

Artículo de Revisión

***REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE LA EFICIENCIA DE
ANTIINCRUSTANTES CON DISTINTAS BASES QUÍMICAS***

***LITERATURE REVIEW ON THE EFFICIENCY OF ANTISCALANTS WITH
DIFFERENT CHEMICAL BASES***

Lourdes Castro Mieles^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-9720-7985>
Alex Alberto Dueñas-Rivadeneira² <https://orcid.org/0000-0002-8603-0694>

¹ Departamento de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

² Departamento de Procesos Agroindustriales, Facultad de Ciencias Zootécnicas,
Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

Recibido: Octubre 22, 2022; Revisado: Noviembre 10, 2022; Aceptado: Diciembre 5, 2022

RESUMEN

Introducción:

La ósmosis inversa (OI) es un método para la purificación del agua. Separa el agua de incrustaciones, mediante membranas semipermeables; el recogimiento de las escalas puede provocar daños en las membranas, afectando al proceso. Inyectar antiincrustantes elimina e inhibe su sobreproducción. El objetivo de este artículo científico es aprender sobre antiincrustantes, usando como método la revisión bibliográfica de trabajos anteriores que han operado con estos, mediante el análisis de sus procesos y conclusiones, para estudiar como varían entre si y cual implica mejores resultados.

Objetivo:

Analizar los antiincrustantes más comunes en la actualidad mediante la revisión bibliográfica, donde se estudien compuestos que tengan como base química metafosfatos y polímeros.

Materiales y Métodos:

Se realizó la revisión de 3 publicaciones originales que planteaban como tema principal el uso de distintos antiincrustantes y su acción sobre las membranas de equipos de ósmosis inversa. Los artículos revisados se publicaron en el período de 2018-2021, tomando en consideración la calidad y naturaleza de las publicaciones.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Lourdes Castro, Email: lcastro6411@utm.edu.ec



Resultados y Discusión:

Según el análisis comparativo de los antiincrustantes elegidos se realizó el seguimiento del efecto que tienen con respecto a las membranas de equipos de ósmosis inversa. Para analizar los resultados se consideraron aspectos de la función, dosificación, punto de inyección y conclusiones que se obtuvieron de cada uno.

Conclusiones:

En comparación con el ácido fosfinocarboxílico y la tecnología novedosa, el hexametáfosfato de sodio ha demostrado mejores resultados en la industria con respecto a las membranas de ósmosis inversa en los procesos de purificación del agua.

Palabras clave: agua; antiincrustantes; membranas; ósmosis inversa; polímeros.

ABSTRACT

Introduction:

Reverse osmosis (RO) is a method for purifying water. It separates water from incrustations, through semi-permeable membranes; absorption of scales can cause damage to the membranes, affecting the process. Injecting antifouling removes and inhibits its overproduction. The objective of this scientific article is to learn about antiscalants, using as a method the bibliographic review of previous works that have operated with these, through the analysis of their processes and conclusions, to study how they vary from each other and which one implies better results.

Objective:

To analyze the most common antifoulings today through a bibliographic review, where compounds that have metaphosphates and polymers as a chemical base are studied.

Materials and Methods:

The review of 3 original publications that posed as the main topic the use of different antiscalants and their action on the membranes of reverse osmosis equipment was carried out. The reviewed articles were published in the 2018-2021 period, taking into consideration the quality and nature of the publications.

Results and Discussion:

According to the comparative analysis of the chosen antiscalants, the effect they have with respect to the membranes of reverse osmosis equipment was monitored. To analyze the results, aspects of function, dosage, injection point and conclusions obtained from each one were considered.

Conclusions:

Compared to phosphinocarboxylic acid and the modified base, sodium hexametaphosphate has shown better results in the industry with respect to reverse osmosis membranes in water purification processes.

Keywords: water; antifouling; membranes; inverse osmosis; polymers.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es una sustancia compuesta por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno (H₂O) y se puede encontrar en estado sólido (hielo), gaseoso (vapor) y líquido (agua). Las propiedades físicas y químicas del agua les permiten a los seres vivos su supervivencia y la de los ecosistemas, por esto el agua es entendida como un elemento de alta necesidad y demanda en la civilización; para su uso en humanos es necesaria la potabilización. Entre las varias técnicas para potabilizar está la ósmosis inversa (OI), que utiliza de membranas para retener los minerales y sustratos que se encuentran en el agua.

Las membranas de OI son necesarias para la purificación del agua, puesto que estas operan en la desalinización del agua de mar y en el tratamiento de aguas residuales. La forma en que accionan es mediante la separación del agua y los sustratos ubicadas en ella, formando dos vertientes, una con el agua con baja concentración de sales y otra de salmuera concentrada; así el líquido es descontaminado de sólidos disueltos, compuestos orgánicos y microorganismos obteniendo agua apta para ser consumida (Wang & Wang., 2019).

Para la capacidad de separación del agua, se ha indicado que las membranas de OI tienen la característica de ser semipermeables, así que mediante la presión que ejerce el líquido que entra se consigue un flujo, que pasa por el colector de permeado y crea las dos vertientes, y el agua de alta concentración de sales logra salir hacia un extremo de la membrana, y el solvente puro por el otro y a través de los poros la membrana logra el paso iones o moléculas pequeñas, y retiene a los más grandes (García y Chairpoulou, 2021).

