



Dosificación de dióxido de carbono en membranas de ósmosis inversa para la eliminación de incrustaciones de precipitados salinos y biofilm

La formación de incrustaciones de precipitados salinos y biofilm es un problema que afecta a la explotación de plantas de tratamiento con tecnología de ósmosis inversa. En este artículo, se presenta una alternativa sostenible y efectiva mediante la dosificación de dióxido de carbono (CO_2) en las membranas. Los resultados obtenidos en una planta piloto indican que la dosificación de CO_2 logra la eliminación eficiente de incrustaciones y biofilm, sin dañar el medio ambiente. Este enfoque innovador promete mejorar la eficacia y sostenibilidad del tratamiento de aguas en diferentes sectores.

Palabras clave

Membranas, ósmosis inversa, dióxido de carbono, incrustaciones salinas, biofilm, biocida, ETAP.

DOSING OF CO_2 IN REVERSE OSMOSIS MEMBRANES FOR THE ELIMINATION OF SALT PRECIPITATE AND BIOFILM

The formation of salt precipitate and biofilm deposits is a common problem in the field of water treatment, which often requires the use of biocides with harmful effects on the environment. This article presents a sustainable and effective alternative by dosing carbon dioxide (CO_2) in reverse osmosis membranes. Results obtained in a pilot plant indicate that CO_2 dosing achieves efficient elimination of salt precipitate and biofilm without harming the environment. This innovative approach promises to improve the effectiveness and sustainability of water treatment in different sectors.

Keywords

Membranes, reverse osmosis, carbon dioxide, salt precipitate, biofilm, biocide, DWTP.

Marc Iglesias Sánchez

grado universitario en Ingeniería Química de Granada

Eva Sastre Calvente

jefa del Departamento de Explotación de la Empresa Municipal d'Aigües i Clavegueram, S.A. (Emaya)

Sebastià Ferragut Fiol

capataz de la Planta Potabilizadora de Ósmosis Inversa Son Tugores, de la Empresa Municipal d'Aigües i Clavegueram, S.A. (Emaya)



1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de agua es un proceso fundamental en muchas industrias y áreas, incluyendo la producción de alimentos, la fabricación de productos químicos, la generación de energía, el suministro de agua potable y muchos otros. Sin embargo, uno de los problemas comunes en el tratamiento de agua es la formación de incrustaciones de precipitados salinos y biofilm en los sistemas, que puede reducir la eficiencia y aumentar los costes de producción.

Las incrustaciones de precipitados salinos en membranas y tuberías de agua pueden ser el resultado de varios factores, incluyendo la calidad del agua, la temperatura, el pH y la concentración de minerales disueltos. Las incrustaciones más frecuentes son las de naturaleza calcárea, en particular, la formación de carbonato de calcio (CaCO_3).

Cuando los niveles de calcio y carbonato en el agua superan cierto umbral, comienzan a formar cristales de CaCO_3 que se adhieren a la superficie de las membranas. Con el tiempo, estas incrustaciones pueden reducir significativamente la eficacia del sistema de tratamiento de agua y afectar a la calidad del agua producida, incrementando el paso de sales normalmente debido a microrroturas en las membranas.

Al agua que entra a las membranas de ósmosis inversa se le realiza un pretratamiento que consiste en la dosificación de metabisulfito sódico para eliminar el cloro y un antiincrustante para evitar la precipitación química. No obstante, es posible que aparezca precipitación en membranas de segunda etapa si la hidráulica del sistema no está bien ajustada. Así mismo, la ausencia de cloro en las membranas proporciona un ambiente perfecto para la prolife-

ración de bacterias, originando así el problema del biofilm.

El biofilm se refiere a la acumulación de microorganismos que se asocian entre sí y con las paredes de tuberías y membranas a través de una sustancia que ellos mismos segregan. Su presencia puede deteriorar gravemente la calidad del agua e incrementar los costes de explotación al taponar los orificios de las membranas, lo cual requiere trabajar con una mayor presión de trabajo para mantener un caudal constante [1]. El biofilm se desarrolla en ambientes acuosos y tiene la capacidad de adherirse a diversas superficies, ya sean naturales o artificiales. Este facilita la presencia y multiplicación de bacterias como *Escherichia coli*, *Pseudomonas* y Coliformes [2].

