

Métodos de limpieza para membranas de ósmosis inversa

JOSÉ M. VEZA (*); JAIME SADHWANI (*)

RESUMEN La limpieza de membranas en las plantas de desalación por ósmosis inversa se ha convertido en un aspecto relevante de la operación de las plantas, puesto que el uso de procedimientos adecuados tiene una influencia importante sobre el funcionamiento de la membrana, lo cual a su vez implica un efecto en los costos operacionales (reposición de membranas, consumo de energía).

Los procedimientos de limpieza de membranas no se han abordado de una forma sistemática hasta ahora, y con vistas a desarrollar procedimientos efectivos de limpieza, se han llevado a cabo una serie de ensayos con distintos agentes de limpieza y en varias dosis, en una unidad piloto.

Los agentes de limpieza utilizados fueron productos alcalinos y ácidos, así como mezclas de aquellos con detergentes. Las dosis para los agentes limpiadores oscilaron entre 0.5 y 1%. La metodología de trabajo consiste en tres etapas: a) medida del rendimiento de operación (caracterización) de una membrana sucia, b) ejecución de un proceso de limpieza, y c) nuevamente medida de rendimiento de la membrana después de la limpieza.

En cada ensayo se midieron el caudal, la conductividad y la turbidez, tanto para la alimentación como para el producto, antes y después de la limpieza, para poder comparar el funcionamiento. En la serie de ensayos previos se realizaron 12 experimentos, y en cada uno de ellos se probaron al menos cinco elementos de membrana diferentes.

Los ensayos previos ya han proporcionado alguna información de interés. El producto más prometedor parece ser el ácido clorhídrico (0.8%) que dio lugar a un aumento del caudal de producto de 12.3% y una disminución de la conductividad de 4.5%, junto con una reducción en la turbidez de producto de 21.1%.

Los resultados alcanzados se consideran una primera etapa dentro de un programa de investigación más amplio y que continúa en desarrollo.

CLEANING METHODS FOR REVERSE OSMOSIS MEMBRANES

ABSTRACT Membrane cleaning in reverse osmosis desalination plants has become a relevant issue within plant operation, since the use of appropriate cleaning procedures has a strong influence upon the membrane performance, which in turn means an effect on the operational costs (membrane replacement, energy consumption).

The membrane cleaning procedures have not been systematically approached, and in order to develop efficient cleaning procedures a number of trials have been carried out under variable type of cleaning agents and various doses, in a pilot plant.

Cleaning agents used are alkaline and acid chemicals, detergent, and mixtures of alkaline and/or acid with detergents. Doses for the cleaning agents vary from 0.5 to 1%. The working methodology consists of three steps: a) measuring performance of operation with a fouled membrane, b) carrying out a cleaning process, and c) again measurement of operation performance with the clean membrane.

On each trial the flow, conductivity and turbidity were measured both for feed and product water, before and after the cleaning stage, in order to be able to compare performance. For the preliminary set of experiments, 12 tests were carried out, each of them involving at least 5 membrane elements.

Preliminary trials have already provided with some interesting data. The most promising chemical seems to be hydrochloric acid (0.8%) which provided an average increase in product flow rate of 12.3% and a decrease in product conductivity of 4.5%, together with a reduction in product turbidity of 21.1%.

The results achieved are regarded as a first stage in a wider research project still in progress.

Palabras clave: Ósmosis inversa; Membranas; Ensuciamiento; Pérdida de carga; Energía; Limpieza; Reposición; Coste; Rendimiento; Caudal.

INTRODUCCIÓN

El proceso de ósmosis inversa para desalación de agua de mar ha venido incrementando su capacidad de producción instalada a lo largo de la última década. Las membranas de ósmosis inversa están sometidas a ensuciamientos debidos a los componentes que se encuentran en el agua de alimentación. El ensuciamiento se puede producir por sólidos en suspensión, coloides, óxidos metálicos, incrustaciones, limos biológicos, compuestos orgánicos, y aceites y grasas.