Debido a la capacidad de separación del agua, los excesos de minerales y sustratos pueden causar incrustaciones a las membranas de ósmosis inversas (Jiang et al., 2017), afectando a los equipos de tratamiento y a sus operaciones. Esto es una problemática para las plantas de purificación. Con base en la problemática se da la propuesta de realizar una revisión sistemática de tres tipos antiincrustantes según su composición química; para esto se escogió al hexametáfosfato de sodio (metáfosfato); al ácido fosfinocarboxílico (polímero) y al clorhidrato de quitosano biguanidina (tecnología novedosa). Teniendo como base teórica la descripción de los procesos de ósmosis inversa, y cómo las incrustaciones resultan una problemática que se puede llegar a resolver según los varios antiincrustantes a revisar y cómo varían al momento de ejecutar sus funciones.

El objetivo del presente artículo científico es analizar los antiincrustantes más comunes en la actualidad mediante la revisión bibliográfica, donde se estudien compuestos que tengan como base química metáfosfatos y polímeros.

También se incluye a un antiincrustante formado por clorhidrato de quitosano biguanidina, estableciendo como metodología la revisión bibliográfica de proyectos actuales que hayan operado con estos reactivos, y así analizar los procesos y conclusiones para estudiar cómo varían entre sí y presentan mejores resultados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar la revisión bibliográfica se escogieron distintos tópicos a analizar, partiendo desde el análisis del sistema de ósmosis inversa general hacia el de los antiincrustantes escogidos.

2.1. *Procesos de ósmosis inversa*

El agua es un recurso que siempre ha sido, es y será necesario en la humanidad, sin embargo, para su consumo se necesita de la purificación. La ósmosis inversa es un proceso utilizado en el tratamiento de aguas salobres, superficiales y subterráneas para aplicaciones de caudales grandes y pequeños. En la industria es útil para la producción de productos farmacéuticos, agua de alimentación de calderas, alimentos y bebidas, acabado de metales y fabricación de semiconductores, entre otros.

La ósmosis es un proceso que sucede en la transferencia del disolvente, este suele ser agua en la industria, sucede a través de una membrana debido a la acción de un gradiente de concentración. Necesita de dos compartimentos separados por una membrana selectiva permanente. El fenómeno de la ósmosis conducirá a un flujo de agua dirigido desde la solución diluida a la concentrada (Sellami et al., 2022).

Kavaiya y Raval, (2020) afirman que, en la desalinización del agua basada en membrana, la membrana está afectada directamente por las características físicas y químicas de esta, por tanto, son incidentes en los aspectos de costos y la productividad del proceso. Las membranas de ósmosis inversa son comúnmente de tipo no poroso y rechazan varios iones de sal, moléculas orgánicas, etc.

La brecha para analizar los aspectos económicos es altamente amplia, debido a que en el proceso de la desalinización por unidad de agua varía según el tipo de agua (salobre o de mar de alimentación), y por la incidencia de la cantidad de energía que se utiliza en los sistemas de desalinización elegido (Dévora y col., 2013). Además de esto, en el estudio de (Imiete y Viacheslovovna, 2018) se determinó que los costos operativos y de capital de los procesos de desalinización muestran los beneficios económicos aplicados para algunas tecnologías, incluyendo a la ósmosis inversa con una mayor ventaja, por esto ubica a la ósmosis inversa entre las tecnologías más apropiadas.

La ósmosis inversa es un proceso donde se purifican muestras de agua mediante la eliminación de partículas en suspensión, es un tratamiento fisicoquímico que consiste en pasar el agua a través de membranas semipermeables. Este proceso logra eliminar especies disueltas y suspendidas del agua, incluidas las bacterias, y se utiliza tanto en procesos industriales como en la producción de agua potable. El resultado es que el soluto se retiene en el lado presurizado de la membrana y se permite que el solvente puro pase al otro lado (Ahuchaogu et al., 2018).

El proceso de este sistema, de acuerdo con (Albergamo et al., 2020) sucede mediante el paso de sustancias químicas a través de las membranas gracias al mecanismo de difusión de solución; el disolvente y los solutos se transportan independientemente en el sistema. La difusión de compuestos orgánicos se ve obstaculizada principalmente por el tamaño del compuesto e influenciada por la carga y la hidrofobicidad de los solutos y las membranas, cuando este sucede empiezan a aparecer las incrustaciones.

Con esta herramienta se consigue la eliminación de contaminantes como sólidos disueltos, compuestos orgánicos o microorganismos dando como resultado agua apta

para el consumo humano y de buena calidad. Dicho proceso tiene como objeto principal una membrana donde se da lugar a la depuración del agua y dependiendo de esto se verá afectado el rendimiento del sistema.

2.2. Equipos de ósmosis inversa

La ósmosis inversa ocurre cuando el agua fluye desde una solución salina diluida a través de una membrana hacia una solución salina más concentrada. Las membranas tienen las características de semipermeabilidad, por tanto, pueden controlar el paso de ciertas sustancias (Benavides y Muvdi, 2014). En el caso de procesos por OI la membrana permite pasar el agua y retiene las sales para evitar las incrustaciones. En la figura 1 se puede observar un sistema de ósmosis inversa.

