



Reutilización del agua de la purga de torres de refrigeración

Solución sostenible para un ahorro de agua y energía

J. Aumatell Colom, D. Gutiérrez Estepa, P. Infante Romero, J. I. Ramos Grande, A. Pérez, J. C. Benjumea Reyes, O. Villanueva Chapa, S. Coma Calafell, N. Adroer Martori, E. Cortada Cluet y M. C. Royo Reverter

ADIQUIMICA S.A.

El estudio evalúa el aumento de rendimiento, el ahorro de agua y energía, la reducción de costes de operación y la reducción de las emisiones de CO₂ que ha supuesto el uso de un antiincrustante libre de fósforo y biodegradable diseñado específicamente, y de un limpiador que no contiene EDTA ni fósforo en su formulación, en una planta real de ósmosis inversa que trata el agua de purga de las torres de refrigeración para su reutilización.

PALABRAS CLAVE: Tratamiento de aguas; Torre de refrigeración; Ósmosis inversa; Antiincrustante.

The study evaluates the increase in performance, water and energy savings, reduction in operating costs and reduction in CO₂ emissions that has resulted from the use of a specifically designed phosphorus-free and biodegradable antifouling, and a cleaner that does not contain EDTA or phosphorus in its formulation, in a real reverse osmosis plant that treats purge water from cooling towers for reuses.

KEYWORDS: Water treatment; Cooling tower; Inverse osmosis; Antifouling.

Antes de la intervención de ADIQUIMICA, la planta de ósmosis inversa estaba afectada por un ensuciamiento severo por biopelícula, y las membranas se tenían que limpiar frecuentemente, provocando una disminución drástica del rendimiento. Además, la planta operaba a una conversión inferior respecto a la de diseño, a causa del elevado poder incrustante del agua y del uso de un antiincrustante no específico, de amplio espectro formulado en base a fósforo orgánico.

El tratamiento con un antiincrustante específico, biodegradable y formulado a partir de una mezcla sinérgica de materias activas que no contienen fósforo, y el uso de un limpiador ambientalmente respetuoso, comportó una gestión sostenible de la planta de ósmosis inversa, con un aumento de uso del agua reutilizada, un ahorro en el consumo de agua y una reducción

del vertido. Se consiguió un ahorro energético y la reducción de las emisiones de CO₂. También se redujeron los costes asociados a la reposición de membranas, a las paradas de la planta por limpiezas y al consumo de productos químicos.

INTRODUCCIÓN

La escasez del recurso agua, resultado del crecimiento de la población, supone una amenaza para el crecimiento económico, la seguridad hídrica y la salud de los ecosistemas. La industria consume grandes cantidades de agua y produce cantidades significativas de aguas residuales. Si estas aguas residuales no se tratan adecuadamente, su vertido provoca la contaminación del medio, afectando negativamente a los ecosistemas acuáticos y a la salud pública. El incremento de la explotación de los recursos hídricos debido al aumento de la demanda, los problemas derivados del cambio climático como las sequías, la contaminación de los medios acuáticos, la normativa más estricta y el incremento del precio del agua, hacen que la reutilización del agua se convierta en una necesidad creciente para garantizar su cantidad y calidad. La reutilización del agua minimiza el volumen y el riesgo medioambiental de las aguas residuales vertidas, y también disminuye la presión sobre los ecosistemas derivada de la extracción de agua.

En muchas instalaciones industriales, como en la industria química, las plantas de generación de energía o la industria petrolera, los sistemas de refrigeración son responsables de una gran parte del consumo de agua. En las torres de refrigeración se aporta el agua que se pierde por evaporación, arrastres y purga. La reutilización de la purga es una fuente alternativa de agua que puede ser utilizada para alimentar las torres de refrigeración o las calderas. 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 aumenta

» La escasez del recurso agua, resultado del crecimiento de la población, supone una amenaza para el crecimiento económico, la seguridad hídrica y la salud de los ecosistemas

la salinidad y las especies incrustantes del agua, del grado de contaminación microbiológica, y de los productos químicos dosificados para el tratamiento antiincrustante, anticorrosivo y biocida de la torre [2]. La ósmosis inversa es una de las tecnologías más utilizadas en la reutilización de la purga de las torres de refrigeración, porque es eficaz en el rango de salinidad de las purgas, y se consigue una elevada tasa de recuperación con una elevada calidad del agua tratada. Es necesario diseñar un pretratamiento adecuado de la ósmosis inversa, en función de la calidad del agua de purga. Cuando se reutiliza el agua permeada de la ósmosis inversa para alimentar las torres de refrigeración, se mezcla con el agua de aporte, consiguiendo una reducción del consumo, una mejora de la calidad del agua de alimentación, operar la torre a un mayor número de ciclos de concentración y una reducción del vertido.