El ensuciamiento produce una reducción del rendimiento (en términos de caudal de producto y de su calidad) así como un aumento en la pérdida de carga a través de las membranas, lo

cual a su vez significa un aumento del consumo de energía. En conjunto, la membrana muestra un periodo de vida más corto, lo cual aumenta los costes de limpieza y de reposición, una parte significativa de los costes del agua.

Los métodos de limpieza de membranas para reducir el ensuciamiento han sido desarrollados por los fabricantes de membranas, y los operadores de plantas los han adaptado a sus propias necesidades. Sin embargo hay falta de información de base sobre trabajo sistemático en este campo. La experiencia existente es escasa, dispersa, y no permite llegar a conclusiones generales de interés para los operadores de plantas.

Una revisión interesante del trabajo hecho en limpieza de membranas de ósmosis inversa fue realizado por Ebrahim [1]. Se describen brevemente los diversos métodos de limpieza existentes:

- Físicos: lavado con agua (directo o inverso), contrapresión del producto, vibración, drenaje con aire y llenado con agua,

(*) Departamento de Ingeniería de Procesos. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

purga con aire, contrapermeación con CO₂, limpieza automática con pelotas de goma en membranas tubulares.

- Químicos: (limpieza de membranas con diversas combinaciones de reactivos, por ejemplo un detergente alcalino seguido de ácido peracético y peróxido de hidrógeno, EDTA y ácido cítrico estabilizado con amoníaco, productos comerciales como Flocclean, y otros. En algunos casos, la limpieza es seguida del uso de agentes restauradores de la membrana (polivinil metil éter, conocido como PT-A, y ácido tánico, conocido como PT-B).
- Físico - químicos: combinaciones de ambos.

Los tipos de ensuciamiento que pueden encontrarse en las membranas son:

- Sólidos en suspensión.
- Coloides (sílice, subproductos de Al y Fe cuando se usan como coagulantes).
- Óxidos metálicos (Fe, Mn,...).
- Incrustaciones (precipitados de sales inorgánicas, tales como sulfato de calcio y carbonato de calcio).
- Limos biológicos (algas, productos derivados del uso de biocidas orgánicos...).
- Productos orgánicos.
- Aceites y grasas.

En conjunto hay muy poca bibliografía sobre los métodos de limpieza, y la que hay disponible se suele basar en experiencias relacionadas con las recomendaciones de los fabricantes de membranas. En el trabajo mencionado anteriormente, y después de revisar la literatura, se llegó a las siguientes conclusiones:

- La limpieza de membranas es esencial con objeto de mejorar el rendimiento.
- Los métodos químicos se usan ampliamente para limpieza, aunque sus resultados no siempre son positivos.
- El éxito en una aplicación específica no implica el mismo resultado en otra aplicación.
- No hay una única técnica generalizada de limpieza.
- Los métodos físicos no están muy extendidos, excepto el lavado con agua entre limpiezas, cuando se usan varios productos químicos.

Otros autores como Tragard [2] concluyen que los métodos de limpieza operan esencialmente por ensayo y error. Falta un mejor conocimiento del mecanismo de limpieza, y específicamente de la acción del agente de limpieza sobre la suciedad.

Graham et al [3] dan detalles sobre las circunstancias en que se aconseja la limpieza: cuando se observe una reducción de la productividad, o en la presión neta efectiva, o un aumento en la caída de presión.

Los pasos a seguir en una investigación sobre estos temas serían la identificación o caracterización de la suciedad, selección del agente limpiador, y evaluación de la eficacia de la limpieza (mediante comparación del rendimiento de la membrana antes y después de la limpieza).

Amjad [4] da detalles de algunas experiencias, y sobre las complejas técnicas utilizadas en la identificación de los depósitos: difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, espectroscopia infrarroja, microscopía óptica, microscopía de barrido electrónico, rayos X con dispersión de energía, absorción atómica.

