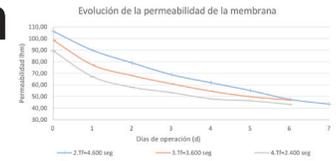


Análisis y viabilidad de la reducción de productos químicos en los lavados de la ultrafiltración como tecnología de pretratamiento de la desalación por osmosis inversa



Analysis and feasibility of chemical products reduction in the clean in place of ultrafiltration as a pre-treatment technology for reverse osmosis desalination



Francisco-Javier Roo-Filgueira, Sigrid Arenas-Urrea, Jorge Pordomingo-Bañó, Cristófer Ramos-Marrero, Rubén Mesa-de-León, Juan-Antonio de-la-Fuente-Bencomo, Federico León-Zerpa

Elmasa Tecnología del Agua, SAU. Avda de Tirajana,39. Ed Mercurio, T-li, P-6ª - 35100 San Bartolomé de Tirajana, Las Palmas de Gran Canarias (España)

DOI: <https://doi.org/10.6036/10454> | Recibido: 11/ene/2022 • Inicio Evaluación: 27/ene/2022 • Aceptado: 13/jul/2022

To cite this article: ROO-FILGUEIRA, Francisco-Javier; ARENAS-URREA, Sigrid; PORDOMINGO-BANÓ, Jorge; RAMOS-MARRERO, Cristófer; MESA-DE-LEÓN, Rubén; DE-LA-FUENTE-BENCOMO, Juan-Antonio; LEÓN-ZERPA, Federico. ANALYSIS AND FEASIBILITY OF CHEMICAL PRODUCTS REDUCTION IN THE CLEAN IN PLACE OF ULTRAFILTRATION AS A PRE-TREATMENT TECHNOLOGY FOR REVERSE OSMOSIS DESALINATION. DYNA. November-December 2022. vol.97, n.6, pp. xxx. DOI: <https://doi.org/10.6036/10454>

FINANCIACIÓN

Este trabajo ha sido co-financiado por la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información - Gobierno de Canarias (ACIISI) a través del Proyecto DESAL+ - Plataforma macaronésica para el incremento de la excelencia en materia de I+D en desalación de agua y del conocimiento del nexo agua desalada-energía (MAC/1.1a/094), cofinanciado por fondos FEDER en el marco del programa INTERREG MAC (2014-2020).

ABSTRACT

• The reverse osmosis seawater desalination plants open-intake requires different strategies of pre-treatment to reduce the biofouling and scaling. The UltraFiltration (UF) technology is a recent application to this process. In this work, some alternatives to chemical products reducing in chemically enhanced backwash (CEB) and clean in place (CIP) of a UF rack have been studied. Mainly the sodium hypochlorite consumption, due to its biofouling precursor effect over reverse osmosis membranes. For this purpose, the optimal filtration time has been studied, to get the highest water production prior to the CIP, as well as some modifications in the conventional CIP's, modifying the duration of the stages of the same. The results were compared with the current mode of daily operation of the CEB.

The results show that a reduction of up to 60% in the amount of sodium hypochlorite per cubic meter of water produced employed in UF CEB's, mini CIP's and CIP's can be achieved. However, the consumption of the rest of chemical dosing increased notably, and therefore the operating cost of UF also increased. In addition, there was an increase of desalted water consumption to the chemical products removed, up to almost 95,84 %, in comparison with the currently operational mode of CEB. On the other hand, operating the UF plant in the manner proposed requires a automatization of the process and expert staff to programme the control. Therefore, based on the results obtained, the alternatives proposed could reduce the chemical products in use, but it is not conclusive in terms of exploitation operational costs.

• **Key Words:** Ultrafiltration, Reverse osmosis, Open-intake, Clean in place, Chemically Enhanced Backwash, chemical products reduction, biofouling, pre-treatment.

RESUMEN

Las captaciones abiertas de agua de mar para desalación por osmosis inversa requieren diferentes estrategias de pretratamiento para reducir el efecto del biofouling e incrustaciones. La UltraFiltración es una aplicación reciente a este proceso. En este trabajo se han estudiado alternativas para reducir el consumo de productos químicos, tanto en las limpiezas diarias de mantenimiento (CEB's) como en las limpiezas químicas intensivas (CIP's) de los bastidores de UF. Principalmente el consumo del hipoclorito sódico, por su efecto precursor del biofouling sobre las membranas de ósmosis inversa. Para ello se ha estudiado el tiempo de filtración óptimo, con el cual se obtiene la mayor producción de agua, previo al CIP, así como modificaciones en los CIP's convencionales, modificando la duración de las etapas del mismo. Los resultados se compararon con el modo de operación actual, es decir realizar CEB's con una frecuencia diaria.

Los resultados revelaron que se puede alcanzar una reducción de hasta un 60% de la cantidad de hipoclorito sódico por metro cúbico de agua producida, en los CEB's, mini CIP's y CIP's de la UF. No obstante, se incrementa notablemente el consumo del resto de reactivos químicos, así como el coste de explotación de la tecnología de UF. Adicionalmente, también se observó un incremento en el consumo de agua osmotizada, empleada en los desplazamientos de los productos químicos durante los mini CIP's, de hasta un 95,84 %, con respecto al agua osmotizada empleada operando con CEB's. Por otro lado, operar la planta de UF como pretratamiento a la ósmosis, del modo planteado, requiere automatizar el proceso y contar con personal especialista en programación y automatización. Por lo que, en base a los resultados obtenidos, se determina que las alternativas planteadas si bien pueden reducir el uso de productos químicos, no son concluyentes como una medida de ahorro en costes de explotación.

