



Tratamiento sostenible de membranas de ósmosis inversa y ultrafiltración para la reutilización de purgas de torres de refrigeración

Este estudio evalúa la eficacia de un anti-incrustante libre de fósforo y biodegradable, y de los productos de limpieza que no contienen EDTA ni fósforo, para el tratamiento de una planta real de reutilización de efluentes industriales compuesta por ultrafiltración y ósmosis inversa. El tratamiento aplicado ha comportado una gestión sostenible con un aumento de la reutilización, un ahorro en el consumo de agua, una reducción del vertido y del impacto ambiental sin contribución a la eutrofización. Se maximizó y estabilizó el rendimiento de la planta de reutilización, reduciendo la frecuencia de limpiezas, alargando la vida de las membranas, y reduciendo el consumo energético y los costes de operación.

Palabras clave

Reutilización, purgas de torres de refrigeración, tratamiento sostenible, anti-incrustante, limpiador de membrana, ambientalmente respetuoso, biodegradable, EDTA-free, phosphorus-free.

SUSTAINABLE TREATMENT OF REVERSE OSMOSIS AND ULTRAFILTRATION MEMBRANES FOR COOLING TOWER PURGES REUSE

This study evaluates the efficacy of a phosphorus-free and biodegradable antiscalant and cleaning products that do not contain EDTA or phosphorus for the treatment of a real industrial effluent reuse plant consisting of ultrafiltration and reverse osmosis. The treatment applied resulted in sustainable management with increased reuse, savings in water consumption, a reduction in discharge, and a reduction in environmental impact without contributing to eutrophication. The performance of the reuse plant was maximized and stabilized, reducing cleaning frequency, extending membrane life, and reducing energy consumption and operating costs.

Keywords

Reuse, cooling tower blowdown, sustainable treatment, antiscalant, membrane cleaner, environmentally friendly, biodegradable, EDTA-free, phosphorus-free.

Jordi Aumatell Colom
director técnico de Adiquímica

Daniel Gutiérrez Estepa
director comercial en Andalucía de Adiquímica

Núria Adroer
responsable de I+D+i de Adiquímica

Paula Sagué Torrenta
técnica de I+D+i de Adiquímica

Alex Pascual Esco
técnico de I+D+i de Adiquímica

Alejandro Vega Rodríguez
director comercial en Cataluña y Baleares de Adiquímica

Paco Rodrigo Mora
director comercial en Levante de Adiquímica

Aurélie Biurrarena
directora comercial en Francia de Adiquímica

Alberto Cirugeda San Román
director comercial en Canarias de Adiquímica



1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la explotación de los recursos hídricos debido al aumento de la demanda, los problemas derivados del cambio climático como las sequías que provocan estrés hídrico, el aumento de la salinidad y del contenido en materia orgánica de las aguas, la contaminación de los medios acuáticos, la normativa más estricta y el incremento del precio del agua, han hecho que la reutilización del agua en la empresa se convierta en una necesidad para garantizar su producción, y asegurar un aporte alternativo constante de agua.

Los efluentes que genera la industria son una fuente alternativa de agua que puede ser reutilizada en la misma industria. El objetivo de la reutilización y recuperación de los efluentes industriales es captar el agua de fuentes no tradicionales, y tratarla para obtener una calidad acorde con sus usos posteriores. En este contexto, la utilización de membranas de ultrafiltración seguidas de membranas de ósmosis inversa, es una alternativa viable para el tratamiento y la reutilización de efluentes industriales (Drewnowski *et al.*, 2023), debido a su elevada eficacia y a la obtención de un agua regenerada de elevada calidad.

El ensuciamiento de las membranas es un problema persistente en todos los sistemas de ósmosis inversa. La pérdida de rendimiento de las membranas es causada mayoritariamente por cuatro tipos de ensuciamientos: incrustaciones y ensuciamientos por metales provocados por la precipitación de las sales inorgánicas de baja solubilidad y de óxidos/hidróxidos metálicos en el rechazo; adsorción de materia orgánica; formación de la biopelícula en la superficie de la membrana debida a la actividad de los microorganismos; y taponamiento de la superficie de la membrana debido a la deposición de material coloidal y particulado (Weinrich *et al.*, 2013 y Goh *et al.*, 2018).