Aparte del coste energético de la operación de las plantas de ósmosis inversa, el coste de la reposición de las membranas también es significativo. La reposición de las membranas depende de su vida útil. Las membranas se sustituyen cuando no se consigue el rendimiento deseado, es decir, no producen suficiente caudal de permeado o el rechazo de sales se reduce obteniendo un agua con una conductividad elevada. Hay dos tipos de factores que reducen el rendimiento de las membranas y, por lo tanto, reducen su vida útil, provocando un aumento del consumo energético, de los costes de operación y del impacto ambiental. Por un lado, hay los factores inherentes a la membrana y a la planta, que son el envejecimiento de la membrana y la configuración de la planta. Cuando se instala

una membrana, su rendimiento disminuye progresivamente debido a la temperatura, presión, tiempo de operación y compactación. Y, por otro lado, hay los factores que se pueden minimizar, alargando la vida útil de la membrana, que son los efectos del ensuciamiento y la frecuencia y efectividad de las limpiezas químicas de las membranas. El ensuciamiento de las membranas es un problema persistente en todos los sistemas de ósmosis inversa. La pérdida de rendimiento de las membranas es causado mayoritariamente por cuatro tipos de ensuciamientos: incrustaciones y ensuciamiento por metales, causados 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 (5, 10). Con el objetivo de maximizar la recuperación de los sistemas de ósmosis inversa, prevenir el ensuciamiento y conseguir la máxima reutilización de las purgas de los sistemas de refrigeración, es necesario diseñar un tratamiento adecuado y adaptado a cada planta.

El objetivo del presente estudio es evaluar el aumento de rendimiento, el ahorro de agua y energía, la reducción de costes de operación y la reducción de las emisiones de CO₂ que ha supuesto el uso de un antiincrustante libre de fósforo y biodegradable diseñado específicamente, y de un limpiador que no contiene EDTA ni fósforo en su formulación, en una planta real de ósmosis inversa que trata el agua de purga de las torres de refrigeración para su reutilización.

CASO DE ESTUDIO DE UNA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA QUE TRATA EL AGUA DE PURGA DE UNA TORRE DE REFRIGERACIÓN PARA SU REUTILIZACIÓN

DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA ANTES DE LA INTERVENCIÓN DE ADIQUIMICA

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo del proceso de reutilización de las purgas de las torres de refrigeración de la planta real del caso de estudio.

Debido al proceso de concentración que tiene lugar en las torres de refrigeración, las purgas contienen una elevada concentración de sales. El caudal de purga de 120 m³/h es tratado para su reutilización mediante dos líneas de ósmosis inversa iguales con un pretratamiento previo. Cada línea de ósmosis inversa está constituida por dos etapas, y opera a una conversión del 75 %. Se obtiene un caudal de permeado total de 90 m³/h, que se reutiliza para alimentar las torres de refrigeración.

Con el objetivo de aumentar el caudal reutilizado como aporte a las

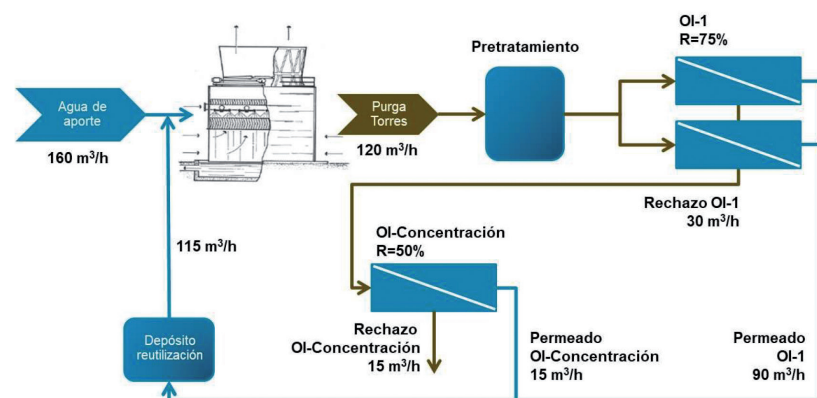
torres de refrigeración, el caudal de rechazo de 30 m³/h de las líneas de ósmosis inversa que tratan las purgas alimentan una ósmosis inversa de recuperación de rechazos. Esta agua presenta una elevada concentración de sales incrustantes. A causa del proceso de concentración de la salinidad que tiene 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 membranas. En el rechazo es donde hay más peligro de precipitación, debido a la alta concentración de los componentes de las sales insolubles. El caudal de permeado de la planta de recuperación de rechazos también se reutiliza para alimentar las torres de refrigeración. La ósmosis inversa de recuperación de rechazos está constituida por dos etapas, con una configuración de tres tubos de presión en la primera etapa y dos tubos en la segunda etapa. Cada tubo contiene seis membranas 8040 Hydranautics ESPA2-LD.