Los métodos tradicionales para controlar y eliminar estos depósitos a menudo implican el uso de biocidas. Los biocidas son compuestos químicos que se utilizan para matar microorganismos en el agua, incluyendo bacterias, hongos y algas. Aunque son efectivos para prevenir la formación de biofilm, las bacterias llegan a desarrollar una adaptación y resistencia a los biocidas, provocando un mayor número de limpiezas de los bastidores y choques con biocida. Disminuir el número de productos que se añaden al agua para su tratamiento es evidentemente una mejora de la calidad de la misma.

La búsqueda de alternativas sostenibles y efectivas ha llevado al desarrollo de varias tecnologías, incluida el uso de CO_2 como agente neutralizante en sustitución de ácidos fuertes minerales como el ácido clorhídrico (HCl) y sulfúrico (H_2SO_4), en membranas de ósmosis inversa [3]. Cuando se añade CO_2 al agua, se forma ácido carbónico (H_2CO_3), que reduce el pH y la alcalinidad, disuel-

ve los precipitados salinos formados por la combinación de sales con carbonato, bicarbonato o hidróxido. Además, el CO_2 también inhibe el crecimiento de microorganismos, al limitar su capacidad de fijarse a las superficies al crear un ambiente ácido [4].

El objetivo de este artículo es presentar una revisión del potencial de la dosificación de CO_2 en membranas de ósmosis inversa para eliminar eficazmente precipitados salinos y biofilm en sistemas de tratamiento de agua. También se presentan los resultados de su aplicación en una planta piloto en la que se evaluó su eficacia. Los resultados indican que la dosificación de CO_2 es una alternativa sostenible y efectiva para el control y eliminación de estos depósitos, lo que puede mejorar la eficiencia y sostenibilidad del tratamiento de agua en diferentes sectores.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto se centra en las pruebas realizadas en la planta piloto situada en ETAP de Son Tugores en Palma de Mallorca (**Figura 1**). La planta está conectada a una

FIGURA 1. Planta piloto.



caja de siete membranas de primera etapa, modelo Fortilife CR100. Su conversión de primera etapa es del 60% al igual que en la ETAP. El caudal de entrada es de 160 L/min, producto de 96 L/min y rechazo de 64 L/min.

Durante el funcionamiento de la planta piloto se han efectuado pruebas en cuatro cajas de membranas diferentes, con el fin de observar el comportamiento de distintos parámetros ante el efecto que produce la dosificación de CO₂ en las mismas. Las pruebas se han realizado aplicando tres métodos distintos: dosificación de CO₂ en producción, presurización y choque biocida.

La primera prueba, realizada en la etapa de producción, consistió en dosificar 1h de CO₂ (366 ppm) durante 8 días al agua bruta de entrada a las membranas, periodo durante el que se tomaron muestras de la entrada, rechazo y producto.

En la segunda prueba se aplicó la presurización, donde se buscó arrastrar las incrustaciones de precipitados salinos y biofilm con ayuda del CO₂ [5]. Esta prueba comienza teniendo un desplazamiento con agua osmotizada durante 15 minutos con dosificación de CO₂. Tras el desplazamiento, se paran las bombas y al tiempo se observa burbujeo en el rotámetro de rechazo. En ese momento es cuando se cierra su salida para forzar la penetración del CO₂ hacia el permeado de la membrana. Tras unos minutos se observa el burbujeo en el rotámetro de producto y es cuando se inicia

la presurización. Transcurrido una hora de inyección de CO₂ se deja de dosificar. La presurización finaliza cuando se alcanza la presión máxima que toleran las membranas y no sale agua por el producto. Tras terminar esta etapa, se procede a despresurizar, llenar y purgar el circuito con el fin de eliminar el CO₂ que ha quedado retenido.

La tercera prueba consistió en un choque biocida con dosificación de CO₂ donde se busca aumentar la eficacia del biocida en la eliminación de *biofouling* de las membranas.

En cada una de las pruebas se ha realizado un seguimiento de los mismos parámetros:

- pH: se observa si con la dosificación de CO₂, el agua producto y rechazo tienen algún cambio significativo en su acidez.
- Conductividad: se busca una correlación entre el desprendimiento de incrustaciones de precipitados salinos y la dosificación de CO₂.
- dPT: se evalúa la pérdida de carga de la caja de presión (entrada de agua bruta - agua rechazo).
- Dureza total: se observa la concentración de CaCO₃ en el agua de producto y rechazo.

TABLA 1	
DOSIFICACIÓN DE CO ₂	
Dosificación de CO ₂	
Caudal (m ³ /h)	9,6
Cantidad (g/h)	3.516
Concentración ppm	366

- Análisis microbiológico: se analiza la evolución de la presencia de pseudomonas y bacterias coliformes.
- Pesaje: se comprueba la diferencia de peso antes y después de las pruebas.