Amjad et al [5] establecen los criterios generales para la selección del agente de limpieza, el procedimiento standard, así como los métodos generales para restauración y esterilización

de membranas, además de incluir algunos casos de estudio concretos.

Hickman [6] añade que la mejor técnica para la caracterización de la suciedad es la autopsia de la membrana. Sin embargo este es un ensayo destructivo, que no puede realizarse a gran escala en una planta industrial.

Otras referencias de la bibliografía dan detalles de trabajos concretos como Whittaker et al [7] que realizaron una evaluación de cinco productos químicos para eliminar la capa biológica formada en la superficie de membranas espirales, con varias dosis de cloro. El tratamiento se realizó con surfactantes y detergentes, agentes caotrópicos, bactericidas, enzimas, y antiincrustantes.

La evaluación se llevó a cabo con un microscopio de barrido electrónico, mediante el recuento de las bacterias que sobrevivían al tratamiento. La combinación más efectiva fue la de urea junto con dodecil sulfato sódico (SDS).

Siler [8] hizo algunos trabajos con hidróxido sódico y un producto comercial alcalino de Filmtec.

A pesar de la necesidad de limpiezas periódicas de las membranas, no hay una metodología general válida para una mayoría de casos. Así que este proyecto pretende desarrollar directrices y métodos de limpieza para mejorar el funcionamiento de las membranas, ampliando su vida útil, y poniéndolas a disposición como una tecnología en forma amplia.

El uso de membranas para ósmosis inversa se está convirtiendo en una parte importante de la industria de la desalación, en muchas áreas geográficas, como las Islas Canarias, donde hay cerca de 10 000 elementos en operación. Por tanto para la industria es de interés económico y estratégico alcanzar reducciones substanciales en los costes operacionales.

Se estima que una reducción en la tasa anual de reposición desde un 15% a un 5% produciría unos ahorros anuales en costes de membranas de unos trescientos millones de pesetas, cifra referida exclusivamente al mercado de Canarias.

Los resultados esperados de esta investigación permitirán identificar los componentes del ensuciamiento en una membrana, además de establecer los métodos adecuados de limpieza en cada caso, y adicionalmente mejorar los métodos de pretratamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos de limpieza fueron realizados en una pequeña unidad piloto especialmente diseñada para este propósito, y con la suficiente flexibilidad para cumplir dos objetivos:

- Permitir la realización de limpiezas de membranas bajo diversas condiciones.
- Permitir la comprobación de los resultados de las limpiezas.

Por tanto, el dispositivo experimental incluye dos partes bien definidas, a saber:

- Un módulo para limpiezas químicas.
- Un módulo para evaluación de esas limpiezas, mediante la medición de los parámetros de operación.

La principal diferencia entre ambos módulos está en la presión de operación, ya que el módulo de limpieza funciona a baja presión (normalmente a unos 5 bar), mientras el módulo de evaluación opera a la presión habitual de los bastidores de ósmosis inversa, es decir entre 55 y 68 bar. Se incluyen en la unidad un depósito para acondicionamiento del agua y un filtro de cartucho de 5 µm.

El diagrama de flujo de la unidad piloto aparece en la figura 1.

La tabla 1 relaciona los principales parámetros de diseño del equipo.