Antes de la intervención de ADIQUIMICA, para evitar la formación de incrustaciones en las membranas de ósmosis inversa se realizaba un tratamiento convencional con la dosificación de un antiincrustante no específico de amplio espectro formulado en base a fósforo orgánico. El rendimiento de la ósmosis inversa de recuperación de rechazos estaba limitada por el elevado potencial de incrustación del sulfato de calcio en el rechazo. La formación de las incrustaciones de sulfato de calcio tiene lugar cuando las especies iónicas individuales de sulfato y calcio alcanzan una concentración que excede los límites de solubilidad. La sobresaturación del sulfato de calcio resulta en la formación de incrustaciones. El sulfato de calcio es una sal cristalina que precipita en forma de agujas formando rosetas o estrellas muy estables, que crecen como incrustaciones muy difíciles de eliminar. La solubilidad del sulfato de calcio respecto la temperatura es similar a la del carbonato de calcio, es decir, la solubilidad disminuye cuando aumenta la temperatura. Sin embargo, mientras que la precipitación del carbonato de calcio puede minimizarse disminuyendo el pH con la dosificación de ácido, la solubilidad del sulfato de calcio tiene muy poca dependencia respecto el pH. Por lo tanto, la precipitación de sulfato de calcio no puede ser prevenida disminuyendo el pH de alimentación; en consecuencia, las incrustaciones no pueden ser eliminadas utilizando productos de limpieza ácidos. Las incrustaciones de sulfato de calcio provocan una disminución del caudal de permeado, un aumento de la presión de alimentación, un aumento de la Delta P y un aumento del paso de sales. Este efecto es más importante en las membranas localizadas en las últimas posiciones de la instalación.

La conversión de diseño de la ósmosis inversa de recuperación de rechazos era del 65 %. Sin embargo, a causa del elevado potencial de incrustación del sulfato de calcio que presenta el agua en el concentrado, operando

» La formación de las incrustaciones de sulfato de calcio tiene lugar cuando las especies iónicas individuales de sulfato y calcio alcanzan una concentración que excede los límites de solubilidad

FIGURA 1. Diagrama de flujo del proceso de reutilización de las purgas de las torres de refrigeración



a la conversión de diseño el antiincrustante de amplio espectro que se dosificaba no era efectivo para prevenir su precipitación. Con el objetivo de proteger las membranas frente las incrustaciones de sulfato de calcio, se había disminuido la conversión al 50 %. Operando a una conversión inferior respecto a la de diseño, se habían reducido los potenciales de incrustación del sulfato de calcio y del resto de especies insolubles. El poder incrustante del agua a la conversión del 50 % se encontraban dentro de los límites de efectividad del antiincrustante de amplio espectro. Sin embargo, se redujo el caudal de permeado de diseño que se reutilizaba a 15 m³/h. Por lo tanto, la reutilización total de las purgas de las torres de refrigeración era del 87,5 %, que correspondía a la suma del caudal de permeado de las dos líneas de ósmosis inversa que trataban las purgas (90 m³/h) y el caudal de permeado de la ósmosis inversa de recuperación de rechazos (15 m³/h). El rechazo total del sistema de reutilización era de 15 m³/h.

Por otro lado, la planta de recuperación de rechazos presentaba sínto-

mas de ensuciamiento severo, que obligaban a realizar limpiezas químicas frecuentes. La Figura 2 muestra la evolución del caudal de permeado normalizado. Los parámetros normalizados son los mejores indicadores del ensuciamiento de las membranas. La normalización de los datos de operación se realizó de acuerdo con el método estándar ASTM D 4516 Standard Practice for Standardizing Reverse Ósmosis Performance Data (American Society for Testing Materials, 2010). El rendimiento de una planta de ósmosis inversa está influenciado por la composición del agua de alimentación, la presión de alimentación, la temperatura y la conversión. La variación de alguna de estas variables implica una variación de la productividad y de la calidad del agua de permeado. La normalización permite distinguir si la pérdida de rendimiento es debida a la variación de estas variables o es debida al ensuciamiento. El caudal de permeado normalizado se calcula a partir del caudal de permeado de la planta corregido frente las variables de composición, temperatura y presiones en el momento de la lectura de la medida

de caudal, y se compara con un valor de referencia. Por lo tanto, una pérdida de rendimiento en los parámetros normalizados se atribuye sólo a procesos de ensuciamiento.

