



Ensuciamiento y limpieza de membranas empleadas en la desalación de aguas

Santiago Gutiérrez Ruiz doctor por la Universidad de Cádiz

Mohammed Hassani Zerrouk profesor en la Faculte des Sciences et Techniques d'Al-Hoceima, Universite Mohammed Premier

José María Quiroga Alonso catedrático del Área de Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Cádiz

El agua de mar contiene una serie de componentes orgánicos e inorgánicos que provoca, cuando se someten a un proceso de desalación mediante ósmosis inversa, el ensuciamiento de las membranas. Este ensuciamiento constituye una problemática relevante en la gestión de las plantas desaladoras, ya que se traduce en una importante pérdida de rendimiento del sistema. Para recuperar la operatividad de las membranas, se hace necesaria la realización de protocolos periódicos de limpieza. Teniendo esto en cuenta, el objetivo de este trabajo ha sido la optimización de las secuencias de lavado de membranas de ósmosis inversa que han sufrido un ensuciamiento severo, debido a la incrustación de sales, deposición de coloides y acumulación de microalgas presentes en las aguas marinas. Los resultados obtenidos muestran que la realización de una limpieza secuencial, en la que se alternaba medio básico y ácido de diferentes reactivos, y a determinadas concentraciones, permitió alcanzar una importante recuperación de la membrana (94,2%) y una considerable reducción en el consumo de reactivos limpiadores (54-57%), siendo más adecuado iniciar este lavado en medio básico.

Palabras clave

Ósmosis inversa, ensuciamiento, coloides, reutilización.

Fouling and cleaning of the membranes used in the water desalination

Seawater contains a number of organic and inorganic components that cause fouling of membranes when subjected to a process of reverse osmosis desalination. This fouling is one of the most important problems in the management of desalination plants, as it entails a significant loss in system performance. For membranes to be able to continue operating under appropriate conditions, they must undergo periodic cleaning protocols. This paper presents the results obtained when, subjecting a previously fouled aromatic polyamide membrane to different washing agents and using different concentrations of the same. Optimal concentrations of cleaning reagents were established. The results indicate that the performance of cleaning using a mixture of reagents, and alternating alkaline and acidic media, enabled maximum recovery of the membrane permeate flux (94.2%) and a significant reduction in the consumption of cleaning reagents (54-57%).

Keywords

Reverse osmosis, fouling, colloid, reuse.



1. Introducción

Durante la operación de plantas desaladoras de agua mediante la tecnología de la ósmosis inversa se produce el ensuciamiento de las membranas (Song *et al.*, 2013). Este ensuciamiento se traduce, a lo largo del tiempo, en un descenso gradual del flujo de permeado y del rechazo salino. El proceso de ensuciamiento termina originando una notable pérdida de productividad (Sablani *et al.*, 2001), que tiene una influencia negativa en la economía de la operación con membranas.

Entre las principales causas del ensuciamiento está la abundancia de partículas coloidales, iones inorgánicos y material biológico en el agua de mar, que son capaces de superar los pretratamientos y depositarse posteriormente en el interior de los elementos de membrana.

En este proceso, juegan un papel primordial las sustancias coloidales (Park *et al.*, 2013), especialmente los de naturaleza silíceas (Zhu y Elimelech, 1997) y los iones de Ca^{2+} , CO_3^{2-} y SO_4^{2-} (Ghafour, 2003). Estos iones pueden encontrarse en las aguas marinas en concentraciones lo suficientemente altas como para que se alcancen sus límites de solubilidad y por tanto, formen precipitados de naturaleza inorgánica sobre las membranas (Hamrouni y Dhahbi, 2001). Además, la presencia de microalgas en las aguas supone un factor potencialmente relevante en el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa, debido a su reducido tamaño y por el posible desarrollo de episodios de florecimiento o *bloom* de algas en momentos puntuales (Sunda *et al.*, 2006).

La complejidad de eliminación de los depósitos de materia orgánica (microalgas), coloides e incrustaciones salinas sobre la superficie de la membrana obliga a contemplar pro-

tolos periódicos de limpieza de las mismas, con el fin de mantener las mejores condiciones de funcionamiento. Se suele considerar necesaria una limpieza del sistema cuando tiene lugar una disminución del 10 al 15% en el flujo de permeado, una disminución del 10% del rechazo salino o un aumento del 15% en la presión diferencial (Fariñas, 1999).

Dada la complejidad de la suciedad depositada, la limpieza se consigue mediante una gran variedad de interacciones químicas y físicas entre las soluciones de lavado y los sólidos existentes sobre la superficie de la membrana. La limpieza, empleando soluciones compuestas por mezclas de agentes limpiadores, y mediante diferentes secuencias de lavado, supone una herramienta útil para mejorar la eficiencia de los lavados (García-Fayos *et al.*, 2014). Los elementos clave de una estrategia de limpieza son el tipo y la concentración de los agentes limpiadores, el orden y la duración de las etapas de limpieza y los parámetros de operación del sistema durante el proceso (D'Souza y Mawson, 2005).

El objetivo general del presente trabajo ha consistido en optimizar los protocolos de limpieza de membranas que han sufrido un ensuciamiento severo por la acumulación de incrustaciones salinas (carbonato

y sulfato de calcio), partículas coloidales de naturaleza silíceas y microalgas. Para ello se estudió la eficacia de diferentes secuencias de limpieza de membranas en planta piloto, optimizándose tanto las concentraciones de reactivos limpiadores utilizados, como las condiciones de operación del sistema (pH y T^a de trabajo).

2. Material y métodos

2.1. Metodología aplicada

Inicialmente se procedió al ensuciamiento severo de las membranas, utilizando como corriente de alimentación un agua de mar enriquecida con los diferentes compuestos químicos y agentes microbiológicos, que habitualmente son los responsables del ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa (Lee y Lee, 2000; Wang y Tamabara, 2007). Los agentes químicos estudiados fueron dos sales inorgánicas (sulfato cálcico y carbonato cálcico), a una concentración equivalente a sus límites de solubilidad (3,16 g/L y 0,03 g/L, respectivamente) y la sílice coloidal (50 mg/L). Como agente biológico se utilizó un cultivo de la microalga *Nannochloropsis gaditana* ($2 \cdot 10^6$ células/mL).

