

# Prueba piloto de membranas de alta eficiencia para la optimización del sistema de membranas en la planta de desalinización de Carboneras

*High efficiency membranes pilot testing for the optimization of the membranes system in Carboneras desalination plant*

Federico León-Zerpa, Alejandro Ramos-Martín y Carlos Mendieta-Pino  
Universidad de las Palmas de Gran Canaria (España)

DOI: <https://doi.org/10.6036/9811>

## 1. INTRODUCCIÓN

La planta desalinización de Carboneras, propiedad de Acuamed, fue proyectada en 1999. Con una capacidad de producción de 42 hm<sup>3</sup>/año, y una red de tuberías de distribución de 120 km. En ese momento fue la planta de desalinización más grande de Europa, y un modelo tecnológico ideal para grandes plantas desaladoras.

La planta es capaz de proporcionar 24,5 hm<sup>3</sup>/año el agua para regar 7000 ha de invernaderos y cultivos intensivos en el área de Níjar y 17,5 hm<sup>3</sup>/año para el consumo humano al municipio de Níjar y otros 16 municipios adicionales localizados en el área de Alanzora baja.

En mayo de 2011, se completó el trabajo de la construcción de sistema de captación de agua salada de la planta de desalación de Las Carboneras (Almería-España).

Desde entonces, la captación de agua fue localizada a 35 metros de profundidad en vez de los 14 m de profundidad de la captación anterior. El resultado más significativo fue un nuevo escenario térmico: más estable en el tiempo, y temperaturas máximas más bajas.

Las temperaturas máximas más bajas favorecen un requerimiento de calidad de agua, ya que el rendimiento de las membranas mejora a temperaturas más bajas. Por este motivo nuevos diseños y oportunidades de operación aparecieron para mejorar el rendimiento energético del proceso [1-3].

La eficiencia energética, es uno de los factores más importantes dado que los precios de la energía han aumentado sobre el 60 % en los últimos 10 años en España para las empresas medianas, y representa

un 50% de los costes de operación de planta desaladora de capacidad de producción media-alta. Además, mejores prácticas en el consumo energético y en la contratación del suministro de energía han sido aplicadas, con el objetivo de minimizar los costes de energía. Cualquier reducción del consumo específico o en coste de compra de energía, llevara a importantes ahorros económicos. De esta forma, el diseño óptimo de la configuración de la membrana es un factor clave para la eficiencia energética para la planta de desalinización [4, 5].

Teniendo en cuenta el proceso de sustitución y proyectos de modernización se iban a cometer en la planta de Las Carboneras, una prueba piloto fue ejecutada, bajo este nuevo escenario térmico.

El propósito de este estudio fue, por una parte, comparar el rendimiento de las membranas de los diferentes fabricantes, y por el otro lado, determinar la configuración óptima de la membrana, requerida para conseguir la calidad y cantidad de agua necesarias bajo las nuevas condiciones térmicas de captación de agua [6,7].

## 2. CONFIGURACIÓN DE LA PRUEBA PILOTO Y MODELO HIDRÁULICO DEL SISTEMA

La configuración de la prueba piloto consistió en tres HPVs envejecidos (tubos de alta presión) y un HPV de prueba. Los VPH de envejecimiento consistió en tres recipientes de alta presión donde las membranas de tres fabricantes principales fueron probadas. Los vasos estaban equipados con una válvula de control, un transmisor de presión y un medidor de flujo en el flujo de permeado. Otros instrumentos de cremallera proporcionaron la información necesaria para el monitoreo adecuado del VPH para envejecimiento.

La finalidad de los ensayos de envejecimiento HPVs era conseguir el rendimiento maduro de las membranas. Durante este

proceso de envejecimiento, los principales parámetros de ejecución fueron controlados.