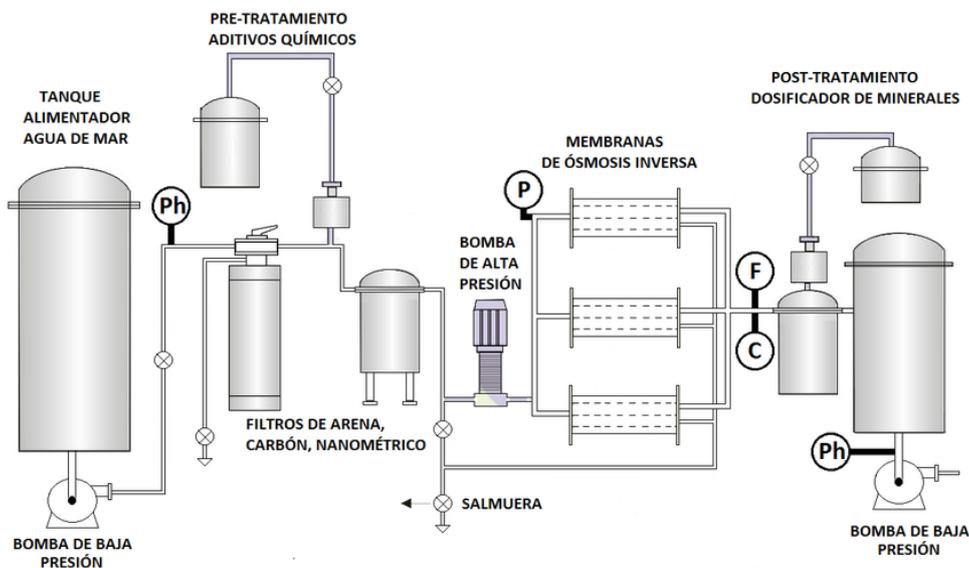


Figura 1. Diseño de un sistema de ósmosis inversa (ESIDIN, 2020)

La presencia de sulfatos y carbonatos de calcio comúnmente logran las incrustaciones de minerales en los sistemas de ósmosis inversa, estos se evitan mediante la adición de antiincrustantes. De acuerdo con Mohammad et al., (2020) mantener la eficiencia de las plantas de ósmosis inversa es necesario, y se puede lograr garantizando tasas de recuperación máximas en las membranas, para mejorar la vida útil de las plantas que los procesan. Los antiincrustantes han jugado un papel muy importante en conseguir esto, y el uso de los mismo pueden solventar problemas económicos y de procesamiento, por tanto, es necesario entender cómo funcionan y en qué momento aplicarlos.

La importancia de saber maniobrar estos equipos reside en la calidad del producto. Se espera que en el proceso de purificación del agua se tome en cuenta el cuidado de las membranas debido a la vulnerabilidad que estas presentan ante los residuos del agua, por esto es necesario inyectar antiincrustantes con la dosis necesaria para poder evitar problemas.

2.3. Afectaciones en los equipos de ósmosis inversa por incrustaciones

La incrustación inorgánica es la deposición de sustancias de esta naturaleza en la superficie de la membrana o dentro de sus poros (Henthorne y Boysen, 2015). Las incrustaciones se forman de compuestos que tienen bajos niveles de solubilidad. La

concentración de iones en el agua es alta, superando el producto de solubilidad de equilibrio y sobresaturándose, logrando que se depositen en los poros de la membrana y formando entonces las incrustaciones (Jiang et al., 2017).

De acuerdo con análisis estadísticos, (Jiang et al., 2017) concluyeron que el sulfato y carbonato de calcio fueron los más estudiados como incrustantes inorgánicos por los investigadores en los últimos 10 años, aumentando entonces su incidencia en el ensuciamiento inorgánico de las membranas de ósmosis inversa. Además de otros incrustantes inorgánicos comunes incluyen fosfato de calcio, sulfato de bario, etc.

Diversos problemas ocurren cuando se forman incrustaciones, (Yokoyama et al., 2022) en su artículo encontró que el principal problema en la operación práctica de las plantas de ósmosis inversa es la prevención y predicción de la degradación del rendimiento de la membrana en sus equipos. Los autores dividen las causas del desgaste sobre el rendimiento de las membranas en dos categorías: desgaste de la propia membrana de ósmosis inversa, ya sea por desgaste químico (oxidación o hidrólisis), y el desgaste biológico y físico; y el ensuciamiento de la membrana por adsorción de sustancias disueltas la deposición de materiales orgánicos y coloidales, y la precipitación de sustancias inorgánicas escasamente solubles como son las incrustaciones en la membrana.

Debido a la dificultad de eliminar los incrustantes en la superficie o en los poros de la membrana, es bastante difícil recuperar el rendimiento de la membrana solo mediante el uso de métodos físicos como el retrolavado (Jiang et al., 2017), por esto la importancia de utilizar antiincrustantes que inhiban la formación de esta problemática.

Las afectaciones a la membrana son incidentes directos en los costos operativos de los procesos de ósmosis inversa, de acuerdo con (Park et al., 2018) el coste aumenta cuando existe la limpieza química excesiva y frecuente de las membranas, y esta representa el 50 % de los costos operativos totales de las plantas de desalinización de agua de mar. Aun así, este proceso realizado en tiempos no recomendados puede acortar la vida útil de la membrana.

La vida útil de la membrana tiene una incidencia directa con los aspectos económicos de las industrias, Das et al., (2022) afirman que el ensuciamiento de las membranas en la desalinización aumenta los costos operativos y el consumo de energía. De acuerdo con Ghada et al., (2016), los costos en el proceso de ósmosis inversa se pueden dividir en costo de capital directo, costo de capital indirecto y costo operativo anual. Los costos operativos refieren a los procesos químicos y pueden ser anuales y según cómo se desarrolle la planta y durante esta operación se incluyen productos químicos, energía, salarios, mantenimiento de la planta, gastos, etc.

Cuando suceden las incrustaciones se denomina ensuciamiento, y este provoca la disminución del flujo de permeado, lo que da como resultado un mayor consumo de energía durante el funcionamiento de la membrana de ósmosis inversa (Takizawa et al., 2018).