Una vez ensuciadas las membranas, se sometieron a una inspección por microscopía electrónica al objeto de valorar el ensuciamiento. A conti-

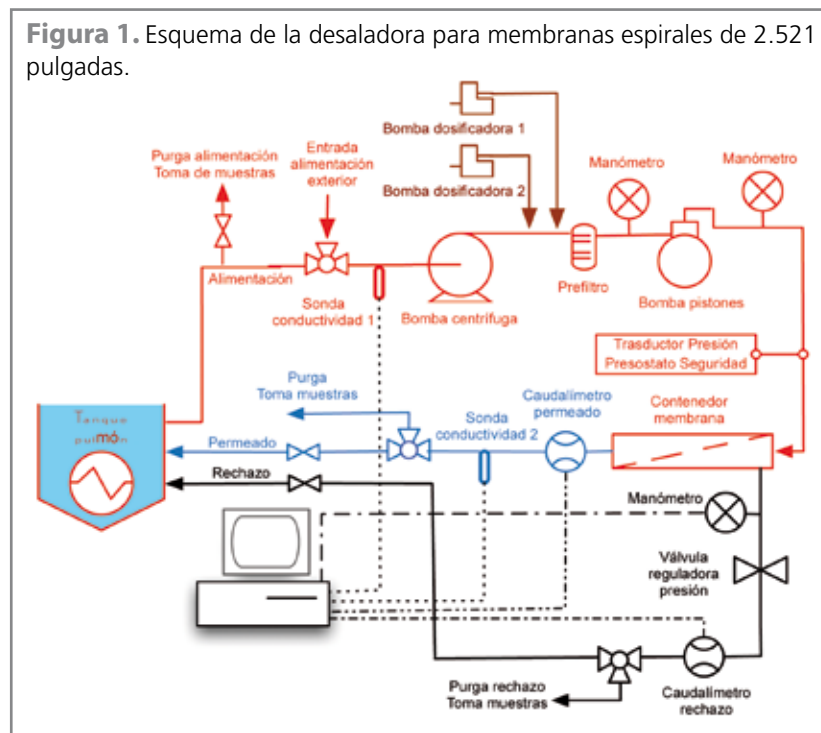
Tabla 1. Concentraciones de los diferentes reactivos limpiadores utilizados en los experimentos realizados de forma aislada.

Agente limpiador	Limpieza 1	Limpieza 2	Limpieza 3	Limpieza 4	Limpieza 5
EDTA (g/m ²)	2,5	5	10	15	20
Bisulfito sódico (g/m ²)	2,5	5	10	15	20
LAS (g/m ²)	1	2,5	5	7,5	10
Ácido cítrico (g/m ²)	2,5	5	10	15	25
Hidróxido de amonio (g/m ²)	2,5	5	10	15	20
Temperatura (°C)	19	22	25	32	40
pH	2	4	8	10	12

nuación se sometieron a un proceso de lavado, probándose la capacidad limpiadora de los siguientes agentes fisicoquímicos: EDTA, bisulfito sódico, LAS, ácido cítrico, hidróxido de amonio, temperatura, y pH. Para cada uno de los reactivos anteriores se probaron cinco disoluciones de concentraciones diferentes (Tabla 1). De esta batería de experimentos se consideró como concentración extrema la que logró una mayor recuperación del caudal de permeado. La concentración óptima sería aquella que consiguiera una mayor recuperación del caudal de permeado, respecto al ensayo de limpieza de concentración inmediatamente inferior. La estimación de las concentraciones óptimas y extremas de los reactivos de limpieza, cuando estos actúan de manera aislada, sirvió para la selección de la secuencia óptima de lavado considerándose como tal aquella en que las concentraciones de los reactivos empleados consigan una máxima eficacia con un menor consumo de reactivos.

Para cada uno de los lavados se preparó una disolución de 5 L del reactivo limpiador y se almacenó en el tanque de alimentación de la célula de flujo. Una vez puesta en funcionamiento la bomba de alimentación, el sistema hacía pasar la solución de lavado sobre la membrana sucia en circuito cerrado durante 30 minutos. Al finalizar esta etapa se eliminaban los restos del agente limpiador y se realizaba una prueba de flujo y rechazo salino de la membrana lavada, utilizando como referencia los parámetros de operación marcados por el fabricante de las membranas (solución de alimentación de 32 g/L NaCl, presión de operación de 55,16 bares y 25 °C de temperatura).

Una vez establecidas las concentraciones óptimas y extremas de cada reactivo, se diseñaron experimen-

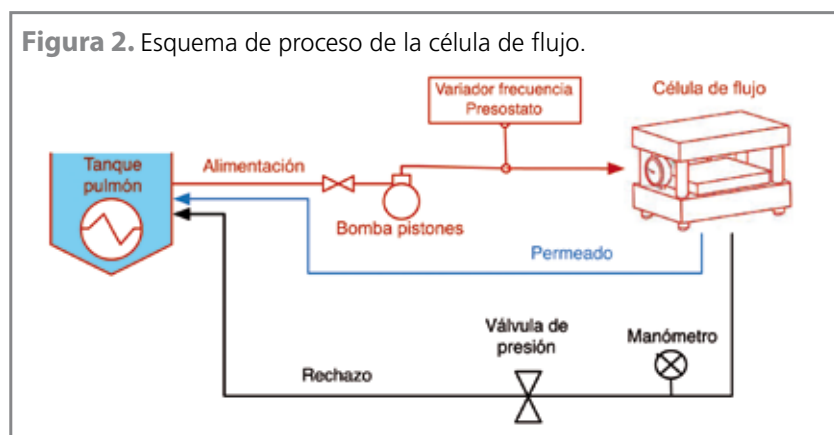


tos de limpieza secuencial utilizando combinaciones de todos los agentes limpiadores en concentraciones óptimas y extremas y atendiendo a la naturaleza ácida o básica de estos reactivos. En resumen, el procedimiento de limpieza secuencial consistió en la aplicación de un lavado doble, en el que se alternaron durante un tiempo de 30 minutos cada una de las mezclas ácida o básica (o viceversa). Durante el proceso de lavado se controló el pH de la solución, asegurando su estabilidad entorno al valor adecuado y se mantuvo constante la temperatura de operación.

Finalmente, se procedió a realizar una inspección con el microscopio electrónico de barrido de la membrana lavada donde se obtuvieron unos resultados de limpieza óptimos (Limpieza 1) con el fin de comparar el desarrollo y composición de los depósitos, antes y después del lavado.

2.2. Descripción de las plantas desaladoras utilizadas.

Para la realización de la fase experimental se emplearon dos plantas pilotos, cuyos esquemas de funcionamiento se muestran en las Figuras 1 y 2. La Figura 1 corresponde al





esquema de la planta piloto provista de membranas en configuración espiral y utilizada para provocar el ensuciamiento de la membrana. La **Figura 2** muestra el esquema de la célula de flujo para membranas de configuración plana donde se realizaron los ensayos de limpieza.

Se utilizaron membranas de ósmosis inversa de poliamida aromática de la marca Hydranautics, modelo SWC2-2521. Este tipo de membranas es muy utilizado en plantas desaladoras de escala industrial y combina altos niveles de conversión y rechazo salino. Tras el ensuciamiento de las mismas, se procedió a su fragmentación hasta un área utilizable en la célula de flujo (155 cm²). Las condiciones de trabajo se ajustaron a las condiciones óptimas de operación marcadas por el fabricante de las membranas (55 bares de presión y 25 °C de temperatura). Estos parámetros fueron normalizados mediante la aplicación de ecuaciones de normalización aportadas por el fabricante de las membranas.

2.3. Reactivos utilizados

Para provocar el ensuciamiento de la membrana se utilizaron los siguientes reactivos:

- Carbonato cálcico (CaCO₃) y sulfato cálcico 2-hidrato (CaSO₄·2H₂O) suministrados por Panreac.
- Como modelo de coloide se utilizó la sílice comercial (AerosilR200, Degusta Cor., Akron, OH) en forma de polvo. La utilización de este coloide es adecuado para el estudio del ensuciamiento de membranas de ósmosis inversa (Zhu y Elimelech, 1997).
- Cultivo de la microalga *Nannochloropsis gaditana* (2·10⁶ células/mL) procedente de la Planta de Cultivos Marinos de la Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales de

Durante el proceso de ensuciamiento de las membranas se efectuó un seguimiento automatizado de los principales parámetros de operación (caudal, conductividad y temperatura) en las corrientes de alimentación, rechazo y permeado, mediante el instrumental incluido en la planta desaladora

la Universidad de Cádiz. Esta es una microalga de reducido tamaño (2,5 μm) que ha protagonizado episodios de *bloom* (Sunda *et al.*, 2006).