El ensayo HPV consistió en un depósito equipado con todos los elementos requeridos para permitir una monitorización total y control de las condiciones de operación (presión y flujo del agua de mar, salmuera, y flujos permeados). El ensayo de HPV fue equipado con:

Flujo de agua de mar de alimentación:

- Una válvula de control, en la entrada del HPV para el control del flujo y presión de agua.
- Un transmisor de presión.
- Un transmisor de caída de presión.

Flujo del permeado:

- Medidor de corriente.
- Transmisor de presión (del bastidor de escala real).

Flujo de salmuera:

- Tres válvulas, para controlar el flujo de salmuera y hacer la descarga apropiada de salmuera de 65 bar a la presión atmosférica.
- Medidor de corriente.

El flujo de la alimentación fue calculado sumando los flujos de salmuera y permeado.

El ensayo HPV fue diseñado para permitir la prueba de las membranas bajo todas las condiciones posibles. Cualquier parámetro de operación (presión o flujo) fue modificado por las válvulas el control, y todos los parámetros principales (presión, flujo y calidad del agua) fueron medidos.

Un aspecto clave en la definición del proceso fue el modelo hidráulico, que se indica en la figura 1, y la elección de válvulas que podrían haber llevado al control apropiado del sistema. De este modo, un estudio detallado fue desarrollado siguiendo los siguientes pasos [8-10]:

1. Definición del entorno: Definición del criterio de operación y los principales valores de los parámetros bajo condiciones extremas de ensayo.
2. Estudio hidráulico: De acuerdo con las condiciones necesarias de operación, un estudio hidráulico fue desarrollado.

Las válvulas fueron elegidas para conseguir los requisitos de control de la prueba piloto basado en un modelo hidráulico comparativo para la elección de la válvula de control, según la figura 1, permeado de los HPV envejecidos (abajo a la izquierda) y

alimentar el flujo de agua de mar del test HPV (abajo a la derecha).

Para probar los tres tubos de presión de envejecimiento se fija la misma presión de alimentación para cada tubo, por lo que se espera un flujo de permeado diferente para los tres tubos.

Debido a esto, los tres tubos de presión de envejecimiento han instalado una válvula de control para la diferencia de presión, junto con un transmisor de presión, un medidor de flujo, un sistema de control y las válvulas, en la tubería de permeado. Esto está dispuesto en baja presión, así que no es un gran costo para la investigación.

Se debe fijar el mismo flujo de permeado por cada tubo de envejecimiento, y esto es posible añadiendo una contrapresión. De esta manera, el tubo de presión de envejecimiento con la mayor presión de permeado es el que tiene el menor consumo de energía. Se necesita más contrapresión para obtener el mismo flujo de permeado de los otros. De esta manera, es posible determinar el tipo más eficiente de membranas de ósmosis inversa. Si todos los tubos

de los trenes tuvieran esta condición, con este tipo de membrana de la mayor contrapresión, sería posible operar con una presión de alimentación más alta que la actual, ahorrando costes de energía, o produciendo más agua a la misma presión de alimentación que ahora.

Por lo tanto, con este estudio, se logra la membrana de ósmosis inversa más eficiente, bajo estas condiciones de funcionamiento de la planta.

Los experimentos se llevaron a cabo de acuerdo con este esquema:

- Etapa de envejecimiento (del 2 de febrero de 2015 al 7 de julio de 2015): los tres HPV envejecidos estaban operando simultáneamente. Durante este período, las membranas fueron monitorizadas y envejecidas simultáneamente y en las mismas condiciones antes de ser ensayadas.

- Etapa de prueba: (desde el 10 de julio de 2015 hasta el 14 de diciembre de 2015): Las membranas de cada fabricante fueron cargadas y probadas en el test HPV para determinar su rendimiento bajo condiciones específicas. Los resultados entre

diferentes fabricantes de membranas se compararon en condiciones experimentales reales (presión, flujo, temperatura), ya que los experimentos se llevaron a cabo alternativamente en el test HPV. Se llevó a cabo la normalización de los datos. El horario era el siguiente:

- Membranas A: desde el 10 de julio de 2015 hasta el 25 de agosto de 2015.
- Membranas B: desde el 25 de agosto de 2015 hasta el 9 de noviembre de 2015.
- Membranas C: desde noviembre 14, 2015 hasta el 14 de diciembre de 2015.