2.4. *Incrustaciones en membranas de ósmosis inversa*

Los procesos de ósmosis inversa funcionan mediante membranas semipermeables que, debido a la presión que se ejerce, permiten el paso del agua, que fluye con una alta concentración de sales que posteriormente saldrán por el extremo de la membrana.

Las tecnologías también son ampliamente aceptadas comercialmente para la recuperación de productos químicos valiosos y para el tratamiento de aguas residuales industriales de las industrias farmacéutica, textil, de pulpa y papel, pigmentos y tintes, alimentos y productos lácteos, y otros (Choudhury et al., 2018). La amplia aceptación de la tecnología de membrana de ósmosis inversa es debido a su simplicidad, bajo consumo de energía y respeto al medio ambiente.

Debido a este sistema, la membrana permite el paso de iones o moléculas pequeñas a través de sus poros por donde agua limpia pasa por un lado, y el agua contaminada por otra área, causando incrustaciones que comienzan al momento en que las partículas pequeñas se adhieren a moléculas orgánicas en una superficie con la consiguiente colonización de microorganismos (González, 2019). Al suceder esto las vías del sistema de OI se ven bloqueadas y se inhibe el proceso de desalinización, además “existe un riesgo continuo de bloqueo de los tubos del condensador, válvulas, orificios y otros lugares constreñidos por organismos que se desprenden” (Soler, 2021), provocando pérdidas monetarias por el material desperdiciado.

En la publicación de (Matin et al., 2019) se afirmó que las sales minerales como CaCO_3 , CaSO_4 y BaSO_4 casi siempre están presentes cerca de sus niveles de saturación en las alimentaciones de agua salobre. Cuando se realiza el proceso de ósmosis inversa estas aumentan la probabilidad de que se produzcan incrustaciones inorgánicas.

2.5. Antiincrustantes

Los antiincrustantes son un aditivo al agua, utilizados en diversos procesos de la industria, entre estos se ubica el pretratamiento en los sistemas de ósmosis inversa, utilizado para evitar la formación de incrustaciones. Los equipos de OI son los encargados de la purificación del agua. De acuerdo con Solís et al., (2017) las incrustaciones afectan en la implantación de la tecnología de membranas porque reduce de forma continua el flujo de permeado, afectando a las máquinas. Es necesario que las dosificaciones sean precisas, pues en caso contrario se promueve el ensuciamiento, y para una dosis más alta de antiincrustantes se provoca bioincrustaciones, con la formación de complejos de iones con una densidad elevada de carga positiva alrededor del núcleo atómico (Mohammed, 2021).

Existen numerosos inconvenientes asociados con los antiincrustantes para disminuir la incrustación en la película de OI, como el movimiento de las bacterias, el control de las dosis efectivas, la concentración adecuada y el ensuciamiento causado por los propios antiincrustantes. La eficiencia de la limpieza química depende de si el agente químico puede romper la unión entre el alginato y el Ca^{+2} cuando el Ca^{+2} existe en la capa de suciedad orgánica (Park et al., 2018).

Las membranas han promovido significativamente el desarrollo de tecnologías de tratamiento de agua con rendimientos de separación eficientes, selectivos y confiables (Zhao et al., 2018), sin embargo, en informes actuales aún se considera al ensuciamiento de las membranas como una problemática crucial, ya que al adherirse a las películas delgadas influyen en el tratamiento de las aguas residuales marinas y la reutilización de aguas residuales (Mushtaq et al., 2021). Cuando esto ocurre las incrustaciones crean una película sobre la superficie de la membrana, que incide en que el flujo del agua y la consistencia del permeado se vean reducidas. Las propiedades en las que se encuentra la

membrana afectan en gran medida la productividad del agua y los costos de energía en los procesos de desalinización por ósmosis inversa (Lamma, 2015) por tanto, el inadecuado uso de antiincrustantes puede ser un problema para la calidad de la producción y para la economía industrial.

Los antiincrustantes son necesarios para disminuir el ensuciamiento, cuando estos son seleccionados y administrados se pueden operar los equipos de forma óptima y prevenir problemas. Existen varios elementos que son necesarios para poder hacer un uso correcto de estas sustancias, se toman en cuenta la dosificación del antiincrustante y el punto de inyección como elementos a tomar en cuenta en la adición de antiincrustantes. Los antiincrustantes actuales más utilizados se encuentran detallados en la Tabla 1:

Tabla 1. Antiincrustantes y su grupo químico a analizar

<i>Antiincrustante</i>	<i>Grupo</i>
Hexametáfosfato de sodio	Metafosfatos
Ácido fosfinocarboxílico	Polímeros
Clorhidrato de quitosano biguanidina	Base modificada

2.6. Hexametáfosfato de sodio

El hexametáfosfato de sodio posee propiedades dispersantes y defloculantes, que inhiben la cristalización de compuestos como carbonatos y sulfatos de calcio al actuar como sal secuestrante, estabilizador, espesante, agente tensoactivo, texturizador y neutralizante. Este compuesto ya muestra propiedades inhibitorias de incrustaciones en condiciones más suaves, como agua de refrigeración (Morais et al., 2020). El compuesto se utiliza para frenar la incrustación de compuestos como el sulfato metálico de calcio y el carbonato de calcio.

De acuerdo con el trabajo de (Mohammed, 2021) la dosis de antiincrustante se encuentra entre un valor de 2 a 10 ppm, dependiendo del potencial de formación de incrustaciones en el agua de refuerzo de OI, el elemento de recuperación de agua y las propuestas del fabricante del antiincrustante.

2.7. Ácido fosfino-carboxílico

En diversas investigaciones se ha encontrado que los antiincrustantes poliméricos son particularmente efectivos contra silicatos metálicos e ineficaces contra precipitados de sílice simple (Topçu et al., 2017) convirtiéndolo en una buena opción para la creación de antiincrustantes.

