

AVANCES EN EL USO DE MEMBRANAS SINTÉTICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA

Advances in the Use of Synthetic Membranes for Water Treatment

Estefanía Espinoza Márquez^{*1}, Genaro Martín Soto Zarazúa¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
e_espinozam@hotmail.com

RESUMEN

En el presente artículo se revisan los progresos de la tecnología de membranas para su aplicación en los procesos de tratamiento de agua y su potencial para generar sistemas de reutilización y potabilización mediante estrategias más eficientes y costeables que las convencionales. Los avances en el área de nanomateriales han ofrecido la posibilidad de manipular las características físicas y químicas de las membranas para mejorar su permeabilidad y selectividad a cierto tipo de contaminantes y disminuir el problema de incrustación, el cual es su principal factor de disminución de rendimiento. El objetivo de esta revisión es describir cómo los avances en la ciencia de materiales y nanotecnología, integrados con la tecnología de membranas para el tratamiento de agua, permiten disminuir el problema de incrustación en membranas, así como mejorar la selectividad de contaminantes, por lo que demuestran ser una estrategia efectiva para optimizar los procesos de tratamiento existentes y hacer viable el desarrollo de sistemas de bajo consumo de energía con un uso más eficiente de los recursos.

Palabras clave: Membrana, nanomateriales, nanofibras, tratamiento de agua, incrustamiento, procesos integrados

ABSTRACT

This paper reviews the progress of membrane technology for its application in water treatment processes and its potential to generate reuse and purification systems through more efficient and affordable strategies than conventional ones. Advances in the area of nanomaterials have offered the possibility of manipulating the physical and chemical characteristics of the membranes to improve their permeability and selectivity to certain types of pollutants and reduce the problem of fouling, which is their main factor of decrease in performance. The objective of

this review is to describe how advances in materials science and nanotechnology integrated with membrane technology for water treatment reduce the problem of membrane fouling, as well as improve the selectivity of contaminants, thus proving to be an effective strategy to optimize the existing treatment processes, and enabling the development of low energy consumption systems with a more efficient use of resources.

Keywords: membrane, nanomaterials, nanofibers, water treatment, fouling, integrated processes.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de desarrollar sistemas de tratamiento de agua mediante la integración de tecnología avanzada que optimice los rendimientos y recuperen energía y recursos ha surgido a raíz de que el manejo convencional del agua es cada vez más difícil de sostener, debido a factores que impiden el suficiente abasto de los suministros públicos, tales como el crecimiento de la población, la urbanización y el cambio climático [1].

Las aguas superficiales y subterráneas se extraen del medio ambiente, a menudo, desde ubicaciones remotas y se transportan a las áreas urbanas, donde tras su recolección, uso y tratamiento, su calidad inicial disminuye; posteriormente, se transportan y descargan de vuelta al medio ambiente en lugares alejados. Este modo de manejo del agua se conoce como sistema lineal, y se requiere de un esfuerzo inmenso y nuevas estrategias para conseguir un sistema de recuperación y reciclaje que haga un uso óptimo del agua, la energía y los nutrientes en el sistema de agua urbano para satisfacer las cambiantes necesidades [2].

Una forma de lograr este objetivo es mediante el aumento de la reutilización del agua, para lo que es necesario crear un modelo de infraestructura avanzada con diseños de sistemas orientados a este fin específico. Por lo tanto, se deben desarrollar sistemas integrados para diseñar nuevas



plantas de tratamiento de aguas que optimicen los rendimientos y recuperen energía y recursos [1]. La creación de instalaciones que tomen estas consideraciones se reflejará en el valor del agua, nutrientes, energía y otros recursos; además, garantizará la calidad requerida de los efluentes.

Esta revisión tiene el objetivo de ilustrar cómo el uso de la tecnología de membrana para el tratamiento de agua ha logrado aumentar su versatilidad a través de los avances en el área de materiales y la nanotecnología, lo que hace viable el desarrollo de sistemas que permiten no sólo la descontaminación del agua, sino el aumento de su eficiencia, el ahorro de energía, la recuperación de nutrientes y su adaptabilidad a los sistemas de tratamiento existentes para lograr la optimización de estos.

Principio del Tratamientos de Agua

El tratamiento del agua puede definirse como el procesamiento de ésta para proporcionarle una calidad que cumpla con los estándares establecidos por el usuario final o una comunidad a través de sus agencias reguladoras. Tradicionalmente los tratamientos de agua están compuestos por la combinación de distintos procesos unitarios que resultan en tres fases: 1) el tratamiento primario, que incluye procesos de purificación de naturaleza física y química; 2) el secundario, que consta del tratamiento biológico de las aguas residuales; y 3) el tratamiento terciario, en el cual el agua se convierte en agua de alta calidad que puede utilizarse para diferentes tipos de propósitos, es decir, para consumo humano y uso industrial, medicinal y agrícola [3]. Los procesos

Tabla 1. Procesos unitarios del tratamiento de agua.

Proceso	Descripción
Cribado	La retención de una sustancia por una pantalla que tiene un tamaño de malla más pequeño que la sustancia a retener.
Gravedad de asentamiento	Una partícula que cae bajo la influencia de la gravedad se llama sedimentación.
Coagulación	La neutralización de carga de un coloide cargado negativamente, generalmente por medios químicos, como el uso de alumbre o compuestos férricos.
Floculación	Un proceso unitario que promueve colisiones entre partículas que se unen entre sí al contacto, creciendo en tamaño para aumentar la velocidad de asentamiento.
Filtración	La convección de una corriente de agua a través de un medio poroso con la intención de retener partículas suspendidas dentro del medio.
Transferencia de gas	El transporte de gas entre la fase disuelta en agua y una fase gaseosa.
Adsorción	La unión de una molécula a un sitio de adsorción proporcionado por la superficie interna de un material adsorbente. El carbón activado es el adsorbente más conocido para un sistema de ingeniería, aunque prácticamente cualquier material sólido puede proporcionar sitios de adsorción.
Separación de membranas	Microfiltración, Ultrafiltración, Nanofiltración, Ósmosis inversa.

unitarios del tratamiento del agua se definen como un sistema diseñado para efectuar ciertos cambios de estado previstos para el agua; éstos se incluyen en la Tabla 1 [5].