3. RESULTADOS

La primera fase de las pruebas en la planta piloto consiste en estudiar la evolución de la dosificación de CO₂ con distintos métodos en dos cajas de membranas distintas (membranas cajas 21B y 51B).

Tras la finalización de dichas pruebas, se escoge el método que ha sido más eficaz, el cual será el que se realice únicamente en el siguiente conjunto de membranas (membranas 52E) para estudiar su evolución con distintas duraciones de dosificación de CO₂.

Por último, se realiza una prueba distinta a las anteriores directamente en un bastidor de ósmosis inversa durante el desplazamiento, sin mediación del uso de la planta piloto (membranas caja 51C).

3.1. MEMBRANAS 21B Y 51B

En estos dos primeros conjuntos de membranas, la planta piloto comienza su puesta en marcha con la etapa de producción sin dosificación de CO₂ durante varios días para estudiar su comportamiento inicial.

A continuación, comienza el primer método, la dosificación de CO₂ en la etapa de producción. Se realiza durante 8 días seguidos con una dosificación de 1h de CO₂ con las características de la **Tabla 1**.

» La presencia de CO₂ en las membranas de ósmosis inversa tiene un efecto muy positivo, pues se consigue una reducción del peso de las membranas muy significativa, incluso en algún caso alcanzado los 5,7 kg de eliminación de incrustaciones de precipitados salinos y biofilm



FIGURA 2. Evolución del dPT en las membranas 21B.



FIGURA 3. Evolución del dPT en las membranas 51B.



Tras la finalización de este primer método, se vuelve a la etapa de producción sin dosificación durante unos días, hasta que se inicia el segundo método de dosificación de CO₂, la presurización. En este caso, a diferencia del método anterior solamente se realiza un día con una inyección de CO₂ de 1h y misma concentración (**Tabla 1**).

Por último, se vuelve a dejar unos días en etapa de producción sin dosificación tras finalizar el segundo método. Para el tercer método, el choque biocida, se realiza con la misma duración y concentración que el segundo método.

Tras analizar y graficar la evolución de cada prueba, se ha elaborado un diagnóstico donde se plasma el cambio que provoca los diferentes métodos de dosificación de CO₂ en los parámetros mencionados anteriormente.

Los resultados referentes al pH indican que al dosificar CO₂, disminuye cerca de una unidad de pH, lo que da lugar a un agua de producto y rechazo más ácida.

En relación a los datos obtenidos de conductividad, se esperaba una correlación entre el aumento de conductividad y la dosificación de CO₂.

El parámetro que más ha variado y destacado entre los distintos métodos es el dPT (**Figuras 2 y 3**). En cuanto a la variabilidad del dPT tras el primer método, no se aprecian cambios significativos en su evolución e incluso en la **Figura 3** se observa que aumenta el dPT.

El cambio destacable se produce tras la realización del segundo método, la presurización, puesto que se produce una disminución muy significativa. En la **Figura 2** hay una bajada de 11,39 m.c.a. a 9,59 m.c.a. y en la **Figura 3** vuelve a disminuir pasando de 12,22 m.c.a. a 9,82 m.c.a. En referente al último método, no se observa que haya producido alguna variabilidad en el dPT.

El siguiente parámetro que se tiene en consideración es el pesaje de la caja de membranas antes y después de realizar las pruebas, se tienen datos solamente del conjunto

de membranas 51B. La **Tabla 2** recoge los distintos pesos de las siete membranas de la caja y se observa la diferencia de peso y cuántos kilogramos se han reducido. Las membranas ubicadas en la entrada del agua presentan un mayor peso y, por ende, experimentan una reducción de peso más pronunciada durante las pruebas. En contraste, las membranas más alejadas tienen un peso similar al de las nuevas y, por lo tanto, su reducción de peso no es tan significativa.

Por último, se realiza diariamente un análisis microbiológico de una muestra de entrada, producto y rechazo. Se busca estudiar la evolución y comportamiento de las bacterias coliformes y pseudomonas ante la presencia de CO₂. En las **Figuras 4-11** se observa que en ambas membranas la presencia de bacterias coliformes, desde el inicio, es muy inferior a la de pseudomonas. En las distintas gráficas no se aprecia un patrón claro que relacione la presencia bacteriana con la dosificación de CO₂. Se ha discutido que una

TABLA 2

TABLA DE PESOS DE M51B (ORDEN DE MEMBRANAS: ENTRADA -> SALIDA DEL AGUA).