Palabras Clave: UF, osmosis inversa, toma abierta, limpieza, pretratamiento, biofouling, reducción de productos químicos.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de OI está limitada por tres factores asociados al uso de las membranas: (i) la capacidad de garantizar un flujo máximo de permeado y rechazo de soluto a través de las membranas, (ii) la frecuencia de las limpiezas químicas y (iii) la vida útil de los elementos de membranas. De hecho, el ensuciamiento de

Las membranas está registrado como un obstáculo frecuente en la mayoría de las EDAMs. Cuando el agua de alimentación se extrae de una toma abierta el fouling se reconoce como el principal problema en la aplicación de las tecnologías de membranas, [1]. Una toma abierta puede presentar un índice de ensuciamiento (SDI) en torno a valores de 3 a 5 en el agua de alimentación de la EDAM. Esto puede ocasionar problemas de incrustaciones sobre las membranas. Por ello, se trata de diseñar un buen pretratamiento para la OI, vital para prolongar la vida útil de éstas.

La tecnología de UF nos proporciona una buena calidad de filtrado en sistemas con tomas abiertas, incluso con mar de fondo, reduciendo notablemente la cantidad de sólidos en suspensión y coloidales del agua, así como la eliminación de agentes patógenos, bacterias y virus, etc. No obstante, esta tecnología también presenta una serie de desventajas, tales como un incremento en el costo operativo de la planta, al requerir de limpiezas químicas de mantenimiento diarias (CEB-1 y CEB-2) y limpiezas químicas intensivas (CIP). Así mismo se tiene dependencia de un depósito requerido para la realización del contralavado en el CEB-1 y CEB-2. Por otro lado, presenta dificultad para la identificación de las fibras afectadas (debido a la intrusión de esporas, sobre la superficie de éstas). Además se requiere de un control exhaustivo del cloro residual para evitar la oxidación de membranas OI.

No obstante, la tecnología de UF ha tenido un gran desarrollo e impulso en los últimos años 15 a 20 años, especialmente en el caso de aguas difíciles de tratar como pueden ser las aguas superficiales, residuales y de agua de mar. Algunas de las plantas a nivel mundial que emplean esta tecnología son la planta de Jamnagar, en India, con una capacidad de producción de 1.726.147 m³/d y la planta TUAS III, en Singapur, con una producción de 238.480 m³/d [2-5]. Además, es referente a nivel nacional la planta de Maspalomas 1 con una capacidad de producción de 35.000 m³/d. Esta planta se puso en servicio en el año 2012, tras estudios previos y ensayos pilotos realizados con la tecnología de UF. La aplicación de esta tecnología fue consecuencia del desarrollo del sector turístico en la zona sur de la isla de Gran Canaria. Debido a ello fue necesaria la ampliación de la planta de OI y la modificación de la toma de agua de mar por una toma abierta. El uso de la UF, como pretratamiento a ósmosis inversa, supuso un importante reto, al tratarse de la primera planta desaladora en Canarias con dicha tecnología. Este proceso de UF sustituyó a la tecnología convencional de filtración [6-9].

Las características principales y los modos de operación de la tecnología de ultrafiltración implantada en la Planta Desaladora conocida como Maspalomas 1 se representan en el siguiente diagrama (figura 1).

No obstante, al poco tiempo de la puesta en marcha de la ampliación de la planta Maspalomas 1 con la toma de agua de mar abierta, aparecen los primeros problemas de ensuciamiento en los filtros cartuchos y los parámetros de operación de la planta se vieron modificados. Esto ocasionó un incremento en el diferencial de presión en la ósmosis inversa, así como también se incrementó la tasa de reposición de los filtros cartuchos. El diagnóstico realizado reveló que las membranas de ósmosis sufrían un ensuciamiento orgánico y biológico conocido como biofouling, cuyo desarrollo se beneficia del efecto que causa el hipoclorito sódico (empleado en los CEB's de la UF), sobre las bacterias. La generación de esta película en la superficie tiene una alta variedad de funciones que hace que una vez que se llega al punto de su formación sea difícil su eliminación. Algunas de estas funciones son: servir como agregado para la unión de los microorganismos, actuar como almacenamiento para los nutrientes, o aportar estabilidad a la estructura y permitir la comunicación entre los microorganismos. Además, funciona como una barrera protectora, pues confiere resistencia y tolerancia a diversos compuestos como desinfectantes y antibióticos [4, 5, 10-15].

El objeto del trabajo descrito en este artículo es analizar la viabilidad de la reducción del uso del hipoclorito sódico en los CEB's, requeridos por la tecnología de UF como pretratamiento en la ósmosis inversa de la EDAM Maspalomas 1.

2. MATERIALES

Para llevar a cabo este estudio se ha empleado una planta piloto propiedad de ELMASA, constituida por los siguientes equipos:

- Un sistema de aire comprimido.
- Un depósito de almacenamiento de agua de alimentación de 500 l de capacidad.
- Una bomba de alimentación/contralavado.
- Un módulo de membranas de UF de las siguientes características [3]:

o Fabricante:	Dow
o Modelo:	SFX-2880 U-PVC
o Material:	H-PVDF
o Diámetro nominal poro:	0,70 mm
o Área de filtración:	77 m ²
o Rango pH:	2-11
o Máx. presión transmembrana:	2,1 bar
o Flux de trabajo:	72,5 l/m ² h
- Un depósito de almacenamiento de agua ultrafiltrada de 500 litros de capacidad.
- Un sistema de limpieza química compuesto por los siguientes equipos:
 - o Un depósito de preparación de la solución de limpieza de 100 litros de capacidad.
 - o Una bomba de limpieza.
 - o Un lote de instrumentación para conocimiento de los parámetros más característicos del proceso.
 - o Un cuadro de distribución y control.