En la fase de limpieza se utilizaron los siguientes agentes químicos:

- Ácido clorhídrico (HCl): disolución 0,2 N en dicho ácido, marca Sharlau.
- Hidróxido de sodio (NaOH): sólido. Pureza mínima del 98%. Marca Panreac.
- Bisulfito sódico (NaHSO₃): sólido para análisis. Pureza mínima del 98%. Marca Panreac.
- Ácido Etilendiaminotetraacético (C₁₀H₁₄N₂Na₂O₈·2H₂O): sal disódica dihidratada. Sólido para análisis. Pureza mínima del 99%. Marca Panreac.
- Sulfonato de alquilbenceno lineal (LAS): aal sódica. Sólido para análisis con ≈ 80% de mezcla de alquil benzenosulfonatos. Marca Fluka.
- Ácido cítrico anhidro (C₆H₈O₇): sólido para análisis. Pureza mínima del 99%. Marca Panreac.
- Hidróxido de amonio (NH₄OH): Líquido para análisis al 20%. Marca Panreac.

2.4. Técnicas analíticas

Durante el proceso de ensuciamiento se efectuó un seguimiento automatizado de los principales parámetros de operación (caudal, conductividad y temperatura) en las corrientes de alimentación, rechazo y

permeado, mediante el instrumental incluido en la planta desaladora. En los ensayos de limpieza en la célula de flujo, se registraron: caudal, conductividad, temperatura y pH. Para ello se utilizó un conductímetro microprocesador portátil marca Crison, modelo 524, y un pH-metro portátil, marca WTW y modelo 330-SET 1 de alta resolución.

Para analizar la composición del *fouling* depositado sobre la membrana sucia se utilizó el espectrómetro ICP-AES Iris Intrepid de la casa Thermo Elemental. Mediante esta técnica se midió la presencia de: aluminio, boro, bario, calcio, cobre, hierro, potasio, litio, magnesio, sodio, silicio y estroncio. Para las medidas del carbono orgánico total (COT) y el carbono inorgánico (CI) se utilizó un analizador Shimadzu TOC-5050A.

En la inspección superficial de las membranas sucias y lavadas se utilizó el microscopio electrónico de barrido Quanta 200, provisto de un detector de energía dispersiva (EDS) para el microanálisis de elementos mayoritarios, que permite identificar los principales elementos presentes en el *fouling*.

3. Resultados y discusión

3.1. Ensuciamiento de las membranas

El ensuciamiento de la membrana por sales inorgánicas, coloides y microalgas se siguió a partir de la

evolución de la producción del permeado relativo (Q/Q_0) y del rechazo de sales (%F) del sistema (Figuras 3a y 3b). Respecto a la evolución del permeado, se observó una reducción superior al 56% (56,7%) como consecuencia de la acumulación de materiales (incrustaciones salinas, coloides y microalgas) sobre la superficie de la membrana. La formación de esta capa de fouling provocó un ligero aumento del paso de sales a través de la membrana (1,63%), ya que el rechazo salino pasó del 98,6% inicial al 96,94% medido al finalizar el ensayo de ensuciamiento.

La composición química del *fouling* se recoge en la Tabla 2. La abundante presencia de calcio, potasio, magnesio, sodio y silicio, indican la formación de incrustaciones salinas procedentes de las sales estudiadas y de la acumulación de sílice coloidal sobre la membrana, respectivamente. Además, la existencia de 10,85 g de COT por cada kg de *fouling* indica la deposición de microalgas presentes en la corriente de alimentación al sistema.

Esta capa de *fouling* depositada sobre la superficie de la membrana puede observarse en las micrografías SEM realizadas a la membrana sucia (Figura 4a), en las que se aprecia una capa basal formada por sílice coloidal, y que presenta una serie de grietas originadas por la contracción del material durante el secado de las muestras. Sobre esta capa se depositan gran cantidad de agregados y crecimientos cristalininos de naturaleza carbonatada que se mezcla con restos orgánicos y cuya composición, estudiada mediante microanálisis EDS (Figura 8b), corrobora la presencia de los elementos: carbono, oxígeno, silicio, azufre y calcio. El pico del oro procede de la metalización previa de la muestra.

Figura 3. Evolución del caudal de permeado relativo (A) y del rechazo de sales (B) en el ensayo de ensuciamiento.

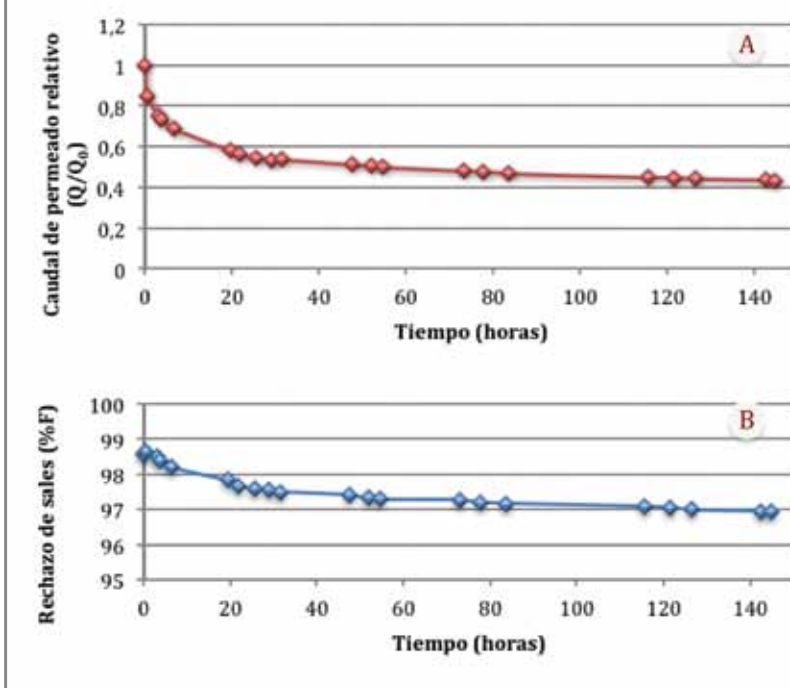


Tabla 2. Resultados del análisis químico del *fouling*.

Composición	Fouling	Composición	Fouling
COT (mg C/Kg)	10.085,13	Potasio (mg/kg)	1.477,34
Cl (mg C/Kg)	3.729,13	Litio (mg/kg)	-
Aluminio (mg/kg)	435,94	Magnesio (mg/kg)	2.039,06
Boro (mg/kg)	-	Manganeso (mg/kg)	3,12
Bario (mg/kg)	-	Sodio (mg/kg)	20.859,37
Calcio (mg/kg)	14.140,62	Silicio (mg/kg)	1.871,09
Cobre (mg/kg)	216,4	Estroncio (mg/kg)	210,94
Hierro (mg/kg)	34,6	Peso seco (g/m ²)	128

Figura 4. Micrografías de la membrana sucia.