Número de membranas	Membrana 7	Membrana 6	Membrana 5	Membrana 4	Membrana 3	Membrana 2	Membrana 1
Peso inicio (kg)	20,8	19,2	17,2	16,4	16,1	16,1	22,8
Peso final (kg)	16,9	15,8	15,2	14,8	14,7	14,8	21,3
Reducción (kg)	3,9	3,4	2	1,6	1,4	1,3	1,5

FIGURA 4. Presencia de pseudomonas en el producto M21B.

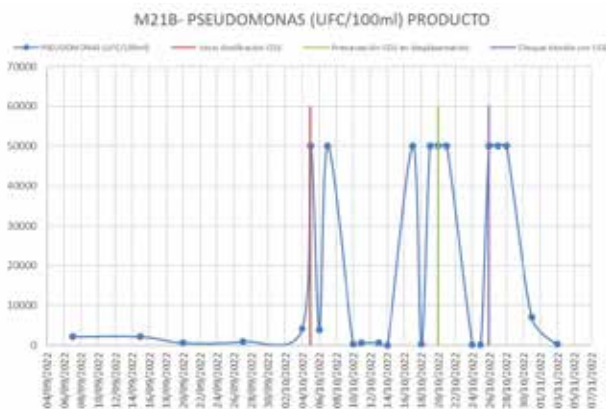


FIGURA 5. Presencia de bacterias coliformes en el producto M21B.

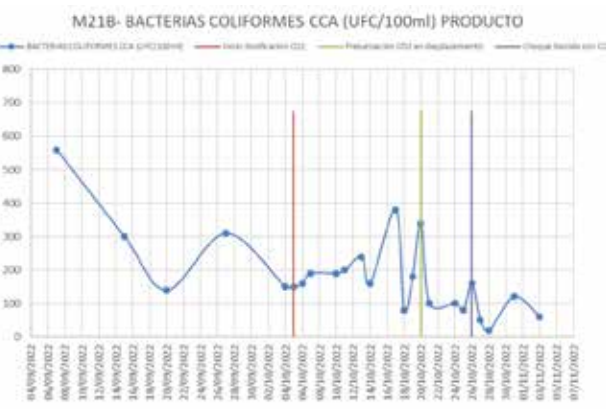


FIGURA 6. Presencia de pseudomonas en el rechazo M21B.

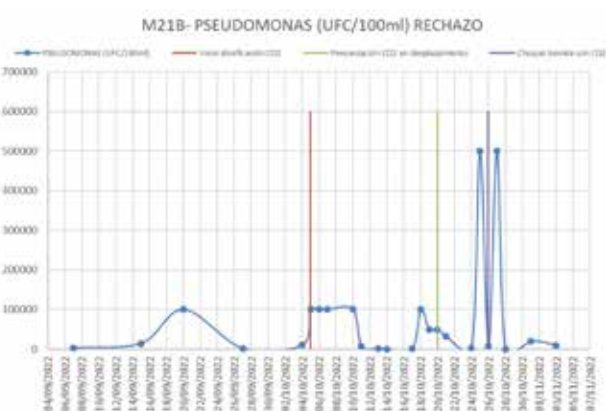


FIGURA 7. Presencia de bacterias coliformes en el rechazo M21B.

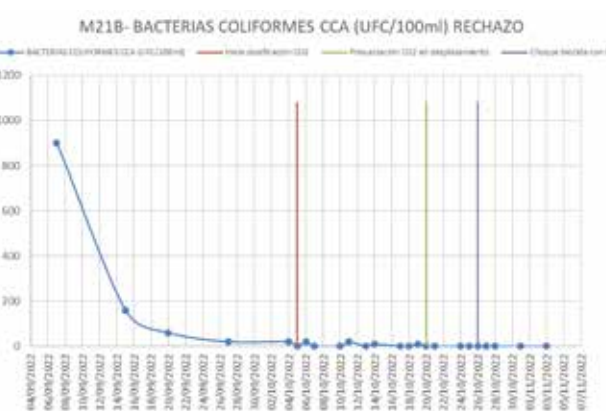


FIGURA 8. Presencia de pseudomonas en el producto M51B.