La planta, además, cuenta con un sistema de control compuesto por un micro-autómata programable y un sistema de supervisión a través de una pantalla táctil de 6", que permite configurar

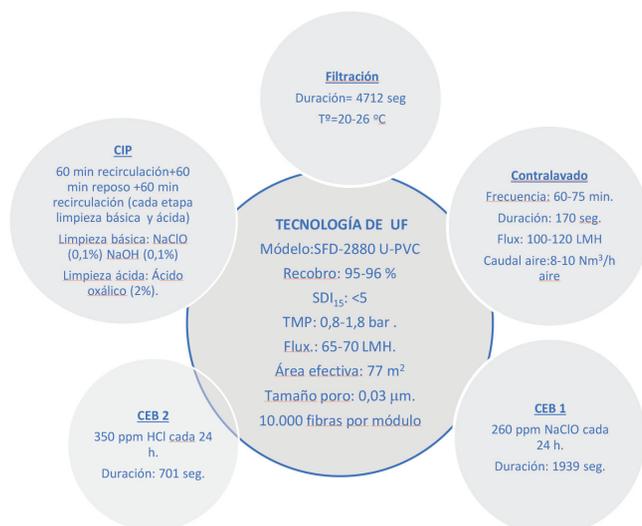


Figura 1: Características y modos de operación de la tecnología de UF EDAM Maspalomas 1

caudales, tiempos de filtrado y contralavado, consigna de presión transmembrana, etc.

En cuanto a la calidad del agua bruta que alimenta a la planta piloto de UF.

Parámetro	Unidades
Turbidez	0,6 U.N.F
Conductividad eléctrica	54.200 mS/cm
pH	8,1
Temperatura	22,9 °C
Carbono orgánico total	< 1 mg/l
Recuento de colonias a 22°C	0 UFC/ml

Tabla 1: Características físico-químicas del agua bruta

La planta piloto de ultrafiltración, que se muestra en la figura 2, se opera con caudal de alimentación de 5,4 m³/h y con las características físico-químicas que se indican en la tabla 1. El agua de alimentación se encuentra en un depósito de agua bruta con una capacidad de 500 litros. Cada 4712 segundos, se realiza un contralavado mediante una bomba centrífuga que impulsa un caudal de 9,34 m³/h de agua ultrafiltrada que nos permite arrastrar todas las partículas coloidales y en suspensión que previamente han sido sacudidas de la superficie de la membrana de UF gracias a un contralavado con aire 10 Nm³/h. El contralavado se realiza tanto por el puerto superior de drenaje como por el puerto inferior y una vez finalizado el mismo, la membrana entra de nuevo en modo filtración, donde el agua se hace pasar previamente por unos filtros de cesta con un corte de partícula de 100 micras. Adicionalmente, el agua ultrafiltrada se hace pasar por un filtro cartucho de 1 micra de corte de partícula para simular las condiciones de operación de

la planta industrial y cuyo pretratamiento físico es de seguridad previo a la ósmosis inversa, para asegurar la retención de partículas en suspensión y coloidales (superiores a 1 micra de tamaño) en el caso de que alguna membrana de UF se viera dañada. Por otro lado, una vez alcanzada la consigna de tiempo en modo filtración, se le debe realizar un mini CIP o CIP con las condiciones de operación establecidas, en cuanto al tiempo de duración de la limpieza básica y ácida se refiere. Para ello, se requiere de un depósito de 100 litros, donde se vierte la solución, una bomba que impulsa un caudal de 2 m³/h y un circuito hidráulico aislado para hacer pasar la solución a través de la membrana, por el puerto inferior y se hace salir parte por el puerto superior de permeado y la otro parte por la tubería de drenaje. Todo el producto químico, empleado en las limpiezas químicas, se vierte a un depósito de neutralización y una vez finalizados los mini CIP's o CIP, se pone nuevamente a la membrana en modo de filtración.

3. ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos realizados fueron los siguientes:

Entre cada ensayo se realiza un CIP para tratar de partir de los valores de permeabilidad y TMP de origen, y así poder evaluar la curva de ensuciamiento de la membrana en las diferentes condiciones de operación. Para analizar la evolución del ensuciamiento de la membrana llevando a cabo mini CIP en varios ciclos de operación, se ha estimado la producción anual, el recobro, el coeficiente de utilización de la membrana y el consumo de productos químicos por metro cúbico producido con su coste asociado. Adicionalmente, también se ha estimado el volumen de agua osmotizada empleada en los mini CIP's y CIP's de cada uno de los ensayos realizados, y el porcentaje de reducción del hipoclorito sódico en las limpiezas químicas en general.

Evaluación del ensuciamiento de la membrana de UF			
Nº Ensayo	Tiempo ciclo de filtración membrana (segundos)	Tipo limpieza química	Duración limpieza química (minutos)
1	4.600	CEB1 Y CEB2 (cada 24 h)	44 (ceb1+ceb2)
2	4.600	-	-
3	3.600	-	-
4	2.400	-	-
5	4.600	Mini CIP (cada 72 h)	30+30 (etapa ácida+básica)
6	4.600	Mini CIP (cada 72 h)	60+60 (etapa ácida+básica)
7	4.600	Mini CIP (cada 72 h)	90+90 (etapa ácida+básica)