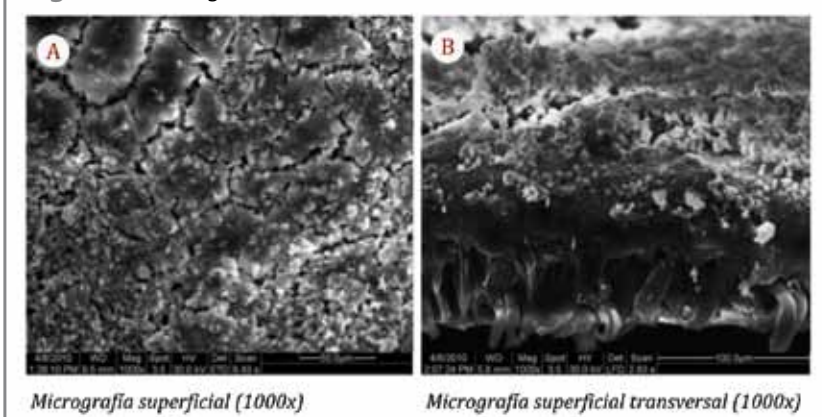


Tabla 3. Concentraciones óptimas y extremas de los reactivos utilizados en los ensayos de limpieza con mezclas ácidas y básicas.

Concentración (g/m ²)	EDTA	Bisulfito sódico	LAS	Ácido cítrico	Hidróxido de amonio	pH
Ácida óptima	5	15	5	5	-	4
Ácida extrema	20	20	5	25	-	2
Básica óptima	5	15	5	-	5	10
Básica extrema	20	20	5	-	20	12

Tabla 4. Diferentes combinaciones realizadas y orden de lavado en los ensayos de limpieza conjunta de reactivos.

Mezclas	Condiciones	Primero	Segundo
Limpieza 1	Óptimas	Básica	Ácida
Limpieza 2	Extremas	Básica	Ácida
Limpieza 3	Óptimas	Ácida	Básica
Limpieza 4	Extremas	Ácida	Básica

Utilizando la micrografía de corte transversal (**Figura 4b**) se realizó una estimación cuantitativa del espesor de la capa de *fouling*. Este grosor varió entre 15 y 18 µm. La gruesa capa de *fouling* explica la disminución de la producción de permeado durante el ensayo de ensuciamiento.

3.2. Realización de los ensayos de limpieza

3.2.1. Limpieza con agentes limpiadores aislados

Tal y como se indica en el apartado 2, se realizaron ensayos de lavado con los diferentes agentes de limpieza utilizados, cuyas condiciones aparecen recogidas en la **Tabla 3**. En la **Tabla 4** se recogen las combinaciones realizadas y orden de lavado en los ensayos de limpieza conjunta de reactivos.

En la **Tabla 5** se realiza una comparación del flujo de permeado, descenso del flujo de permeado respecto a la membrana limpia y rechazo salino en los ensayos de limpieza con reactivos lavadores aislados y en concentraciones óptimas y extremas de

reactivos. La **Figura 5** muestra, además, la variación del flujo de permeado en todos los ensayos de limpieza con reactivos lavadores aislados.

3.2.1.1. Limpieza con ácido etilendiaminotetracético (EDTA)

En la **Figura 5a** se muestran los valores del flujo de permeado normalizado obtenidos después de los ensayos de limpieza realizados con EDTA. Los lavados con EDTA producen una importante recuperación de la membrana, incluso a bajas concentraciones del agente limpiador. En los ensayos de limpieza con 2,5 y 5 g/m² de EDTA, la pérdida de flujo respecto a la membrana limpia fue del 12,7 y 9,9%, respectivamente. Para las condiciones de operación del sistema la concentración de lavado óptima fue la de 5 g/m².

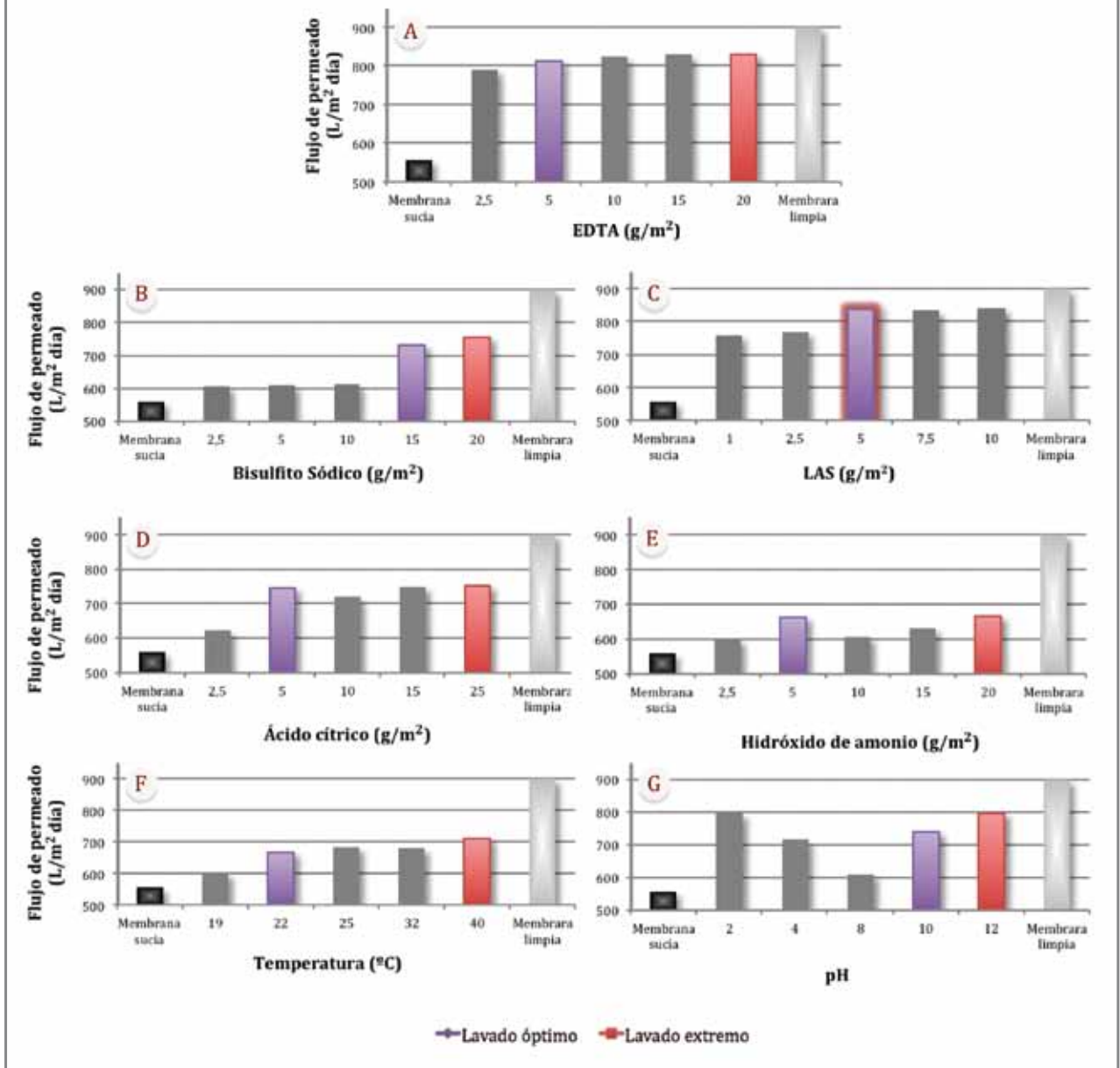
La limpieza con EDTA también se tradujo en una recuperación del rechazo salino, llegándose a registrar valores muy cercanos a los de la membrana limpia (98,83 %). El buen comportamiento del EDTA como agente de limpieza puede ex-

Tabla 5. Comparación del flujo de permeado, descenso del flujo de permeado y rechazo salino en los ensayos de limpieza en condiciones óptimas y extremas.