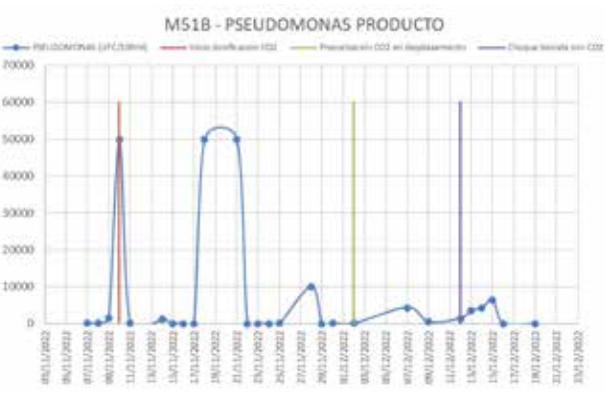


FIGURA 9. Presencia de bacterias coliformes en el producto M51B.

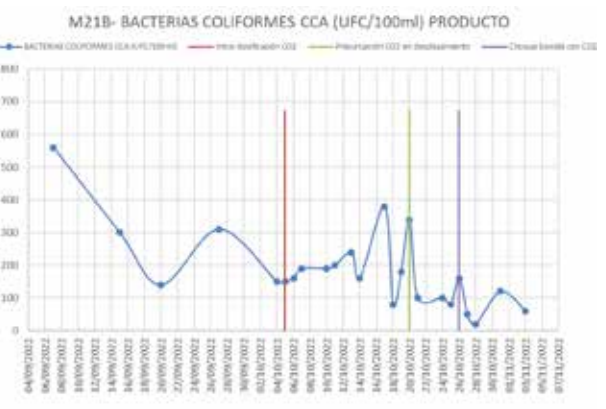
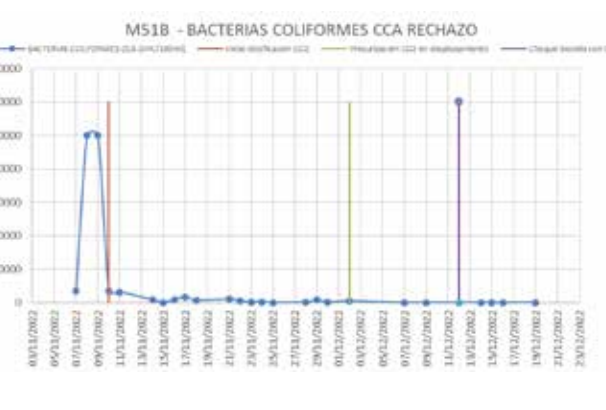


FIGURA 10. Presencia de pseudomonas en el rechazo M51B.



FIGURA 11. Presencia de bacterias coliformes en el rechazo M51B.





muestra diaria para un seguimiento microbiológico es insuficiente y se debería realizar un número mayor de muestreos para apreciar cuando hay desprendimiento del biofilm o utilizar un citómetro de flujo.

3.2. MEMBRANAS 52E

Tras la realización de las pruebas a las dos cajas de membranas anteriores, se decide que la presurización es el método más efectivo. Es por ello por lo que en este ciclo de membra-

nas se han realizado 3 pruebas de presurización de 1 h separadas entre sí por una semana de puesta en producción para estudiar su evolución. La segunda prueba no se hizo completamente porque hubo un percance con el rotámetro de rechazo, pero se llegó a dosificar CO₂.

En cuanto al dPT (**Figura 12**), en la primera presurización de 1h (24/01) se observa la disminución más grande, pasando de 15,95 m.c.a. a 10,49 m.c.a. En los días posteriores, se observa un ligero aumento llegando a 11,09 m.c.a. En la segunda presurización (30/01), hubo una pequeña bajada, alcanzando los 9,87 m.c.a. Se sospecha que, tras el incidente con el rotámetro, no se pudo purgar ni desplazar completamente el CO₂ de las membranas y estuvo en contacto con éstas durante 24h. En los días posteriores, se vuelve a observar un ligero aumento hasta 10,22 m.c.a. En la última presurización (06/02) hay otra bajada situándose en 9,45 m.c.a. Se deduce que los valores cercanos a 9,5 m.c.a. son el tope que se puede alcanzar, ya que son los valores cercanos que se obtienen con membranas nuevas.

En cuanto a la conductividad (**Figura 13**), se observa que, en el producto, los valores previos a la primera presurización son elevados. Mientras que la primera presurización consigue valores más bajos, los valores siguientes a las dos siguientes presurizaciones aumentan.

En relación a la conductividad de rechazo (**Figura 14**), en las dos presurizaciones que se realizaron correctamente se consiguen unos valores más bajos en las siguientes muestras.

En este conjunto de membranas se introduce un nuevo parámetro de estudio, la dureza del agua. Diariamente se toma una muestra de

FIGURA 12. Evolución del dPT del producto M52E.