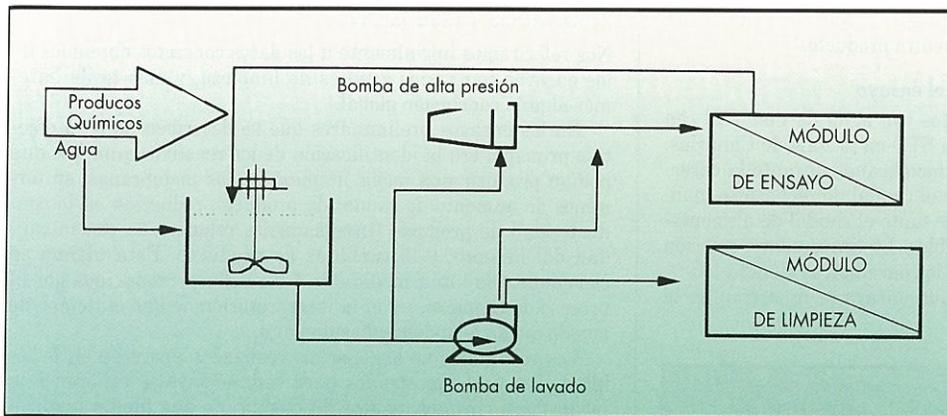


FIGURA 1. Diagrama de flujo. Unidad de ensayos.

BOMBAS	BOMBA DE ALTA PRESIÓN	BOMBA DE BAJA PRESIÓN
Tipo de bomba Caudal Presión de aspiración/descarga Material de pistón/cuerpo Potencia del motor Velocidad de bomba/motor Fluido	Alternativa (pistones) 77 L/min 1/70 bar Cerámicas/bronce de Al 14.7 kW 1.500/457 rpm Agua de mar	Centrífuga 4 m ³ /h 1/6.7 bar /polipropileno 11.2 kW 3.000/rpm Reactivos químicos
FILTRO		
Tipo de filtro Material del cuerpo Presión de operación Diámetro interno/longitud Número de cartuchos Diámetro nominal de poro Material de cartucho Diámetro externo/longitud	Cartucho PVC 6 bar 200/1.350 mm 3 5 µm Polipropileno 60/1.016 mm	
MÓDULOS	MÓDULO DE ENSAYO	MÓDULO DE LIMPIEZA
Material Presión de operación Diámetro interno/longitud	Fibra de vidrio reforzada con plástico (FRP) 70 bar 202/1.650 mm	Fibra de vidrio reforzada con plástico (FRP) 21 bar 202/1.650 mm
ELEMENTOS DE ÓSMOSIS INVERSA		
Configuración Rechazo de sales Diámetro Material de la capa activa Agua de alimentación	Arrollada en espiral < 99.5% 202 mm (8 pulgadas) Poliamia aromática Agua de mar, 38.000 ppm STD	
INSTRUMENTOS		
Manómetros, interruptores de presión	Interruptores de nivel, rotámetros	Termómetros, conductímetros, pHmetros

TABLA 1. Especificaciones para la planta piloto.

Las membranas usadas para los ensayos eran de tipo espiral, de 8 pulgadas de diámetro, de un solo fabricante, y con una capa activa de separación a base de poliamida con polisulfona en una configuración de capa fina compuesta (thin film composite). Cada uno de los elementos estaba perfectamente identificado, y se utilizaron un total de 80 elementos en las experiencias. Estos elementos habían estado operando previamente en la planta comercial durante unos tres años y medio (alrededor de 27 000 horas).

En cuanto a los propios ensayos, cada uno de ellos consistió en tres etapas distintas:

a) Medida del rendimiento (caracterización) de un elemento de membrana en el módulo de alta presión. El ensayo se realiza

en las mismas condiciones (agua de alimentación, presión ..) que en la planta principal. Esta etapa requiere unas dos horas y media, incluido el tiempo necesario para la estabilización de caudal.

b) Limpieza de la membrana (entre 0.5 y 1 hora) con los productos químicos seleccionados para ese ensayo concreto, en el módulo de baja presión.

c) Medida del rendimiento del mismo elemento a alta presión, después de la limpieza, de nuevo por unas 2.5 horas.

Considerando las tres etapas, cada ensayo requiere unas ocho horas de trabajo. Algunos de los ensayos implicaban una

doble etapa de limpieza: es decir limpieza con un producto seguida de una segunda limpieza con otro producto.