Los sistemas de ultrafiltración se utilizan como pretratamiento de las membranas de ósmosis inversa porque ofrecen ventajas frente a los pretratamientos convencionales. La ultrafiltración produce un agua de alimentación a la ósmosis inversa estable y de elevada calidad en términos de turbidez, material particulado y coloidal (SDI), materia orgánica y precipitados inorgánicos (Lorain *et al.*, 2007). Se utilizan membranas de ósmosis inversa específicas resistentes al ensuciamiento por modificación de las propie-

dades superficiales de las membranas (Jiang *et al.*, 2017). Es imprescindible diseñar e implementar un programa de mantenimiento de las membranas de ultrafiltración y ósmosis inversa. Por un lado, se dosifican productos anti-incrustantes y biocidas para prevenir la formación de incrustaciones y la formación de la biopelícula por la actividad de los microorganismos. Y, por otro lado, se aplican protocolos de limpieza química para eliminar el ensuciamiento de la superficie de las membranas y recuperar su rendimiento.

El objetivo del presente estudio es evaluar la eficacia de un anti-incrustante libre de fósforo y biodegradable, y de los productos de limpieza que no contienen EDTA ni fósforo, para el tratamiento de las plantas de reutilización de efluentes industriales compuestas por ultrafiltración y ósmosis inversa.

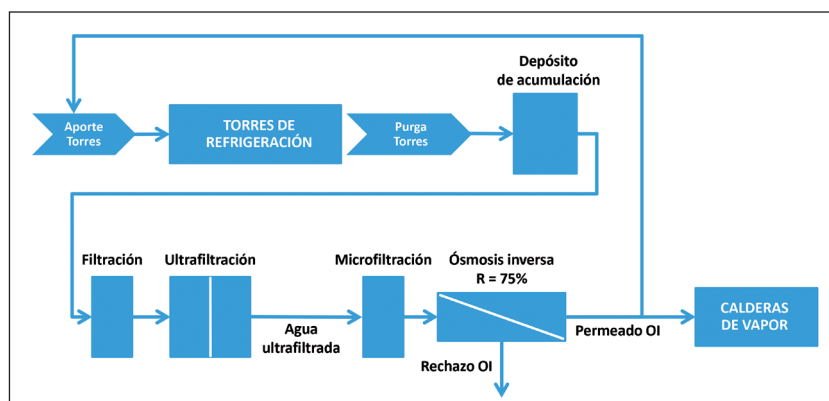
2. PLANTA REAL DE TRATAMIENTO PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS PURGAS DE LAS TORRES DE REFRIGERACIÓN

El estudio se realizó en una planta real para la reutilización del agua de las purgas de las torres de refrigeración como fuente alternativa de agua en una industria del sector de la alimentación.

La **Figura 1** muestra el diagrama de flujo del proceso de reutilización del agua de las purgas de las torres. El agua de la purga de las torres de refrigeración se acumula en un tanque donde se realiza una cloración para controlar el crecimiento microbiológico. El agua alimenta un sistema compuesto por una ultrafiltración seguida de una planta de ósmosis inversa.

La planta de ultrafiltración está compuesta por cuatro módulos To-

FIGURA 1. Diagrama de flujo el sistema de ultrafiltración y ósmosis inversa para el tratamiento del agua de las purgas de las torres de refrigeración.



» En este caso de estudio, cuando se planteó el uso del agua de la purga de la torre de refrigeración, se vio que era necesaria una mejora adicional de la calidad del agua para su reutilización, lo que hacía imprescindible aplicar procesos avanzados de tratamiento como la ósmosis inversa y la UF

ray HFUG-2020AN con membranas de fibra hueca de fluoruro de polivinilideno (PVDF) con un tamaño nominal de poro de 0,01 μm que operan a una conversión del 90%. La ósmosis inversa opera a una conversión de 75% y produce un caudal de permeado de 11 m^3/h . La planta está constituida por dos etapas con una configuración de dos tubos de presión en la primera etapa, y un tubo en la segunda etapa. Cada tubo contiene 5 membranas Hydranautics LFC3-LD, que son membranas de muy bajo ensuciamiento, diseñadas para el tratamiento de aguas residuales y efluentes industriales con elevado potencial de ensuciamiento.