Los procesos unitarios se combinan para formar los trenes de tratamiento, cuyas combinaciones pueden llegar a ser muy numerosas. Los más comunes son (a) para agua potable y (b) para aguas residuales, como se muestra en la figura 1 [4].

Dentro de los procesos unitarios, pueden incluirse los tratamientos terciarios para mejorar la calidad del agua final. El tratamiento terciario exige una calidad más alta y, por lo tanto, requiere la aplicación de métodos más sofisticados y costosos. La tecnología de membrana tiene un gran potencial para acortar y simplificar las largas cadenas de tratamiento de los procesos unitarios fisicoquímicos y biológicos necesarios para satisfacer estrictos criterios de calidad del agua.

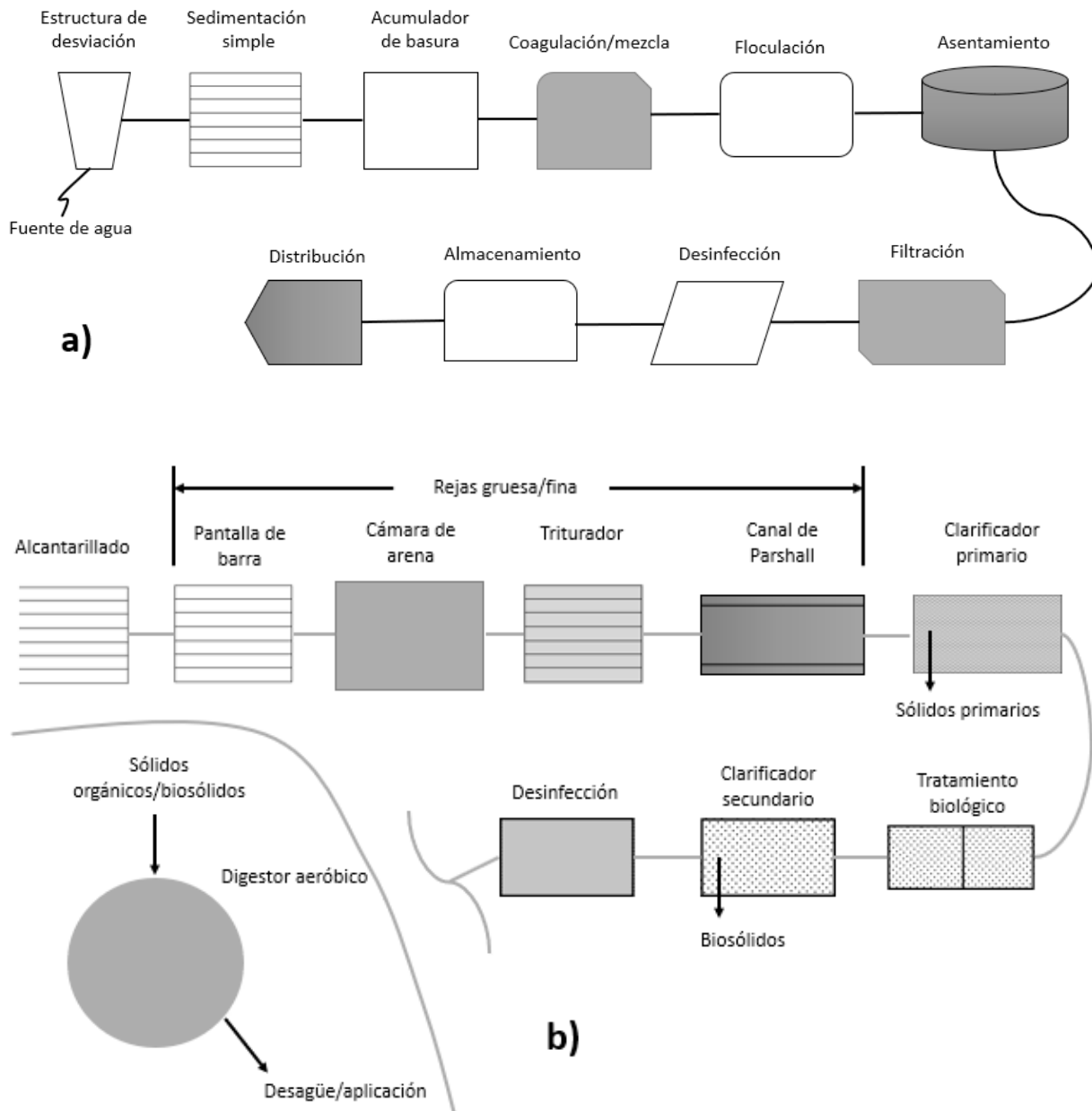


Figura 1. Ejemplo de trenes de tratamiento: (a) agua potable; (b) aguas residuales municipales.