El ácido fosfino-carboxílico (PPCA) es un polímero reconocido por sus propiedades de dispersión en lo que corresponde a la escala de carbonato y fosfato de calcio dentro de sistema de circulación de agua fría (Zhang et al., 2016). En los sistemas de ósmosis inversa actúa la prevención de depósitos de incrustaciones minerales. Tiene una buena inhibición de incrustaciones de sulfato de bario, sulfato de estroncio e incrustaciones de sílice.

Este polímero es un agente eficaz de control de incrustaciones y dispersante, por lo cual es utilizado principalmente en calderas y limpieza industrial; dispersa eficazmente partículas como limo y arcilla. Tiene ventajas en estabilidad térmica y fuerte tolerancia al cloro. De acuerdo con (Chhima et al., 2020), la acción del aditivo polimérico sobre

las incrustaciones tiene propiedades importantes, incluida la efectividad de baja concentración y la resistencia a altas temperaturas.

2.8. Clorhidrato de quitosano biguanidina

El quitosano es un polisacárido lineal, que se produce por la desacetilación de la quitina en condiciones alcalinas. Tiene propiedades de biocompatibilidad, biodegradabilidad, hidrofilia y efecto antibacteriano. Se usa en varias aplicaciones, especialmente en sistemas de agua de refrigeración, ya que se ha informado en muchos estudios como inhibidor de incrustaciones (Salama et al., 2017). La unión del grupo guanidina al quitosano puede dar al polímero una carga positiva, lo que daría lugar a una solubilidad acuosa mucho mejor a pH neutro y muestra una poderosa actividad antimicrobiana que puede ser útil para evitar la bioincrustación de la membrana que mejoran los antiincrustantes (Maher et al., 2018).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según la acción de los antiincrustantes en las membranas de ósmosis inversa se logró analizar que:

3.1. Uso de hexametáfosfato de sodio

En el trabajo de (Mohammed, 2021) se realizaron estudios sobre el hexametáfosfato de sodio como antiincrustante para tratar agua salobre bajo el planteamiento de que el polifosfato se puede transformar en ortofosfato en presencia de una solución de hexametáfosfato de sodio. Para demostrarlo, la metodología de uso fue disolver el hexametáfosfato de sodio en agua, dosificado en el tanque de alimentación, con concentraciones desde 10 ppm y 7 %. El resultado más visible fue que aproximadamente el 25 % de la solución con polifosfatos se regresó a ortofosfato a 10 ppm.

Los resultados de este proyecto fueron positivos con respecto a la protección de la membrana, ya que la actuación del antiincrustante fue crear una distancia entre los contaminantes que absorbían el oxígeno de las líneas de dosificación y el hexametáfosfato de sodio, retardando la formación de incrustaciones a medida que ocurre su distribución. El agua salobre se transfirió al primer y segundo módulo y las salmueras eliminadas de estos módulos fueron transferidas al tercer módulo.

Entre las conclusiones obtenidas sobre este proyecto fue que la problemática más común es la capacidad de hidrolizarse del hexametáfosfato de sodio, y que es más recomendable el uso de compuesto organofosforados, sin embargo, el acceso es más complejo debido a su precio. Se nombró la importancia de controlar los niveles de pH para evitar que se produzca la hidrólisis.

3.2. Uso de Ácido fosfino-carboxílico

En este estudio publicado por (Mangal et al., 2021) se hace uso de varios antiincrustantes de distintas naturalezas, sin embargo, se centra en el polímero. La base del proyecto fue que descubrir la propiedad inhibidora contra el fosfato de calcio en las membranas de ósmosis inversa. Para la ejecución experimental tomaron en cuenta la dosis de antiincrustante recomendada por los proveedores, así que usaron la dosis de 2

mg/L y 5 mg/L en el agua de alimentación, que correspondieron a 13,3 mg/L y 33,3 mg/L en el concentrado sintético de 85 % de recuperación, respectivamente.

Para investigar el efecto de los antiincrustantes en la formación de fosfato de calcio amorfo, se realizaron experimentos con las soluciones concentradas sintéticas en un reactor de vidrio de 3 litros. El reactor constaba de un controlador de mezcla y un eje para permitir que la solución se agitara a una velocidad de 150 min^{-1} . La temperatura se mantuvo en $20 \text{ }^\circ\text{C}$ durante todo el experimento.

El reactor se llenó hasta la mitad con soluciones de NaHCO_3 y KH_2PO_4 , pH 7,5–7,6; a la que se añadió antiincrustante a la solución. Posteriormente, la otra mitad del reactor se llenó con una solución de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ manteniendo la distribución uniforme de la solución. Mientras sucedía esto, la mezcla en el reactor se agitaba a 150 min^{-1} para lograr una mezcla uniforme de las soluciones y evitar la aparición de zonas sobresaturadas locales.

Los resultados mostraron que con 13,3 mg/L del antiincrustante hubo un aumento en los valores de turbidez del concentrado sintético, demostrando que fue efectivo en la prevención de la formación de fosfato de calcio amorfo. Si bien influyó en la formación de dichos compuestos, no se observó aumento de turbidez en la primera hora cuando se añadieron 33,3 mg/L del polímero.

El antiincrustante en conjunto con iones de fosfato, HCO_3 y NaOH fueron dosificados a partir de soluciones madre a una corriente de agua desmineralizada. La superficie del filtro se cubrió con partículas de fosfato de calcio amorfo cuando se filtraron las soluciones sintéticas concentradas con una recuperación del 85 % en presencia del antiincrustante, mientras que no se observaron partículas en la superficie del filtro cuando las soluciones sintéticas se filtraron con este. La solución sintética se alimentó a un flujo de 90 L/h a un elemento de ósmosis inversa.