El agua regenerada correspondiente al permeado de la ósmosis inversa se reutiliza para la alimentación de las torres de refrigeración y calderas de vapor. Los sistemas de refrigeración y las calderas de vapor son responsables de una gran parte del consumo de agua de la empresa. Con la reutilización se consigue una reducción del consumo del agua, una reducción del vertido, la calidad de agua requerida para las calderas, una mejora de la calidad del agua de alimentación a las torres de refrigeración y operar la torre a un mayor número de ciclos de concentración.

Cuando se planteó el uso del agua de la purga de la torre de refrigeración, se vio que era necesaria una mejora adicional de la calidad del agua para su reutilización, lo que hacía imprescindible aplicar procesos avanzados de tratamiento. En la empresa, el agua regenerada requiere una elevada calidad porque

se reutiliza para la alimentación de las torres de refrigeración y las calderas de vapor. Es por esta razón que se instaló un sistema de ósmosis inversa, debido a su elevada eficiencia en el rango de salinidad del agua residual tratada y de las purgas, y porque se consigue una elevada tasa de recuperación con una elevada calidad del agua permeada.

La eficacia de la ósmosis inversa está limitada por el ensuciamiento de las membranas. Las aguas que alimentan un sistema de ósmosis inversa para la reutilización tienen, habitualmente, todas las sustancias que provocan el ensuciamiento de las membranas: materia orgánica, carga microbiológica, material particulado y coloidal, sustancias inorgánicas y metales. En las torres de refrigeración se aporta agua que se pierde por evaporación, arrastres y purga. Las propiedades del agua de la purga dependen de la calidad del agua de alimentación de la torre de refrigeración, del número de ciclos de concentración que implica el aumento de la salinidad y las especies incrustantes del agua, del grado de contaminación microbiológica, y de los productos químicos dosificados para el tratamiento anti-incrustante, anticorrosivo y biocida de la torre (Ahmed *et al.*, 2020).

Para mejorar el proceso de la ósmosis inversa y minimizar el potencial de ensuciamiento por materia orgánica y material particulado y coloidal del agua que alimenta a las membranas, la empresa instaló un pretratamiento constituido por una filtración y una ultrafiltración.

Los objetivos del tratamiento sostenible fueron:

- Maximizar la conversión de la planta de ósmosis inversa y minimizar el volumen de rechazo mediante la dosificación de un anti-incrustante específico para inhibir la precipitación del carbonato de calcio, fosfato de calcio y hierro, formulado a partir de una mezcla sinérgica de materias activas biodegradables y que no contienen fósforo.
- Aplicar protocolos de limpieza eficaces para las membranas de ultrafiltración y ósmosis inversa utilizando limpiadores específicos ambientalmente respetuosos que no contienen EDTA ni fósforo en su formulación con los objetivos de aumentar la eficacia de las limpiezas de recuperación de las membranas de ultrafiltración, y restablecer las condiciones de operación de las membranas de ósmosis inversa en episodios excepcionales de ensuciamiento por desarrollo de la biopelícula.

2.1. TRATAMIENTO ANTI-INCrustANTE PARA LAS MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA

A causa del proceso de concentración de la salinidad que tiene lugar en el interior de las membranas de ósmosis inversa, existe la posibilidad de superar el límite de solubilidad de los compuestos inorgánicos insolubles y precipitar en la superficie de las mismas. En el rechazo es donde hay más peligro de precipitación, debido a la alta concentración de los com-



ponentes de las sales insolubles. Con el objetivo de evitar la formación de incrustaciones en las membranas de ósmosis inversa, se dosifica un producto anti-incrustante en la corriente de alimentación a la ósmosis inversa después de la ultrafiltración.