## 2.1. MEMBRANAS

La Tabla 1 muestra las características principales de las membranas ensayadas en este proyecto.

Como se muestra en la tabla, las membranas C ofrecen una configuración híbrida (con un HPV de siete elementos equipado con 4x ... R-440 y 3x ... X-440), mientras que las membranas A y las membranas B ofrecen siete elementos del mismo modelo (7x ... R-440 para membranas A y 7x ... 440-R para membranas B).

## 3. RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados relativos a la calidad del permeado.

### 3.1. ETAPA DE ENVEJECIMIENTO

Las condiciones de funcionamiento fueron:

- Presión de alimentación: La de toda la estantería (69,9 bar de presión media, desviación estándar 0,4; 6,069 datos considerados durante 151 días) dada por la HPP (bombas de alta presión) y
- Flujo de agua de permeación:  $3,6 \text{ m}^3 / \text{H}$  (valor establecido).

Dado que el objetivo de la etapa de envejecimiento era sólo para adquirir un rendimiento maduro de las membranas y como un control limitado de los parámetros de operación era posible, los resultados mostraron una aproximada (pero no exacta) vista del comportamiento de la membrana. La conductividad de las membranas de A-membranas fue la más baja, seguida de membranas-B y membranas-C (para la presión de alimentación homogénea, la calidad del agua y las condiciones de temperatura de alimentación).

### 3.2. ETAPA DE LA PRUEBA

La etapa de la prueba de los experimentos divulgó resultados de la calidad a ser analizados mientras que el sistema permitió un mejor control del funciona-

