.

Esta disposición sólo se utiliza cuando el alimento tiene una elevada viscosidad, generalmente en aplicaciones de las industrias farmacéutica y alimentaria.

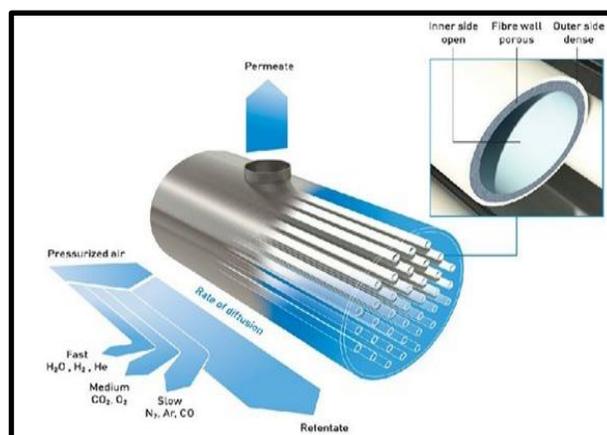


Recuperado de: <https://es.slideshare.net/guillermogaribay1447/filtracin-37561540>

2.5.5. fibra hueca

Consta de un elevado número de membranas con un diámetro inferior a 0,1 mm que constituyen un haz en el interior de una carcasa.

Se utiliza prácticamente sólo para aplicaciones de nanofiltración y ósmosis inversa para tratar efluentes con una baja concentración de sólidos.



Recuperado de: <https://emontanos.files.wordpress.com/2013/11/2.png>

3. Capítulo 3

3.1. LOS BIORREACTORES DE MEMBRANA (MBR)

Actualmente, la legislación ambiental ha contribuido a coordinar los derechos ambientales o de la naturaleza bajo un sistema de normas jurídicas que regulan las relaciones de las personas con la naturaleza, teniendo como propósito preservar y proteger el medio ambiente en su afán de dejarlo libre de contaminación, o mejorarlo en caso de estar afectado.

Por lo tanto, al hablar de sistemas de depuración que permitan manejar las aguas residuales industriales, nos encontramos con un inconveniente que impide llevar a cabo instalaciones de diferentes sistemas de purificación, puesto que cada vez hay menos espacios para establecer plantas de tratamiento, debido a al crecimiento urbano en torno a espacios industriales. De esta manera, en el campo de tratamiento de aguas residuales se está empezando a trabajar cada vez más con nuevas tecnologías avanzadas con elevadas tasas de depuración, lo cual permite tener mejores resultados en estos sectores.

Una tecnología que es muy bien usada para el proceso de tratamiento de aguas residuales es el Biorreactor de Membrana (MBR), el cual está compuesto de dos partes integradas en una sola que permiten tener una depuración biológica de las



aguas residuales y del mismo modo, tener una separación física de la biomasa y el agua a través de un sistema con membranas

Por esta razón, cuando hablamos de la tecnología MBR debemos saber qué es, cómo está compuesta, los beneficios que aporta y los diferentes diseños que hay.

DQS is member of:





3.2. DESARROLLO HISTÓRICO

La tecnología de biorreactor de membrana (MBR) ha crecido de manera muy significativa debido a las ventajas en comparación con los procesos de tratamientos convencionales, estas ventajas se pueden ver reflejadas puesto que estos tienen una calidad de efluente ventajosa, además, tienen un mejor control del proceso.

Por esta razón, para hablar sobre los MBR y los procesos basados en membranas el cual es un enfoque de proceso de tratamiento muy nuevo, es necesario hablar de los comienzos tempranos en los cuales involucran a Dorr Oliver en los años 60, quien fue el primero en desarrollar el primer MBR usando la tecnología de hoja plana y presurizada, a través de este MBR se empezaron a trabajar diferentes modelos durante las primeras 2 décadas y se basaron en módulos de lámina plana, membranas tubulares, que requieren un alto flujo cruzado para poder mantener el rendimiento. Sin embargo, con estos sistemas trabajados el consumo de energía fue un poco más alto, por lo que fue necesario trabajar sobre diferentes sistemas, así como lo muestra la siguiente tabla realizada en una investigación por Buer, T., & Cumin, J. (2010)

Tabla 1. La evolución de MBR.

| Hora | Evento | Tecnología |
|---------------------------|---|------------------------------------|
| Finales de 1960 | Dorr Oliver desarrolla el primer MBR | Hoja plana presurizada |
| Principios de los setenta | Thetford-Systems (ZENON) comercializa Cycle-Let [®] para reutilizar el agua en EE. UU. | Membrana tubular presurizada |
| Principios de 1980 | TechSep (Rhone-Poulenc) comercializa PLEIADE para reutilizar el agua en Japón | Hoja plana presurizada |
| Mediados de 1980 | Nitto-Denko presenta una patente japonesa sobre un MBR sumergido | Hoja plana sumergida |
| | Universidad de Tokio experimenta con fibra hueca MBR | Fibra hueca sumergida |
| Principios de los noventa | Kubota comercializa un MBR en Japón | Hoja plana sumergida |
| | Mitsubishi Rayon comercializa un MBR en Japón | Inmerso sumergido. fibras huecas |
| | Zenon comercializa ZeeWeed [®] en Norteamérica y Europa | Fibra hueca reforzada sumergida |
| Principios de 2000 | USF comercializa Memjet | Fibra hueca no soportada sumergida |
| | Puron (Alemania) presenta una versión similar a una copia de ZeeWeed [®] | Fibra hueca reforzada sumergida |
| | Kolon y Para (Corea) presentan copias similares de ZeeWeed [®] | Fibra hueca reforzada sumergida |
| | Toray presenta una versión de copia del módulo Kubota | Hoja plana sumergida |
| | Mitsubishi Rayon reemplaza su fina fibra hueca con una membrana HF basada en trenza (ZeeWeed [®]) | Fibra hueca reforzada sumergida |

A través de esta tabla es posible constatar el proceso evolutivo que ha tenido el MBR desde su primera creación, aunque cabe mencionar que desde sus orígenes

esta tecnología no era muy aceptada debido a que no tenía mucha diferencia con las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Además, Buer, T., & Cumin, J. (2010) mencionan que la mayoría de los conceptos de módulos de membrana en ese momento usaban módulos típicamente aplicados para bajos flujos de agua sólida (por ejemplo, módulos DT o módulos enrollados en espiral con separadores o módulos capilares). El uso de estos módulos en un ambiente hostil de aguas residuales con alto contenido de sólidos causó problemas operativos que resultaron en ciclos de limpieza cortos, reemplazos frecuentes de membranas y alteraciones generales del proceso.