Tecnología de Membranas para el tratamiento de agua

El término “membrana” se define como una barrera que separa dos corrientes de fluido y facilita el transporte de masa selectiva entre estas dos corrientes [5]. La tecnología de membrana se ha convertido en una importante técnica de separación en las últimas décadas. Ésta tiene una amplia aplicación industrial tanto en gestión del agua como en tecnología química y se utiliza en una extensa gama de aplicaciones [6]. La tecnología de membrana se aplica a varios procesos de separación, cada uno de los cuales utiliza un tipo distinto de membrana y los detalles del método difieren [7]. En general, las membranas son capas delgadas que pueden tener estructuras significativamente diferentes, pero todas tienen la característica común de transporte selectivo a diferentes componentes en una alimentación. Las membranas pueden ser homogéneas o heterogéneas, simétricas o asimétricas y porosas o no porosas. La alta porosidad, el tamaño de poro ajustable, la distribución del tamaño de poro, la amplia gama de materiales elegidos y la funcionalización de la superficie disponible han proporcionado la flexibilidad de diseñar a medida las membranas para numerosas aplicaciones, existentes y emergentes [8]. Según sus aplicaciones técnicas pueden clasificarse por las características que se muestran en la Tabla 2 [9]:

Hoy en día, la membrana ha ganado una amplia aceptación e importancia en diversas áreas debido a la flexibilidad y la fiabilidad del rendimiento de su sistema, la competitividad de costos, la creciente demanda y la conciencia ambiental; además, tiene diseño modular y bajos costos operativos [9]. Los procesos de filtración por membrana son reconocidos como las tecnologías más efectivas para la reutilización y recuperación de aguas residuales gracias a sus excelentes resultados, especialmente para la eliminación de micro contaminantes [10], [11]. Dadas las características inherentes de las membranas, no se necesitan aditivos químicos, insumos térmicos ni regeneración de vida media gastada, lo que las hace más populares que otras tecnologías de tratamiento de aguas [12]. Los avances recientes de estas membranas para aplicaciones de filtración de agua incluyen microfiltración (MF) ($d = 50\text{--}500\text{ nm}$), ultrafiltración (UF) ($d = 2\text{--}50\text{ nm}$), nanofiltración (NF) ($d = 1\text{--}2\text{ nm}$) y ósmosis inversa (OI) ($d < 1\text{ nm}$) (Figura 2) [13]; todos ellos son procesos de membrana impulsados por presión que se aplican con frecuencia en plantas de tratamiento de agua [14]. La filtración por membrana permite el paso de solventes de agua pero rechaza solutos, gases, fluidos y varias partículas presentes en el agua contaminada. Como regla general, la MF es adecuada para la eliminación de sólidos en suspensión, incluidos microorga-

Tabla 2. Características de las membranas.

Características de las membranas	
Material que la compone	Polímeros orgánicos, materiales inorgánicos (óxidos, cerámicas, metales), matriz mixta o materiales compuestos.
Sección transversal	Isotrópico (simétrico), integralmente anisotrópico (asimétrico) o compuesto de matriz mixta.
Método de preparación	Separación de fases (inversión de fase) del polímero, proceso sol-gel, reacción de interfaz, estiramiento, extrusión, grabado de huellas o micro fabricación
Forma de membrana	Lámina plana, fibra hueca, capilar, tubular o cápsula

nismos como los protozoos y las bacterias; se requiere UF para la eliminación de virus y macromoléculas orgánicas hasta un tamaño alrededor de 20 nm; el NF puede eliminar los iones orgánicos más pequeños y los iones multivalentes; mientras que la OI es adecuada incluso para la eliminación de todas las especies disueltas (0.2 –0.4 nm), hasta los iones monovalentes [11], [15]. Tanto el agua de mar, que presenta concentraciones de sales de 30,000–40,000 mg/l, como el agua salobre, con concentración de 500–17,000 mg/l, se pueden desalinizar mediante un proceso de OI: aproximadamente 19 % de las plantas de desalinización del mundo han instalado con éxito la membrana de OI [16], [17].

La (OI) tiene aceptación mundial en aplicaciones de tratamiento de agua y desalinización. Es un proceso impulsado por la presión mediante el cual una membrana semipermeable rechaza los componentes disueltos presentes en el agua de alimentación. Este rechazo se debe a la exclusión de tamaño, la exclusión de carga y las interacciones físicoquímicas entre soluto, disolvente y membrana [3], [18]. La eficiencia del proceso depende de los parámetros operativos y de las propiedades de la membrana y el agua de alimentación [11]. Aunque el gasto de energía que requieren los procesos de OI es

alto, el consumo promedio de energía en las plantas de DOI (desalinización por ósmosis inversa) se ha reducido a un quinto durante estos 40 años gracias a los avances en la tecnología de membranas y a la implementación de nanomateriales para aumentar su eficiencia y selectividad [19]. Si el objetivo es producir agua potable, se puede agregar OI junto con varios otros procesos de filtración con tecnologías de membranas [4].

Incrustación en membranas

El principal obstáculo para la aplicación de los procesos de membrana para el tratamiento de agua es la rápida disminución del flujo de permeado y, por lo tanto, de la eficiencia de la filtración a lo largo del tiempo como resultado de la incrustación en la membrana [20], [21]. La incrustación se refiere a la acumulación de contaminantes en la superficie o dentro de la matriz porosa de una membrana [22]. Conseguir un sistema de tratamiento de agua confiable, segura, sensible y rentable se ha convertido en el aspecto más difícil de lograr respecto a la purificación y desalinización del agua [16]. La incrustación de las membranas es causada por complejas interacciones físicas y químicas entre los diversos componentes presentes en el flujo de alimentación y la superficie de la membrana;