Tabla 2: Ensayos realizados

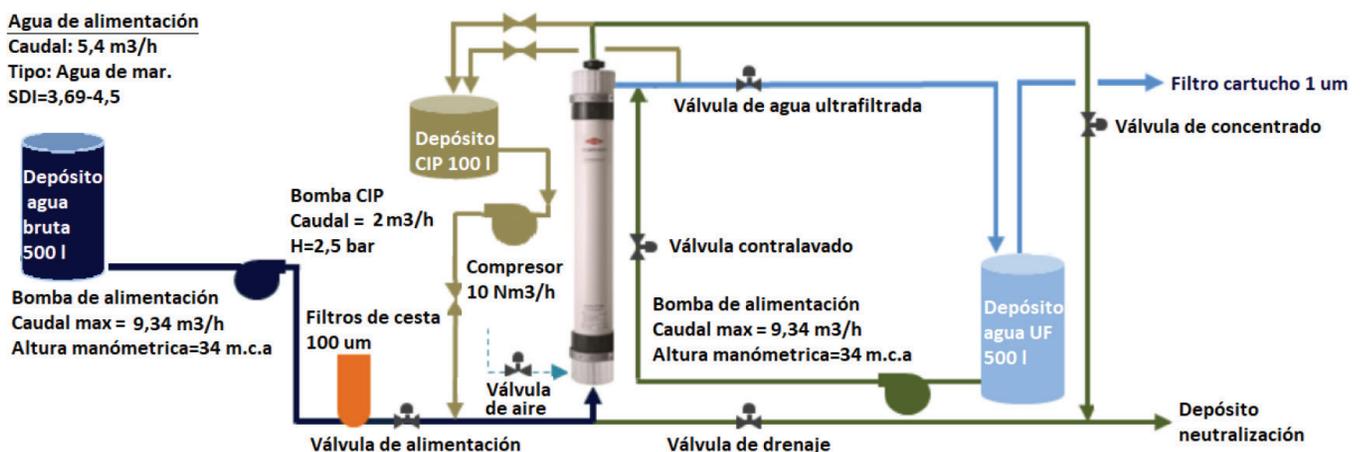


Figura 2: Diagrama del proceso de la planta piloto de UF

4. METODOLOGÍA

La metodología aplicada durante los ensayos (desde 06/06 hasta 13/11) consta de las siguientes etapas:

1. Puesta a punto de la membrana: Al comienzo de cada prueba se debe realizar una puesta a punto de la membrana de UF, mediante un CIP para recuperar los valores de permeabilidad y presión transmembrana (TMP). Adicionalmente, previo al desarrollo de los ensayos, se realizó un test de integridad a la membrana para verificar su estado en cuanto a características técnicas se refiere.

2. Control del proceso: Para realizar el correcto seguimiento de los ensayos y el estado de la membrana, se recogen los principales parámetros de operación, mediante el parte de operación correspondiente. Estos parámetros son:

- Caudal de alimentación a la membrana de UF, en m³/h.
- Temperatura de alimentación de UF, en °C.
- Presión de alimentación a la membrana, en bar.
- Presión transmembrana, en bar.
- Volumen acumulado de agua filtrada por la membrana, en m³.
- Volumen acumulado de agua empleada en el contralavado, en m³.
- Volumen acumulado de agua empleada en el drenaje, en m³.
- Recobro, en %.
- Medición del SDI₁₅ en la alimentación y producto de la membrana de UF.
- Turbidez en la alimentación y producto de la membrana de UF, NTU.
- Incidencias y novedades.

3. Análisis de datos: Durante el desarrollo de los ensayos, se analiza la evolución de los parámetros de operación, tales como:

- Tiempo efectivo de filtración en cada ciclo de operación y recobro.
- Cantidad de producto químico empleado por metro cúbico producido, durante el ciclo de operación de la membrana y el coste económico asociado.
- Porcentaje de reducción en el consumo de productos químicos, durante el ciclo de operación de la membrana con respecto a la realización de CEB₁ y CEB₂.
- Factor de utilización, en %.
- Cantidad de agua osmotizada empleada durante el desplazamiento de las limpiezas químicas.
- Comparación entre las limpiezas químicas modificadas planteadas (mini CIP) frente a las limpiezas químicas de mantenimiento (CEB).
- Evolución del índice de ensuciamiento (SDI) y de la turbidez.
- Tiempo de mano de obra empleada en llevar a cabo las limpiezas químicas a la membrana en cada ciclo de operación.

4. Modificación de las condiciones de operación: Al finalizar cada uno de los ensayos, en base a los resultados obtenidos se modifican las condiciones de operación, con el fin de reducir en la mayor medida posible el consumo de productos químicos durante el proceso de UF, principalmente el hipoclorito sódico.

5. RESULTADOS

5.1. EVALUACIÓN DEL ENSUCIAMIENTO DE LA MEMBRANA SEGÚN EL TIEMPO DE FILTRACIÓN

En la figura 3, se puede observar la curva de ensuciamiento de la membrana, operando con diferentes tiempos de filtración tales como 4.600 segundos (ensayo nº 2), 3.600 segundos (ensayo nº 3) y 2.400 segundos (ensayo nº 4), con el fin de estudiar la evolución de la permeabilidad de la membrana sin realizar CEB's diarios. Los resultados revelaron que, la permeabilidad presentó una tendencia y durabilidad similar en los tres casos, donde la membrana estuvo prácticamente 7 días en operación en continuo, sin realizar CEB's, previo a alcanzar la consigna establecida para realizar el mini CIP (tmp=1,7 bar, 41 l/mh/bar). También se puede observar que, las líneas de tendencia no parten del mismo punto inicial de la permeabilidad (110 l/m), debido a que, tras realizar el CIP correspondiente para iniciar un nuevo ensayo, no se consigue recuperar los valores de origen ni de la permeabilidad, ni de la presión transmembrana.