Por lo tanto, la tecnología MBR no pudo emerger de donde se encontraba puesto que era muy pequeña para flujos de alta resistencia, lo que impidió que los MBR compitieran por las aplicaciones convencionales que en última instancia requieren una nueva innovación para tener éxito.

En vista que este sistema no estaba siendo tan competitivo con las otras aplicaciones que habían, Japón y Canadá empezaron a trabajar en una mejora de los MBR creando un módulo de membrana sumergida los cuales permitieron que hubiera una evolución rápida y oportuna de este sistema, y gracias a estos avances todos los conceptos de módulos desarrollados hasta hoy se basan en el principio de lámina plana de Kubota o

en el diseño del módulo ZENON de fibra hueca compatible con un dispositivo de aireación debajo o integrado en el casete de membrana.

3.3. ¿QUÉ ES UN BIORREACTOR DE MEMBRANA?

los biorreactores de membrana (Membrane Bio-Reactor, MBR) pueden ser definidos como sistemas en los que se integra la degradación biológica de los efluentes de aguas residuales con una filtración por membrana (Cicek, y otros, 1998). Las técnicas biológicas de tratamiento de aguas residuales se vienen usando desde hace más de cien años. De todos los procesos que se han desarrollado para el tratamiento de las aguas residuales el sistema convencional de fangos activados ha sido el más extendido. Por su parte, la tecnología de membrana, en un principio se vio limitado su uso y solamente se empleaba como tratamiento de afino o para la desalación de agua de mar.

El uso de membranas en el tratamiento de las aguas residuales es más reciente y se han empleado en aquellas situaciones donde había requerimientos de vertido rigurosos o donde se pretendía reutilizar el agua depurada. Los factores principales que han limitado el desarrollo de la tecnología de membrana han sido el elevado coste de inversión y de operación. Sin embargo, con la aparición de novedosos módulos de membrana menos costosos y más efectivos junto con el endurecimiento de los

requisitos de vertido, la tecnología de membrana ha vuelto a cobrar interés. Son numerosas las vías de investigación que en la actualidad se mantienen abiertas.

3.4. ¿CÓMO ESTÁ COMPUESTO?

Los MBR están compuestos por dos partes principales

a) La unidad biológica, responsable de la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual (biodegradación)

b) La unidad de filtración, encargada de llevar a cabo la separación sólido-líquido del licor mezcla mediante filtración

De forma general, el funcionamiento de un MBR. el afluente, normalmente predecantado, entra en el biorreactor, donde se pone en contacto con la biomasa y luego es filtrado en la membrana. El agua filtrada, o permeado (permeate), es retirada (por ej., por succión), mientras que la biomasa permanece en el biorreactor. El exceso de fangos se purga a fin de mantener un tiempo de retención celular constante.

Este ciclo se alterna con un corto periodo de limpieza, mediante aire (scour air) o por retro lavado. En este último, se invierte el sentido del flujo para forzar el paso del agua filtrada desde el interior al exterior de la membrana. Periódicamente, en

función del grado de ensuciamiento (fouling), las membranas se someten a limpiezas químicas profundas mediante su inmersión en una solución ácida (ácido cítrico u oxálico) o básica (hipoclorito sódico).

3.6. COSTOS

COSTOS DE LOS MBR

Los biorreactores de membrana al ser un sistema moderno y con múltiples modificaciones en comparación con los sistemas de tratamiento convencionales antiguos, presentan unos costos elevados, ya que requieren de materiales que no son muy comunes, y las membranas empleadas en diferentes MBR pueden variar.

Los costos de los MBR se determinan mediante los gastos de capital (CAPEX) y los gastos operativos (OPEX) que se presentan en la puesta en marcha de este sistema.

Los CAPEX tienen que ver con los equipos, costos del terreno, servicios de instalación (de obra civil, mecánico y consultoría).

Los OPEX hacen relación a la demanda de energía, productos químicos y reemplazo de la membrana.

Los MBR son nuevas tecnologías aplicadas al tratamiento de las aguas residuales, el uso de estos sistemas se ha incrementado considerablemente por la mayor implementación de estas tecnologías. Por esta razón, los costos de los MBR con el paso de los años han ido disminuyendo por la misma demanda y la mejora en las operaciones del proceso.

Según Bohórquez., & Sarmiento Higuera., (2017). los costos que hacen relación a la vida útil de la membrana bajaron \$400/m² debido al mismo incremento en la implementación de esta tecnología, comparada con años anteriores. Las membranas usadas en los MBR son de diferentes configuraciones, pero las de fibra hueca son líderes en el mercado y su aplicabilidad se hace de manera sumergida lo cual mejora el rendimiento en el proceso y desde 1990 se ha reducido la demanda de energía por de la misma.

CALCULO DE LA DEMANDA DE ENERGIA

- $EMBR = E' A, M SADp + E' A, bio SADbio + Esludge \Sigma R + EL, M + Eel$
- $E' A, m$ Demanda energética específica por unidad de volumen de aire, tanque de membrana, kWh Nm⁻³ (0.022)
- $E' A, bio$ Demanda energética específica por unidad de volumen de aire, tanque de proceso, kWh Nm⁻³ (23)

- Lodos E Demanda energética específica, bombeo de lodos (potencia / flujo), kWh m⁻³ (0.018)
- E L, m Demanda energética específica, bombeo de permeado (potencia / flujo), kWh m⁻³ (0.015)
- E el Consumo específico de energía eléctrica residual, kWh m⁻³ (0.005)
- $\sum R$ Suma de relaciones de reciclaje (5)
- SAD p Demanda de aireación específica para limpieza de membrana, aire por unidad de volumen de permeado, Nm³ m⁻³ (0.25)
- SAD bio Demanda de aireación específica para procesos biológicos, aire por unidad de volumen de permeado, Nm³ m⁻³

Estos costos sobre la demanda de energía están relacionados con la aireación necesaria para el correcto funcionamiento del MBR, en donde difieren por la profundidad del reactor y el mantenimiento de la membrana.