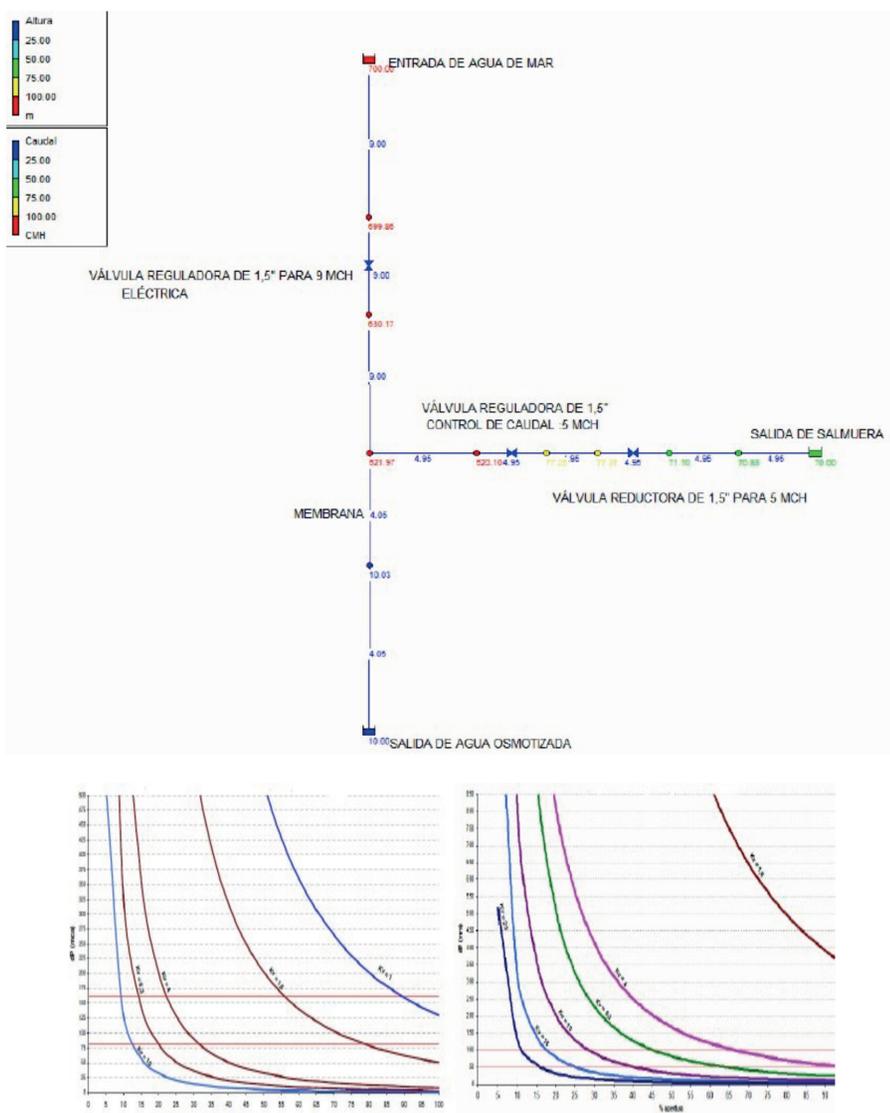


Figura 1: Modelo hidráulico de la prueba HPV y para la elección de las válvulas de control

A-Modelo	Referencia	Posición	Flujo (m³/d)	TDS Rechazo (%)
...R-440	141060802	1	30,3	99,84%
...R-440	141060800	2	31,4	99,86%
...R-440	141060799	3	32,4	99,87%
...R-440	141060793	4	32,4	99,88%
...R-440	141060797	5	32,6	99,87%
...R-440	141060803	6	33,0	99,86%
...R-440	141060801	7	33,1	99,86%
B-Modelo	Referencia	Posición	Flujo (m³/d)	TDS Rechazo(%)
...440-R	140613024	1	33,7	99,78%
...440-R	140613086	2	36,3	99,78%
...440-R	140613045	3	37,1	99,78%
...440-R	140613096	4	37,3	99,78%
...440-R	140613088	5	37,7	99,78%
...440-R	140613073	6	38,2	99,78%
...440-R	140613072	7	38,2	99,78%
C-Modelo	Referencia	Posición	Flujo (m³/d)	TDS Rechazo(%)
...R-440	F9279845	1	23,2	99,86%
...R-440	F9279840	2	23,3	99,85%
...R-440	F9279838	3	23,8	99,85%
...R-440	F9278743	4	28,9	99,84%
...X440	F9114431	5	33,3	99,61%
...X440	F9114429	6	37,1	99,63%
...X440	F9114418	7	35,9	99,66%

Tabla 1: Principales características de las membranas

miento de la membrana. El sistema de etapa de prueba se configuró para monitorizar las condiciones de operación requeridas para producir un flujo de agua permeado de 4,05 m³ / h. Los parámetros operacionales y de calidad requeridos para lograr el valor de la producción de agua fueron registrados, exhibidos y discutidos bajo este capítulo.

Los resultados se muestran en dos secciones:

- Datos brutos: en este capítulo se muestran la evolución de la presión de alimentación, el flujo de permeado, la conductividad de permeado y la concentración de boro de permeado frente a la temperatura.
- Datos normalizados: con el fin de eliminar la "distorsión" de los cambios de temperatura en los resultados, los datos de operación se normalizaron para mostrar el paso de sal normalizado, la salinidad del permeado normalizado y la presión de caída normalizada frente a los días de operación durante la etapa de prueba.