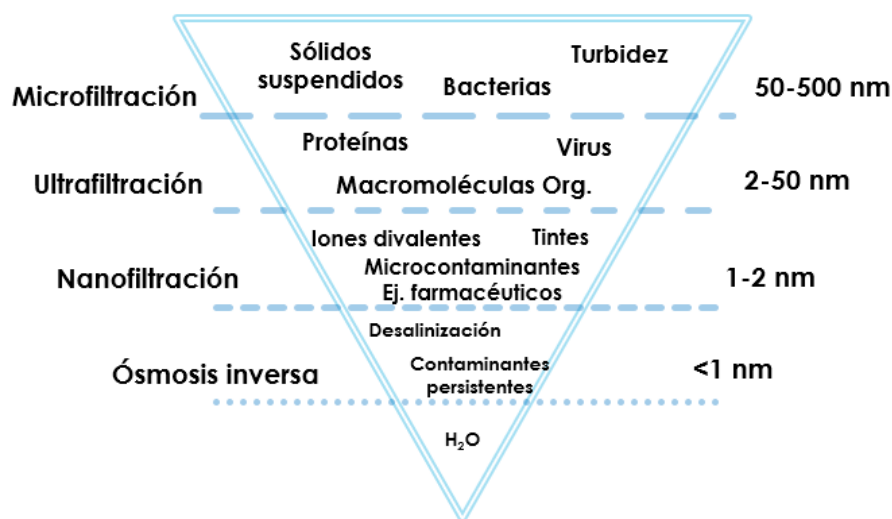


Figura 2. Técnicas de filtración por membrana.



el transporte masivo puede conducir a la fijación, acumulación o adsorción de materiales en las superficies y/o dentro de los poros. Se ha demostrado que las características de tipo de incrustaciones están determinadas por la composición del agua de alimentación, la concentración de los principales componentes, la química del agua (pH, fuerza iónica y concentración de cationes divalentes), las propiedades de la membrana (morfología de la superficie, hidrofobia, carga y corte de peso molecular), temperatura, modo de operación y condiciones hidrodinámicas (flujo de permeado inicial y velocidad de flujo cruzado) [23]. Por lo tanto, cualquier factor que pueda cambiar las características hidrodinámicas de los módulos de membrana y las características químicas de las aguas de alimentación afectaría el rendimiento general de la membrana. En consecuencia, los efectos físicos y químicos combinados controlarán la gravedad de la incrustación y qué estrategias serán efectivas para controlarla [21]. Los contaminantes que generan la incrustación se pueden clasificar en las siguientes cuatro categorías [21]:

Incrustación en membranas por materia orgánica natural

En los procesos de filtración por membranas la desinfección aún es necesaria, ya que éstas no pueden eliminar los compuestos de carbono orgánico asimilable (COA), que son uno de los factores más importantes que afectan el nuevo crecimiento de microorganismos en el agua potable y promueven el taponamiento sobre ellas [24], [25]. Al ser estos componentes de degradación biológica lenta, los tratamientos de membrana se vuelven ineficaces; por lo tanto, se requieren tratamientos más específicos y avanzados.

La materia orgánica natural (MON) es uno de los componentes primarios de la incrustación en la filtración de membrana a baja presión, y puede presentarse sola o mezclada con partículas coloidales. La MON es una mezcla compleja de productos orgánicos disueltos en partículas generada por la descomposición microbiana de plantas y vegetales, cuyas características varían de una fuente de agua a otra. Tiene una amplia gama de distribuciones en peso molecular (PM) y grupos funcionales (fenólicos, hidroxilo y

Tabla 3. Contaminantes formadores de incrustación en membranas.

Partículas	Las partículas / coloides inorgánicos u orgánicos actúan como contaminantes que pueden cegar físicamente la superficie de la membrana y bloquear los poros, o dificultar el transporte a la superficie mediante el desarrollo de una capa de torta.
Orgánicos	Componentes disueltos y coloides (por ejemplo, ácidos húmicos y fúlvicos, materiales y proteínas hidrofílicas e hidrofóbicas) que se unirían a la membrana por adsorción.
Inorgánicos	Componentes disueltos (por ejemplo, hierro, manganeso y sílice) que tienden a precipitarse sobre la superficie de la membrana debido al cambio de pH o a la oxidación. Los residuos coagulantes / floculantes también pueden estar presentes como contaminantes inorgánicos.
Organismos microbiológicos	La categoría microbiológica abarca la materia vegetal, como las algas y los microorganismos, que pueden adherirse a las membranas y causar bioincrustaciones (formación de biopelículas).

grupos carboxilo), que se origina a partir de entradas alóctonas (por ejemplo, desechos terrestres y vegetativos) y autóctonas (por ejemplo, algas). Se tiene el informe de los principales contaminantes en membranas de todo el mundo y su distribución presenta porcentajes de 50.2 % para compuestos orgánicos y 7.6, 13.5, 4.7, 3.6, 3.7, 2.6 y 14.1 para Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , CaPO_4 , CaCO_3 , CaSO_4 y otros compuestos incrustantes, respectivamente [21].

Métodos para reducir incrustación en membranas

Debido a la complejidad que tiene la MON y la gran cantidad de reacciones que puede presentar en las diferentes condiciones químicas del medio, es difícil determinar exactamente cómo se da su comportamiento en el fenómeno de incrustación y qué propiedades de la composición de la membrana deben modificarse para conseguir un proceso ideal que la disminuya. Se han desarrollado y probado ampliamente diversas medidas preventivas para interferir con la incrustación de MON, como el uso de pretratamientos de coagulación, la oxidación, el intercambio iónico, la adsorción de carbono y la adsorción de óxido mineral [26].

Sin embargo, se necesitan más investigaciones sobre el diseño óptimo y la operación de tales procesos y sus combinaciones, ya que pueden tener desventajas, como la necesidad de mantener condiciones muy estrictas sobre el control de las incrustaciones, la posibilidad de que las membranas se degraden, la precipitación de metales, y tener un efecto poco significativo o poca flexibilidad de operación [26].

Otros enfoques para reducir la incrustación consisten en aumentar la hidrofilia de la membrana y la integración de nanomateriales en la matriz membranal. El aumento de la hidrofilia de la membrana es una técnica que incluye la adición de polímeros hidrofílicos a la solución de moldeo, la inmovilización de polímeros con segmentos hidrofílicos

por fotopolimerización o por plasma y el recubrimiento de la superficie. La integración de la nanotecnología acoplada a las técnicas de membranas puede utilizarse para mejorar la eficiencia de los tratamientos, ya que existe una gran cantidad de nanomateriales que presentan distintas propiedades y mecanismos que permiten mayores aplicaciones y ventajas en comparación con los procesos existentes [27]. Las membranas de nanofibras electrohiladas se pueden aplicar para diversos fines, incluida la filtración de aire/agua, almacenamiento de gas, sensores/electrónica y atención médica/cosmética.