3.7. TIPOS DE MBR

3.7.1. BIORREACTORES CON MEMBRANA INTEGRADA O SUMERGIDA

La unidad de membrana que realiza la separación física está inmersa en el tanque biológico. La fuerza impulsora a través de la membrana es alcanzada presurizando el biorreactor o creando presión negativa en el lado permeado de la membrana (Buisson et al. 1998; Cote et al. 1997; Rosenberger et al. 2002). La limpieza de la membrana se realiza a través de frecuentes retrolavados con agua permeada y aire y ocasionalmente mediante retrolavados con soluciones químicas. Generalmente se coloca un difusor de aire justo debajo del módulo de la membrana para suministrar el aire necesario para homogeneizar el contenido del tanque, para el proceso biológico y para la propia limpieza de la membrana

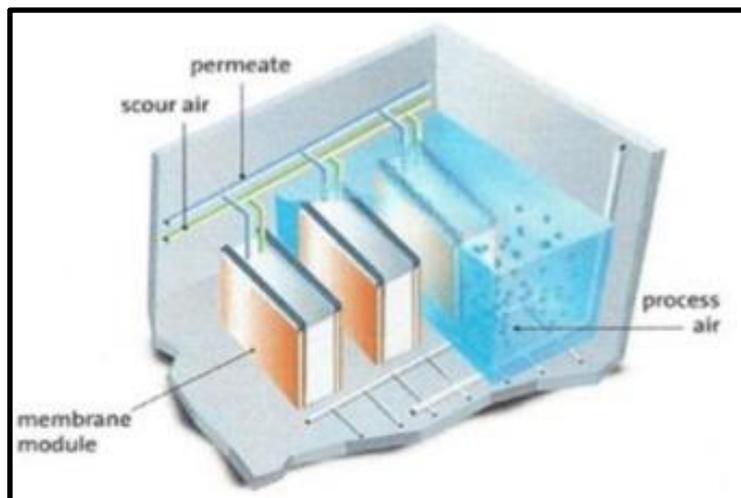


Figura: membrana sumergida

3.7.2. MEMBRANAS EXTERNAS O CON RECIRCULACIÓN AL BIOREACTOR

Esta configuración de MBR implica que el licor de mezcla es recirculado desde el bioreactor hasta la unidad de membrana que se dispone externamente a la unidad biológica. La fuerza impulsora es la presión creada por la alta velocidad del flujo a través de la superficie de la membrana (Cicek et al. 1998b; Urbain et al. 1998). La Figura 2 muestra un esquema de simplificado de este tipo de configuración.

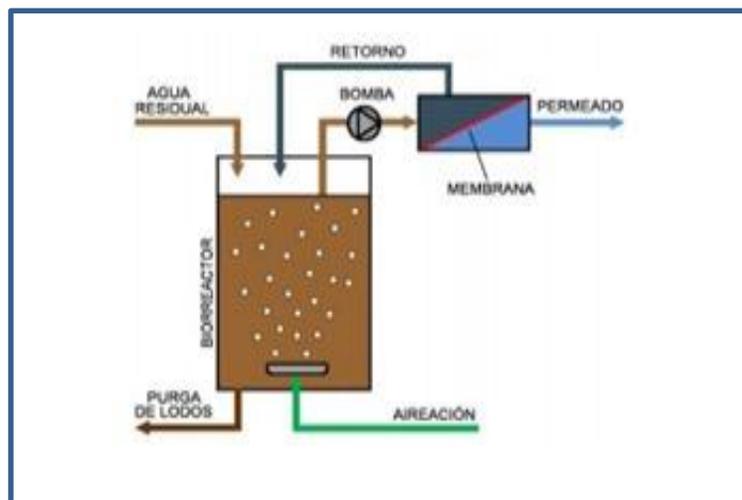


Figura: membrana externa

3.8. COMPLICACIONES EN LOS MBR POR EL ENSUCIAMIENTO DE LA MEMBRANA

Con el propósito de mejorar el rendimiento de los biorreactores de membrana, contemplando que la mayor problemática que existe en este sistema son las incrustaciones y ensuciamiento de la membrana. En este caso se diseñaron y fabricaron membranas de ultrafiltración de nanocompuestos (UF) utilizando nanopartículas de policitrato de alumoxano (PC-A) y polietersulfona (PES) hidrofílicas con de mejorar el rendimiento en el biorreactor.

Según Pirsahab, M., Farahani, M., Zinadini, S., Zinatizadeh, A., Rahimi, M., & Vatanpour., V. (2019) Esta modificación de membrana sumergida se trabajó con el fin de comparar el (PC-A) y el (PES), los resultados obtenidos demostraron que el (PC-A) es adecuado para reducir las incrustaciones en las membranas. Sin embargo, no debe exceder el % que debe agregarse a la membrana, por lo tanto, las características de antiincrustaciones deber ser óptimas para el funcionamiento de la membrana. En este estudio fue de 0.5%, logrando el mejor rendimiento del 95.2%.

Según Campo, R., Capodici, M., Di Bella, G., & Torregrossa, M. (2017). La producción de espumas, problemas de ensuciamiento siguen generando dudas en el funcionamiento de los MBR. En una investigación reciente se identificaron las

causas que radican en la generación de espumas y el ensuciamiento de la membrana por aireados intermitentes y a su vez el papel de las sustancias poliméricas extracelulares (EPS)..... para esta investigación se trabajó con una configuración de membrana sumergida. En este estudio se utilizó un parámetro (Foam Power (FP) para evaluar el potencial de espuma en donde se dedujo que la formación de esta se presentó en todos los períodos operativos del proceso. Por otra parte, el ensuciamiento de la membrana afecto progresivamente el paso del flujo debido a la presencia de microorganismos filamentosos o por la abundancia hidrofobia del floculo y la viscosidad del lodo.

3.9. PARÁMETROS DE DISEÑOS DEL MBR

Rodríguez, P., Burgos, A., López, J., (2015). Mencionan los parámetros de diseño que deben seguir los MBR, puesto que los Biorreactores de Membrana tienen una combinación de dos procesos que comprenden un reactor biológico y filtración por membrana. Además, plantean los criterios generales de que se deben aplicar en los MBR.

Los principales parámetros de diseño y operacionales de un MBR son:

- Flujo o carga hidráulica
- Conversión

- Rechazo
- Presión transmembrana
- Permeabilidad
- Resistencia a la filtración
- Recuperación de la membrana
- Aireación
- Concentración de SSLM
- Edad del fango
- Relación F/M

DISEÑOS DEL REACTOR BIOLOGICO

1. Caudales

2. Parámetros básicos del reactor biológico

- Carga másica:
- Carga volumétrica:
- Tiempo de retención celular (o edad del fango):
- Tiempo de retención hidráulica:

3. Otras variables básicas que afectan al funcionamiento del reactor biológico

- Necesidades de oxígeno:
- Producción de lodos en exceso:
- TRC de funcionamiento:
- Tasa de recirculación de lodos:

4. Criterios generales de diseño del reactor biológico

| Parámetro | Valores Habituales | Max-min | |
|----------------------------|--------------------|----------------|-------------|
| | | Membrana plana | Fibra hueca |
| Concentración SSLM (g/L) | 6-8 | 5 – 10 | <7.5 |
| Coefficiente α | 0.35-0.5 | - | - |
| Edad de fango – TRC (días) | >9 | 21 - 31 | 8-20 |
| Recirculación – R (%) | 300-500 | 300 - 400 | 150 – 250 |