Los datos normalizados indican que, durante el periodo estudiado, el caudal de permeado normalizado disminuyó progresivamente un 46 %, pasando de 14 a 7.5 m³/h. Se realizaron siete limpiezas químicas en un periodo de un año. La elevada frecuencia de las limpiezas y los protocolos de limpieza aplicados no eran eficaces, y no conseguían restablecer el caudal de permeado normalizado.

ACCIONES DE MEJORA PARA AUMENTAR EL RENDIMIENTO DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA DE RECUPERACIÓN DE RECHAZOS

Con el objetivo de aumentar el rendimiento de la ósmosis inversa de recuperación de rechazos, ADIQUIMICA estableció dos acciones de mejora:

1. Aumentar la conversión de la planta y minimizar el volumen de rechazo, mediante la dosificación de un antiincrustante específico para inhibir

FIGURA 2. Caudal de permeado normalizado de la osmosis inversa de recuperación de rechazos. Caudal de diseño operando a una conversión del 50 % y frecuencia de las limpiezas químicas



» Los antiincrustantes que contienen fósforo en su formulación son ampliamente utilizados para el control de las incrustaciones en los sistemas de ósmosis inversa

la precipitación del sulfato de calcio, formulado a partir de una mezcla sinérgica de materias activas biodegradables y que no contienen fósforo.

2. Aplicar un protocolo de limpieza eficaz para recuperar el rendimiento de las membranas, y establecer un programa preventivo para minimizar el ensuciamiento y la frecuencia de las limpiezas.

ESTRATEGIA PARA AUMENTAR LA CONVERSIÓN DE LA ÓSMOSIS INVERSA DE RECUPERACIÓN DE RECHAZOS

Antiincrustante biodegradable y libre de fósforo específico para inhibir la formación de incrustaciones de sulfato de calcio

Con el objetivo de aumentar la conversión de la ósmosis inversa de recuperación de rechazos hasta el valor de diseño de 65 %, se desarrolló el antiincrustante específico ADIC RO-64 AdicGreen con una elevada eficacia para inhibir la formación de incrustaciones de sulfato de calcio en sistemas de membranas. También es efectivo frente la formación del resto de las incrustaciones inorgánicas, como el carbonato de calcio, sulfato de bario, sulfato de estroncio, fluoruro de calcio y fosfato de calcio, así como para inhibir la formación de depósitos de hierro, aluminio, sílice y manganeso.

Los antiincrustantes que contienen fósforo en su formulación son ampliamente utilizados para el control de las incrustaciones en los sistemas de ósmosis inversa. Sin embargo, su baja biodegradabilidad y su contenido en fósforo son algunas de las razones de la preocupación por el impacto ambiental que representa el vertido de

estos compuestos. Cuando los antiincrustantes que contienen fósforo se vierten, pueden actuar como fuente de nutrientes para algas y bacterias, y pueden provocar eutrofización [4]. Por consiguiente, la normativa medioambiental y los requisitos de calidad del rechazo de las plantas de ósmosis inversa son cada vez más restrictivos en lo que respecta al vertido de los productos químicos utilizados en el tratamiento del agua. En este contexto, el antiincrustante 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). Las pruebas de biodegradabilidad determinan la susceptibilidad del antiincrustante a la degradación microbiana en condiciones ambientales, por lo que se puede establecer su seguridad cuando se vierte. En las pruebas experimentales, el proceso de biodegradación se monitoriza mediante la determinación de la DQO (demanda química de oxígeno) de diferentes mezclas que contienen el antiincrustante desarrollado, nutrientes y lodos activos, durante un periodo de 28 días.

Software para el diseño del tratamiento antiincrustante, la modelización de los equilibrios iónicos del agua y la predicción de los potenciales de incrustación

Para diseñar el tratamiento antiincrustante óptimo, operando a la conversión de diseño del 65 %, es fundamental, por un lado, modelizar exactamente la composición y el

comportamiento del agua en el interior de las membranas, y predecir de forma muy precisa la formación de incrustaciones. Y, por otro lado, es imprescindible disponer de un modelo de dosificación del antiincrustante. La aplicación Adicro es un software desarrollado íntegramente por ADIQUÍMICA [1], 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 adquirido 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. El software Adicro permite determinar de manera muy precisa los potenciales de incrustación y calcular la dosis mínima de anti-incrustante para asegurar una completa protección de las membranas.

Diseño del tratamiento anti-incrustante de la ósmosis inversa de recuperación de rechazos

El objetivo del estudio era determinar la dosis óptima del antiincrustante específico para operar a la conversión de diseño del 65 % sin peligro de incrustación de sulfato de calcio. Se realizó un estudio mediante simulación con el software Adicro a partir de la composición del agua de aporte de la ósmosis inversa de recuperación de rechazos, con una elevada concentración de sulfatos (3.368 mg/L SO_4) y calcio (1.316 mg/L Ca). La Tabla 1 muestra la composición del agua de aporte y del agua de rechazo operando a una conversión del 65 %.