Ensayo	Condiciones de lavado	Flujo de permeado (L/m ² -día)	Descenso de flujo (%)	Rechazo salino (F%)
Membrana sucia	-	557,70	38,09	97,96
Lavado EDTA	Óptimas	812,04	9,86	98,81
	Extremas	830,91	7,77	98,83
Lavado bisulfito sódico	Óptimas	732,23	18,72	98,72
	Extremas	752,84	16,43	98,75
Lavado LAS (g/m ²)	Óptimas	837,60	7,00	98,83
	Extremas	837,88	7,03	98,83
Lavado ácido cítrico	Óptimas	744,43	17,37	98,73
	Extremas	752,07	16,52	98,74
Lavado hidróxido de amonio	Óptimas	661,50	26,57	98,65
	Extremas	665,87	26,08	98,66
Lavado temperatura	Óptimas	666,13	26,06	98,66
	Extremas	710,48	21,13	98,70
Lavado pH	Óptimas	741,23	20,59	98,73
	Extremas	796,12	17,72	98,69
Membrana limpia	-	900,90	0,00	98,90



Figura 5. Variación del flujo de permeado normalizado en los ensayos de limpieza para las diferentes concentraciones de reactivos utilizadas.



plicarse por su efecto quelante (Sia-vash, Madaeni *et al.*, 2001), ya que es un ligando con gran capacidad para secuestrar entre otros, a los cationes Ca²⁺ y Mg²⁺, reduciendo así la formación de incrustaciones de carbonatos y sulfatos.

3.2.1.2. Limpieza con bisulfito sódico

La mejora de la permeabilidad de la membrana por el efecto de los lavados con bisulfito sódico fue limitada, como puede observarse en la **Figura**

5b, de manera que la limpieza con concentraciones inferiores a 15 g/m² tan solo consiguieron recuperar el 6,1% del flujo de permeado. Sin embargo, el paso de 10 a 15 g/m² de reactivo se tradujo en una sensible mejora de la eficacia del lavado, elevando la producción de permeado un 13,45%. Esta fue, por tanto, la concentración óptima de bisulfito sódico. En condiciones extremas de reactivos (20 g/cm²) la recuperación de la membrana solamente se incre-

mentó en un 2,3% con respecto a la concentración inmediatamente inferior (15 g/m²).

Como se muestra en la **Tabla 5**, la máxima recuperación en el rendimiento de la unidad se produjo en el ensayo de limpieza con 20 g/m², lo que supone un descenso del flujo respecto a la membrana limpia del 16,43%. Estos resultados indican que la capacidad limpiadora del bisulfito sódico fue inferior a otros agentes químicos utilizados. Los ni-

veles de rechazo salino en las membranas lavadas con bisulfito sódico en condiciones óptimas y extremas de reactivos (98,72% y 98,75%, respectivamente) mostraron valores cercanos al registrado en la membrana limpia (98,9%).

La acción limpiadora del bisulfito sódico esta muy relacionada con su acción antioxidante y desinfectante. Su carácter reductor le permite actuar sobre incrustaciones inorgánicas como el carbonato cálcico y eliminar depósitos de hierro y aluminio. Además, su efecto biocida puede contribuir a la reducción de los depósitos de microalgas existentes sobre la superficie de la membrana.

3.2.1.3. Limpieza con sulfonato de alquilbenceno lineal (LAS)

La presencia de este tensioactivo en las soluciones de limpieza se tradujo en una importante mejora de la producción de permeado (**Figura 5c**), incluso para concentraciones bajas del mismo (1 g/cm²), en las que se alcanzó una recuperación del 84,3% del flujo de permeado.

Si se analiza la eficacia de las diferentes concentraciones de LAS utilizadas en los lavados, las condiciones óptimas se dieron a una concentración de 5 g/m², condiciones que consiguieron mejorar la producción de permeado en un 7,8%, respecto al lavado con una concentración inmediatamente inferior (2,5 g/m²). Los buenos resultados de limpieza obtenidos con 5 g/m² de LAS no fueron superados con concentraciones mayores de reactivo, por lo que en este caso las concentraciones óptimas y extremas coinciden y el uso de concentraciones superiores a 5 g/m² no se tradujeron en un aumento adicional en la eficacia de los lavados.

Utilizando una concentración óptima de reactivos (5 g/m²) en la solución de limpieza se logró una impor-

tante recuperación de la membrana, registrándose un descenso del flujo respecto al blanco de solo un 7%, y una recuperación casi total de los niveles de rechazo salino (98,83%).

El comportamiento del LAS como agente limpiador viene determinado por su acción como tensioactivo. La formación de micelas permite la solubilización de *fouling* orgánico.

3.2.1.4. Limpieza con ácido cítrico

En la **Figura 5d** se muestra el flujo de permeado registrado en los lavados con ácido cítrico. Para lograr una limpieza eficaz con este agente limpiador fue necesaria una concentración mínima de 5 g/m², con la que se logró una mejora sensible de la producción del 13,6% respecto al experimento de concentración inferior. Por lo tanto, la concentración óptima fue de 5 g/m² y la utilización de soluciones de limpieza más concentradas no lograron una mejora significativa de los lavados.

En la **Tabla 5** se comprueba que la limpieza con ácido cítrico tuvo una eficacia moderada, registrándose un descenso de flujo máximo del 17,4% y unos niveles de rechazo salino ligeramente inferiores (98,73%) a los de la membrana limpia.

El ácido cítrico supone una alternativa a los agentes limpiadores más utilizados. En solución acuosa se presenta como ión citrato, formando sales con gran número de iones metálicos y favoreciendo la eliminación de óxidos metálicos e incrustaciones de carbonato cálcico.

3.2.1.5. Limpieza con hidróxido de amonio

La recuperación del flujo de permeado por la acción limpiadora del hidróxido de amonio fue desigual en los diferentes lavados realizados. Aunque todos los ensayos muestran una mejora de la producción respec-

to al flujo de la membrana sucia, los resultados fueron discretos y no muestran una proporcionalidad clara (**Figura 5e**).

El experimento que utilizó la cantidad más baja de reactivo (2,5 g/m²) solo consiguió una mejora del 4,5% respecto a la membrana sucia y fue necesario elevar la concentración de hidróxido de amonio hasta los 5 g/m² para lograr una mejora significativa en la producción (11,52%), por lo que la concentración seleccionada como óptima fue de 5 g/m². Mayores concentraciones del agente limpiador no se tradujeron en mejoras del flujo de permeado, que osciló entre los 605 L/m².día del ensayo con 10 g/m² y los 665 L/m².día del ensayo con 20 g/m².día (concentración extrema).

El flujo de permeado en el lavado más eficaz alcanzó un 26,08% menos que el de la membrana limpia (**Tabla 5**), lo que indica un efecto limpiador moderado. Igualmente, solo se consiguió recuperar ligeramente el nivel de rechazo salino (99,66%).