2.1.1. Anti-incrustante concentrado, biodegradable y libre de fósforo específico para el tratamiento de membranas de ósmosis inversa de plantas de reutilización

Las incrustaciones más habituales se pueden prevenir con un tratamiento convencional con la dosificación de un anti-incrustante no específico de amplio espectro. Sin embargo, estos anti-incrustantes convencionales no son efectivos para controlar las incrustaciones de fosfato de calcio. Con el objetivo de inhibir la formación de incrustaciones en las plantas de ósmosis inversa para la reutilización de efluentes industriales, se desarrolló el anti-incrustante ADIC RO-86AdicGreen, que es un producto concentrado, biodegradable y libre de fósforo que no contribuye a la eutrofización. Es una formulación concentrada que proporciona una elevada eficacia a dosis bajas reduciendo los costes de operación.

Al tratarse de un producto concentrado, también se reducen los costes asociados al transporte y almacenaje, reduciendo las emisiones de CO₂. Es altamente eficaz para inhibir la formación de incrustaciones de fosfato de calcio, sin necesidad de ajuste de pH del agua de alimentación con ácido. También presenta una elevada capacidad de dispersión

de los metales, especialmente para el hierro. Además, es efectivo frente a la formación del resto de las incrustaciones inorgánicas como el carbonato de calcio, sulfato de calcio, sulfato de bario, sulfato de estroncio y fluoruro de calcio, así como para inhibir la formación de depósitos de aluminio, sílice y manganeso. El anti-incrustante desarrollado está formulado a partir de una mezcla sinérgica de materias activas que no contienen fósforo en su composición. Además, es un producto biodegradable de acuerdo con el método estándar para la evaluación de la biodegradabilidad OECD 302 B (OECD, 1992).

2.1.2. Software para el diseño del tratamiento anti-incrustante, la modelización de los equilibrios iónicos del agua y la predicción de los potenciales de incrustación

Para diseñar el tratamiento anti-incrustante óptimo es fundamental, por un lado, modelizar exactamente la composición y el comportamiento del agua en el interior de las membranas, y, por otro lado, es imprescindible disponer de un modelo de dosificación del anti-incrustante.

El *software* científico Adicro es un programa informático desarrollado íntegramente por Adiquímica, que desde hace más de 30 años permite cumplir con estos objetivos aportando un conocimiento y un tratamiento efectivo de las plantas de ósmosis inversa con una minimización de los costes de operación y del impacto ambiental. Es un programa en constante mejora e innovación alimentado a partir del conocimiento adqui-

rado en los ensayos de laboratorio y de planta piloto, con la experiencia adquirida en planta real y a partir de la bibliografía científica más reciente.

Adicro simula el comportamiento del agua en las plantas de ósmosis inversa y modeliza los índices de sobresaturación de las especies insolubles presentes en el agua y sus interacciones a partir de la composición del agua de alimentación, de la temperatura, de la conversión de la planta y de las membranas utilizadas. Recomienda la dosis óptima del anti-incrustante desarrollado para proteger las membranas frente a la formación y deposición de especies insolubles.

El hecho diferencial de este *software* respecto la mayoría de programas de predicción de las incrustaciones en sistemas de osmosis inversa, es que determina de manera muy precisa los potenciales de incrustación utilizando una compleja modelización de los equilibrios iónicos (Adroer *et al.*, 2001). Se eliminan las limitaciones y restricciones de las predicciones de la formación de incrustaciones basadas en índices simplificados que utilizan las concentraciones totales obtenidos mediante análisis, sin tener en cuenta todas las posibles asociaciones iónicas que tienen lugar.

