



# ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA PARA OBTENER CALIDAD DEL AGUA DESALADA ADECUADA PARA CUMPLIR EL RD 3/23 DE AGUAS DE CONSUMO HUMANO

DICIEMBRE 2023

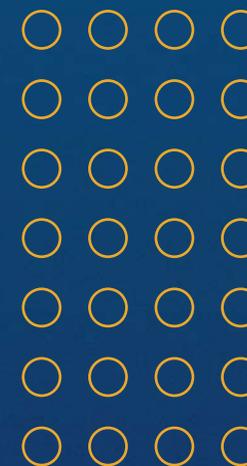


MAC 2014-2020  
Cooperación Territorial

Interreg



Fondo Europeo de Desarrollo Regional



**ENTREGABLE REALIZADO POR:**

Departamento de Agua (ITC) con la colaboración como asesor externo de Federico León Zerpa.

**ACTIVIDAD DEL PROYECTO:**

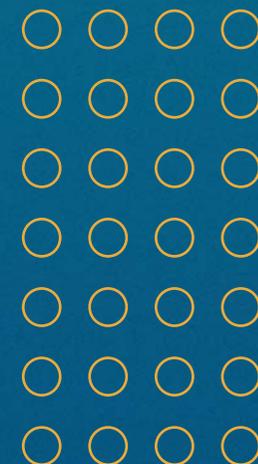
2.1.2 - Calidad de aguas desaladas, pretratamientos y vertidos de salmuera.

---

Este informe ha sido realizado en el marco del proyecto E5DES, cofinanciado al 85% por el Programa Interreg MAC 2014-2020 (MAC2/1.1a/309). El presente documento refleja información del autor o autores y el Programa MAC no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información que contiene.

# TABLA DE CONTENIDOS

1. INCREMENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE BORO EN EL RD 3/2023 DE AGUAS DE CONSUMO HUMANO Y SU EFECTO EN LA CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS EN PLANTAS DESALADORAS DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA .....	4
2. HIPÓTESIS DE PARTIDA ANTE NUEVAS CONFIGURACIONES DE MEMBRANAS PARA ALCANZAR LA ADAPTACIÓN AL RD 3/2023.....	7
3. ANÁLISIS DE NUEVAS CONFIGURACIONES DE MEMBRANAS PARA ATENDER A LOS REQUISITOS DEL RD 3/2023.....	16
4. PROPUESTAS DE CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS PARA OPTIMIZAR EL CONSUMO ENERGÉTICO Y CALIDAD DE AGUA ACORDE AL RD 3/2023.....	21
5. CONCLUSIONES.....	28



**INCREMENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE BORO EN EL  
RD 3/2023 DE AGUAS DE CONSUMO HUMANO Y SU EFECTO  
EN LA CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS EN PLANTAS  
DESALADORAS DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA**

Este informe, titulado **“Alternativas de diseño de configuración de membranas de ósmosis inversa para obtener calidad del agua desalada adecuada para cumplir el RD 3/2023 de aguas de consumo humano” - PROYECTO E5DES**, se desarrolla dentro del marco de la plataforma DESAL+ LIVING LAB, coordinado por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), y con el soporte del Programa Interreg-MAC.

El nuevo Real Decreto 3/2023 de aguas de consumo humano, de 10 enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro fue publicado en el Boletín Oficial del Estado el pasado 11 de enero de 2023. Se trata de una transposición parcial de la Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2020, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano y sustituye al Real Decreto 140/2003, de 7 de julio, que ha sido la legislación de referencia en España en control de la calidad del agua potable durante los últimos 20 años.

En cuanto a los cambios importantes del RD 3/2023 en relación a las características físico-químicas de las aguas desaladas, podemos destacar los siguientes:



La turbidez, es un parámetro básico de seguimiento de la calidad del agua. Debe medirse en continuo cuando el volumen de agua distribuida o producida es superior a 10.000 m<sup>3</sup>/d, además deberá notificarse en el SINAC el valor medio y máximo diarios. En el permeado de una planta desaladora debe ser inferior a 0,3 UNF (acorde al RD, a la salida del proceso de filtración en la ETAP), después de la remineralización menor de 0,8 FNU y en redes de distribución inferior a 5 UNF.



El Boro, tiene un valor paramétrico de 1,5 mg/L, pero éste será de 2,4 mg/L cuando el origen total del agua sea de transición o costera y el tratamiento de potabilización sea de desalación o bien en zona de abastecimiento que tengan captaciones en aguas subterráneas cuyas condiciones geológicas puedan provocar niveles elevados de Boro.



Se incluyen y amplía la evaluación de riesgos a través de los Planes Sanitarios del Agua (metodología para identificar y gestionar los riesgos en la cadena de suministro (captación, abastecimiento y entrega al usuario).