Los datos de partida en cada ensayo fueron los siguientes:

- Ensayo 2: TMP de 0,69 bar a una caudal de 5,64 m³/h,
- Ensayo 3: TMP fue de 0,74 bar a una caudal de 5,62 m³/h,
- Ensayo 4: TMP fue de 0,82 bar a un caudal de 5,62 m³/h

Probablemente este hecho es debido a la acumulación del ensuciamiento sobre la misma como consecuencia de no realizar las limpiezas de mantenimiento diarias. Por lo que en esta parte del estudio se busca analizar la tendencia del ensuciamiento de la membrana en el tiempo y conocer con qué tiempo de filtración se obtiene el mayor volumen de agua producida.

Por otro lado, se analizó cuál era el tiempo de filtración que nos permitía tener un ciclo de operación con el mayor volumen de agua producida posible, así como el mayor recobro y horas de funcionamiento. Por lo que, en base a los resultados obtenidos (tabla 3), al reducir el tiempo de filtración hasta 2.400 segundos, también se redujo el volumen de agua ultrafiltrada producida al día, y en consecuencia el recobro. No obstante, al operar con un tiempo de filtración de 4.600 segundos, se obtuvo un mayor volumen de agua ultrafiltrada y un mayor recobro para el mismo número de horas de operación en el modo de filtración. Por lo que se determinó que el tiempo de filtración de 4.600 segundos era el óptimo.

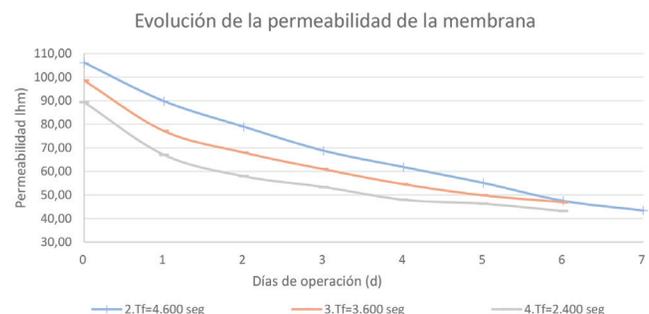


Figura 3: Evolución de la permeabilidad de la membrana operando con diferentes tiempos de filtración, (4.600, 3.600 y 2.400 segundos)

5.2. EVALUACIÓN DEL ENSUCIAMIENTO DE LA MEMBRANA CON LIMPIEZAS QUÍMICAS MODIFICADAS PARA UN CICLO DE OPERACIÓN

En esta segunda parte del estudio, se buscó una alternativa a los CEB's, los cuales se realizan de forma diaria. La alternativa estudiada consiste en realizar mini CIP's, cada 72 horas y con un tiempo de duración de las etapas de las limpiezas básicas y ácidas,

ENSAYO	Tiempo de filtración	Volumen de agua ultrafiltrada producida	Recobro	Tiempo en modo de filtración
	(Segundos)	(m ³)	(%)	(horas)
2	4.600	784,75	98,70	163,80
3	3.600	651,53	97,60	139,80
4	2.400	689,82	97,00	160,23

Tabla 3: Resultados obtenidos del volumen de agua ultrafiltrada producida, recobro y horas de funcionamiento de la membrana para los distintos tiempos de filtración

inferior al tiempo empleado en realizar un CIP normal. Para ello, se han analizado tres casos en donde las etapas de las limpiezas básicas y ácidas del mini CIP duren 30 minutos (ensayo n° 5), 60 minutos (ensayo n° 6), y 90 minutos (ensayo n° 7), respectivamente como puede verse en la figura 4.

Los resultados revelaron que el ciclo de operación de la membrana realizando CEB's diarios tiene una mayor durabilidad que en el caso de los mini CIP's, ya que ésta estuvo operando en continuo durante 60 días, previo a alcanzar la consigna del CIP. Por otro lado, se observan varios picos en la curva de la permeabilidad en los casos en los que se realizaron mini CIP's, esto es debido a que tras los mismos, se consigue eliminar el ensuciamiento en mayor medida que con los CEB's, aunque esto dependerá mayoritariamente del tiempo empleado en la etapas de remojo y recirculación de las limpiezas básicas y ácidas, ya que cuanto más tiempo se deje el producto químico en contacto con la membrana, más efectiva será la limpieza química intensiva, pudiendo recuperar la permeabilidad y presión transmembrana de origen en mayor medida. En cuanto al ensayo n° 5, se alcanzaba una presión transmembrana de 1,7 bar a los 5 días de operación en continuo, por lo que en consecuencia el ciclo de operación de la membrana en estas condiciones se vio reducido notablemente.

En el caso del ensayo n° 6 y 7, la membrana estuvo en operación durante 26 y 41 días respectivamente, para completar un ciclo de operación. Por lo que, en consecuencia, se obtuvo un incremento en las horas de funcionamiento de la planta para un ciclo de operación, así como en el volumen de agua producida con respecto al ensayo n° 5. Sin embargo, dicho incremento de producción no superó el volumen de agua producida con el ensayo, en el cual se realizan los CEB's.