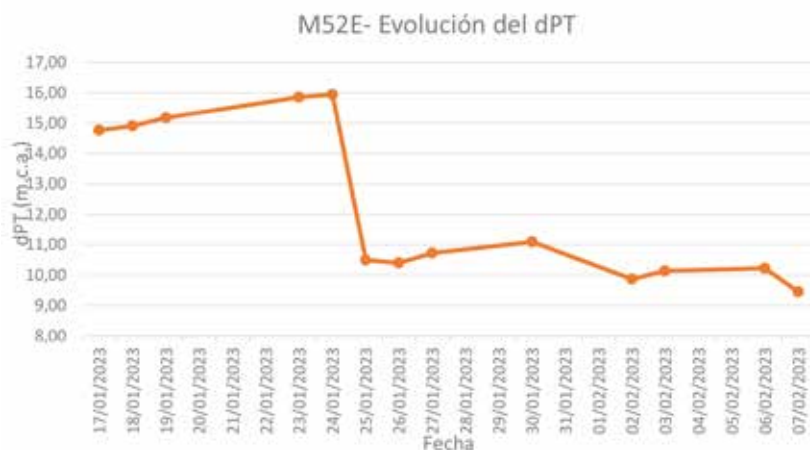


FIGURA 13. Evolución de la conductividad del producto M52E.



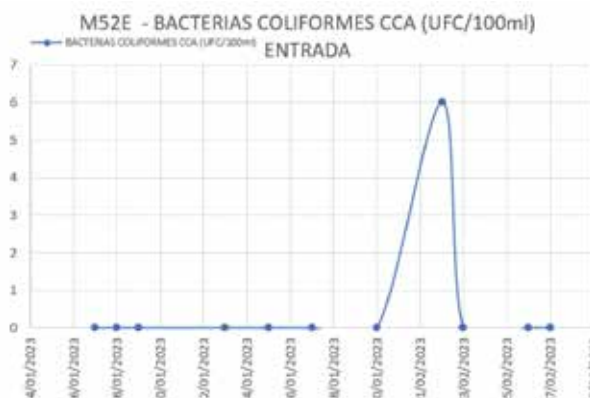
FIGURA 14. Evolución de la conductividad del rechazo M52E.



FIGURA 15. Presencia de pseudomonas en la entrada M52E.



FIGURA 16. Presencia de bacterias coliformes en la entrada M52E.



producto y rechazo y se realiza la determinación del calcio mediante el método volumétrico con EDTA. La evolución de este parámetro es muy lineal y no se observan variaciones relacionadas con la adición de CO₂.

En cuanto al análisis microbiológico que estudia la evolución de la presencia de pseudomonas y bacterias coliformes en la planta piloto (Figuras 15 y 16), se observa que los datos referentes a las muestras del agua de entrada, la presencia de estas bacterias es inexistente. Solamente en los días 02/02 y 03/02 se aprecia una mínima presencia de ambas.

En relación con el análisis de la presencia de pseudomonas en el producto (Figura 17), se observa que en el segundo día se registra un valor elevado de 8.000 UFC/100 mL, que disminuye drásticamente

en los días siguientes y se mantiene por debajo de los 2.000 UFC/100 mL, con la excepción del último día en que se realiza la tercera presurización y se detectan valores de 10.000 UFC/100 mL.

En cuanto a la presencia de bacterias coliformes (Figura 18), se observa la mayor cantidad en el primer día, con un valor de 2.500 UFC/100 mL. En los días siguientes, se mantienen por debajo de los 1.000 UFC/100 mL.

También se puede observar un incremento constante en la presencia de pseudomonas en el rechazo, empezando en 5.800 UFC/100 mL y llegando al valor máximo registrado en el último día, con 50.000 UFC/100 mL (Figura 19). En cuanto a las bacterias coliformes, no se presenta una evolución lógica y no se detecta

ningún patrón o motivo relacionado con las tres etapas de presurización. Sus valores aumentan y disminuyen constantemente (Figura 20).

En relación a los pesos, la Tabla 3 muestra una comparativa de los pesos iniciales y finales de las membranas. Se ha observado una disminución significativa en el peso de las membranas motivo de estudio. La mayor reducción de peso se ha producido en la membrana 7, que está más cerca del caudal de entrada, con una disminución muy significativa de 5,7 kg. Las membranas más alejadas del caudal de entrada (membranas 1 y 2) han experimentado una reducción de peso menor, con una disminución de 1,0 kg y 0,8 kg, respectivamente. Se conoce que el peso de este modelo de membranas nuevas es de alrededor de 14,5

FIGURA 17. Presencia de pseudomonas en el producto M52E.