Entre las conclusiones, el antiincrustante no pudo inhibir la formación de partículas de fosfato de calcio amorfo en el concentrado de OI sintético, pero sí dificultó la aglomeración de la partícula formada. Además, no fue posible evitar la deposición de partículas de fosfato de calcio amorfo en la superficie de la membrana del equipo de ósmosis inversa. Hubo efectos en el flujo normalizado del equipo de ósmosis inversa ya que, en presencia del antiincrustante, disminuyó en más del 15 % en un tiempo de tres horas.

3.3. Uso de Clorhidrato de quitosano biguanidina

Maher et al., (2018) realizaron una evaluación sobre estos compuestos, dedicada a la investigación del clorhidrato de quitosano biguanidina, a este producto lo nombran como tecnología novedosa y biodegradable aplicado en forma de antiincrustantes, debido a que el método utilizado fue la modificación del quitosano por el grupo guanidina y así mejorar su solubilidad en agua. El planteamiento de este es usar este nuevo método en la creación de una solución antiincrustante modificada.

Debido a que este es un producto de tecnología novedosa, los autores comenzaron a diseñarlo, mediante las instrucciones de disolver un gramo de quitosano en 100 mL de HCl diluido 1 % en condiciones de agitación durante tres horas. Luego, 0,52 gramos de cianoguanidina en 20 mL de H_2O y se agregaron a la solución de Ca. La mezcla de reacción se agitó a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ durante tres horas. Después de enfriar la mezcla a

temperatura ambiente, se añadió un exceso de metanol para la precipitación de la mezcla y posterior producto. El producto obtenido se filtró y dializó con agua destilada durante 24 horas para eliminar los materiales que no reaccionaron.

En orden de realizar la experimentación se utilizó una solución de incrustación de CaSO_4 con una concentración de 7500 mg/L; en las membranas, se tomó en cuenta el tiempo de inducción (tiempo de precipitación) de las sales para la deposición de soluciones salinas sobresaturadas que se puede determinar detectando el tiempo hasta que se produce la precipitación y comienza la disminución del flujo en experimentos de rendimiento de ósmosis inversa.

El antiincrustante se dosificó en la solución de alimentación antes de comenzar el experimento de flujo cruzado. El análisis del rendimiento de los antiincrustantes en la membrana se realizó mediante el seguimiento de la disminución gradual del flujo de permeado en la misma. La temperatura se mantuvo en el intervalo de 25 a 30 °C. Las muestras de membrana se almacenaron con agua destilada durante 24 horas antes de su uso. Para medir el porcentaje de la sal, se midió la conductividad eléctrica tanto del permeado como de las soluciones de alimentación utilizando un medidor de conductividad.

El tiempo de inducción de la precipitación de CaSO_4 sin adición de antiincrustante se logró rápidamente después de los primeros dos minutos. Pero al agregar el antiincrustante a 10 mg/L se prolonga a 15 minutos. También disminuye la cantidad de precipitación formado con respecto a la muestra de precipitado de control, por tanto, se demostró que fue factible su uso con referencia a inhibición de los cristales. La conclusión en este trabajo fue que hubo éxito con el comportamiento antiincrustante de clorhidrato de quitosano biguanidina para las incrustaciones de sulfato y carbonato de calcio.

3.4. Discusión comparativa de los antiincrustantes encontradas

Estos antiincrustantes tenían diferentes funciones, aunque se utilizaron con un mismo objetivo. Sobre el hexametáfosfato de sodio se descubrió que lograba mejorías sobre las incrustaciones de carbonato de calcio, ya que mediante la interacción efectiva entre los iones de Ca y hexametáfosfato de sodio, se mejoraron las características de inhibición de escala hasta en un 75 %, bajo la condición del pH en 6,5.

Sin embargo, el ácido fosfinocarboxílico se encontró que redujo la turbidez del agua, pero no logró inhibir la formación de fosfato de calcio amorfo, por tanto, no se lograron los objetivos que se esperaban de este antiincrustante.

A esto, el correspondiente a la tecnología novedosa fue el de clorhidrato de quitosano biguanidina, que ofreció resultados positivos con respecto a retardar la formación de incrustaciones en agua de alimentación para sulfato de calcio y carbonato de calcio. Por tanto, tiene un excelente carácter antiincrustante, ya que transformó las estructuras de los elementos incrustantes, siendo como antiincrustante en una unidad de desalinización de laboratorio para la incrustación de membranas.

En comparación con los otros dos antiincrustantes analizados, el ácido fosfinocarboxílico no logró una mejoría directa sobre las partículas de calcio, una característica que se observó tanto con hexametáfosfato de sodio como con clorhidrato de quitosano biguanidina, haciendo de estos las mejores opciones para la inhibición de

incrustaciones, ya que las incrustaciones que afectan a las membranas en procesos de ósmosis inversa se forman principalmente de minerales como el calcio.