APLICACIÓN DE NANOMATERIALES EN MEMBRANAS PARA TRATAMIENTO DE AGUA

Propiedades de los nanomateriales

La nanotecnología ofrece oportunidades para desarrollar sistemas de suministro de agua de última generación y ha brindado oportunidades inmensurables para purificar el agua incluso en estado iónico. Los diversos materiales nanoestructurados se han fabricado con características tales como alta relación de aspecto, reactividad y volumen de poro sintonizable, interacciones electrostáticas, hidrofílicas e hidrofóbicas que son útiles en adsorción, catálisis, sensores y optoelectrónica.

Los metales a nanoescala (plata, titanio, oro y hierro) y sus óxidos se han utilizado ampliamente en la mitigación ambiental. Las nanopartículas de plata son efectivas para desinfectar contaminantes biológicos como bacterias, virus y hongos [14]. Las nanopartículas de titanio se han utilizado en contaminantes que se transforman por medio de reacciones redox en especies inofensivas [28]. La mayoría de los nanomateriales han aumentado la porosidad de la superficie, lo que mejora el rechazo de sales y evita la formación de macrovoides.



Los nanomateriales han jugado un papel importante en la degradación de diversos colorantes y compuestos halogenados y la eliminación de metales pesados con microbios desinfectantes. Las nanopartículas de oro y hierro son especialmente adecuadas para eliminar metales pesados inorgánicos de aguas superficiales y residuales [29].

Las extraordinarias propiedades de los nanomateriales, como la alta área superficial, la fotosensibilidad, la actividad catalítica y antimicrobiana, las propiedades electroquímicas, ópticas y magnéticas, el tamaño de poro sintonizable y la química de la superficie proporcionan características útiles para muchas aplicaciones.

Estas aplicaciones incluyen sensores para el monitoreo de la calidad del agua, adsorbentes especiales, desinfección / descontaminación solar y membranas de alto rendimiento. Los procesos de modulación para diseñar aplicaciones multifuncionales y de alta eficiencia habilitados por la nanotecnología proporcionan una ruta prometedoras tanto para modernizar la infraestructura obsoleta como para desarrollar sistemas de tratamiento descentralizados de alto rendimiento y bajo mantenimiento, incluidos dispositivos de punto de uso [27].

Nanomateriales utilizados para el tratamiento de agua

Dentro de las áreas de tratamiento de agua se pueden utilizar varios nanomateriales en la fabricación de membranas compuestas para aprovechar sus propiedades. Esto mejora la capacidad de retención de sal y reduce los costos, el área de tierra y la energía para la desalinización.

Por ejemplo, las nanopartículas de zeolita se mezclan con la matriz polimérica para formar una membrana OI de película delgada, lo que aumenta el transporte de agua y la capacidad de retención de sal en un 99.7 % [30].

Las nanopartículas de sílice se han utilizado para dopar matrices de polímeros de OI para la desalinización del agua, con lo que se

logró mejorar las propiedades de transporte y modificar las redes poliméricas y los diámetros de poro [31]. Los CNT y el grafeno se han utilizado para la desalinización basada en la adsorción debido a sus extraordinarias capacidades de adsorción [16].

La separación de contaminantes específicos que depende del tamaño de poro es posible a través de la fabricación de membranas compuestas de nanofibras, ya que éstas poseen una alta porosidad y el tamaño de poro se puede ajustar a través del proceso de fabricación. Debido a la capacidad de ajuste en la composición y estructura de las membranas compuestas de nanofibras, éstas poseen capacidades prometedoras, tales como alta permeabilidad y selectividad, así como poca acumulación de suciedad. Existe una gran variedad de mezclas de polímeros, tanto orgánicos como inorgánicos, que se usan según las necesidades de filtración.

La producción de nanofibras consta de varias vías, como plantillas sintéticas, separación por diferentes fases, autoensamblaje de nanopartículas y, más ampliamente usado, el electrohilado. El giro eléctrico es frecuente debido a su facilidad de uso y bajo costo en comparación con los procesos de plantilla y autoensamblaje [32]. Algunos otros ejemplos de aplicaciones de los nanomateriales para el tratamiento de agua se muestran en la Figura 3 [27].

Electrohilado para la generación de membranas

Las membranas de nanofibras electrohiladas tienen diversas aplicaciones, incluida la filtración de aire/agua, almacenamiento de gas, sensores/electrónica y atención médica/cosmética. La alta porosidad, el tamaño de poro ajustable/la distribución del tamaño de poro, la amplia gama de materiales elegidos y la funcionalización de la superficie disponible han proporcionado la flexibilidad para diseñar a medida las membranas. Los recientes avances en la tecnología de electrohilado han ofrecido una variedad de vías

para la producción a escala de membranas electrohiladas, tras el descubrimiento de su potencial para la purificación del agua [8].