Por lo tanto, de cara a la configuración de membranas de ósmosis inversa para desalación se ha de tomar en consideración tanto el valor de 1,5 mg/l como de 2,4 mg/l.

aquellas configuraciones cuya concentración de Boro en agua desalada está entre 1,5 mg/L y 2,4 mg/L pero pone en riesgo el cumplimiento del RD 3/2023 por otros parámetros.

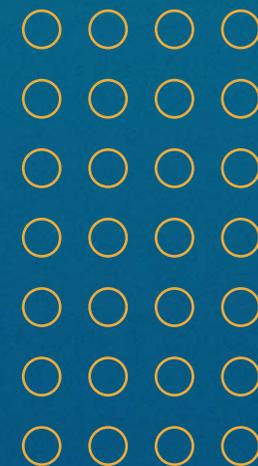


En la tabla 3 de la parte C del Anexo I de Parámetros y valores paramétricos del RD 3/2023, se muestra el límite de Cloruros en el permeado que es de 250 mg/L y de la conductividad de 2500 uS/cm a 20°C (ver Figura 1).

En función de estos nuevos requisitos, se hace imprescindible realizar un estudio de configuración de membranas que tengan en cuenta estos valores paramétricos en el agua desalada producida con el objeto de conseguir eficiencia en el proceso, reducir consumos de energía y seguir cumplimiento la normativa vigente. Este estudio realizado propone diferentes configuraciones de membranas para los explotadores, conforme a los límites de concentración de los parámetros aquí recogidos, resaltando

	PARÁMETRO	VALOR PARAMÉTRICO	UNIDAD
11	Boro (B)	1,5	mg/L
46	Cloruros (Cl)	250	mg/L
47	Conductividad (EC)	2500	µS/cm a 20 °C

Figura 1. Extracto de valores parámetros de interés del Anexo I del RD 3/2023



2.

**HIPÓTESIS DE PARTIDA ANTE NUEVAS CONFIGURACIONES DE MEMBRANAS PARA ALCANZAR LA ADAPTACIÓN AL RD 3/2023**

Para realizar este estudio se ha partido de un análisis de agua de mar tipo Atlántica, toma abierta. La caracterización usada en las diferentes simulaciones realizadas, con los rangos de concentraciones de iones, es la siguiente:

CATIONES			
IONES	mg/l	mEq/L	mg/l de CaCO3
Ca	476,7	23,8	1190,4
Mg	1414	116,4	5823
Na	11532,5	501,6	25104,3
K	457,9	11,7	586,1
<b>TOTALES</b>		653,5	

ANIONES			
IONES	mg/l	mEq/L	mg/l de CaCO3
HCO3	146,4	2,4	120,1
Cl	20834	587,7	29409
SO4	3011	62,7	3137,3
NO3	1,8	0,03	1,5
F	2,4	0,1	6,4
B	5,1	0,5	23,7
<b>TOTALES</b>		653,4	

Figura 2. Análisis de agua de mar tipo.

Para este estudio se utiliza un rango de temperaturas de agua de mar entre 19°C a 25°C (valores tipo mínimo y máximo en esta zona del Atlántico para una captación abierta de agua de mar), siendo la temperatura media 22°C.

Para este estudio se eligieron las membranas de última generación del mercado de bajo consumo energético y alto rechazo al Boro. Con estas membranas, de los cuatro fabricantes con mayores referencias mundiales (Dupont, Hydranautics, LG y Toray),

realizaron un centenar de simulaciones destacándose en este informe los diseños de configuración de membranas más adecuados para el cumplimiento del RD 3/2023 en relación al contenido de Boro en agua desalada (B), Conductividad Eléctrica del agua

desalada (EC) y concentración de Cloruros. En todos los casos se obtiene un valor de consumo específico de energía (kWh/m<sup>3</sup> desalada) usando recuperador de energía estándar de cámara isobárica.

DUPONT					
MODELO	TIPO	CAUDAL PERMEADO	ÁREA	RECHAZO BORO	RECHAZO SALES
SW30HRLE-440	Alto rechazo	8.000 gpd (30,2 m <sup>3</sup> /d)	40,88 ft <sup>2</sup>	92%	99,80%
SW30XLE-440i	Bajo consumo	9.900 gpd (37,4 m <sup>3</sup> /d)		91,5%	99,8%
SeamaxxTM-440 (800 psi)	Ultra bajo consumo	17.000 gpd (64,4 m <sup>3</sup> /d)		89%	99,70%

Figura 3. Selección de membranas Dupont para este estudio

“Todas las simulaciones realizadas en el marco de este estudio están a disposición de los interesados (desal+@desalinationlab.com)”

Las membranas usadas de la marca Hydranautics se muestran en la figura 4. Se validaron diversos escenarios con las membranas SWC4 MAX de alto rechazo, también con el modelo SWC5 MAX de

bajo consumo y finalmente con el elemento de ósmosis inversa de ultra bajo consumo SWC6 MAX. Se muestran, a continuación, los datos técnicos de estas tres membranas de Hydranautics.