### 3.2.1. Datos brutos

Los datos brutos muestran el comportamiento de los parámetros de funcionamiento (presión de alimentación y flujo de agua permeada) y calidad (permeabilidad y

Presión de alimentación (bar)	A-membranas	B-membranas	C-membranas
Promedio (bar)	59,6	60,7	61,4
Desviación estándar (bar)	0,64	0,87	0,52
Población (Nº medidas)	280	372	193
Temperatura (°C)	19,9	20,0	19,7

Tabla 2: Presión de alimentación

Conductividad (µS/cm)	A-membranas	B-membranas	C-membranas
Promedio (µS/cm)	319,3	394,6	522,9
Desviación estándar (µS/cm)	32,49	45,4	42,4
Población (Nº medidas)	26	45	18
Temperatura (°C)	19,8	20,0	19,7

Tabla 3: Valores medios de conductividad

boro) frente a la temperatura del agua de alimentación.

El valor establecido para el agua permeada fue 4,05 m³ / h. El sistema registró valores con un punto decimal. Esta es la razón por la cual la mayoría de los valores son 4,0 o 4,1 m³ / h.

Los resultados muestran los requerimientos de presión para obtener el valor de flujo del permeado establecido. Dado que la presión está relacionada con el consumo de energía de la bomba a partir de esta figura se puede deducir la eficiencia energética de las membranas. Los valores medios de la presión se muestran en la tabla 2.

Los requerimientos de presión de alimentación resultaron en diferentes requerimientos estimados de energía. Los requerimientos de presión y potencia se aproximan a una relación lineal. Así, los requerimientos de presión (y requerimientos de potencia) para las membranas B eran 2% por encima de las membranas A y las membranas C eran 3% por encima de las membranas A.

La conductividad durante la etapa de prueba fue menor que la conductividad durante la etapa de envejecimiento para la misma temperatura, ya que el flujo de permeado en la etapa de prueba fue mayor. La Tabla 3 muestra los valores medios de conductividad a 20 C (> 19 C y < 21 C).

Los resultados muestran que la menor conductividad pertenecía a las membranas A, seguido por las membranas B (24% más altas) y las membranas C (64% por encima de las membranas B).

Es importante señalar que sólo hay tres valores disponibles de concentración de boro para las membranas A debido a un problema analítico detectado en las determinaciones iniciales de boro. Por lo tanto, estos valores fueron rechazados.

Los resultados de la tabla 4 muestran que las membranas B rechazan el boro me-

que las membranas A (con una concentración de permeado de boro del 21% por encima de las membranas B) y las membranas C (con una concentración de permeado de boro del 39% por encima de las membranas B).

### 3.2.2. Datos normalizados

Los datos de funcionamiento se normalizaron para eliminar el efecto de los cambios de temperatura. LG Soluciones de Agua fue el software para la normalización de datos.

El parámetro Días de operación no considera los 151 días de operación de la etapa

Boro (mg/l)	A-membranas	B-membranas	C-membranas
Promedio (mg/l)	0,8	0,6	0,9
Desviación estándar (mg/l)	0,02	0,04	0,03
Población (Nº medidas)	2	6	11
Temperatura media (°C)	17,7	17,8	18,5

Tabla 4: Valores promedio de boro

de envejecimiento. Por lo tanto, la cantidad total de días de operación es de más 151 días.

La Tabla 5 muestra el paso de sales y la conductividad promedio normalizados durante la etapa de Prueba para los tres grupos de membranas. Los resultados muestran que las membranas A tienen el mejor rechazo de sal, seguido por las membranas B (con un paso de sal 37% por encima de las membranas A) y las membranas C (con un paso de sal 74% por encima de las membranas A).

Los resultados de la conductividad del permeado normalizado varían en la misma proporción que la normalización del paso de sales.

Por último, se obtiene que el promedio de la diferencia de presión (caída de presión) en la HPV por diferente caída de presión en la membrana- C continúa siendo la más baja, le sigue la membrana - A (un 5% más alto que la membrana - C) y la membrana-B (un 24% más alta que la membrana-C. A pesar de esto, no altera la conclusión de la eficiencia de la membrana.