Condiciones de operación durante el ensayo

Todos los ensayos fueron realizados con agua de mar real con una salinidad de unos 38 000 ppm STD en la zona de Canarias. La presión de operación para las membranas durante la caracterización se mantuvo en 67 bar y el caudal de rechazo se mantuvo fijo en 5.1 m³/h, de forma que tanto el caudal de alimentación como de producto eran variables. La conversión o relación de recuperación pasa a ser uno de los parámetros medidos.

Los parámetros medidos en cada ensayo se muestran en la tabla 2.

FECHA	NÚMERO DE SERIE DEL ELEMENTO
Presión de alimentación	Conversión
SDI de alimentación	
Temperatura	
pH de alimentación	Cloro de alimentación
Conductividad de alimentación	Turbidez de alimentación
SDI de producto	SDI de salmuera
pH de producto	pH de salmuera
Conductividad de producto	Conductividad de salmuera
Cloro de producto	Cloro de salmuera
Turbidez de producto	Turbidez de salmuera
	Presión diferencial alimentación/salmuera

TABLA 2. Parámetros medidos durante los ensayos.

Los productos químicos usados para los ensayos de limpieza fueron los que aparecen en la tabla 3.

ENSAYO Nº	PRODUCTO QUÍMICO
1	Hidróxido sódico 0.5%
2	Hidróxido sódico 0.8%
3	Ácido clorhídrico 0.5%
4	Ácido clorhídrico 0.8%
5	Hidróxido sódico 0.5% seguido de Ácido clorhídrico 0.5%
6	Hidróxido sódico 0.8% seguido de Ácido clorhídrico 0.8%
7	Detergente Ultrasil* P-10 + Hidróxido sódico 0.5%
8	Detergente Ultrasil* P-10 + Hidróxido sódico 0.10%
9	Detergente Ultrasil* P-75 + Ácido clorhídrico 0.5%
10	Detergente Ultrasil* P-75 + Ácido clorhídrico 0.8%
11	Detergente Ultrasil* P-10 + Hidróxido sódico 0.5% seguido de Detergente Ultrasil* P-75 + Ácido clorhídrico 0.5%
12	Detergente Ultrasil* P-10 + Hidróxido sódico 0.8% seguido de Detergente Ultrasil* P-75 + Ácido clorhídrico 0.8%

* Producto de Henkel.

TABLA 3. Combinaciones de productos químicos usados para limpieza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nos referiremos inicialmente a los datos concretos obtenidos de los ensayos con varios agentes de limpieza, y más tarde haremos alguna conclusión global.

En los ensayos preliminares que se describen aquí, el objetivo principal era la identificación de los reactivos químicos que podían producir una mejor limpieza de las membranas, en términos de aumento de caudal de producto, reducción en la conductividad de producto (inversamente relacionada con la calidad del mismo), y la turbidez de producto. Esta última se considera como una medida de los residuos producidos por el proceso de limpieza, y con la interpretación de que el tiempo de lavado puede no haber sido suficiente.

Los resultados de los ensayos realizados aparecen en la tabla 4. Los datos mostrados para cada ensayo se refieren a la media para cinco elementos de membrana que fueron analizados en cada ensayo. Los datos incluyen la variación en porcentaje (antes y después de limpieza) del caudal, conductividad y turbidez de producto.

La mayoría de los ensayos dieron lugar a una mejora en el caudal de producto, en porcentajes que oscilan entre 0.1 a 12.3%, mientras que en un solo ensayo se redujo el caudal en un 0.73%. A efectos de la discusión, vamos a separar los ensayos en varios grupos.

Hay un primer grupo, en el que están incluidos los ensayos que produjeron notables mejoras en el rendimiento de las membranas. El ensayo número 4, con ácido clorhídrico al 0.8% dio los mejores resultados: un incremento medio (para cinco elementos de membrana) en el caudal de producto de 12.3% y una reducción en la conductividad de 4.5%, junto con una reducción en la turbidez de 21.1%.