La acción limpiadora del hidróxido de amonio se basa en su capacidad desinfectante y su comportamiento como base débil. Este compuesto favorece la eliminación de materia orgánica y tiene una importante acción biocida, ayudando también a la eliminación de incrustaciones de sulfato cálcico (Siavash Madaeni et al., 2001).

3.2.1.6. Efecto de la temperatura

En la **Figura 5f** se representan los flujos de permeado obtenidos en los ensayos con diferentes temperaturas de lavado. Se observa que la temperatura tiene un efecto positivo en la efectividad del lavado.

Así, la limpieza de la membrana a una menor temperatura (19°C) muestra una baja recuperación de la membrana (4,8%). Sin embargo al



www.abering.com
info@abering.com

Sectores que trabajamos:

- Empresas de abastecimiento de agua potable, Públicas y Privadas
- Servicios de abastecimiento Municipal
- Diputaciones Provinciales
- Empresas privadas de servicios de Submetering
- Comunidades de Regantes
- Almacenes de Materiales de fontanería y agricultura

Trabajamos para ofrecer la solución de telelectura más innovadora con los contadores de agua más avanzados

Adaptando nuestra tecnología a los mejores operadores de servicios de redes de comunicación inalámbrica

El catálogo de contadores se ampliará en breve, incluyendo los nuevos contadores volumétricos en material polímero y los modelos ultrasonidos

Empresa de capital y tecnología 100% Española



PRESENTES EN SMAGUA 2016 del 8 al 11 de Marzo



BOMBAS DE ALTA PRESION



- Bombas, equipos y accesorios para limpieza de tuberías, alcantarillado e industrial con agua a alta presión



- Cojines neumáticos
- Obturadores de tuberías
- Trasvase de aguas
- Pruebas de tuberías



Motorrens S.L.

www.motorrens.es
E-Mail: motorrens@rostor.com

C/ Apel·les Mestres, 36-38 43206-REUS
Tel. 977 32 81 05 Fax 977 32 65 52



elevant la temperatura de lavado hasta los 22 °C se consiguió una mejora de la eficacia de la limpieza, obteniéndose un incremento del flujo del 12,03% respecto a la membrana sucia. Por lo tanto, la temperatura seleccionada como óptima fue de 22 °C, aunque utilizando temperaturas de lavado superiores se consiguió un aumento adicional moderado de la producción, obteniéndose una producción máxima en el experimento a 40 °C (condiciones extremas).

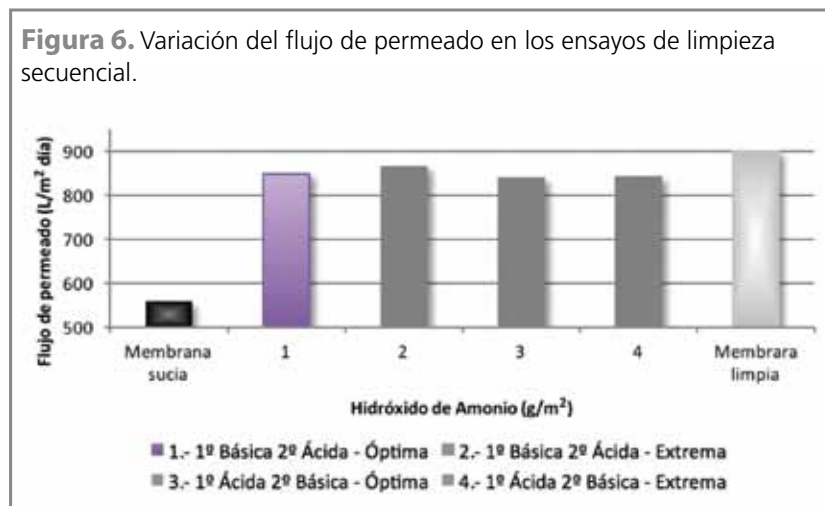
El descenso de flujo respecto a la membrana limpia fue del 26,06 y 21,13% en los lavados óptimo (T = 22 °C) y extremo (T = 40 °C), respectivamente. Además, la limpieza consiguió una ligera mejora en el rechazo salino (98,66-98,7%).

El efecto de la temperatura como agente de limpieza se debe a su influencia en la remoción de materia orgánica y en los límites de solubilidad de las sales precipitadas sobre la membrana. Una mayor temperatura de lavado se traduce en un aumento de los límites de solubilidad de las sales, favoreciendo así la disolución de las incrustaciones. Sin embargo, el lavado a temperaturas elevadas tiene el inconveniente de un mayor coste energético y de que podría dañar la estructura de las membranas, por lo que es necesario atender a las recomendaciones del fabricante de las mismas.

3.2.1.7. Efecto del pH

Para evaluar la influencia del pH en la limpieza se efectuaron lavados en medio ácido (disoluciones de HCl a pH 2 y 4) y en medio básico (disoluciones de NaOH de pH 8, 10 y 12), tal y como se indica en la *Figura 5g*.

En ella se observa que la efectividad del lavado mejora conforme se utilizan valores de pH más alejados de la neutralidad. El lavado a pH 4 produjo un incremento de la per-



meabilidad de la membrana de un 17,5% con respecto a la limpieza a pH 8, mientras que a pH 10 esta subida fue del 20,4%. Con estos datos puede concluirse que el lavado en condiciones óptimas fue el que utilizaba pH 10. En cuanto a los experimentos a pH 2 y 12, consiguieron una leve mejora de los resultados obtenidos con pH 4 y 10, siendo ligeramente más efectivo el que utilizaba pH básico (pH 12). Por lo tanto, los resultados de los lavados básicos obtuvieron rendimientos ligeramente superiores a las limpiezas en medio ácido.

El rechazo salino de la membrana también tuvo una mayor recuperación tras los lavados a pH alejados de la neutralidad, independientemente del carácter ácido o básico de los mismos (**Tabla 5**).

Dependiendo del pH utilizado en el lavado, se consigue la eliminación de un determinado tipo de *fouling*. Mientras la limpieza ácida reduce las incrustaciones inorgánicas, facilitando la disolución de carbonatos y sulfatos, la limpieza básica elimina materia orgánica y material biológico. Además el lavado básico es eficaz en la remoción de sílice, atacando al *fouling* coloidal. Las consideraciones anteriores, así como los resultados obtenidos en los ensayos de limpie-

za en medio ácido y básico indican que la aplicación de una secuencia de lavados con alternancia de condiciones ácidas y básicas, mejoraría la efectividad global de la limpieza, atacando a todas las formas de *fouling* presentes sobre la membrana.

3.2.2. Limpieza secuencial

Una vez realizados los lavados con diferentes agentes de limpieza de forma aislada, se procedió a realizar lavados usando combinaciones de todos los agentes limpiadores probados individualmente y utilizando las condiciones que se habían obtenido como óptimas y extremas y de forma secuencial. Las variaciones del flujo de permeado en los ensayos de limpieza secuencial aparecen representadas en la **Figura 6**. Tal y como se observa en esa figura, la realización de los lavados secuenciales dieron resultados muy positivos en la recuperación de la membrana sucia, consiguiendo en todos los lavados una mejora mínima del 31% y manteniéndose el flujo de permeado por encima de los 840 L/m²-día. La efectividad del lavado secuencial fue superior al realizado con un solo agente limpiador en todos los casos. Estos resultados prueban que el uso conjunto de diferentes reactivos limpiadores y la alternancia de



Tabla 6. Comparación del flujo de permeado, descenso del flujo de permeado respecto al blanco y rechazo salino en los ensayos de limpieza secuencial.