En la tabla 4, se puede observar que las limpiezas de mantenimiento (CEB's) nos permiten obtener una mayor producción, debido a que la membrana dispone de un mayor número de horas en funcionamiento para un ciclo de operación. No obstante, en cuanto al recobro se refiere, se obtuvo un valor inferior con respecto al resto de ensayos. Esto es debido, a que durante los CEB's se emplea únicamente agua ultrafiltrada en los contralavados, mientras que en el caso de los mini CIP's, se emplea agua ultrafiltrada en los contralavados y agua osmotizada durante el desplazamiento de los productos químicos, de 17,13 m³ en cada mini CIP o CIP. En ese

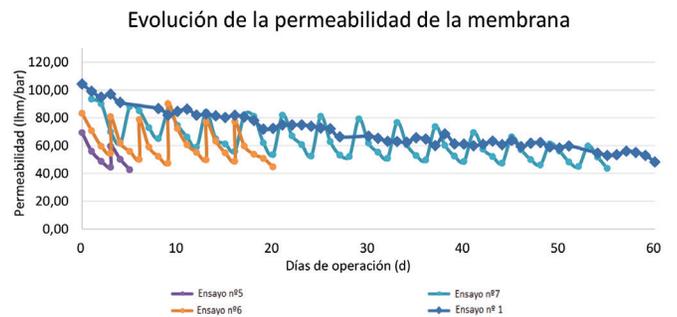


Figura 4: Evolución de la permeabilidad de la membrana al completar un ciclo de operación en los distintos casos de ensayo

sentido, el ensayo n° 7 fue el ensayo que más cantidad de agua osmotizada empleó en los mini CIP's, 222,69 m³.

Con respecto a la calidad del agua de alimentación y ultrafiltrada analizada mediante la medición del SDI de 15 minutos y la turbidez (figura 5), se observó que ambas se mantuvieron estables durante el tiempo empleado en llevar a cabo este estudio, independientemente de los distintos ensayos realizados. La finalidad de analizar la evolución de este parámetro es verificar la integridad de la membrana durante los distintos casos de estudio, ya que si se produce una rotura de fibras en la membrana empleada, se detectaría mediante la medición del SDI.

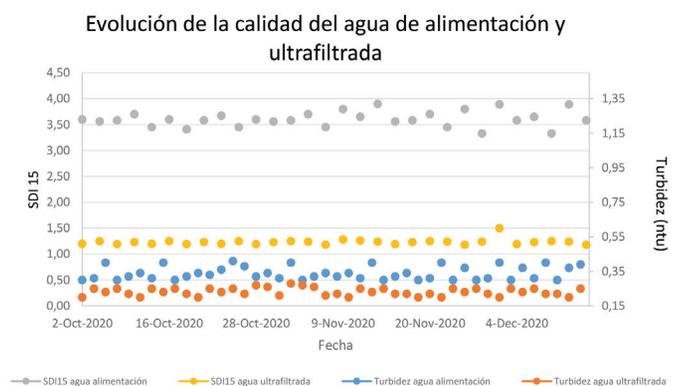


Figura 5: Evolución de la calidad del agua de alimentación y ultrafiltrada

ENSAYO (n°)	Volumen de agua ultrafiltrada producida	Recobro	Horas de funcionamiento en modo de filtración	Número de mini CIP's realizados	Volumen de agua osmotizada empleada en el mini CIP o CIP
	(m ³)	(%)	(horas)	Nº	(m ³)
1	7.187,04	97,60	1.271,40	0	17,13
5	528,45	98,10	124,00	1	17,13
6	2.644,75	98,20	483,32	7	119,91
7	4.491,04	98,40	831,67	13	222,69

Tabla 4: Cuadro resumen de los resultados obtenidos en los 4 ensayos, para un ciclo de operación con CEB's cada 24 horas y mini CIP's cada 72 horas

5.3. EVALUACIÓN DEL ENSUCIAMIENTO DE LA MEMBRANA CON LIMPIEZAS QUÍMICAS MODIFICADAS PARA VARIOS CICLOS DE OPERACIÓN

· Ensayo nº 1: CEB's con una frecuencia diaria

Los resultados indican que el mayor volumen de agua producida por la membrana de UF se obtiene realizando los CEB's diarios. Sin embargo, con este modo de operación se obtuvo un recobro inferior al resto de ensayos, debido a que durante el desplazamiento de los productos químicos empleados en los CEB's se emplea agua ultrafiltrada. Adicionalmente, también se obtuvo el menor coeficiente de utilización.

Con respecto al consumo de productos químicos, se obtuvo mayor consumo de hipoclorito sódico por metro cúbico producido, (5,7 ppm), mientras que el consumo de productos químicos en su conjunto fue el más reducido (7 ppm), teniendo como consecuencia que los costes de explotación de la tecnología de UF en

este caso, sea el menor que con respecto a los demás casos de estudio.

En cuanto a la cantidad de agua osmotizada consumida en los desplazamientos de los CIP's durante un año de operación con estas condiciones, conllevarían un consumo de 104 m³, con una pérdida económica asociada por el consumo del agua osmotizada producida y la cual se emplea en los desplazamientos de los productos químicos.

· Ensayo nº 5: Mini CIP 30'

En este caso, el consumo de hipoclorito sódico en los mini CIP's fue de 3,1 ppm, obteniéndose una reducción en el consumo de este (de un 47 %, con respecto al modo de operación en el cual se realizan CEB's). Además, se obtuvo como resultado una producción de agua similar a la que se obtiene con el caso 1, aunque con un recobro ligeramente mayor. No obstante, en cuanto al consumo de productos químicos en su conjunto empleados en los mini CIP's tales como el hipoclorito sódico al 0,1 %, el hidróxido sódico al 0,1% y el ácido oxálico al 2%, éste fue de 12 ppm por metro cúbico producido, y cuyo incremento alcanzó un 60% con respecto al modo de operación normal (realizando CEB's). En cuanto a la cantidad de agua osmotizada consumida en los desplazamientos de los mini CIP's durante un año de operación en estas condiciones, conllevarían un consumo de 2.500 m³.