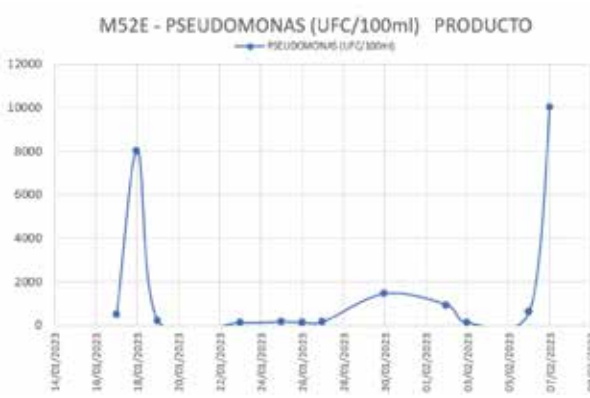


FIGURA 18. Presencia de bacterias coliformes en el producto M52E.

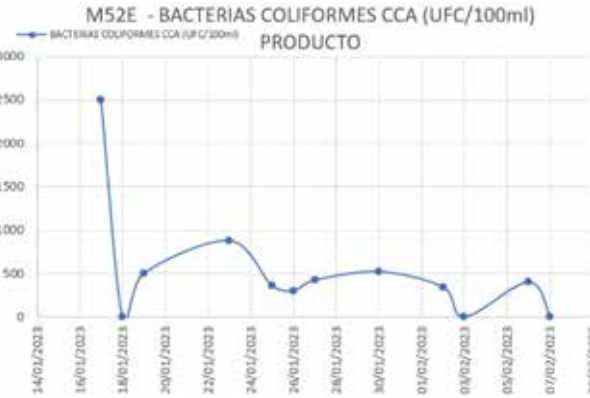
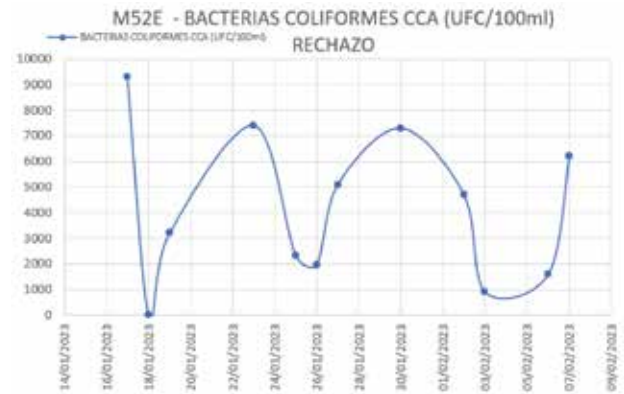




FIGURA 19. Presencia de pseudomonas en el rechazo M52E.



FIGURA 20. Presencia de bacterias coliformes en el rechazo M52E.



kg. Debido a esto, las membranas 1, 2 y 3 han experimentado la menor disminución de peso al estar próximas al peso de las membranas limpias. Lo mismo ha ocurrido en el conjunto de membranas anteriores, en las que el peso mínimo registrado ronda este valor.

3.3. MEMBRANAS 51C

En este conjunto de membranas se han realizado pruebas directamente en los racks, sin mediación de la planta piloto. Durante cinco días, se realizó una dosificación de CO₂ en la etapa de desplazamiento, con una duración de 10 a 13 minutos cada vez. La dosificación consistió en in-

yectar un caudal de 36 L/min y una dosis de 300 ppm de CO₂.

En el tercer día de dosificación, se observó un aumento en el caudal del producto de la primera etapa, que pasó de 54 m³/h a 57 m³/h. En total, la dosificación duró aproximadamente una hora (12 minutos al día durante 5 días). A pesar de haberse utilizado solamente esta dosificación, se logró una disminución importante en el peso de las membranas reflejado en la **Tabla 4**.

4. CONCLUSIONES

En el estudio de la evaluación de las dos primeras cajas de membranas, debido al parámetro del diferencial

de presión, se demuestra que la pre-saturación es el método más eficaz.

En referente a las cajas de membranas que se han realizado las pruebas, se puede afirmar que la presencia de CO₂ tiene un efecto muy positivo:

- A nivel químico de reducción de pH para evitar la incrustación de precipitados salinos como los carbonatos.
- A nivel fisicoquímico por efecto del pH y de CO₂ (disuelto y gas) en el control del crecimiento del biofilm, con posibles efectos biocidas o de control del crecimiento microbiano.