Con el software Adicro se calculó el poder incrustante del agua de rechazo, operando a una conversión del 65 % y la dosis óptima del antiincrustante específico para prevenir las incrustaciones. El software Adicro 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 indicaban que los potenciales de incrustación sin tratamiento antiincrustante del carbonato de calcio, sulfato de calcio, fluoruro de calcio, fosfato de calcio, sulfato de estroncio, hierro y sílice, superaban el valor del 100 %, indicando que existía riesgo de ensuciamiento de la membrana por estos compuestos. Con la dosificación del antiincrustante específico, los potenciales de incrustación para estos compuestos insolubles disminuyeron hasta alcanzar valores inferiores al 100 %.

La Figura 3 muestra los resultados simulados de reducción de los potenciales de incrustación del agua de rechazo con la dosificación del anti-incrustante específico. Se concluye que, con la dosificación del antiincrustante específico, y operando a la conversión de diseño del 65 %, el sistema queda perfectamente protegido frente al ensuciamiento y la formación de incrustaciones, incluidas las de sulfato de calcio.

ESTRATEGIA PARA EL CONTROL Y PREVENCIÓN DEL ENSUCIAMIENTO DE LAS MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA

Caracterización del ensuciamiento de las membranas

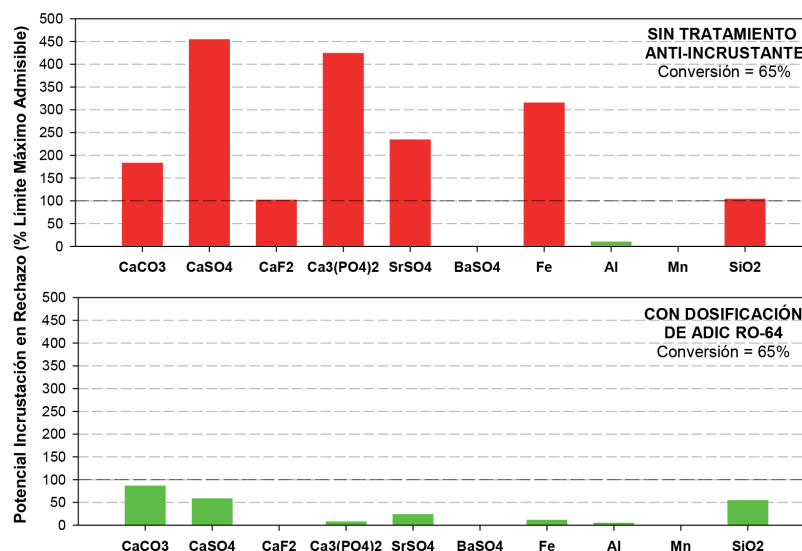
La planta de recuperación de rechazos presentaba síntomas de ensuciamiento severo, que obligaban a realizar limpiezas químicas frecuentes. Con el objetivo de caracterizar el ensuciamiento que afectaba a las membranas, se realizó una autopsia de un elemento Hydranautics Espa2-LD de la primera posición de la primera etapa de la planta de recuperación de rechazos.

TABLA 1.

COMPOSICIÓN DEL AGUA DE APORTE DE LA OSMOSIS INVERSA DE RECUPERACIÓN DE RECHAZOS Y DEL AGUA DE CONCENTRADO A UNA CONVERSIÓN DEL 65 %

Parámetro	Agua de aporte	Agua de rechazo (Conversión=65%) simulada (software ADICRO)
pH	7,50	7,78
Calcio	1.316 mg/L Ca	3.730 mg/L Ca
Magnesio	353 mg/L Mg	1.001 mg/L Mg
Sodio	1.185 mg/L Na	3.361 mg/L Na
Potasio	95 mg/L K	269 mg/L K
Estroncio	10,2 mg/L Sr	28,9 mg/L Sr
Hierro	0,12 mg/L Fe	0,33 mg/L Fe
Aluminio	0,04 mg/L Al	0,12 mg/L Al
Sulfato	3.368 mg/L SO ₄	9.546 mg/L SO ₄
Cloruro	2.563 mg/L Cl	7.264 mg/L Cl
Fluoruro	0,39 mg/L F	2,52 mg/L F
Bicarbonato	255,2 mg/L HCO ₃	583,9 mg/L HCO ₃
Carbonatos	3,3 mg/L CO ₃	21,9 mg/L CO ₃
CO ₂	13,3 mg/L H ₂ CO ₃	13,3 mg/L H ₂ CO ₃
Nitrato	103 mg/L NO ₃	292 mg/L NO ₃
Sílice	45 mg/L SiO ₂	128 mg/L SiO ₂
Fosfato	0,17 mg/L PO ₄	0,49 mg/L PO ₄
Fuerza iónica	0,173	0,436

FIGURA 3. Potenciales de incrustación en el rechazo para cada especie insoluble sin tratamiento anti-incrustante y con dosificación del antiincrustante específico operando a una conversión del 65 %



Los resultados de la autopsia indicaron que la superficie de la membrana estaba contaminada por una capa abundante de depósito (Figura 4), correspondiente mayoritariamente a biopelícula [7, 11].