2.1.3. Diseño del tratamiento anti-incrustante de la ósmosis inversa

La conversión de la planta de ósmosis inversa y la composición del agua de alimentación son las variables que tienen una influencia más importante en el cálculo del poder

» El uso de un anti-incrustante libre de fósforo y biodegradable y de productos de limpieza que no contienen EDTA ni fósforo permite un tratamiento sostenible de las plantas de ultrafiltración y ósmosis inversa para la reutilización

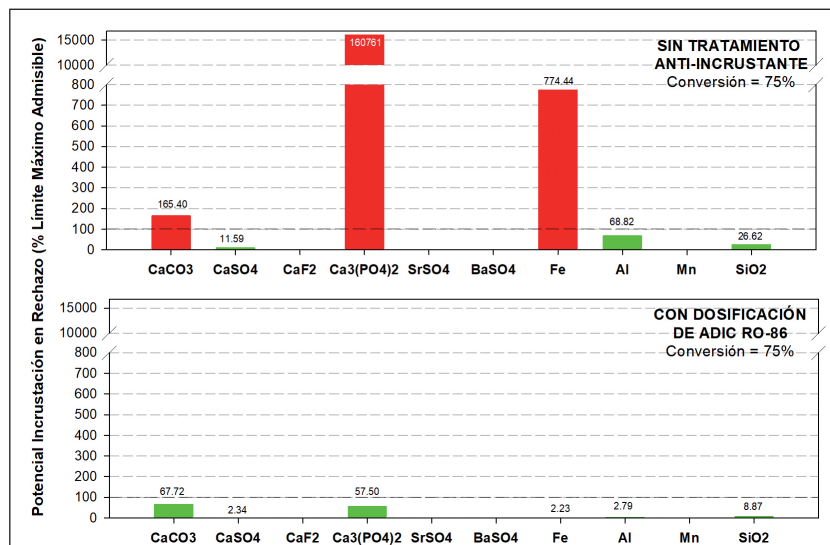
incrustante del agua de rechazo. La planta de ósmosis inversa operaba a una conversión del 75%. Esta conversión comportaba que las concentraciones de las especies incrustantes en el rechazo se multiplican por 4.0 y, por lo tanto, el poder incrustante en el rechazo aumentan con el consiguiente peligro de precipitación. El agua tenía una elevada conductividad de 2.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Con el objetivo de determinar la dosis óptima del anti-incrustante específico para operar a una conversión de diseño del 75% sin peligro de formación de incrustaciones, se realizó un estudio utilizando el *software* Adicró. El programa calcula los potenciales de incrustación, que permiten determinar el peligro de incrustación en el rechazo. El potencial de incrustación se expresa como el porcentaje del límite máximo admisible para los distintos índices de sobresaturación e índices de ensuciamiento. Un potencial de incrustación superior al 100% significa que el índice de sobresaturación correspondiente es mayor que el límite máximo admisible para este índice y que el compuesto insoluble puede precipitar.

Los resultados de la simulación indicaron que los potenciales de incrustación sin tratamiento anti-incrustante del carbonato de calcio, fosfato de calcio y hierro, superaban el valor del 100%, indicando que existía riesgo de ensuciamiento de la membrana por estos compuestos. Con la dosificación del anti-incrustante específico, los potenciales de incrustación para estos compuestos insolubles, disminuyeron hasta alcanzar valores inferiores al 100%.

La **Figura 2** muestra los resultados simulados de reducción de los potenciales de incrustación del agua de rechazo con la dosificación del anti-incrustante específico. Se concluye

FIGURA 2. Potenciales de incrustación en el rechazo para cada especie insoluble sin tratamiento anti-incrustante y con dosificación del anti-incrustante específico operando a una conversión del 75%.



que, con la dosificación del anti-incrustante específico y operando a la conversión de diseño del 75%, el sistema queda perfectamente protegido frente al ensuciamiento y la formación de incrustaciones.

2.2. AUMENTO DE LA EFICACIA DE LAS LIMPIEZAS DE RECUPERACIÓN DE LAS MEMBRANAS DE ULTRAFILTRACIÓN

2.2.1. Caracterización del agua de alimentación a las membranas de ultrafiltración

Se realizó una caracterización orgánica, microbiológica y de turbidez del agua que alimenta al sistema de ultrafiltración con el objetivo de determinar su potencial de ensuciamiento. A partir del análisis se concluye que el agua de alimentación a la ultrafiltración presenta un potencial de ensuciamiento por material orgánico, microbiológico y de turbidez elevado, superando los límites máximos de calidad de agua a la alimentación establecidos por los fabricantes de membranas de ósmosis inversa.