Hubo otros ensayos satisfactorios, como el número 5 (hidróxido sódico 0.5% seguido de ácido clorhídrico 0.5%) con un incremento de 2.39% en caudal de producto y un pequeño incremento de 0.9% en la conductividad. También el ensayo número 9 (Detergente Ultrasil P-75 + ácido clorhídrico 0.5%) produjo un incremento de 1.85% en caudal y una ligera reducción (-0.12%) en la conductividad. El ensayo número 3 también se puede considerar como satisfactorio, siendo realizado con ácido clorhídrico 0.5%, y mostrando una ligera mejora en el caudal (2.64%) junto con una reducción en conductividad (-4.21%).

Un segundo grupo de agentes químicos produjo resultados contradictorios, o sin cambios significativos en el rendimiento de las membranas. Así por ejemplo, el ensayo número 1 con hidróxido sódico (0.5%) produjo un aumento de caudal (5.51%), pero también aumento de la conductividad (7.93%). El ensayo número 6 (hidróxido sódico 0.8% seguido de ácido clorhídrico 0.8%) produjo un aumento en caudal (3.73%) pero también un aumento significativo de la conductividad (9.39%).

Otros ensayos incluidos en este grupo son el número 7 (detergente Ultrasil⁽¹⁾ P-10 + hidróxido sódico 0.5%) que dio lugar a un gran aumento del caudal de producto (8.54%) junto con un aumento aun mayor de la conductividad (14.85%). Resultados similares fueron los proporcionados por el ensayo 8 (Ultrasil P-10 + hidróxido sódico 0.8%) con aumento de 8.05% en el caudal y un alto incremento de 21.4% en la conductividad. En la misma forma, el ensayo 10 (Ultrasil P-75 + ácido clorhídrico 0.8%) proporciona un aumento de 1.24% en caudal y 21.92% aumento en conductividad, y finalmente el ensayo 12 (Ultrasil P-10 + hidróxido sódico 0.8% seguido de Ultrasil P-75 + ácido clorhídrico 0.8%) produjo aumentos de 2.82% y 17.14% en caudal y conductividad, respectivamente.

Y por fin hay un tercer grupo en que los agentes de limpieza produjeron una reducción en el rendimiento de la membrana a la vista de los ensayos. El caso número 2 (hidróxido sódico 0.8%) donde un aumento mínimo en la productividad (0.34%) fue se-

(1) Producto de Henkel.

ENSAYO	CAUDAL DE PRODUCTO %	CONDUCTIVIDAD %	TURBIDEZ %	CONVERSIÓN %
1	5,51	7,93	-17,33	4,98
2	0,34	10,52	-7,67	0,62
3	2,64	-4,21	-6,38	2,41
4	12,36	-4,53	-21,14	12,49
5	2,39	0,90	-26,50	1,55
6	3,73	9,39	-23,52	3,19
7	8,54	14,85	4,44	7,59
8	8,05	21,40	-7,31	7,22
9	1,85	-0,12	-21,15	1,69
10	1,24	21,92	-26,02	1,31
11	0,82	1,81	7,48	0,90
12	2,82	17,14	-9,16	2,84
Máximo	12,36	21,92	7,48	12,49
Mínimo	0,34	-4,53	-26,50	0,62

TABLA 4. Resultados de los ensayos de limpieza (variación en porcentaje, antes y después de la limpieza, media para 5 elementos de membrana).