Limpieza secuencial	Flujo de permeado (L/m ² -día)	Descenso flujo (%)	Rechazo salino (F %)
Sucia	557,70	38,09	97,96
1. 1º Básica 2º Ácida - Óptima	848,40	5,83	98,84
2. 1º Básica 2º Ácida - Extrema	866,46	3,82	98,86
3. 1º Ácida 2º Básica - Óptima	840,46	6,71	98,83
4. 1º Ácida 2º Básica - Extrema	842,85	6,44	98,83
Limpia	900,90	0	98,90

un medio ácido y básico, producen un efecto sinérgico que intensifica la acción limpiadora.

Por lo que respecta al orden de la limpieza (1º básico y 2º ácido o viceversa), los resultados indican que ambas secuencias son muy efectivas, aunque aquellos lavados que comenzaron en medio básico demostraron una ligera ventaja (**Tabla 6**), que osciló entre el 0,62 y el 0,93%, dependiendo de si se analizan los lavados en condiciones óptimas o extremas, respectivamente. Esto supone una mejora del flujo de permeado entre 8,9 y 23,6 L/m²-día.

La producción registrada en los ensayos secuenciales en condiciones extremas fue ligeramente superior a la de los experimentos en condiciones óptimas. Esta diferencia osciló entre 0,27 y 2%, según si los lavados se iniciaron en medio básico o ácido, respectivamente. Es destacable que en la limpieza 1 (1º básico y 2º ácido en condiciones óptimas) se obtuvo un flujo de permeado de 848,4 L/m²-día, lo que supone una diferencia de solo un 5,83% con respecto a los resultados de la membrana limpia.

En cuanto al rechazo salino, aunque este parámetro no sufrió un retroceso importante durante el ensuciamiento de la membrana, la totalidad de los lavados secuenciales consiguieron recuperar prácticamente los niveles originales (**Tabla 6**).

Puede afirmarse que las mem-

branas han demostrado una buena compatibilidad química con los agentes limpiadores utilizados en la limpieza secuencial y en las condiciones de operación del sistema, ya que no se han detectado degradaciones o deterioro de la membrana en cuanto a su nivel de producción o de rechazo salino.

3.2.3. Inspección microscópica de la membrana lavada.

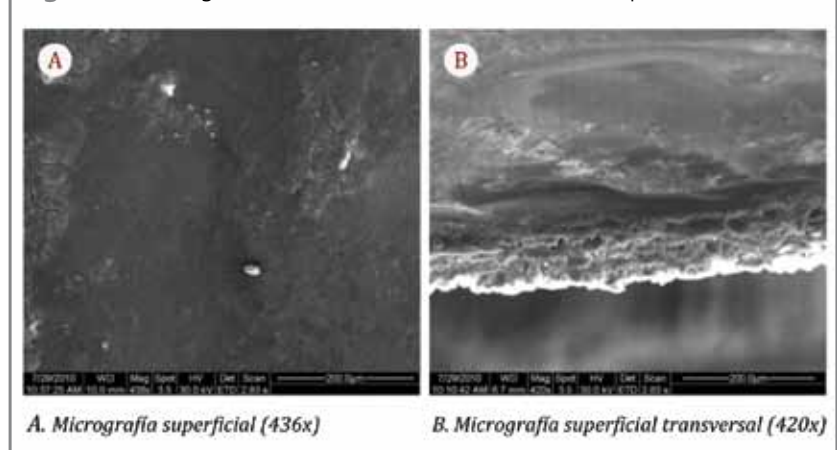
Las micrografías realizadas a la membrana procedente de la limpieza 1 permiten confirmar una importante reducción de la capa de *fouling* (**Figura 7a**), en comparación con la membrana sucia (**Figura 4**), como resultado del lavado secuencial. En la membrana lavada solo se observa la presencia de agregados en zonas puntuales y algunos acúmulos compuestos principalmente por sílice co-

loidal. La mayor parte del *biofouling* y de las incrustaciones salinas fueron removidas durante la limpieza.

La **Figura 7b** muestra una micrografía de corte transversal de la membrana lavada. Utilizando esta imagen se pretende cuantificar el espesor de la capa de *fouling* resistente al lavado. Como la limpieza había desprendido la capa de *fouling* en parte de la superficie, el espesor de la capa solo pudo estimarse en determinadas zonas, no superando en ningún caso las 2 µm. Si comparamos este espesor, con los obtenidos en la membrana sucia (15-18 µm), puede confirmarse una eliminación muy significativa de los depósitos durante la limpieza secuencial.

Mediante análisis de energía dispersiva (EDS) se analizó la composición atómica de la capa superficial

Figura 7. Micrografías de la membrana lavada en la limpieza secuencial 1.

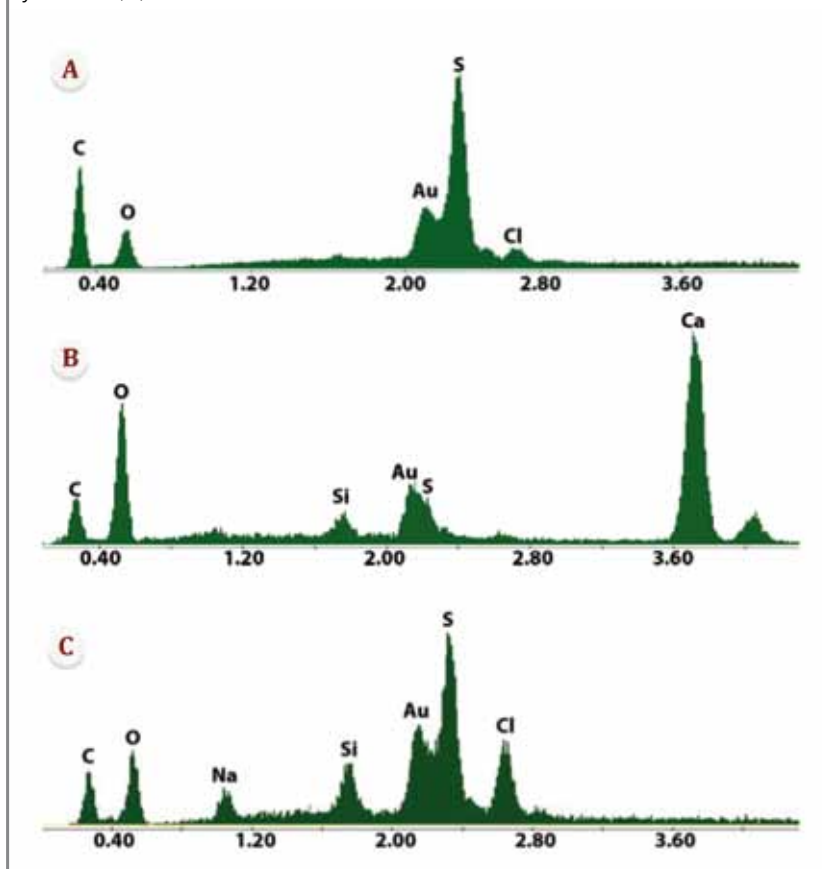


de la membrana, realizándose una comparativa entre los análisis EDS de las membranas limpia, sucia y lavada (**Figura 8**). Es destacable la ausencia de calcio en la membrana lavada, lo que confirma una alta eliminación de las sales de calcio, especialmente de los depósitos de carbonato y sulfato de calcio. La relación entre los picos del carbono y el oxígeno entre las membranas sucia y lavada también indica la remoción de las sales anteriores. Así, en los análisis EDS la relación C/O en las membranas limpia, lavada y sucia fue de 2, 0,76 y 0,4 respectivamente. Estos datos indican que la presencia de incrustaciones salinas y/o sílice coloidal contribuyen a una disminución de la relación C/O, debido a la diferencia en la abundancia relativa de estos compuestos entre el *fouling* y la estructura molecular de la membrana.