5. Volumen del reactor

6. Capacidad de oxigenación requerida del reactor

DISEÑO DE LAS MEMBRANAS

Para el diseño de las membranas se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- -Flujo de membrana - F_m y presión transmembrana - ΔP_{TM}
- Flujo bruto y flujo neto
- Superficie de membrana
- Aireación de la membrana
- Número de tanques de membrana
- Criterios de diseño de membranas

| Parámetro | unidad | Sumergidas | | Flujo- | LPCF LPCF |
|------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|--------------|
| | | Fibra | Plana | | |
| Flujo bruto a 15°C | | | | | |
| Municipal | L/(m2. | 15 – 50 | 15 - 45 | 50 - 150 | 15 – 30 |
| Industrial | L/(m2. | 5 – 15 | 5 – 15 | 50 - 100 | 5 – 15 |
| η_m (neto/bruto) | | 0.85 – | 0.8 – 0.9 | 1.0 | 0.85 – |
| Concentración de fango en la | g SST/L | 8 – 15 | 8 - 15 | 12 - 30 | 8 – 15 |
| Volumen de módulo | m3 | 2 – 12 | 3 - 10 | 0.1 | 0.1 |
| Area superficial | m2/m3 | 100 – 150 | 40 - 70 | 200 - 330 | 200 – |

| | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------|------------------------|---------|-----------|
| Requerimiento específico de aire | Nm ³ /m ² | 0.1 – 0.5 | 0.3 – 1.0 0.2 – 0.6 | N.A. | 0.5 – 0.6 |
| ΔPTM de operación | bar | 0.1 – 0.2 | 0.1 – 0.2 | 2 – 4 | 0.2 – |
| Velocidad en los tubos | m/s | N.A. | N.A. | 3 - 5 | 0.5 – |
| Ratio de recirculación | | 4 – 8 | 4 - 8 | 10 - 20 | 30 - 40 |

3.10. VENTAJAS

3.10 DESVENTAJAS/LIMITES

Las principales ventajas asociadas a la tecnología MBR y que la convierten en una alternativa válida frente a las otras tecnologías son establecidas de acuerdo a lo que plantearon diferentes autores en sus estudios de investigación sobre los MBR, así mismo, se describen las desventajas o límites que aún tiene este sistema de tratamiento moderno.

| VENTAJAS | LÍMITES |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> El MBR en comparación a las otras tecnologías para el tratamiento de aguas residuales tiene una eficaz retención de los sólidos suspendidos y de los compuestos más solubles dentro del biorreactor lo que | <ul style="list-style-type: none"> El sistema de MBR requiere de una inversión inicial importante, debido a que las unidades de membrana tienen un costo bastante elevado El gasto energético que conllevan los MBR para lograr |

| | |
|--|--|
| <p>proporciona un efluente de excelente calidad capaz de cumplir los requisitos de vertido más rigurosos y potencialmente reutilizable (Chiemchaisri et al. 1992).</p> <ul style="list-style-type: none">• Al emplear unos de los sistemas de MBR, como el UF, es posible conseguir la retención de las bacterias y virus obteniéndose un efluente estéril, lo que hace que llevar a cabo costosos procesos de desinfección eliminando también la peligrosidad que llevaban asociada los subproductos de la desinfección (Cicek et al. 1998a). | <p>las presiones requeridas es similar al gasto que tienen las plantas de tratamiento convencionales</p> <ul style="list-style-type: none">• Las membranas empleadas en el MBR son susceptibles a la polarización y a un ensuciamiento constante.• Empleando el MBR es posible que haya una acumulación de compuestos inorgánicos no filtrables como metales pesados que a determinadas concentraciones pueden ser dañinos para la población bacteriana o afectar a la integridad de la membrana (Cicek et al., 1999a). |
|--|--|

- Una característica importante es que, con la ausencia del clarificador, que también actúa como un selector natural de la población bacteriana, permite que se desarrollen bacterias de crecimiento lento (bacterias nitrificantes, bacterias que degradan compuestos complejos etc.) y que persistan en el biorreactor incluso a tiempos de retención de sólidos cortos (Cicek et al, 2001).
- La membrana retiene no sólo toda la biomasa, sino que también previene el escape de enzimas exocelulares y de oxidantes solubles que crean un licor de mezcla más activo capaz

de degradar una gama más amplia de compuestos (Cicek et al., 1999c).

- Compactación: Con la tecnología MBR se puede operar bajo unas concentraciones de 15 – 30 g MLSS/L. Trabajando a la máxima concentración de MLSS la superficie de la planta se puede reducir en un 50% o más.
- Huella más pequeña, calidad de efluente ventajosa y mejor control del proceso
- Dado que los bio-reactores de los MBR pueden operar con 15-30 g MLSS/L, la edad del fango son más altas que los sistemas convencionales. La mayor parte de las plantas MBR operan a

edades de fango de 40 días o superior. Estas edades de fango elevadas pueden reducir en hasta un 40% la producción de fango con la consiguiente reducción de costes de operación. La Tabla 2 compara un proceso convencional de fangos activados con un proceso MBR en cuanto a la distinta producción de fango al variar las edades de fango del sistema.

4. CAPÍTULO 4

4.1. EL USO DE LOS BIORREACTORES DE MEMBRANA (MBR) EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Actualmente, el agua es considerado un líquido útil en los países desarrollados y para aquellos que están en un proceso de desarrollo, así mismo, según el primer informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, agua para la vida (marzo 2003), se estima que un 59 % de este recurso es destinado a uso industrial, lo cual indica que es un valor muy elevado en comparación al consumo agrícola quien recibe solo un 30% de este líquido, siendo también una parte fundamental para el desarrollo de una nación, y en cuanto al uso del agua para gasto doméstico solo se destina un 11% lo que deja un gran desequilibrio dentro de las legislaciones ambientales. Es así, según este informe, para el año 2025 las industrias tendrán un uso más elevado lo cual pasará de un uso de 752 km³ a uno mayor 1.170 km³ / año.

Por otra parte, basado en este informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, se puede evidenciar que el sector industrial es uno de los que más está gastando agua y, además, contaminando de forma exagerada y descontrolada grandes cantidades de este valioso líquido. Los países desarrollados o que están una constante evolución arrojan un 80% de los desechos peligrosos en el agua,



provocando un desperdicio casi total del mismo puesto que no se puede volver a reutilizar; desde esta misma perspectiva, se ha constatado que en los países que están en vía de desarrollo se está generando una contaminación paralela a los desarrollados, puesto que se tiene un 70 % de residuos que se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento o prevenciones para mitigar las contaminaciones. Así mismo, teniendo como punto de referencia los antecedentes dados en este reporte, podemos fijarnos que el tratamiento de las aguas residuales resulta una alternativa fundamental y valiosa en el sector industrial y también en los otros sectores, así como se plasma en un artículo propuesto por Reynolds, k., (2002) en el que se aborda la importancia del tratamiento de las aguas residuales en Latinoamérica, puesto que es uno de los continentes donde hay una basta producción de residuos sólidos que son arrojados sin ningún control y tan solo un 5% de las aguas reciben un tratamiento, por otra parte, también se menciona que en los países donde hay más déficit hídrico no se tiene un control de las aguas residuales, pero si se hace un tratamiento estas aguas residuales podría contribuir de forma positiva para mitigar esta problemática y dar un aprovechamiento significativo de las aguas que ya han prestado un servicio.