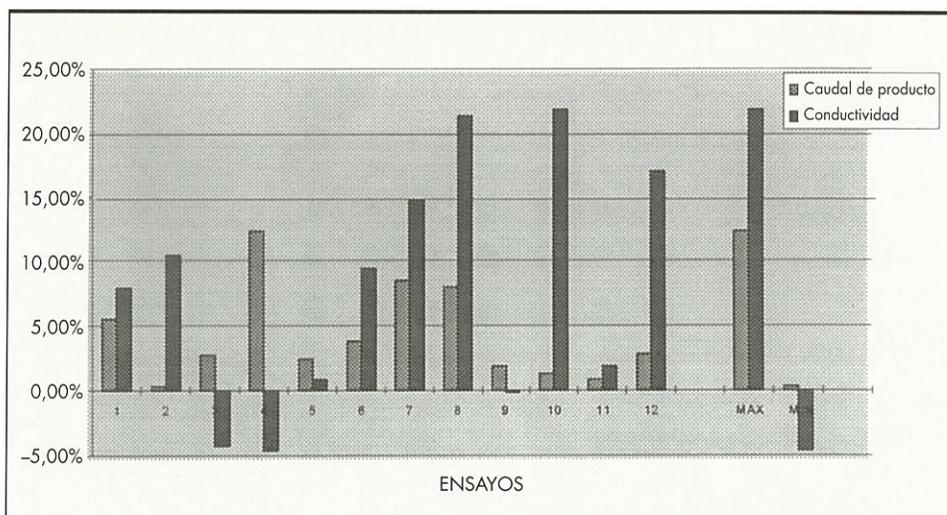


FIGURA 2. Resultados de los ensayos de limpieza. Variación en porcentaje del caudal y conductividad de producto.

guido de una gran pérdida en la calidad del producto (aumento de 10.52% en la conductividad). O el ensayo número 11 (una doble combinación de detergente Ultrasil P-10 e hidróxido sódico 0.5% seguido de Ultrasil P-75 y ácido clorhídrico 0.5%) que solo produjo un escaso aumento de 0.82% en caudal junto con un aumento en la conductividad de 1.81%.

La figura 2 muestra las mejoras o reducciones en el rendimiento para cada producto químico utilizado, así como los valores máximos y mínimos obtenidos. Los parámetros mostrados son el porcentaje de variación en el caudal y conductividad de producto.

Del análisis de los resultados, se puede concluir fácilmente que hay una amplia dispersión de los datos, lo cual hace difícil extraer conclusiones generales. Sin embargo, se pueden anotar algunas observaciones previas, siempre teniendo en cuenta que los resultados se refieren a valores medios para juegos de cinco elementos de membrana.

En términos generales, hay que observar que muchos productos químicos producen aumentos en el caudal de agua producto tras la limpieza, con una tasa de aumento que varía am-

pliamente entre 0.3 y 12.3%. En este sentido, es relativamente fácil obtener una mejora del caudal de producto con la mayoría de las limpiezas. La mejora del rendimiento de las membranas es evidente.

Sin embargo, también hay que concluir que la mayoría de las soluciones de limpieza produjeron un aumento de la conductividad de producto, mientras que solo dos de ellas (números 3 y 4, ácido clorhídrico) mejoraron su calidad en términos de conductividad. En este sentido, solo estos dos reactivos se mostraron útiles para el propósito de aumentar el caudal y reducir la conductividad tras la limpieza.

Respecto a la variación en la concentración del reactivo, la tendencia general es que la limpieza a mayores concentraciones (0.8% en vez de 0.5%) produjo unas tasas de mejora más altas, tanto en caudal como en conductividad. Las concentraciones más altas fueron más efectivas. Así por ejemplo, el ensayo número 4 dio mejores resultados que el número 3. En algunos casos, como en los números 7 y 8, los resultados fueron muy similares con ambas concentraciones de reactivos.

El hidróxido sódico no resultó muy efectivo, ni cuando se usó solo (ensayos 1, 2) ni junto con detergente (ensayos 7, 8, 12). De hecho, en la mayoría de los ensayos en que se utilizó una combinación de detergente y reactivo ácido o alcalino, se produjo un aumento significativo en caudal, junto con aumentos inadmisibles (mas de 10%) en la conductividad de producto.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha iniciado un proyecto de investigación con el objetivo de identificar los métodos mas apropiados para la limpieza de membranas de ósmosis inversa. Se realizaron 12 ensayos preliminares, con cuatro productos químicos (ácido clorhídrico, hidróxido sódico, y dos detergentes comerciales) en diferentes concentraciones, y sus combinaciones.