4. CONCLUSIONES

1. El hexametáfosfato de sodio es uno de los mejores antiincrustantes, debido a su acción secuestrante, el efecto en la turbidez del agua, eliminación de las bacterias aeróbicas, y debido a que inhibió la formación de escala a un 75 % sin incremento de fosfato. Además, la membrana de la ósmosis inversa estaba protegida y alejada de los contaminantes que absorbían el oxígeno de las líneas de dosificación, por tanto, su uso es positivo durante los procesos de ósmosis inversa para evitar las formaciones de incrustaciones y cuidar así la membrana.
2. Como un factor para que esta investigación cuente con material de relevancia actualizada, se analizaron las nuevas tecnologías, siendo escogido el bioactivo clorhidrato de quitosano biguanidina, el cual demostró eficiencia en la inhibición de incrustaciones en la membrana por tanto es positivo su uso. Sin embargo, no cubría todos los aspectos que el hexametáfosfato de sodio, siendo que, aunque cumple con ser un antiincrustante, su acción no se centraba en la recuperación de la membrana. Como se analizó, los procesos varían en todos los casos y a su vez la dosificación, esto lleva a concluir sobre la importancia de la ejecución del proceso antes de la utilización.
3. En comparación con el ácido fosfinocarboxílico y la tecnología novedosa de clorhidrato de quitosano biguanidina, el hexametáfosfato de sodio ha demostrado mejores resultados en la industria con respecto a las membranas de ósmosis inversa en los procesos de purificación del agua.

REFERENCIAS

- Ahuchaogu, A., Chukwu, O., Obike, A., Igara, C., Chidil, N., & Onyekachi, J., Reverse Osmosis Technology, its Applications and Nano-Enabled Membrane., *International Journal of Advanced Research in Chemical Science*, Vol. 5, 2018, pp. 20-26. <http://dx.doi.org/10.20431/2349-0403.0502005>
- Albergamo, V., Escher, B., Schymanski, E., Helmus, R., Dingemans, M., Cornelissen, E., Kraak, M., Hollender, J., & de Voogt, P., (). Evaluation of reverse osmosis drinking water treatment of riverbank filtrate using bioanalytical tools and non-target screening., *Environmental Science Water Research & Technology*, Vol. 6, 2020, pp. 103-116. <https://doi.org/116.10.1039/c9ew00741e>
- Benavides, O., & Muvdi, C., Evaluación de la ósmosis inversa y de la evaporación de película ascendente como técnicas de concentración de hidrolizados de almidón de yuca., *Revista ION*, Vol. 27, No. 1, 2014, pp. 59-70. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=342031331007>
- Chhima, N., Haddadb, E., Neveuxa, T., Bouteleuxa, C., Teychené, S., & Biscans, B., Performance of green antiscalants and their mixtures in controlled calcium carbonate precipitation conditions reproducing industrial cooling circuits., *Water Research*, Vol. 186, 2020, pp. 1-50. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116334>
- Choudhury, R., Gohil, J., Mohantya, S., & Nayak, S., Antifouling, fouling release and
-

- antimicrobial materials for surface modification of reverse osmosis and nanofiltration membranes., *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 6, 2018, pp. 313–333. <https://doi.org/10.1039/c7ta08627j>
- Das, S., O’Connell, M., Xu, H., Bernstein, R., Kim, J., Sankhala, K., Segal-Peretz, T., Shevate, R., Zhang, W., Zhou, X., Darling, S., & Bunn, J., *Assessing Advances in Anti-fouling Membranes to Improve Process Economics and Sustainability of Water Treatment.*, ACS Publications, Vol. 2, No. 11, 2022, pp. 2159–2173. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.2c00184>
- Dévora, G., González, R., & Ruiz, S., *Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México Tecnología y Ciencias del Agua.*, *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol. 4, No. 3, 2013, pp. 27-46. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531983002>
- ESIDIN., *Diseño de un Sistema de Ósmosis Inversa.*, 11 de junio de 2020. [Online]. Disponible en: <https://esidin.blog/2020/06/11/disenio-de-un-sistema-de-osmosis-inversa/>, Recuperado el 3 de julio del 2022.
- García, P., & Chairopoulou, M., *Investigating reverse osmosis membrane fouling and scaling by membrane autopsy of a bench scale device.*, *Environmental Technology*, Vol. 43, No. 21, 2021, pp. 3198-3211. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1918262>
- Ghada, A., Marwa, M. & Mona, A., *Comparison between Reverse Osmosis Desalination Cost Estimation Trends.*, *Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol. 3, No. 5, 2016, pp. 56-62. <https://oaji.net/articles/2017/4834-1525417139.pdf>
- González, J., *Application of quaternary ammonium compound and aliphatic amine as biocides in the mitigation of microfouling adhered to the internal surface of heat exchangers condensers refrigerated by seawater. Impact on the efficiency of different control strategies applied.*, *Journal of Marine Engineering & Technology*, Vol. 11, 2019, pp. 42-51. <https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1639460>
- Henthorne, L., & Boysen, B., *State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment.*, *Desalination*, Vol. 356, 2015, pp. 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.039>
- Imiete, I., & Viacheslovovna, N., *Reverse osmosis purification: A case study of the Niger Delta region.*, *Water Science*, 32, 2018, pp. 129-137. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.04.001>
- Jiang, S., Li, Y. & Ladewig, B., *A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies.*, *Science of the Total Environment*, Vol. 595, 2017, pp. 567–583. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.235>
- Kavaiya, A., & Raval, H., *Highly Selective and Antifouling Reverse Osmosis Membrane by crosslinkers induced Surface Modification.*, *Environmental Technology*, Vol. 43, 2021, pp. 2155-2166. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1869316>
- Lamma, O., *Impact of Reverse Osmosis on Purification of Water.*, *Journal of Pharmaceutical Biology*, Vol. 5, No. 2, 2015, pp. 108-112. https://www.academia.edu/37803103/IMPACT_OF_REVERSE_OSMOSIS_ON_PURIFICATION_OF_WATER
-