· Ensayo nº 6: Mini CIP 60'

Donde se obtuvo un consumo de hipoclorito sódico en los mini CIP's muy similar al caso 5 (3,2 ppm). Además, con este modo de operación se obtuvo la mayor reducción de la cantidad de hipoclorito sódico empleado en los mini CIP's, un 60%. No obstante, la producción se vio afectada, reduciéndose en un 27%. Adicionalmente, en cuanto al consumo de productos químicos, este se incrementó en un 64%, así como el coste de explotación asociado al proceso de UF. En cuanto a la cantidad de agua osmotizada consumida en los desplazamientos de los mini CIP's, esta fue de 2.000 m³.

· Ensayo nº7: Mini CIP 90'

Con este modo de operación, el consumo de hipoclorito sódico en los mini CIP's fue muy similar a los ensayos previos, (caso 5), un 3,3 ppm, obteniéndose una reducción de la cantidad de hipoclorito sódico empleado en los mini CIP's de un 56%. Sin embargo, también se observó el mayor incremento en el consumo de productos químicos empleados en los mini CIP's y CIP's, con respecto al resto de casos, en un 73%. Además, la producción de agua ultrafiltrada se vio afectada en un 24 % y la cantidad de agua osmotizada consumida en los desplazamientos de los mini CIP's, se elevó a 2.100 m³. A continuación, se muestra también gráficamente toda esta información explicada anteriormente representada en las figuras 6-8.

Finalmente, en cuanto al tiempo empleado en realizar un mini CIP con sus etapas de limpieza básica y ácida, y sus correspondientes desplazamientos de productos

Consumo de hipoclorito sódico en las limpiezas químicas (ppm)

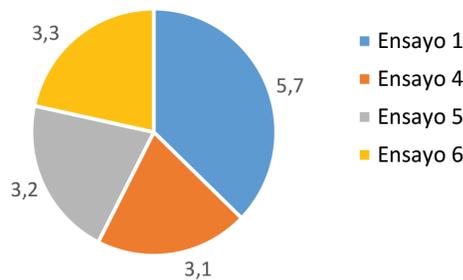


Figura 6: Consumo de hipoclorito sódico en cada ensayo

Reducción del hipoclorito sódico en las limpiezas químicas (%)

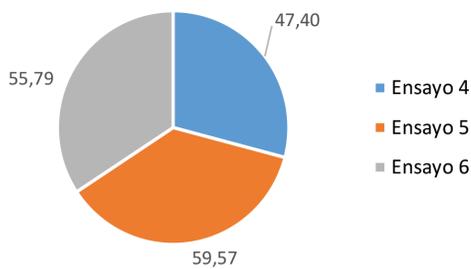
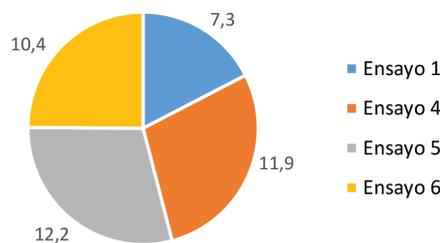


Figura 7: Consumo de productos químicos en los CEB's, mini CIP's y CIP's.

Consumo de productos químicos en las limpiezas químicas (ppm)



Incremento del consumo de productos químicos en las limpiezas químicas (%)

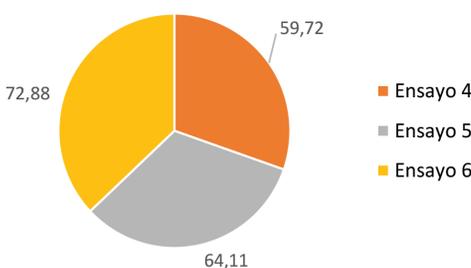
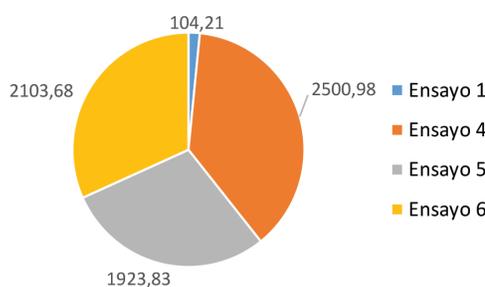


Figura 8: Consumo del agua osmotizada que se ha empleado en el desplazamiento de los distintos ensayos del estudio

Consumo del agua osmotizada empleada en las limpiezas químicas (m³)



ENSAYO	Horas de trabajo requeridas para realizar un mini CIP	Número de mini CIP's o CEB's realizados al año	Número de CIP's realizados al año	Horas de mano de obra requeridas en realizar los mini CIP's al año
	(horas)	Nº	Nº CIP's /año	(horas/año)
1	0,74	359	6	350
5	5	73	73	1.387
6	8	98	14	980
7	10	114	9	1.266

Tabla 5: Horas de trabajo anuales requeridas por los CEB's, mini CIP's y CIP'S, de los distintos casos de estudio

químicos, se comprobó que realizar un mini CIP cada 72 horas con una duración 30, 60 y 90 minutos en cada etapa de la limpieza básica y ácida, conllevan las siguientes horas de trabajo.

En este estudio, también se han tenido en cuenta los CIP's que serían necesarios realizar en un año de funcionamiento con la membrana estudiada, donde un CIP requiere de unas 14 horas de trabajo de un operario para realizar las maniobras necesarias y controlar los parámetros de operación del proceso de la limpieza química intensiva. Por lo que teniendo en cuenta el tiempo empleado en realizar los CIP's, el caso de estudio que requeriría el menor número de horas de trabajo es el caso 1, mientras que el caso 5, es el que requiere el mayor número de horas de trabajo anuales. Cabe la posibilidad de automatizar el proceso, con el coste de inversión y personal especialista en programación y automatización que conlleva, pero esta alternativa no ha sido objeto de estudio de este trabajo.