2.2.2. Evolución de los parámetros de operación de la ultrafiltración

La ultrafiltración tiene como objetivo minimizar el ensuciamiento por materia orgánica, material coloidal y particulado. El mecanismo óptimo de filtración de las membranas de ultrafiltración de fibra hueca es la filtración por formación del cake o torta en la superficie externa de la membrana. La torta se elimina fácilmente con los contralavados que se realizan automáticamente de forma periódica. Las limpiezas de mantenimiento (CEB) se realizan con productos genéricos cuando los contralavados no son suficientes para recuperar las condiciones iniciales de la membrana. Las limpiezas químicas de recuperación (CIP) solo se realizan para recuperar las condiciones de operación cuando las limpiezas de mantenimiento no consiguen disminuir la presión transmembrana y recuperar el flujo de diseño. Para conseguir la máxima eficacia en las limpiezas de recuperación, se utilizan productos formulados.

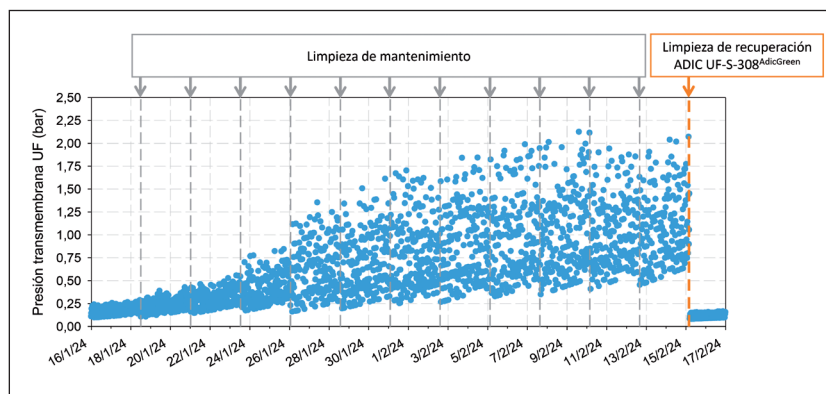


La **Figura 3** muestra la evolución de la presión transmembrana de la ultrafiltración. Los contra-lavados automáticos periódicos se realizan cada 30 minutos, y las limpiezas químicas de mantenimiento con productos genéricos, se realizan cada 60 horas. A causa del elevado potencial de ensuciamiento del agua de alimentación, las membranas de ultrafiltración presentaban una elevada velocidad de ensuciamiento, y las limpiezas de mantenimiento con productos genéricos no eran eficaces para recuperar el rendimiento de filtración. Es por esta razón que se aplicó un protocolo de limpieza química de recuperación con producto formulado para maximizar la eficacia de limpieza.

2.2.3. Protocolo de limpieza de recuperación de las membranas de ultrafiltración utilizando un producto de limpieza ambientalmente respetuoso libre de fósforo y EDTA

Se diseñó el protocolo de limpieza de recuperación eficaz para eliminar el ensuciamiento y recuperar el rendimiento de las membranas de ultrafiltración, utilizando el limpiador alcalino en polvo Adic UF-S-308AdicGreen. Es un producto ambientalmente respetuoso, que ha sido diseñado para la eliminación de biopelícula, depósitos de origen orgánico, metales y precipitados de fosfato de calcio en membranas de ultrafiltración utilizadas en los procesos de reutilización. No contiene ni EDTA ni fósforo en su formulación. Es un producto altamente formulado con materias activas ambientalmente respetuosas que sustituyen los principios activos no biodegradables y que contribuyen a la eutrofización.

FIGURA 3. Evolución de la presión transmembrana de la ultrafiltración antes y después de realizar la limpieza química de recuperación.



Se aplicó el protocolo de limpieza de recuperación a las membranas de ultrafiltración de la planta real de reutilización. La **Figura 3** muestra la presión transmembrana después de aplicar el protocolo de limpieza de recuperación utilizando el limpiador Adiclean UF-S-308AdicGreen. El protocolo de limpieza de recuperación eliminó el ensuciamiento de la superficie de las membranas, y el ensuciamiento adherido a las paredes de los poros que provocaban su bloqueo. La presión transmembrana disminuyó hasta los valores iniciales de operación, y se recuperó el rendimiento de flujo de filtración.