Los resultados de estas pruebas muestran una gran dispersión en los datos, aunque se pueden identificar tres grupos. El primero incluía principalmente ácido clorhídrico en diferentes concentraciones, que dieron buenos resultados y produjeron mejoras significativas. Un segundo grupo produjo mejoras menores o no significativas, e incluso un tercer grupo llevo a proporcionar resultados perniciosos para las membranas, ya que el caudal de producto disminuyó y la conductividad aumentó.

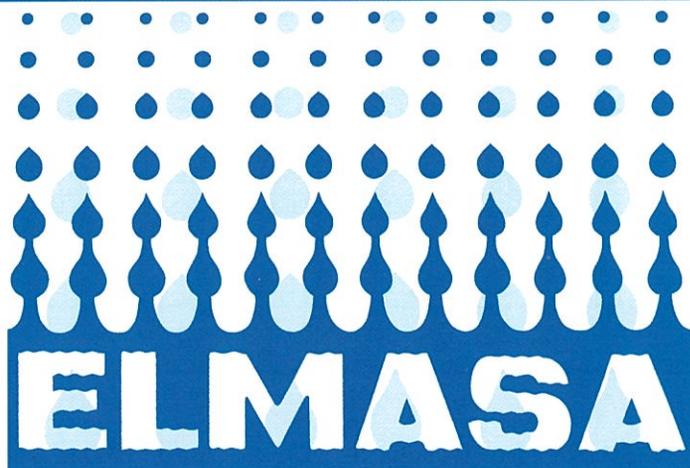
En resumen, el trabajo que aquí se presenta se considera la primera etapa de un proyecto de investigación de mayor alcance. El objetivo final es el de establecer alguna relación entre el tipo y la cantidad de suciedad en una membrana, por un lado, y por otra parte la eficacia de la limpieza.

AGRADECIMIENTO

La preparación de este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración de PRIDESA a quien le agradecemos sinceramente. La Dirección y el personal a cargo de la operación de planta mostraron en todo momento su buena disposición y su apoyo.

REFERENCIAS

1. EBRAHIM, S. *Cleaning and regeneration of membranes in desalination and wastewater applications*. State of the art, Desalination 1994. 96: p. 225 - 238
2. TRAGARDH, G. *Membrane cleaning*, Desalination 1989. 71: p. 325- 335
3. GRAHAM, S. I.; REITZ, R. L.; HICKMAN, C. E. *Improving reverse osmosis performance through periodic cleaning*, Desalination 1989. 74: p. 113 - 124
4. AMJAD, Z. *Advances in membrane cleaners for reverse osmosis system*, Ultrapure water 1989. 6: p. 38 - 42
5. AMJAD, Z.; WORKMAN, K. R.; CASTETE, D. R., *Considerations in membrane cleaning, in Reverse osmosis*, Z. Amjad editor, 1993, Van Nostrand Reinhold, p. 210 - 236
6. HICKMAN, C. E. *Membrane cleaning techniques*, Memb. Technol. Water Ind. AWWA Membr. Processes Conf. 1991: p. 329 - 344
7. WHITTAKER, C.; RIDGWAY, H.; OLSON, B. H., *Evaluation of cleaning strategies for removal of biofilms from reverse osmosis membranes*, Appl. Environ. Microbiol. 1984. 48: p. 395 - 403
8. SILER, J. L. *A comparison of reverse osmosis membranes cleaning methods*, Report WSRC-RP-92-056; 1992.



ABASTECIMIENTO DE AGUA Y SANEAMIENTO

Avda. de Tirajana, Edificio Mercurio • Torre II • P 6
 Teléfonos: 928 76 12 20 / 76 14 33 / 76 07 66 • Fax: 928 76 72 17
 Telex: 96117 AMUR-E • Apartado 44
 Playa del Inglés - 35100 Gran Canaria
 ISLAS CANARIAS