El agua es tanto un derecho como una responsabilidad, y tiene valor económico, social y ambiental. Cada ciudadano, cada empresa, ha de tomar conciencia de que el agua dulce de calidad es un recurso natural, cada vez más escaso



tanto a nivel superficial como subterráneo, necesario no sólo para el desarrollo económico, sino imprescindible como soporte de cualquier forma de vida en la naturaleza. No cabe duda de que la industria es motor de crecimiento económico y, por lo tanto, clave del progreso social. Sin embargo, con la necesidad de maximizar el proceso productivo excluye la protección del Medio Ambiente, el cual es un pilar fundamental en cualquier estilo de desarrollo.

El adecuado tratamiento de aguas residuales industriales y su posterior reutilización para múltiples usos contribuye a un consumo sostenible del agua y a la regeneración ambiental del dominio público hidráulico y marítimo y de sus ecosistemas. Sin olvidar que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria.

4.2. APLICACIONES

Los biorreactores de membrana son un sistema de tratamiento de aguas residuales que han sido empleados con gran eficiencia en los últimos años en las zonas industriales. Esto es gracias a su efectividad de tratamiento, además, es un sistema moderno que emplea membranas para obtener mejores resultados que los métodos convencionales.

Por esta razón, es importante mencionar que el sistema de biorreactor de membrana puede ser empleado para el tratamiento de aguas de diferentes industrias y en diferentes países debido a las configuraciones de membranas que existen actualmente.

Así mismo, en un artículo propuesto por Tiwari, B., Sellamuthu, B., Piché-Choquette, S., Drogui, P., Tyagi, R. D., Vaudreuil, M. A., ... & Dubé, R. (2019) titulado “la estructura de una comunidad bacteriana de un biorreactor de membrana sumergida para el tratamiento de aguas residuales hospitalarias sintéticas” y desarrollado en un tratamiento de aguas residuales municipales en Quebec, Canadá, se analizó la variación de una comunidad bacteriana a través de un biorreactor de membrana sumergido en diferentes tiempos de retención hidráulica (HRT) de 6, 12 y 18 horas, lo cual permitió dar un aporte sobre el uso de los MBR para el tratamiento de aguas residuales de hospitales, puesto que en su gran mayoría, se ha entendido que

los elementos utilizados en los hospitales no pueden ser tratados debido a su alta concentración de agentes patógenos, sin embargo, después de llevarse a cabo diferentes estudios empleando biorreactores de membrana fue posible constatar que al usar este sistema de membranas, la concentración de algunos farmacéuticos puede disminuir en un 90%. Teniendo en cuenta este resultado, se puede indicar una gran ventaja de emplear los MBR para el tratamiento de aguas que suelen estar bastante contaminadas.

Durante el estudio llevado a cabo por Tiwari, B. et al (2019), se trabajaron 6 diferentes productos farmacéuticos (ibuprofeno, estradiol, venlafaxina, carbamazepina y dos antibióticos). A través de estos productos que son bastante utilizados en las zonas hospitalarias se analizó la variación en la dinámica de la comunidad bacteriana con el SMBR usando una secuenciación de alto rendimiento, además, se tuvieron en cuenta solo estos productos puesto que el MBR utilizado era sumergido a un volumen de 6.0 L en modo continuo, lo que indicaba hacer un procedimiento en el cual solo fuera posible tratar pocos contaminantes farmacéuticos y los únicos que necesitan de un tratamiento avanzado para poder ser reusados.

Con el MBR la eliminación de los productos farmacéuticos fue uniforme a la HRT variable. En este proceso se tuvieron diferentes resultados puesto que el ibuprofeno y el estradiol tuvieron una eliminación de agentes en un 90%, sin

embargo, la venlafaxina presentó un menor nivel de eliminación con un 10%, y la carbamazepina tan solo un 5% lo que indicaba que necesitaban un proceso más arduo y complejo en el SMBR.

Sin embargo, en este estudio se presentó que al momento de añadir los fármacos la estructura de la comunidad bacteriana alteró y dio un aumento en el resultado de la abundancia de bacterias.

Por otra parte, teniendo en cuenta el estudio realizado por Bui, X. T., Chen, S. S., Nguyen, P. D., Nguyen, T. T., & Nguyen, T. B. (2019). El cual lleva por título “tratamiento de aguas residuales hospitalarias mediante biorreactor de membrana esponjosa junto con el proceso de ozonización” que fue desarrollado en una planta de tratamiento de aguas residuales de un hospital de vietnam en un laboratorio escala, se puede decir que el uso de MBR ha revolucionado los tratamientos de agua que existían antes, y esto es debido a la gran eficiencia que tienen estos sistemas, sin embargo, es necesario mencionar que no solo existen sistemas MBR, sino que estos biorreactores son complementados con otros sistemas y clasificaciones de membranas para poder trabajar con las aguas residuales de diferentes sectores.

En el caso de Bui, X. T., et al, (2019), el MBR fue trabajado con una membrana esponjosa lo que permitía una mayor eficiencia en la eliminación de los

antibióticos provenientes de las aguas residuales del hospital, además, para poder llevar a cabo este proceso de tratamiento se tuvo que utilizar distintos procesos, puesto que se querían eliminar los antibióticos que resultaban más frecuentes, los cuales era norfloxacin, ciprofloxacina, ofloxacino, sulfametoxazol, eritromicina, tetraciclina y trimetoprima.

Estos antibióticos son los principales contaminantes de las aguas residuales de estos hospitales, ya que son ampliamente utilizados en los medicamentos y su porcentaje de uso es bastante elevado, sin embargo, en las normas ambientales y precauciones de los hospitales no existe un sistema que ayude a tratar los restantes de cada uno de ellos, sino que son arrojados a vertederos o flujos hídricos sin un previo tratamiento.

Por esta razón, este estudio tuvo también como enfoque evaluar el sistema de biorreactor de membrana con el proceso de esponja y de esta manera determinar el rendimiento del tratamiento bajo diferentes flujos.

Como resultado se obtuvo que mientras los antibióticos fueron eliminados alrededor de un 45 a 93%, la tetraciclina se eliminó por completo a una escala de 100%, pero esto se dio gracias al biorreactor de membrana esponjosa utilizado en este tratamiento bajo un flujo de 10 LM H.