2.3. PROTOCOLO DE LIMPIEZA EFICAZ DE LAS MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA EN UN EPISODIO DE ENSUCIAMIENTO POR DESARROLLO DE BIOPELÍCULA

2.3.1. Episodio de ensuciamiento por desarrollo de biopelícula en las membranas de ósmosis inversa

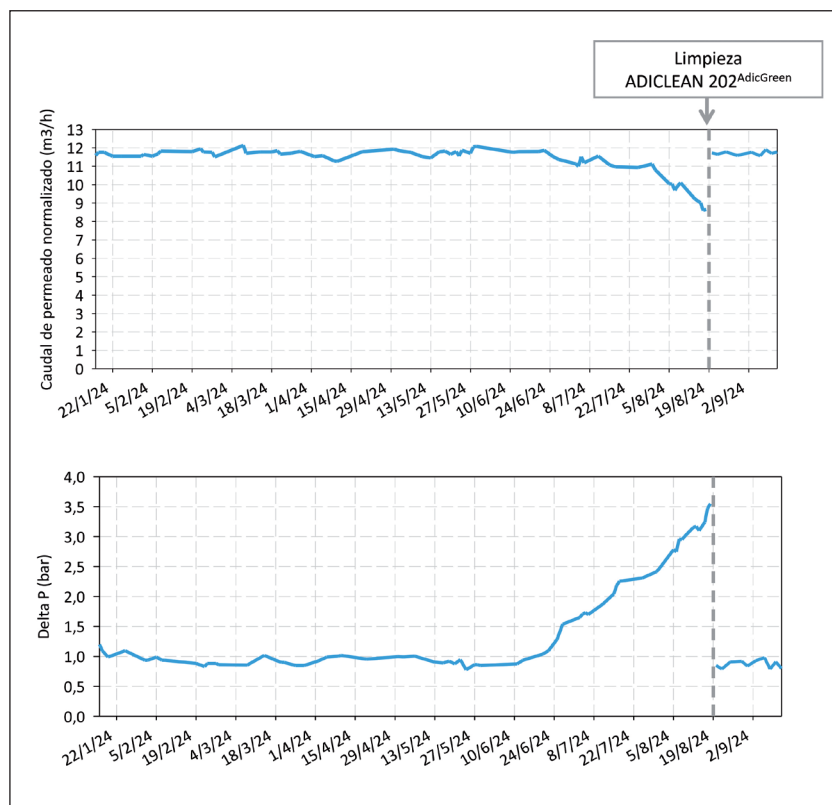
La **Figura 4** muestra la evolución del caudal de permeado normalizado y de la Delta P de la planta de ósmosis inversa. Los datos normalizados de la planta indican que, en

el periodo comprendido entre enero y julio de 2024, el caudal de permeado normalizado y la Delta P se mantuvieron estables, sin síntomas de formación de incrustaciones ni de ensuciamiento por biopelícula. Sin embargo, a partir de julio de 2024 se inició la disminución caudal de permeado normalizado y el aumento de la Delta P de la primera etapa. La evolución de estos parámetros fue progresiva. Estos síntomas son indicativos del desarrollo de la biopelícula en la superficie de las membranas debido a las temperaturas extremas que alcanzó el agua en el periodo estival de 2024. Se aplicó un protocolo de limpieza química de las membranas de ósmosis inversa para eliminar el ensuciamiento y recuperar el rendimiento de la planta.