Más que eso, la morfología y las propiedades de las nanofibras electrohiladas podrían diseñarse y fabricarse utilizando una amplia variedad de materiales (p. ej., polímeros inorgánicos u orgánicos, incluidos materiales naturales y sintéticos e híbridos) y ajustando los parámetros de la solución de polímero (p. ej., concentración, viscosidad, conductividad, tipo de polímero, disolvente), proceso de electrohilado (p. ej., voltaje aplicado, velocidad de flujo, distancia de desplazamiento del chorro, materiales objetivo de recolección) y variables ambientales (p. ej., temperatura, humedad, presión de la cámara) [33]. Cabe mencionar que la mayoría de los parámetros están estrechamente relacionados en el proceso de electrohilado; en consecuencia, el electrohilado es complejo y versátil. Combinando las características físicas de las nanofibras con la funcionalidad química, las estructuras de nanofibras electrohiladas se pueden utilizar para una amplia gama de aplicaciones, incluida la purificación de aire y agua [34], suministro de fármacos (genes), apósito para heridas, inmovilización

enzimática, ingeniería de tejidos, almacenamiento de gas [35], sensores y electrodos en electrónica [36]. En el caso de la purificación de agua, las estructuras nanofibras electrohiladas pueden usarse directamente como una capa barrera para eliminar grandes contaminantes en la microfiltración, o indirectamente como una capa de sustrato para soportar una capa barrera para la ultrafiltración, la nanofiltración, o la ósmosis inversa para la desalinización [8].

A pesar de que las membranas basadas en nanomateriales están entre las tecnologías más avanzadas y con más potencial dentro de los sistemas de tratamiento de agua, pueden presentar una gran cantidad de inconvenientes. Entre estos se tienen inestabilidad térmica, requerimiento de alta presión, incrustación, precipitación de contaminantes, bloqueo de poros, reacción lenta, formación de productos intermediarios tóxicos, formación de partículas de iones recién sintetizados y agregación en el almacenamiento. Estos problemas causan que existan bajas posibilidades de reutilizar las membranas compuestas de estos materiales, además de que hay riesgos desconocidos para los ecosistemas [23].

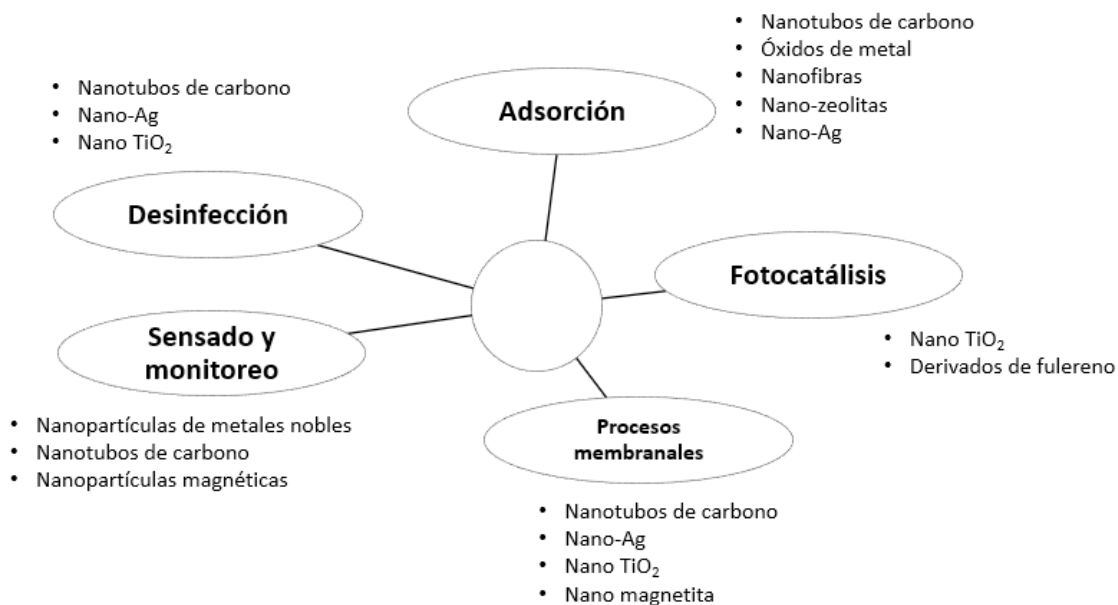


Figura 3. Aplicación de nanomateriales para el tratamiento de agua.



MEMBRANAS INTEGRADAS A BIORREACTORES

Biorreactores

Las aguas residuales domésticas contienen los desechos de nuestra vida cotidiana: heces, grasas, restos de comida, detergentes y productos farmacéuticos. En términos químicos, 1 metro cúbico de aguas residuales domésticas contiene de 300 a 600 gramos de materia orgánica rica en carbono (conocida como demanda química de oxígeno carbonosa o DQO), 40 - 60 gramos de nitrógeno (en forma de amonio y compuestos orgánicos), 5 - 20 gramos de fósforo (en fosfatos y compuestos orgánicos), 10 - 20 gramos de azufre (principalmente como sulfato) y trazas de iones de metales pesados.

El uso de biorreactores se aplica desde el siglo pasado, cuando la mayor parte de las aguas residuales domésticas se trataban mediante el método de "lodos activados", un proceso aeróbico simple y efectivo que utiliza agitación con aire y bacterias para oxidar los contaminantes y eliminar compuestos orgánicos, nitrógeno y fósforo [37]; sin embargo, tiene una gran huella de energía y carbono. Algunas plantas de aguas residuales digieren el lodo anaeróbicamente; en ausencia de oxígeno, los microorganismos descomponen la materia orgánica compleja en moléculas orgánicas más simples [38] que luego se convierten en metano.

Al quemar el metano para producir electricidad y calor, la digestión anaeróbica puede compensar del 20 al 30 % de los costos de energía y gases de efecto invernadero del proceso de lodos activados, pero la digestión es lenta, demora de 10 a 20 días [37].