PROTOCOLO DE LIMPIEZA EFICAZ Y PROGRAMA PREVENTIVO PARA EL CONTROL DEL ENSUCIAMIENTO

El elevado número de limpiezas químicas que se habían realizado antes de la intervención de ADIQUIMICA no eran eficaces. Es por esta razón que, después de determinar la composición y el mecanismo de ensuciamiento de las membranas mediante la autopsia, se realizaron pruebas de limpieza en planta piloto de ósmosis inversa a partir de muestras de la membrana autopsiada. El objetivo de las pruebas de limpieza era diseñar el protocolo de limpieza más eficaz para eliminar la biopelícula teniendo en cuenta criterios ambientales y económicos.

Producto de limpieza ambientalmente respetuoso libre de fósforo y EDTA

Tanto los productos como los protocolos de limpieza desempeñan un papel clave en la recuperación del rendimiento de las membranas. Los protocolos de limpieza estándar que utilizan productos químicos genéricos a menudo son ineficaces y no eliminan el ensuciamiento. Si los productos de limpieza no son los apropiados, es posible que no se logre la eficacia deseada o que la membrana quede dañada. El uso de productos de lim-

pieza formulados garantiza una elevada eficacia y la compatibilidad con las membranas, alargando su vida útil. Los limpiadores formulados son una mezcla de ingredientes que actúan sinérgicamente. Estos productos incluyen materias activas que eliminan ensuciamientos específicos.

Los productos de limpieza que contienen ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) y fósforo en su formulación son ampliamente utilizados para la limpieza de membranas de ósmosis inversa. Sin embargo, su biodegradabilidad y el contenido en fósforo son algunas de las razones de la creciente preocupación por el impacto ambiental que representa el vertido de estos compuestos. El hecho de que el EDTA no sea biodegradable comporta que en las aguas se encuentre en cantidades considerables, con graves consecuencias medioambientales. El vertido de los productos que contienen fósforo pueden provocar la eutrofización, porque son una fuente de nutrientes para las algas y las bacterias.

Las limpiezas químicas se realizaron utilizando el producto de limpieza líquido ADICLEAN 202 AdicGreen, que es innovador y ambientalmente respetuoso. Es un limpiador líquido de pH alcalino, que no contiene ni EDTA ni fósforo en su formulación. Es un producto altamente formulado que contiene materias activas ambientalmente respetuosas que sustituyen los principios activos no biodegradables y que contribuyen a la eutrofización. Es altamente eficaz para eliminar la biopelícula y el ensuciamiento por alumi-

no-silicatos (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.

Optimización del protocolo de limpieza química para eliminar la biopelícula

Los resultados de las pruebas de limpieza indicaron que el protocolo de limpieza más eficaz para eliminar la biopelícula y recuperar el rendimiento de las membranas consta de las siguientes fases:

1. Sanitización con la utilización del biocida no-oxidante y compatible con las membranas de ósmosis inversa Adiclean 128.
2. Limpieza con un producto alcalino Adiclean 202 AdicGreen formulado con capacidad de penetrar, alcanzar y eliminar completamente las capas internas de biopelícula. El limpiador también es efectivo para eliminar los aluminosilicatos.

El protocolo de limpieza fue diseñado de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de la membrana por lo que se refiere a presión, caudal, pH y temperatura de la solución de limpieza.

Programa de mantenimiento para el control de la biopelícula

Se recomendó aplicar un programa de mantenimiento para el control de la biopelícula con un biocida no-oxidante compatible con las membranas de ósmosis inversa. De esta manera se consiguió minimizar y controlar el desarrollo microbiológico en la superficie de las membranas de ósmosis inversa.

RESULTADOS DE LAS ACCIONES DE MEJORA

AUMENTO DEL RENDIMIENTO

En julio de 2022 se aplicó la solución integral propuesta por ADIQUÍMICA en la planta de ósmosis inversa de recuperación de rechazos, que consistía en las siguientes acciones de mejora:

FIGURA 4. Aspecto de la superficie de la membrana y del espaciador plástico alimento-rechazo contaminados de forma abundante por biopelícula



1. Se aplicó el protocolo de limpieza química que combinaba el biocida no oxidante Adiclean 128 y el limpiador ambientalmente respetuoso Adiclean 202 AdicGreen.