2.3.2. Eficacia del protocolo de limpieza de las membranas de ultrafiltración utilizando un producto de limpieza ambientalmente respetuoso libre de fósforo y EDTA

Se diseñó un protocolo de limpieza de las membranas de ósmosis inversa utilizando limpiador líquido Adiclean 202AdicGreen que es innovador y ambientalmente respetuoso. Es un producto altamente formulado de pH alcalino, ambientalmente

FIGURA 4. Evolución del caudal de permeado normalizado y la Delta P antes y después de aplicar el protocolo de limpieza de las membranas de ultrafiltración.



te respetuoso que no contiene ni EDTA ni fósforo en su formulación. Es altamente eficaz para eliminar la biopelícula y el ensuciamiento por aluminosilicatos (arcilla). Es efectivo a dosis bajas y es económicamente viable. Su utilización reduce los costes de operación y minimiza el impacto ambiental que representa su vertido.

Se aplicó el protocolo de limpieza a las membranas de ósmosis inversa de la planta real de reutilización. La **Figura 4** muestra el caudal de permeado normalizado y la Delta P después de aplicar el protocolo de limpieza utilizando el limpiador Adiclean 202AdicGreen. El protocolo de limpieza eliminó el ensuciamiento de las membranas y recuperó el rendimiento de la planta. El caudal de permeado normalizado aumentó y la Delta P disminuyó, restableciendo los valores de diseño de la planta.

3. CONCLUSIONES

El tratamiento sostenible de las plantas de ultrafiltración y ósmosis inversa para la reutilización utilizando un anti-incrustante libre de fósforo y biodegradable, y productos de limpieza que no contienen EDTA ni fósforo, permiten:

- Aumentar el rendimiento de la ultrafiltración, aumentando el tiempo de operación con rendimiento óptimo y reduciendo la frecuencia de las limpiezas químicas de mantenimiento y recuperación.
- Aumentar el rendimiento de la ósmosis inversa evitando la formación de incrustaciones.
- Reducir el consumo y los costes energéticos al trabajar a una presión de alimentación menor en la ósmosis inversa.
- Reducir la huella de carbono, disminuyendo las emisiones de CO₂.

- Aumentar el caudal de agua regenerada de elevada calidad para su reutilización.
- Ahorro significativo del aporte de agua al utilizar fuentes alternativas.
- Minimizar las paradas de la planta de ósmosis inversa por limpiezas químicas, reduciendo los costes asociados a las paradas y al consumo de productos químicos.
- Alargar la vida útil de las membranas de ultrafiltración y ósmosis inversa, reduciendo los costes asociados a la reposición de membranas.
- Reducir el vertido y minimizar el impacto ambiental sin contribución a la eutrofización.

Bibliografía

- [1] Adroer, M., Bodas, J., Coma, J. (2001). Programa de cálculo de tratamiento para instalaciones de ósmosis inversa. Tecnología del Agua, 215, 58-74.
- [2] Ahmed, J., Jamal, J., Shujaatullah, M. (2020). Recovery of cooling tower blowdown water through reverse osmosis (RO): review of water parameters affecting membrane fouling and pretreatment schemes. Desalination and Water Treatment 189, 9-17.
- [3] Drewnowski, J., Marjanowski, J., Sadaj, M., Szelag, B., Szulzyk-Cieplak, J., Lagód, G. (2023). Strategy towards the use of ultrafiltration and reverse osmosis for industrial water recovery and reuse as part of the Green Deal Implementation. Desalination and Water Treatment 305, 227-235.
- [4] Goh, P.S., Lau, W.J., Othman, M.H.D., Ismail, A.F. (2018). Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies. Desalination 425, 130-155.
- [5] Jiang, S., Li, Y., Ladewig, B.P. (2017). A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. Science of the Total Environment 595, 567-583.
- [6] Lorain, O., Hersant, B., Persin, P., Grasmick, A., Brunard, N., Espenan, J.M. (2007). Ultrafiltration membrane pre-treatment benefits for reverse osmosis process in seawater desalting. Quantification in terms of capital investment cost and operating cost reduction. Desalination 203, 277-285.
- [7] OECD, 1992. OECD Guideline for testing of chemicals 302B. Zahn-Wellens/EMPA Test.
- [8] Weinrich, L., Haas, C.N., LeChevallier, M.W. (2013). Recent advances in measuring and modeling reverse osmosis membrane fouling in seawater desalination: a review. Journal of Water Reuse and Desalination 3(2), 85-101.