5. CONCLUSIONES

Los resultados revelaron que se puede alcanzar una reducción del 60% de la cantidad de hipoclorito sódico por metro cúbico de agua producida, en las limpiezas químicas tanto de mantenimiento (CEB's o mini CIP's) como en las limpiezas intensivas (CIP). No obstante, se incrementó notablemente el consumo del resto de reactivos químicos, así como el coste de explotación en limpiezas químicas a la membrana de UF.

Por otro lado, en el ensayo nº 5, se observó una pérdida de producción de entre un 20 al 27%, así como un consumo de agua osmotizada empleada en los desplazamientos de los productos químicos elevado, llegando a incrementarse en un 96%, con respecto al modo de operación con CEB's con una frecuencia diaria.

En cuanto a las horas de trabajo requeridas por los mini CIP's realizados en los casos de estudios planteados, se observa que se requieren desde 1.000 hasta 1.400 horas anuales de un operario para llevar a cabo el proceso de los mini CIP's con sus maniobras correspondientes, por lo que sería necesario la contratación de una persona exclusivamente para dicha tarea, o en su defecto automatizar el proceso, con el coste de inversión y personal especialista en programación y automatización que conlleva.

Por lo que, en base a los resultados obtenidos se deduce que las alternativas planteadas, a priori permiten reducir el consumo de hipoclorito sódico en las limpiezas químicas requeridas por la tecnología de UF de hasta un 60% como se indica en el ensayo nº 6 de estudio. No obstante, esta medida implicaría un incremento en los costes en la explotación de la tecnología como pretratamiento a la OI en la planta desaladora de agua de mar Maspalomas 1, como consecuencia del incremento del consumo de otros productos químicos que también se emplean en los mini CIP's y CIP's, tales como hidróxido sódico y el ácido oxálico.

ACRÓNIMOS Y ANGLICISMOS

UF: Ultrafiltración

Biofouling. Ensuciamiento biológico

TMP: Presión transmembrana

SDI: Índice de ensuciamiento

CEB's: Limpiezas diarias de mantenimiento

CIP's: Limpiezas químicas intensivas

EDAM: Estación Desaladora de Agua de Mar

OI: Osmosis inversa

REFERENCIAS

- [1] Universidad de las Palmas de Gran Canaria, tesis doctoral "Caracterización y evaluación del ensuciamiento en membranas de ósmosis inversa con combinación de agentes ensuciadores", Junio 2021, https://acceda.cris.ulpgc.es/bitstream/10553/17090/4/0722378_00000_0000.pdf
- [2] IAGUA.ES. Junio 2021, <https://www.iagua.es/noticias/inge-gmbh-basfs-ultrafiltration-membrane-business/ultrafiltration-uf-india>
- [3] Dupont Water Solutions "Data sheet IntegraFlux SFP-2880XP ultrafiltration membrane" Diciembre 2020, <https://www.dupont.com/products/integrafluxsfp2880xp.html>
- [4] De Beer, D., & Stoodley, P. (2014). Microbial biofilms. En *The Prokaryotes: Applied Bacteriology and Biotechnology* (pp. 343-372). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-31331-8_32
- [5] Flemming, H. C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8(9), 623-633. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>
- [6] Planificación y gestión del agua. DYNA. Vol. 75 (2000) 61-63.
- [7] Evangelos Dimitriou, Essam Mohamed, et al. Experimental comparison of the performance of two reverse osmosis desalination units equipped with different energy recovery devices. *Desalination and Water Treatment*. Vol. 55 Nº 11 (2015) 3019-3026.
- [8] Evangelos Dimitriou, Essam Mohamed, et al. Experimental investigation of the performance of a reverse osmosis desalination unit under full-and part-load operation. *Desalination and Water Treatment*. Vol. 53 Nº 12 (2015) 3170-3178. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.933623>
- [9] Francisco J. García Latorre, Sebastián O. Pérez Báez and Antonio Gómez Gotor. Energy performance of a reverse osmosis desalination plant operating with variable pressure and flow. *Desalination* 366 (2015) 146-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.02.039>
- [10] Jamel Kherji, Armine Mnif, et al. Study of the influence of operating parameters on boron removal by a reverse osmosis membrane. *Desalination and Water Treatment*. Vol. 56 Nº 10 (2015) 2653-2662. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.968902>
- [11] Julieta Schallenberg-Rodríguez, José Miguel Veza and Ana Blanco-Marigorta. Energy efficiency and desalination in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40 (2014) 741-748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.213>
- [12] Noel Dow, Stephen Gray, et al. Pilot trial of membrane distillation driven by low grade waste heat: Membrane fouling and energy assessment. *Desalination* (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.01.023>
- [13] Nur Muna Mazlan, Dimitar Peshev, Adrew G. Livingston. Energy consumption for desalination - A comparison of forward osmosis with reverse osmosis, and the potential for perfect membranes. *Desalination* 377 (2016) 138-151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.011>
- [14] N. R. G. Walton. Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids - What is Their Precise Relationship? *Desalination* Vol. 72, Issue 3 (1989) 275-292. DOI: [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(89\)80012-8](https://doi.org/10.1016/0011-9164(89)80012-8)
- [15] S. Boerlage, N. Nada. Algal toxin removal in seawater desalination processes. *Desalination and Water Treatment*. Vol. 55 Nº 10 (2015) 2575-2593 DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.947785>