Sin embargo, para poder tener una mejora en el proceso de eliminación de los antibióticos que tenía el agua, fue necesario emplear un proceso de ozonización para poder tratar a membrana. Cabe resaltar que este es un proceso terciario que se realiza para eliminar los contaminantes que están afectando el tratamiento del agua, y en este caso, se usó para desinfectar y eliminar microorganismos que quedan al final del proceso de la membrana.

Ahora, basado en el estudio realizado por Maleki, E., Bokhary, A., Leung, K., & Liao, B. Q. (2019). Sobre el rendimiento a largo plazo de un biorreactor de membrana anaeróbico sumergido para el tratamiento de las aguas residuales de malta a una temperatura ambiente de 22 a 24 °C, en Canadá, en el cual se quería tratar e investigar las aguas residuales a una temperatura ambiente provenientes de una fábrica de malta, utilizando un biorreactor de membrana anaeróbico sumergido a largo plazo, puesto que Canadá presenta una temperatura poco estable y variable, que puede estar entre 14°C a 18°C, por lo tanto, al querer implementar un sistema de membranas aeróbico sumergido, las probabilidades de obtener resultados óptimos es muy baja, además que es necesario tener una temperatura ambiente en la que se pueda tratar sin complicaciones el agua residual.

De esta manera, con el biorreactor de membrana anaeróbico sumergido se puede alcanzar unos resultados positivos en relación a la eliminación de materia

orgánica en las aguas, además, el sistema de membrana anaeróbico demanda de un porcentaje muy mínimo de oxígeno para poder hacer el proceso de tratamiento con las bacterias, y estas pueden estar en un cuarto cerrado en el que se pueda modificar la temperatura de acuerdo a la que se necesite, en este caso entre 22 a 24°C.

Por otra parte, con el biorreactor de membrana anaeróbico se consume más materia orgánica por lo que comparación con el sistema aeróbico la producción de lodo es más baja, y esto es gracias a que las bacterias que se necesitan para el tratamiento se alimentan constantemente de esta materia sin necesitar grandes de oxígeno, sino que ellas pueden hacer su proceso de una forma constante y sumergida.

En cuanto a la eficiencia encontrada por Maleki, E., et al, (2019) con el biorreactor de membrana anaeróbico sumergido fue de un 97% efectiva, pero esto se dio gracias a que la membrana utilizada desde el inicio del tratamiento era virgen, la cual tenía una limpieza y permeabilidad del 100%, sin embargo, en cuanto al proceso de recuperación de la permeabilidad de la membrana a través de imágenes del microscopio electrónico de barrido (SEM) y los espectros de dispersión de energía de rayos-X (EDX), mostraron que el ensuciamiento irreversible había ocurrido cuando la membrana fue reutilizada y trabajada por una larga duración.

Otro estudio realizado por Cheng, H., Hiro, Y., Hojo, T., & Li., (2018) sobre la mejora de la fermentación de metano de los desechos alimentarios mediante el uso de un biorreactor de membrana anaeróbica de fibra hueca, en el cual se querían analizar los efectos de tasa de carga orgánica (OLR) en la fermentación anaeróbica de los residuos alimentarios en Japón, para desarrollar este estudio, los investigadores utilizaron un biorreactor de membrana anaeróbico de fibra hueca, puesto que este es utilizado para procedimientos de nanofiltración en los cuales se requiere una cantidad baja de carga orgánica, además es un sistema que tiene las membranas con un espacio muy diminuto en el que es posible retener la mayor cantidad materia orgánica. Además, Li et al, (2019) compararon este proceso con otros tratamientos, en el cual la tasa de producción de biogás fue más alta en el OLR con 9.72 g- COD, y respecto a la eficiencia de eliminación de materia orgánica se encontró que también fue más alto y el VFA estaba en menor concentración.

Por otra parte, de acuerdo a la eficiencia de conversión de COD, los investigadores mencionaron diferentes resultados 92.9%, 85.3%, 82.6% y 80.4% en OLR de 2.43, 4.86, 7.29 y 9.72 g-COD/L/d, respectivamente. La principal incrustación de membrana fue causada por el bloqueo orgánico de poros, representando el 59.6% de la resistencia hidráulica total después de la operación a largo plazo. El rendimiento del biorreactor de membrana anaeróbico de fibra hueca se

comparó con un reactor de tanque continuamente agitado (CSTR) y un reactor auto agitado (SAR).

Teniendo en cuenta otros estudios realizados con los biorreactores de membrana, se pueden describir cómo han sido empleados a nivel mundial, en diferentes industrias, como se puede describir en el estudio realizado por Schoeberl y Col. (2005), en el cual utilizaron un MBR aeróbico para el tratamiento de aguas textiles, en este artículo encontraron que la eliminación de DQO y el color de las aguas residuales de esta industria fueron del 89 al 94%. Por otra parte, paralelo a este estudio Brik et al. (2011), condujeron una investigación en la cual observaron el proceso de las aguas residuales de la industria textil, en la que hallaron que el MBR redujo de 60 a 95% de DQO y respecto a al color del agua a 525 nm. Estos investigadores mencionaron que el mecanismo principal de eliminación del color en el agua era debido a la adsorción de moléculas de tinte sobre la biomasa, puesto que el proceso de biodegradación desempeñaba una función más pequeña que en la eliminación del color como la naturaleza persistente de los colorantes producidos por la industria textil en los sistemas de lodo activado.

Sin embargo, Yun y col. (2006) en una investigación descubrieron que la eficiencia de eliminación de colorante y DQO promedio fue de 94.8% y 72.9%, respectivamente, por tratamiento con MBR aeróbico. Se sabe que un colorante azo



sintético no se puede biodegradar y solo se puede eliminar mediante adsorción a las células microbianas seguido de la extracción de lodos. Por lo tanto, la eficiencia de eliminación del colorante en el reactor aeróbico podría atribuirse principalmente a la adsorción del colorante en las células bacterianas (lodo activado).

DQS is member of:



tratamiento. Por esta razón, los Biorreactores de Membrana (MBR) son la opción más acertada a pesar de que los costos de construcción y operación son elevados tienen gran eficiencia y pueden proporcionar un agua de alta calidad adecuada para cumplir con los límites de vertido e idónea para la reutilización del agua tratada.

Los biorreactores de membrana (MBR) son una modificación hecha al tratamiento convencional de lodos Activados con el fin de mejorar el proceso y la eficiencia del biorreactor. Además, reducir espacios en la construcción y del mismo reducir costos. A pesar de que este sistema resulta costoso por la puesta en marcha y costos de mantenimiento y cambio periódico de la membrana es una alternativa futura para el tratamiento de las aguas residuales en donde se obtienen efluentes de alta calidad y con posible reutilización de este recurso. Los MBR reducen el sistema de tratamiento eliminando el sedimentador secundario y un tratamiento terciario reemplazado por una unidad de membrana de filtración para generar un efluente libre de sólidos y de microorganismos.