2. Se inició la dosificación del antiincrustante biodegradable y libre de fósforo ADIC RO-64 AdicGreen, con una elevada eficacia para inhibir la formación de incrustaciones de sulfato de calcio, que permitió aumentar la conversión de la planta hasta alcanzar el valor de diseño de 65 %.

3. Se aplicó el programa de mantenimiento para el control de la biopelícula.

La Figura 5 muestra la evolución del caudal de permeado normalizado antes y después de aplicar las acciones de mejora. Aplicando el protocolo de limpieza propuesto, se recuperó el rendimiento de las membranas, restableciendo sus valores de diseño. La dosificación del antiincrustante específico para sulfato de calcio permitió aumentar la conversión de la planta hasta el valor de diseño del 65 %, con un caudal de permeado normalizado promedio de 19.5 m³/h. El caudal de permeado normalizado aumentó un 30 % respecto el caudal de diseño anterior, cuando se operaba a una conversión del 50 %. La dosificación de antiincrustante específico, y el programa de mantenimiento para el control de la biopelícula, han mantenido estable el caudal de permeado al valor máximo de diseño, sin síntomas de formación de incrustaciones ni de ensuciamiento por biopelícula. La planta ha operado durante seis meses sin paradas por limpiezas químicas, alargando la vida útil de las membranas.

AHORRO DE AGUA Y ENERGÍA, REDUCCIÓN DE COSTES Y CONTRIBUCIÓN A LA SOSTENIBILIDAD

La elevada eficacia del antiincrustante y del limpiador líquido ambientalmente respetuosos, así como el tratamiento de mantenimiento adecuado,

FIGURA 5. Evolución del caudal de permeado normalizado después de aplicar las acciones de mejora



mejoraron el rendimiento de la planta, aumentando la conversión y evitaron el ensuciamiento de las membranas. Este incremento de rendimiento comportó un aumento del caudal de permeado operando a presiones de alimentación inferiores y, por lo tanto, disminuyeron los costes de energía, y se redujo la huella de carbono. Se determinó el ahorro energético y la reducción de las emisiones de CO₂ que se consiguieron con la aplicación

de las acciones de mejora. Se calculó el consumo de energía específica, que corresponde al consumo de energía por m³ de agua permeada expresada en kWh/m³ [6], y las emisiones de CO₂ (Ministerio para la Transición Ecológica, 2022) en los siguientes escenarios: (a) antes de la intervención de ADIQUIMICA, y (b) después de aplicar las acciones de mejora. La Tabla 2 corresponde al cálculo del consumo de energía específica y las emisiones de

TABLA 2.		
ENERGÍA ESPECÍFICA Y EMISIONES DE CO ₂ ANTES Y DESPUÉS DE APLICAR LAS ACCIONES DE MEJORA EN LA PLANTA DE RECUPERACIÓN DE RECHAZOS		
Fecha	Julio 2022 (Antes de la intervención de ADIQUIMICA)	Enero 2023 (Después de aplicar acciones de mejora de ADIQUIMICA)
Caudal de permeado	8,9 m ³ /h	19,4 m ³ /h
Caudal de alimentación	29,2 m ³ /h	29,8 m ³ /h
Conversión	31 %	65 %
Presión de alimentación	18,8 bar	14,4 bar
Consumo de energía específica por m³ de permeado	2,12 kWh/m ³	0,76 kWh/m ³
Consumo de energía	18,9 kWh	14,7 kWh
Consumo anual de energía	16.5284 kWh/año	129.157 kWh/año
Coste anual de electricidad	28.098 €	21.957 €
Emisiones de CO₂	51,2 Tn/año	33,5 Tn/año

» Uno de los factores clave que limita la operación de las plantas de ósmosis inversa es la calidad del agua

CO₂ en las condiciones de operación de cada escenario.

Los resultados indican que, en julio de 2022, antes de la intervención de ADIQUIMICA, debido al ensuciamiento masivo que afectaba a las membranas, se operaba a una presión de alimentación de 18.8 bar, correspondiente al límite máximo de la bomba. Esta elevada presión comportaba un consumo elevado de energía. Aunque se operaba a la máxima presión, el caudal de permeado producido era de 8.9 m³/h, con una conversión del 31 %. Estos valores eran significativamente inferiores respecto las condiciones de diseño inicial de 15 m³/h de producción a una conversión del 50 %. El consumo específico de energía que se requería era de 2.12 kWh/m³.