La estructura de los picos de oro y azufre, muy similares entre los análisis EDS de las muestras limpia y lavada, también confirman la reducción de la capa de *fouling*. Si bien en el EDS de la membrana limpia se identifica claramente el azufre, proveniente de la estructura de la membrana (polisulfona) y el oro que procede del metalizado de las muestras, en la membrana sucia la acumulación de una gruesa capa de *fouling* produce un apantallamiento de los elementos anteriores, debido a la gran abundancia relativa de otros elementos característicos del *fouling* depositado, como son el oxígeno, silicio y sobre todo el calcio.

El silicio detectado en el microanálisis EDS de la membrana lavada (**Figura 8c**) indica la presencia de ensuciamiento por sílice coloidal resistente al proceso de limpieza. Sin embargo, la importancia relativa del pico de sílice se explica también por la escasa abundancia del resto de

Figura 8. Microanálisis EDS de la membrana limpia (A), sucia (B) y lavada (C).



los elementos, debido a la reducida suciedad de la membrana lavada. Por ello, es probable que la capa de sílice coloidal resistente a la limpieza fuera muy reducida, como se confirmó mediante su observación al microscopio electrónico de barrido (**Figura 7**).

4. Conclusiones

A la vista de los resultados del presente estudio pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- El ensuciamiento severo causado por la acción conjunta de carbonato y sulfato de calcio, sílice coloidal y microalgas, se traduce en una drástica caída del flujo de permeado (38,1%) y en una leve disminución del rechazo salino (0,94%), respecto a los resultados de la membrana limpia.

- La limpieza de la membrana utilizando mezclas de los agentes limpiadores ensayados y mediante un lavado secuencial en el que se alternó un medio ácido y básico (o viceversa) supuso un método eficaz para la limpieza de las membranas de ósmosis inversa, ya que se consiguió una recuperación mínima en el flujo de permeado del 93,4%, en las condiciones de operación del sistema.

- La secuencia de lavado más adecuada desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, para la limpieza de las membranas estudiadas fue la que utilizaba condiciones óptimas de reactivos e inició la limpieza en medio básico (Limpieza 1).

- La limpieza secuencial en condiciones extremas de reactivos tan solo consiguió mejorar la efectividad del lavado entre el 0,27 y el 2%, con



respecto al uso de condiciones óptimas. Si se tiene en cuenta que en estas condiciones se produjo un ahorro de reactivos del 54-57%, puede afirmarse que la ligera superioridad del lavado en condiciones extremas no justificaría el coste económico y ambiental asociado al uso de estas condiciones de operación.

Bibliografía

- [1] Taheri, A.H.; Sim, L.N.; Chong, T. H.; Krantz, W.B.; Fane, A.G. (2015). Prediction of reverse osmosis fouling using the feed fouling monitor and salt tracer response technique. *Journal of Membrane Science*, núm. 475, págs. 433-444.
- [2] García-Fayos, B.; Arnal, J.M.; Giménez, A.; Álvarez-Blanco, S.; Sancho, M. (2014). Optimization of chemical cleaning of reverse osmosis membrane from a desalination plant by means of two-step static tests. *Desalination and Water Treatment*, págs. 1-13.
- [3] Song, Y.; Gao, X.; Gao, C. (2013). Evaluation of scaling potential in a pilot-scale NF-SWRO integrated seawater desalination system. *Journal of Membrane Science*, núm. 443, págs. 201-209.
- [4] Park, M.; Lee, J.; Boo, C.; Hong, S.; Snyder, S.; Kim, J. (2013). Modeling of colloidal fouling in forward osmosis membrane: Effects of reverse draw solution permeation. *Desalination*, núm. 314, págs. 115-123.
- [5] D'Souza, N.M.; Mawson, A.J. (2005). Membrane cleaning in the dairy industry: A Review. *Critical reviews in food science and nutrition*, núm. 45, págs. 125-134.
- [6] Fariñas, M. (1999). Reverse osmosis. Fundamentals, technology and applications. *Electrotechnologies series*, Ed. Mc Graw Hill., 64.
- [7] Ghafour, E.E.A. (2003). Enhancing RO system performance utilizing antiscalants. *Desalination*, 153, 149-153.
- [8] Hamrouni, B.; Dhahbi, M. (2001). Thermodynamic description of saline waters. Prediction of scaling limits in desalination processes. *Desalination*, núm. 137, págs. 275-284.
- [9] Leel, S.; Lee, C.H. (2000). Effect of operating conditions on CaSO₄ scale formation mechanism in nanofiltration for water softening. *Water Research*, núm. 34, págs. 3.854-3.866.
- [10] Sablani, S.S.; Goosen, M.F.A.; Al-Belushi, R.; Wilf, M. (2001). Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review. *Desalination*, núm. 141, págs. 269-289
- [11] Siavash Madaeni, S.; Mohamamdi, T.; Kazemi Moghadam, M. 2001. Chemical cleaning of reverse osmosis membranes. *Desalination*, núm. 134, págs. 77-82.
- [12] Sunda, W.G.; Graneli, E.; Gobler, C. (2006). Positive feedback and the development and persistence of ecosystem disruptive algal blooms. *Phycological Society of America*, núm. 42, págs. 963-974.
- [13] Wang, F.; Tarabara, V.V. (2007). Coupled effects of colloidal deposition and salt concentration polarization on reverse osmosis membrane performance. *Journal of Membrane Science*, núm. 293, págs. 111-123.
- [14] Zhu, X.; Elimelech, M. (1997). Colloidal fouling of reverse osmosis membranes: Measurements and fouling mechanisms. *Environmental Engineering Science*, núm. 31, págs. 3.654-3.662.

CARLO GAVAZZI
Automation Components



Gama de arrancadores suaves para bombas centrífugas con autoaprendizaje



Arrancador suave RSWT: Monitorización, protección y flexibilidad hasta 45 kW (90 A).

RSWT está dotado de un algoritmo de autoaprendizaje para asegurar un arranque y parada suave de la bomba. El arrancador determina el par inicial y lo optimiza automáticamente en cada nuevo arranque. Esta solución reduce considerablemente el tiempo de puesta a punto.

- Versión básica: 1 potenciómetro para ajuste de rampa ascendente y descendente.
- Versión avanzada: 3 potenciómetros para ajuste de rampa ascendente, descendente y límite de intensidad de sobrecarga.
- Protección contra sobrecargas integrada (clase 10) en la versión avanzada.
- 3 fases controladas con bypass interno y relé de alarma.
- Los modelos de 75 y 120 mm disponen de entrada por PTC.