Sistemas de disminución de incrustación en biorreactores de membrana

La aplicación de prácticas anaeróbicas directamente a las aguas residuales domésticas

podría generar un exceso de energía y revertir los altos costos y los bajos rendimientos en el uso de biorreactores, pero actualmente no es posible lograrlo a temperatura ambiente y con bajas concentraciones de compuestos orgánicos [38]. Eso podría cambiar con dos nuevas tecnologías:

La primera tecnología es el biorreactor de membrana anaeróbica (BRMAN), que utiliza una membrana porosa para retener y concentrar los sólidos (incluida la materia orgánica en partículas y los microbios de crecimiento lento que producen gas metano) y más del 90 % de la materia orgánica disuelta en las aguas residuales [39]. Al prolongar el tiempo de degradación de los materiales, permite que se produzca un 25 - 100 % más metano por metro cúbico de agua tratada. Más del 90 % del metano disuelto (en concentraciones de 10 - 20 miligramos por litro) puede extraerse con técnicas de gas o vacío, utilizando relativamente poca energía (menos de 0.05 kilovatios-hora por metro cúbico, kWh m⁻³) [37]. Aunque el BRM convencional ha progresado enormemente y se ha convertido en un enfoque prometedor en el tratamiento de aguas residuales, todavía posee varias limitaciones; por lo tanto, surgió un BRM integrado para la tecnología de tratamiento de aguas residuales [23]. La rápida expansión de la población en los países en desarrollo provocó la sobrecarga de las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales existentes [40].

En vista de esto, BRM ha atraído crecientes intereses ya que tiene algunas ventajas distintivas, tales como menor huella, menor producción de lodos, mayor eficiencia de separación y calidad de efluente altamente mejorada en comparación con el tratamiento convencional de lodos activados [41]. Asimismo, a diferencia del proceso convencional de lodos activados, BRM también es capaz de retener los microcontaminantes orgánicos de bajo peso molecular y algunos tipos de virus [23].

CONCLUSIÓN

El desarrollo de sistemas de tratamiento de agua —sustentables y capaces de resolver el problema del agua superficial limitada— será alcanzable si se aplican sistemas integrados de tratamiento con diferentes métodos de filtración de membranas, algunos incluso ya se aplican para procesos de desalinización y generación de biorreactores de membrana. La limitante para la aplicación de estos procesos es la necesidad de su optimización para producir sistemas de membranas con propiedades multifuncionales de costos más alcanzables y que disminuyan el problema de la incrustación, el cual implica un aumento en los gastos de mantenimiento. Sin embargo, la rapidez con la que avanza el área de materiales y técnicas de membrana indica que existe el potencial para resolver estos problemas. No obstante, para esto es necesario determinar cuáles de estas nuevas técnicas son las más efectivas para eliminar cada tipo de contaminante, y la manera de integrarlas en un tren de proceso de la forma más eficiente, económica y con menor impacto al ambiente.

REFERENCIAS

[1] H. L. Leverenz, G. Tchobanoglous, and T. Asano, "Direct potable reuse: a future imperative," *J. Water Reuse Desalin.*, vol. 1, no. 1, pp. 2–10, 2011.

[2] V. Lazarova, *Water-Energy Interactions in Water Reuse*, vol. 11. 2015.

[3] V. K. Gupta, I. Ali, T. A. Saleh, A. Nayak, and S. Agarwal, "Chemical treatment technologies for waste-water recycling - An overview," *RSC Adv.*, vol. 2, no. 16, pp. 6380–6388, 2012.

[4] D. G. Hendricks, *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes. Physical, Chemical and Biological*. IWA, 1997.

[5] M. Paidar, V. Fateev, and K. Bouzek, "Membrane electrolysis—History, current status and perspective," *Electrochimica Acta*, vol. 209. Elsevier Ltd, pp. 737–756, 2016.

[6] Y. Pouliot, V. Conway, and P. Leclerc, "Separation and Concentration Technologies in Food Processing" in *Food Processing: Principles and Applications*, Second Edition, USA: Wiley, pp. 33–60, 2014.

[7] Seader, Henley, and Roper, *Separation Process Principles. Chemical and Biochemical Operations*, 3rd ed. Utah: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

[8] H. Ma and B. S. Hsiao, "Current advances on nanofiber membranes for water purification applications," *Filter. Media by Electrospinning Next Gener. Membr. Sep. Appl.*, pp. 25–46, 2018.

[9] S. H. Mohamad, M. I. Idris, H. Z. Abdullah, and A. F. Ismail, "Short Review of Ultrafiltration of Polymer Membrane As a Self-Cleaning and Antifouling in the Wastewater System," *Advanced Materials Research*, vol. 795, pp. 318–323, 2013.

[10] C. Jarusutthirak and G. Amy, "Membrane filtration of wastewater effluents for reuse: Effluent organic matter rejection and fouling," *Water Sci. Technol.*, vol. 43, no. 10, pp. 225–232, 2001.

[11] S. Bunani, E. Yörüko lu, Ü. Yüksel, N. Kabay, M. Yüksel, and G. Sert, "Application of reverse osmosis for reuse of secondary treated urban wastewater in agricultural irrigation," *Desalination*, vol. 364, pp. 68–74, 2015.

[12] M. M. Pendergast and E. M. V. Hoek, "A review of water treatment membrane nanotechnologies," *Energy and Environmental Science*, vol. 4, no. 6. pp. 1946–1971, 2011.

[13] H. Liu and C. D. Vecitis, "CNT-based Electrochemical Filter for Water Treatment: Mechanisms and Applications," *Sch. Eng. Appl. Sci.*, vol. Doctor of, p. 184, 2015.

[14] M. M. Khin, A. S. Nair, V. J. Babu, R. Murugan, and S. Ramakrishna, "A review on nanomaterials for environmental remediation," *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, no. 8, pp. 8075–8109, 2012.

[15] S. Burn *et al.*, "Desalination techniques - A review of the opportunities for desalination in agriculture," *Desalination*, vol. 364, pp. 2–16, 2015.

[16] R. Das, M. E. Ali, S. B. A. Hamid, S. Ramakrishna, and Z. Z. Chowdhury, "Carbon



nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination," *Desalination*, vol. 336, no. 1, pp. 97–109, 2014.