- Maher, Y., Ali, M., Salama, H. & Sabaa, M., Preparation, characterization and evaluation of chitosan biguanidine hydrochloride as a novel antiscalant during membrane desalination process., *Arabian Journal of Chemistry*, Vol. 13, 2018, pp. 2964–2981. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.08.006>
- Mangal, M., Salines, S., Dusseldorp, J., Kemperman, A., Schippers, J., Kennedy, M., & van der Meer, W., Effectiveness of antiscalants in preventing calcium phosphate scaling in reverse osmosis applications. *Journal of Membrane Science*, Vol. 623, 2021, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119090>
- Matin, A., Rahman, F., Zahid, H., & Zubair, S., Scaling of reverse osmosis membranes used in water desalination: Phenomena, impact, and control; future directions., *Desalination*, Vol. 455, 2019, pp. 135-157. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.009>
- Mohammad, Y., Mohammad, A., Zulfa, A., & Nabil, Z., Interaction of seawater microorganisms with scalants and antiscalants in reverse osmosis systems., *Desalination*, Vol. 487, 2020, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114480>
- Mohammed, A., SHMP as Antiscalant for Treating Brackish Water using Reverse Osmosis., *International Journal of Sciences*, Vol. 10, 2021, pp. 11-24. <http://dx.doi.org/10.18483/ijSci.2470>
- Morais, S., de Lima, F., Ferreira, T., Domingos, J., de Souza, M., Castro, B., & Balaban, R., Effect of pH on the efficiency of sodium hexametaphosphate as calcium carbonate scale inhibitor at high temperature and high pressure., *Desalination*, Vol. 491, 2020, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114548>
- Mushtaq, R., Asad, M., Mushtaq, S., Ahmad, N., Khan, N., Khan, A., Hong, W., Sadiq, R., & Jiang, Z., Antifouling and Flux Enhancement of Reverse Osmosis Membrane by Grafting Poly (3-Sulfopropyl Methacrylate) Brushes., *Membranes*, Vol. 11, No. 213, 2021, pp. 213-229. <https://doi.org/10.3390/membranes11030213>
- Park, K., Choi, C., Yu, H., Chae, S., & Kim, I., Optimization of chemical cleaning for reverse osmosis membranes with organic fouling using statistical design tools., *Environmental Engineering Research*, Vol. 23, No. 4, 2018, pp. 474-484. <https://doi.org/10.4491/eer.2017.098>
- Salama, H., Abdel, M., & Riad, G., Thermal properties, crystallization and antimicrobial activity of chitosan biguanidine grafted poly (3-hydroxybutyrate) containing silver nanoparticles., *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 117, 2017, pp. 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.12.153>
- Sellami, A., ben Hamed, Z., Mzoughi, D., & Mami, A., Chemical and Hydrodynamic Modelling of a Reverse Osmosis Desalination System Using Pseudo Bond Graph Approach., *Journal of Membrane Science & Technology*, Vol. 12, 2022, pp. 1-9. <https://doi.org/10.35248/2155-9589.22.12.288>
- Soler, J., Biofouling. Una visión general., 22 de abril del 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/jose-luis-soler-martinez/biofouling-vision-general>, Recuperado el 3 de julio 2022.
- Solís, C., Vélez, C., & Ramírez, J., Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, Vol. 11, No. 22, 2017, pp. 26-36. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-
-

[83672017000200026](https://doi.org/10.1021/acs.omega.8b00601)

- Takizawa, Y., Inukai, S., Araki, T., Cruz, R., Ortiz, J., Morelos, A., Tejima, S., Yamanaka, A., Obata, M., Nakaruk, A., Takeuchi, K., Hayashi, T., Terrones, M., & Endo, M., Effective Antiscaling Performance of Reverse-Osmosis Membranes Made of Carbon Nanotubes and Polyamide Nanocomposites., ACS Omega, Vol. 3, No. 6, 2018, pp. 6047–6055. <https://doi.org/10.1021/acs.omega.8b00601>
- Topçu, G., Çelik, A., Baba, A., & Demir, M., Design of Polymeric Antiscalants Based on Functional Vinyl Monomers for (Fe, Mg) Silicates., Energy & Fuels, Vol. 1, No. 8, 2017, pp. 8489–8496. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01221>
- Wang, Y., & Wang, R., Material Selection to Mechanisms and Industrial Uses Handbooks in Separation Science., Chapter 1 - Reverse Osmosis Membrane Separation Technology, Elsevier, 2019, pp. 1-45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812815-2.00001-6>
- Yokoyama, F., Nakajima, M., & Ichikawa, S., Analysis of Calcium Sulfate Scaling Phenomena on Reverse Osmosis Membranes by Scaling-Based Flux Model., Membranes, Vol. 12, No. 9, 2022, pp. 894-914. <https://doi.org/10.3390/membranes12090894>
- Zhang, R., Liu, Y., He, M., Zhao, X., Elimelech, M., & Jiang, Z., Antifouling membranes for sustainable water purification: strategies and mechanisms., Chemical Society Reviews, Vol. 45, 2016, pp. 5888-5924. <https://doi.org/10.1039/C5CS00579E>
- Zhao, D., Yu, S., Sun, B., Gao, S., Guo, S. & Zhao, K., Biomedical Applications of Chitosan and Its Derivative Nanoparticles., Polymers, Vol. 10, No. 4, 2018, pp. 462-479. <https://doi.org/10.3390/polym10040462>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Lourdes Castro Mieles. Análisis formal, redacción - primera redacción, investigación y metodología.
 - Dr.C. Alex Alberto Dueñas-Rivadeneira. Redacción – revisión y edición, supervisión, validación y visualización.
-