#### 4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

La construcción de una nueva planta de captación de agua de mar y desalinización en Carboneras (de 14 a 35 metros de profundidad) cambia el escenario térmico. Mientras las temperaturas mínimas se mantienen iguales, las temperaturas máximas bajan, por lo tanto, aparecen nuevas oportunidades para el diseño del sistema de membrana. De esta manera se desarrolló una prueba para comprobar la configuración óptima de la membrana que ha sido capaz de cumplir con las necesidades mínimas de energía, tanto en calidad como en cantidad.

Esta prueba está compuesta por dos fa-

ses: La etapa de envejecimiento, logrando un rendimiento maduro de las membranas. La etapa de prueba logró un mejor control de los parámetros operativos, por este motivo se obtuvieron datos de calidad que pueden ser analizados.

Los resultados muestran una cierta expansión de datos (especialmente con los datos relacionados con los de la presión y alimentación), que se pueden corregir mejorando los elementos de control (válvulas). Uno de los resultados del boro relacionados con la membrana sería más apropiado para la membrana-C a altas temperaturas.

Los resultados lograron los objetivos: comparar el rendimiento y determinar la configuración óptima de la membrana. Sin embargo, se necesitan nuevos recursos para continuar con una mayor experimentación con el agua de captación a otras temperaturas para contrastar con otros resultados y evaluar si son similares en consonancia con los objetivos del estudio. Por ello, todo eso se recoge para realizar en líneas futuras de actuación y recoger los resultados en una próxima comunicación.

De acuerdo con los resultados las membranas-A fueron las más eficientes (con 59.6 bar necesarios para producir 4.05 /h de siete elementos a 20°C) siguiéndole las membranas-B (con un 2% de presión más alta de los requeridos) y las membranas-C (con presiones del 3% por encima de las presiones de las membranas-A).

En cuanto a la calidad del permeado las membranas-A tuvieron una salinidad más baja (con un 152  $\mu\text{S}/\text{cm}$  conductividad normalizada), siguiéndole las membranas-B (con un 37% más salinidad) y las membranas-C (con un 74% de salinidad por encima de las membranas-A). Comparando esto, el permeado de las membranas-B produjeron más concentración de boro (0.8 mg/l a 18°C), siguiéndole las membranas- A (con un 21% por encima de las membranas-B) y

Valores Promedio	A-membranas	B-membranas	C-membranas
Paso de sales (% Rechazo)	0,42	0,58	0,73
Desviación estándar (%)	0,00	0,00	0,00
Población (Nº medidas)	121	205	73
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	152	208	263
Desviación estándar ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	23,73	25,33	13,63
Población (Nº medidas)	121	205	73

Tabla 5: Paso de sales y conductividad promedio normalizados

las membranas-C (con un 39% por encima de las membranas-B).

De acuerdo con los resultados y clasificación, la mejor opción dependería de los requerimientos de la calidad del agua (boro/salinidad) y las necesidades de eficiencia energética para la desalinización del agua.

#### ACRÓNIMOS

HPP: Bomba de alta presión.  
HPV: Recipiente de alta presión.

#### REFERENCIAS

- [1] Planificación y gestión del agua. DYNA. Vol. 75 (2000) 61-63.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Jamel Kherij, 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.
- [6] 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.
- [7] Noel Dow, Stephen Gray, et al. Pilot trial of membrane distillation driven by low grade waste heat: Membrane fouling and energy assessment. Desalination (2016).
- [8] 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.
- [9] N. R. G. Walton. Electrical Conductivity and Tottal Dissolved Solids - What is Their Precise Relationship? Desalination Vol. 72, Issue 3 (1989) 275-292.
- [10] S. Boerlage, N. Nada. Algal toxin removal in seawater desalination processes. Desalination and Water Treatment. Vol. 55 Nº 10 (2015) 2575-2593.

#### AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido cofinanciado por el proyecto INTERREG V-A Cooperation, Spain-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) programa 2014-2020, MITIMAC (MAC2/1.1a/263).  
A Acuada por proporcionar la información requerida.