[17] L. N. Nthunya, S. Maifadi, B. B. Mamba, A. R. Verliefde, and S. D. Mhlanga, "Spectroscopic determination of water salinity in brackish surface water in Nandoni Dam, at Vhembe District, Limpopo Province, South Africa," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 8, 2018.

[18] P. Bernardo, E. Drioli, and G. Golemme, "Ind. Eng. Chem. Res. 2009, 48, 4638–4663 Gas Sep State of the art Bernardo *et al.* pdf," pp. 4638–4663, 2009.

[19] T. Uemura, K. Kotera, M. Henmi, and H. Tomioka, "Membrane technology in seawater desalination: History, recent developments and future prospects," *Desalin. Water Treat.*, vol. 33, no. 1–3, pp. 283–288, 2011.

[20] H. K. Shon, S. Vigneswaran, J. K. and asamy, "Membrane technology for organic removal in wastewater," *Water and wastewater*, 2011.

[21] W. Guo, H. H. Ngo, and J. Li, "A mini-review on membrane fouling," *Bioresour. Technol.*, vol. 122, pp. 27–34, 2012.

[22] F. Ahmed, B. S. Lalia, V. Kochkodan, N. Hilal, and R. Hashaiekeh, "Electrically conductive polymeric membranes for fouling prevention and detection: A review," *Desalination*, vol. 391, pp. 1–15, 2016.

[23] C. H. Neoh, Z. Z. Noor, N. S. A. Mutamim, and C. K. Lim, "Green technology in wastewater treatment technologies: Integration of membrane bioreactor with various wastewater treatment systems," *Chem. Eng. J.*, vol. 283, pp. 582–594, 2016.

[24] S. Metsämuuronen, M. Sillanpää, A. Bhatnagar, and M. Mänttari, "Natural organic matter removal from drinking water by membrane technology," *Sep. Purif. Rev.*, vol. 43, no. 1, pp. 1–61, 2014.

[25] X. Fan, H. Zhao, Y. Liu, X. Quan, H. Yu, and S. Chen, "Enhanced permeability, selectivity, and antifouling ability of CNTs/Al₂O₃ membrane under electrochemical assistance," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 4, pp. 2293–2300, 2015.

[26] X. Cui and K. H. Choo, "Natural organic matter removal and fouling control in low-pressure membrane filtration for water treatment," *Environ. Eng. Res.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–8, 2014.

[27] X. Qu, P. J. J. Alvarez, and Q. Li, "Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment," *Water Res.*, vol. 47, no. 12, pp. 3931–3946, 2013.

[28] P. V. Kamat and D. Meisel, "Nanoscience opportunities in environmental remediation," *Comptes Rendus Chim.*, vol. 6, no. 8–10, pp. 999–1007, 2003.

[29] R. Das, S. B. Abd Hamid, M. E. Ali, A. F. Ismail, M. S. M. Annuar, and S. Ramakrishna, "Multifunctional carbon nanotubes in water treatment: The present, past and future," *Desalination*, vol. 354, pp. 160–179, 2014.

[30] M. Fathizadeh, A. Aroujalian, and A. Raisi, "Effect of lag time in interfacial polymerization on polyamide composite membrane with different hydrophilic sub layers," *Desalination*, vol. 284, no. October, pp. 32–41, 2012.

[31] G. L. Jadav and P. S. Singh, "Synthesis of novel silica-polyamide nanocomposite membrane with enhanced properties," *J. Memb. Sci.*, vol. 328, no. 1–2, pp. 257–267, 2009.

[32] M. R. Kulak and R. L. Liang, "Electrospun polymeric nanofibrous membranes for water treatment," no. December, pp. 1–31, 2018.

[33] W. Wu, Z. H. Huang, and T. T. Lim, "Recent development of mixed metal oxide anodes for electrochemical oxidation of organic pollutants in water," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 480, pp. 58–78, 2014.

[34] G. G. Chase, J. S. Varabhas, and D. H. Reneker, "New methods to electrospin nanofibers," *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 6, no. 3, pp. 32–38, 2011.

[35] M. . Paridah, A. Moradbak, A. . Mohamed, F. Abdulwahab taiwo Owolabi, M. Asniza, and S. H. Abdul Khalid, "Hydrogen Storage for Energy Application," *Intech*, vol. i, no. tourism, p. 13, 2016.

[36] J. Miao, M. Miyauchi, T. J. Simmons, J. S. Dordick, and R. J. Linhardt, "Electrospinning of nanomaterials and applications in electronic

components and devices," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 10, no. 9, pp. 5507–5519, 2010.

[37] W.-W. Li, H.-Q. Yu, and B. E. Rittmann, "Extracting carbon, nitrogen and phosphorus from wastewater could generate resources and save energy," *Nature*, vol. 528, no. 7580, pp. 29–31, 2015.

[38] A. L. Smith, L. B. Stadler, L. Cao, N. G. Love, L. Raskin, and S. J. Skerlos, "Navigating wastewater energy recovery strategies: A life cycle comparison of anaerobic membrane bioreactor and conventional treatment systems with anaerobic digestion," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, no. 10, pp. 5972–5981, 2014.

[39] P. L. McCarty, J. Bae, and J. Kim, "Domestic wastewater treatment as a net energy producer-can this be achieved?," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 17, pp. 7100–7106, 2011.

[40] L. Grady, G. T. Daigger., N. G. Love., and C. D. M. Filipe, *Biological Wastewater Treatment*, 3rd ed., vol. 67, no. 6. Taylor and Francis Group, 2011.

[41] N. S. A. Mutamim, Z. Z. Noor, M. A. A. Hassan, and G. Olsson, "Application of membrane bioreactor technology in treating high strength industrial wastewater: A performance review," *Desalination*, vol. 305, pp. 1–11, 2012.