Para la implementación del MBR es importante considerar que, aunque los costos son elevados se pueden mejorar dependiendo de la configuración de la membrana y modalidad con que se trabaje el biorreactor, este costo se pueden reducir de manera significativa. El uso del MBR con membrana sumergida es la configuración más viable ya que reduce los espacios de diseño, costos energéticos

que se generan en la recirculación en una disposición con membrana externa.

Además, en comparación con los lodos activados el volumen del MBR es menor porque trabaja con concentraciones mayores a las de los sistemas convencionales y tiempos de retención de sólidos mayores, por este motivo la producción de lodos es menor y permite gran variedad de microorganismos para la degradación de la materia orgánica.

Los inconvenientes que presentan los MBR están sujetos al ensuciamiento de la membrana debido a las incrustaciones y acumulación de los sólidos que limitan el paso del flujo a través de la membrana. Este sistema comparado con los tratamientos convencionales es efectivo, sin embargo, a pesar de las complicaciones que tiene se puede ver como una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales en especial a las de tipo industrial, que además de utilizar el agua limpia para los diferentes procesos en su gran mayoría de las industrias vierten el agua sin ningún tratamiento. Además, los compuestos orgánicos e inorgánicos que se identifican en las aguas residuales industriales por lo general no se eliminan por un tratamiento convencional ya sea por las altas concentraciones o por su naturaleza química. Por ende, los tratamientos avanzados en las aguas residuales se convierten en una opción viable a la hora de tratar este tipo de aguas, debido a que estos compuestos son objeto de regulación especial por su toxicidad o los efectos que puede presentar a largo plazo.

Se debe considerar que aún falta mucho por indagar, aunque los nuevos estudios sobre los MBR apuntan a la reutilización de las aguas residuales provenientes del sector industrial, con el fin de darle un aprovechamiento significativo en riegos para cultivos, utilización en las fuentes de parques, para lavados y aseo en general de las mismas industrias. Aun no se resuelven los problemas relacionados con ensuciamiento de la membrana y los métodos prácticos de limpieza, reducción de costos de mantenimiento y sustitución de la membrana, optimización de las necesidades de energía y mano de obra siguen generando limitaciones en la implementación de este sistema, sin embargo, con el paso de los años ha aumentado el uso del MBR a nivel mundial por lo que es considerado un sistema procedimental apto para la depuración de las aguas residuales.

En los Países desarrollados como Japón, países europeos y América del Norte es donde más se han extendido la tecnología MBR. América latina debe considerar la implementación de nuevas tecnologías con el fin de tratar las aguas residuales provenientes de los diferentes sectores, teniendo en cuenta que las aguas residuales domesticas en su gran mayoría son vertidas sin ningún tipo de tratamiento, tan solo el 5% de estas aguas son depuradas con tratamientos convencionales. Colombia como país subdesarrollado deben invertir en nuevas tecnologías y proyectos de investigación que ayuden a contribuir en el mejoramiento y manejo adecuado del

agua. Por esta razón, el uso de los MBR ofrecerá beneficios significativos en los sectores que decidan implementar esta tecnología, pensando en una posible reutilización del agua tratada para los diferentes usos, a su vez se hará un ahorro en el consumo del recurso. La implementación de los MBR puede resultar muy costosa al principio, pero a medida que sean usados el costo de este irá disminuyendo significativamente por la comercialización del mismo.

Es importante adentrarnos en las investigaciones que contribuyen al mejoramiento de las complicaciones que emergen en el uso de los biorreactores de membrana. Cuando se logre mejorar el sistema y reducir los costos de operación el MBR será la tecnología adecuada para ser utilizada en la depuración de cualquier tipo de agua residual, especialmente a aquellas que requieren de otros tratamientos avanzados. El agua es un recurso vital para la vida, pero el uso inadecuado y la fuerte demanda que tiene por el crecimiento poblacional hacen que cada día sea más escaso este recurso. Es por esto que las nuevas tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales deben apuntar a mejorar la eficiencia, reducir los espacios, menores costos de construcción y operación para competir con los demás tratamientos convencionales que por años han sido empleados en el tratamiento de las aguas.

CONCLUSIONES

Los MBR representan una solución impenetrable en el tratamiento de las aguas residuales en donde se cuentan con espacios reducidos para la implementación de sistemas de tratamiento que pretendan lograr efluentes de alta calidad y la reutilización del agua tratada para darle usos de aprovechamiento.

Al implementar los MBR en diferentes campos, la eficacia de eliminación global de DQO se puede mantener en un buen promedio, lo que significa que son muy aptos en cualquier sector debido a sus grandes avances durante los últimos 15 años. Además, las concentraciones de sólidos en suspensión que se pueden alcanzar con este sistema de tratamiento son excelentes puesto que se puede lograr un equilibrio de oxidación entre la materia orgánica y el ensuciamiento de la membrana sin tener que realizar otros procesos opcionales.

Por otra parte, en cuanto a la actividad de la biomasa con los MBR se considera apropiada y satisfactoria, debido a que cuenta con los estándares de referencias. Así mismo, teniendo en cuenta el promedio de eliminación de algunos elementos como el nitrógeno, fósforo y azufre con este sistema moderno de tratamiento pueden ser respectivamente buenos.



Es así, el sistema de biorreactor de membranas ha sido un objeto de estudio durante muchos años, puesto que, a través del mismo, se quieren lograr mejores resultados y que en cuanto a los procesos de degradación de materia orgánica y eliminación de agentes contaminantes cada vez sean mejores.

La utilización de un MBR con membrana sumergida logra una mejora en la reducción de áreas de construcción y reducción de los costos de energía consumida en comparación con la configuración de membrana externa, además logra reducir en mayor proporción la producción de lodos.

En comparación con los lodos activados el MBR ocupa menor volumen y trata altas concentración de carga orgánica, lo cual hace de este sistema una opción viable en cualquier sector industrial, teniendo, además, una clasificación de membranas que pueden ser incrustadas dependiendo los agentes que se quieran eliminar.

REFERENCIAS

Ayala, M. E., Mesa, G. P., & Montoya, J. L. (2006). Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (38), 53-63.

Barreto, C. M., Garcia, H. A., Hooijmans, C. M., Herrera, A., & Brdjanovic, D. (2017). Assessing the performance of an MBR operated at high biomass concentrations. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 528-537.

Bohórquez Rincón, C. G., & Sarmiento Higuera, D. A. (2017). Análisis del uso de biorreactores de membrana para tratamiento de aguas residuales y posible implementación en Colombia.