Con la aplicación de las acciones de mejora, el rendimiento de la planta aumentó. En enero de 2023 el caudal de permeado aumentó hasta 19.4 m³/h, operando a una conversión del 65 %. El consumo de energía específica en estas condiciones era de 0.76 kWh/m³. Por lo tanto, se aumentó el caudal un 118 % y se redujo el consumo de energía específica un 64 % respecto las condiciones de operación con las membranas afectadas por ensuciamiento masivo. Estos resultados comportan un ahorro energético anual de 6.141 euros, asumiendo un coste de la electricidad

de 0.17 euros/KW. La reducción anual de las emisiones de CO₂ fueron de 17.7 Tn, que corresponde a una reducción del 35 %.

Las acciones de mejora también han comportado una gestión sostenible por el aumento de uso de agua reutilizada como aporte de las torres de refrigeración. Se ha disminuido el consumo de agua y se ha reducido el vertido, con los consecuentes ahorros económicos. Se utilizan productos químicos biodegradables y ambientalmente respetuosos que minimizan el impacto que supone su vertido en el medio. La minimización de los problemas de ensuciamiento ha comportado una reducción de costes asociados a las paradas de la planta por limpiezas químicas, al consumo de productos químicos y a la reposición de membranas debido al aumento de su vida útil.

CONCLUSIONES

Uno de los factores clave que limita la operación de las plantas de ósmosis inversa es la calidad del agua. El diseño de un tratamiento sostenible y específico para las plantas de ósmosis inversa que tratan el agua de purga de las torres de refrigeración para su reutilización comporta la disminución del consumo de agua de aporte a las torres de refrigeración y la minimización del agua de vertido, con los consecuentes ahorros económicos y beneficios medioambientales.

Se aumentó el rendimiento de la ósmosis inversa aplicando un tratamiento personalizado que incluyó una limpieza química de las membranas, utilizando un limpiador ambientalmente respetuoso que no contiene EDTA ni fósforo en su formulación; la dosificación de un anti-incrustante biodegradable y libre de fósforo con elevada eficacia para inhibir la formación de incrustaciones de sulfato de calcio, y la aplicación de un programa de mantenimiento para el control de la biopelícula. Estas acciones de mejora consiguieron:

- Eliminar el ensuciamiento masivo que afectaba las membranas y recuperar su rendimiento, restableciendo los valores de diseño.
- Aumentar el rendimiento de la planta, incrementando la conversión hasta el

valor de diseño, evitando la formación de incrustaciones.

- Reducir el consumo y los costes energéticos al trabajar a una presión de alimentación menor.
- Reducir la huella de carbono, disminuyendo las emisiones de CO₂.
- Aumentar el caudal de agua regenerada para su reutilización y reducir el vertido.
- Mantener las membranas limpias y sin paradas de la planta por limpiezas químicas, reduciendo los costes asociados a las paradas y al consumo de productos químicos.
- Alargar la vida de las membranas, reduciendo los costes asociados a la reposición de membranas.
- Utilizar productos químicos biodegradables y ambientalmente respetuosos que minimizan el impacto que supone su vertido en el medio.

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 ósmosis (RO): review of water parameters affecting membrane fouling and pretreatment schemes. Desalination and Water Treatment 189, 9-17.
- [3] American Society for Testing and Materials (ASTM), 2015. Standard Test Method for Modified Fouling Index (MFI-0.45), ASTM Designation D8002-15E1, Annual Book of ASTM Standards, Volume 11.02.
- [4] Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., Melin, T., 2007. State-of-the-art of reverse ósmosis desalination. Desalination 216, 1-76.
- [5] 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.
- [6] Li M., 2013. A unified model-based analysis and optimization of specific energy consumption in BWRO and SWRO. Ind. Eng. Chem. Res. 52, 17241-17248.
- [7] Matin, A., Khan, Z., Zaidi, S.M.J., Boyce, M.C., 2011. Biofouling in reverse ósmosis membranes for seawater desalination: phenomena and prevention. Desalination 281, 1-16.
- [8] Ministerio para la Transición Ecológica, 2022. Guía para el cálculo de la Huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización. NIPO: 280-14-241-8
- [9] OECD, 1992. OECD Guideline for testing of chemicals 302B. Zahn-Wellens/EMPA Test.
- [10] Weinrich, L., Haas, C.N., LeChevallier, M.W., 2013. Recent advances in measuring and modeling reverse ósmosis membrane fouling in seawater desalination: a review. Journal of Water Reuse and Desalination 3(2), 85-101.
- [11] Vrouwenvelder, J.S., Picioreanu, C., Kruijthof, J.C., Van Loosdrecht, M.C.M., 2010. Biofouling in spiral wound membrane systems: three-dimensional CFD model based evaluation of experimental data. Journal of Membrane Science 346, 71-85. ■