TABLA 3

TABLA DE PESOS DE M52E (ORDEN DE MEMBRANAS: ENTRADA -> SALIDA DEL AGUA).

Número de membranas	Membrana 7	Membrana 6	Membrana 5	Membrana 4	Membrana 3	Membrana 2	Membrana 1
Peso inicio (kg)	22,3	18	16,4	16,1	15,9	15,7	15,5
Peso final (kg)	16,6	15,3	15	14,9	14,7	14,7	14,7
Reducción (kg)	5,7	2,7	1,4	1,2	1,2	1	0,8

TABLA 4

TABLA DE PESOS DE M51C (ORDEN DE MEMBRANAS: ENTRADA -> SALIDA DEL AGUA).

Número de membranas	Membrana 7	Membrana 6	Membrana 5	Membrana 4	Membrana 3	Membrana 2	Membrana 1
Peso inicio (kg)	21,9	16,9	15,8	15,5	15,4	15,2	15,1
Peso final (kg)	19,8	15,3	14,7	14,6	14,6	14,5	14,3
Reducción (kg)	2,1	1,6	1,1	0,9	0,8	0,7	0,8

» El uso de CO₂ en lugar de biocidas o detergentes convencionales es una alternativa sostenible con el medio ambiente, lo que lo convierte en una opción altamente recomendable para su implementación en plantas de tratamiento de agua

- A nivel físico por arrastre del biofilm mediante las posibles burbujas de gas [5].
- La dosificación de CO₂ aporta un beneficio añadido ya que, al disminuir el pH, ayuda a la remineralización del agua.

Como consecuencia de los efectos excelentes que presenta, se consigue una reducción del peso de las membranas muy significativa, incluso en algún caso alcanzado los 5,7 kg de eliminación de incrustaciones de precipitados salinos y biofilm.

En cuanto al análisis microbiológico, los datos obtenidos no muestran una correlación clara entre la presencia de bacterias y CO₂ debido a la limitación de una sola muestra diaria. Para abordar esta cuestión, se propone la implementación de un sistema

de monitorización microbiológica en tiempo real para permitir un estudio más preciso de la evolución microbiológica o un marco de redes neuronales profundas para la detección de espesor de biofilm *in situ* [6].

Por último, el uso de CO₂ en lugar de biocidas o detergentes convencionales es una alternativa sostenible con el medio ambiente, lo que lo convierte en una opción altamente recomendable para su implementación en plantas de tratamiento de agua.

5. AGRADECIMIENTOS

A Nicolás Urgoiti Moinot y Daniel Caño González de la Empresa Municipal de Aguas de Málaga por su orientación y apoyo en la implementación de la dosificación de CO₂ en la planta objeto de estudio.

Bibliografía

[1] Ngene, I.; Lammertink, R.; Kemperman, A.; Van den Ven, W.; Wessels, L.; Wessling, M.; Van der Meer, M. (2010). CO₂ nucleation in membrane spacer channels remove biofilms and fouling deposits. *Ind. Eng. Chem. Res.*, núm. 49, págs. 10.034-10.039.

[2] Yang, S.; Song, Z.; Li, P.; Sun, F.; Zeng, H.; Dong, W.; Feng, X.; Ren, N. (2023). Biofouling initiation on a microfiltration membrane related to deposition and adhesion of bacteria from the perspective of interface interactions. *Desalination*, núm. 545, pág. 116.151.

[3] Partlan, E.; Ladner, D. (2013). Dissolved CO₂ - An alternative for cleaning inorganic scale from RO membranes. *Clemson University TigerPrints*.

[4] Kashif Shahid, M.; Pyo, M.; Choi, Y. (2018). The operation of reverse osmosis with CO₂ as a scale inhibitor: A study on operational behavior and membrane morphology. *Desalination*, núm. 426, págs. 11-20.

[5] Urgoiti Moinot, N.; Caño González, D.; Assiego de Larriva, M.C. (2021). Empleo del anhídrido carbónico para el control del biofilm e incrustación en la IDAS El Atabal. I Congreso Digital AEDyR, 978-84-09-27519-9.

[6] Qamar, A.; Kerdi, S.; Amin, N.; Zhang, X.; Vrouwenvelder, J.; Ghaffour, N. (2022). A deep neural networks framework for in-situ biofilm thickness detection and hydrodynamics tracing for filtration systems. *Separation and Purification Technology*, núm. 301, pág. 121.959. 