Buer, T., & Cumin, J. (2010). MBR module design and operation. *Desalination*, 250(3), 1073-1077.

Bui, X. T., Chen, S. S., Nguyen, P. D., Nguyen, T. T., & Nguyen, T. B. (2019). Hospital wastewater treatment by sponge membrane bioreactor coupled with ozonation process. *Chemosphere*, 230, 377-383.

Campo, R., Capodici, M., Di Bella, G., & Torregrossa, M. (2017). The role of EPS in the foaming and fouling for a MBR operated in intermittent aeration conditions. *Biochemical engineering journal*, 118, 41-52.

Cheng, H., Hiro, Y., Hojo, T., & Li, Y. Y. (2018). Upgrading methane fermentation of food waste by using a hollow fiber type anaerobic membrane bioreactor. *Bioresource technology*, 267, 386-394.

Chiemchaisri, C., Wong, Y. K., Urase, T., & Yamamoto, A. K. (1992). Organic stabilization and nitrogen removal in membrane separation bioreactor for domestic wastewater treatment. *Water science and technology*, 25(10), 231-240.

Cicek, N., Macomber, J., Davel, J., Suidan, M. T., Audic, J., & Genestet, P. (2001). Effect of solids retention time on the performance and biological characteristics of a membrane bioreactor. *Water Science and Technology*, 43(11), 43-50.

del Agua, F. C. C. (2003). Introducción a los bioreactores de membranas. In *Introducción a los bioreactores de membranas*. Centro Canario del Agua.

Delgadillo, O. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Nelson Antequera.

Díaz, O., González, E., Vera, L., Macías-Hernández, J. J., & Rodríguez-Sevilla, J. (2017). Fouling analysis and mitigation in a tertiary MBR operated under restricted aeration. *Journal of membrane science*, 525, 368-377.

Fenu, A., De Wilde, W., Gaertner, M., Weemaes, M., De Gueldre, G., & Van De Steene, B. (2012). Elaborating the membrane life concept in a full scale hollow-fibers MBR. *Journal of membrane science*, 421, 349-354.

Garnika, J. L., & Trouvé, E. (2004). Criterios técnico-económicos para la implantación de la tecnología de bioreactores de membrana. *Tecnología del agua*, 24(253), 62-69.

Gómez, E. G. (1993). Tratamientos anaerobios de las aguas residuales domésticas. *Revista de Ingeniería*, (4), 1-12

- Hwang, J. S., Kim, J. N., Wee, Y. J., Yun, J. S., Jang, H. G., Kim, S. H., & Ryu, H. W. (2006). Preparation and characterization of melamine-formaldehyde resin microcapsules containing fragrant oil. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 11(4), 332-336.
- Iglesias, R., Simón, P., Moragas, L., Arce, A., & Rodriguez-Roda, I. (2017). Cost comparison of full-scale water reclamation technologies with an emphasis on membrane bioreactors. *Water Science and Technology*, 75(11), 2562-2570.
- Iorhemen, O., Hamza, R., & Tay, J. (2016). Membrane bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: membrane fouling. *Membranes*, 6(2), 33.
- Kaya, Y., Bacaksiz, A. M., Bayrak, H., Vergili, I., Gönder, Z. B., Hasar, H., & Yilmaz, G. (2019). Investigation of membrane fouling in an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating pharmaceutical wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 31, 100822.
- Kimura, K., & Uchida, H. (2019). Intensive membrane cleaning for MBRs equipped with flat-sheet ceramic membranes: Controlling negative effects of chemical reagents used for membrane cleaning. *Water research*, 150, 21-28.
- Lapeña, M. R. (1989). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales* (Vol. 27). Marcombo.
- Maleki, E., Bokhary, A., Leung, K., & Liao, B. Q. (2019). Long-term performance of a submerged anaerobic membrane bioreactor treating malting wastewater at room temperature ($23\pm 1^\circ\text{C}$). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 103269.

Mara, D. D., Cairncross, S., & World Health Organization. (1990). Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura: medidas de protección de la salud pública.

Orozco, A. (2005). *Bioingeniería de aguas residuales*. acodal.

Pirsaheb, M., Farahani, M. H. D. A., Zinadini, S., Zinatizadeh, A. A., Rahimi, M., & Vatanpour, V. (2019). Fabrication of high-performance antibiofouling ultrafiltration membranes with potential application in membrane bioreactors (MBRs) comprising polyethersulfone (PES) and polycitrate-Alumoxane (PC-A). *Separation and Purification Technology*, 211, 618-627.

Ramallo, R. S. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté.

Ramón, A. J., & Maldonado, J. I. (2013). Sistema de tratamiento para aguas residuales industriales en mataderos. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 1(1).

Reynolds, K. A. (2002). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. *Latinoamérica*, 48-49.

Rodríguez, P., Burgos, A., López, J., (2015). *BIORREACTORES DE MEMBRANA (BRM)*.inditex

Romero Rojas, J. A. (1999). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. *JA Romero Rojas, Tratamiento de aguas residuales, teoria y principios de diseño*, 17-23.

Rubio, D. I. C., Calderón, R. A. M., Gualtero, A. P., Acosta, D. R., & Sandoval, J. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. *Ingeniería y Región*, (13), 73-90.

Sastriques, F. O., & Gallego, R. O. (2007). El riego con aguas de mala calidad en la agricultura urbana. Aspectos a considerar. II. Aguas residuales urbanas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(3), 25-27.

Schoeberl, M. R., Douglass, A. R., Joiner, J., Ziemke, J., Strahan, S., & GEST, U. (2005). Improved Tropospheric Ozone Residual and Comparisons to the GMI Model. *molecules*, 10, 37.

Techno-economic evaluation and comparison of PAC-MBR and ozonation-UV revamping for organic micro-pollutants removal from urban reclaimed wastewater

Tiwari, B., Sellamuthu, B., Piché-Choquette, S., Drogui, P., Tyagi, R. D., Vaudreuil, M. A., ... & Dubé, R. (2019). The bacterial community structure of submerged membrane bioreactor treating synthetic hospital wastewater. *Bioresource technology*, 286, 121362.

Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista Ion*, 27(1), 17-34.

van den Brink, P., Satpradit, O. A., van Bentem, A., Zwijnenburg, A., Temmink, H., & van Loosdrecht, M. (2011). Effect of temperature shocks on membrane fouling in membrane bioreactors. *Water research*, 45(15), 4491-4500.

Vera, L., Ruigómez, I., González, E., Bodelón, P., & Rodríguez-Sevilla, J. (2014). Biorreactores de membrana anaerobios para tratamiento de aguas residuales domésticas. Estudio preliminar. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5(4), 1-15.