HYDRANAUTICS				
MODELO	TIPO	CAUDAL PERMEADO	ÁREA	RECHAZO SALES
SWC4 MAX	Alto rechazo	7.200 gpd (27,3 m <sup>3</sup> /d)	40,88 ft <sup>2</sup>	99,8%
SWC5 MAX	Bajo consumo	9.900 gpd (37,5 m <sup>3</sup> /d)		99,8%
SWC6 MAX	Ultra bajo consumo	13.200 gpd (50 m <sup>3</sup> /d)		99,8%

Figura 4. Selección de membranas Hydranautics para este estudio

De la marca de membranas LG se consideraron las membranas más usadas en el mercado y de mayor potencial futuro para el cumplimiento de la calidad de agua de consumo humano requerida en el RD 3/2023. Por ello se estudiaron diversos escenarios con las membranas LG SW GR de alto rechazo, tam-

bién con el modelo LG SW R de bajo consumo y finalmente con el elemento de ósmosis inversa de ultra bajo consumo LG SW ES. A continuación, se pueden ver las especificaciones técnicas de estas tres membranas de LG.

LG					
MODELO	TIPO	CAUDAL PERMEADO	ÁREA	RECHAZO BORO	RECHAZO SALES
LG SW GR	Alto rechazo	8.250 gpd (31,2 m <sup>3</sup> /d)	40,88 ft <sup>2</sup>	93%	99,85%
LG SW R	Bajo consumo	9.900 gpd (37,5 m <sup>3</sup> /d)		93%	99,85%
LG SW ES (800 psi)	Ultra bajo consumo	15.070 gpd (57,0 m <sup>3</sup> /d)		89%	99,8%

Figura 5. Selección de membranas LG para este estudio

Finalmente, se han elegido las membranas más extendidas y de mayor potencial del fabricante Toray. Se validaron diversos escenarios con las membranas TM820M-440 de alto rechazo, también con el mode-

lo TM820V-440 de bajo consumo y finalmente con el elemento de ósmosis inversa de ultra bajo consumo TSW-440LE. Seguidamente se muestran los datos técnicos de estas tres membranas de Toray.

TORAY					
MODELO	TIPO	CAUDAL PERMEADO	ÁREA	RECHAZO BORO	RECHAZO SALES
TM820M-440	Alto rechazo	7.700 gpd (29,2 m <sup>3</sup> /d)	40,88 ft <sup>2</sup>	95%	99,8%
TM820V-440	Bajo consumo	9.900 gpd (37,5 m <sup>3</sup> /d)		92%	99,8%
TSW-440LE (800 psi)	Ultra bajo consumo	13.000 gpd (49,2 m <sup>3</sup> /d)		90%	99,8%

Figura 6. Selección de membranas Toray para este estudio

Para poder entrar en comparativas posteriores con las propuestas de nuevas configuraciones de membranas, se inicia este estudio analizando la situación más común hoy en día en la explotación de plantas desaladoras de Canarias. Actualmente la mayoría de plantas usan una configuración de membranas pensada en el alto rechazo al Boro, la cual lleva años en producción. Además se considera el caso de plantas desaladoras en toma abierta, al ser más desfavorable.

Se ha analizado esta configuración habitual de membranas en 3 condiciones de explotación (arranque, 3 años de garantía estándar) y 5 años de funcionamiento (vida útil media), a las temperaturas entre 19°C y 25°C, a una conversión del 45% (habitual) y a otra del 40%, al igual que con flujos medios de permeado de 16 Lmh (máximo en tomas de pozo) hasta un mínimo de 12 Lmh, incrementando en este caso el número de tubos para asegurar la misma capacidad de producción original.

Para el escenario de una edad media de 3 años, temperatura media 22°C, 45% de conversión y 16 Lmh se obtiene que la configuración que actualmente se viene usando con membranas de alto rechazo al Boro cumple los requisitos del RD 3/23 (ver figura 7) pero el valor de concentración del Boro está muy por debajo respecto a los nuevos límites máximos

de 1,5 o 2,4 mg/l. Esta circunstancia permite flexibilizar la operación para tratar de reducir los consumos de energía a la vez que se pueda seguir cumpliendo la normativa en cuestión.

Cl	mg/L	104,0
B	mg/L	0,642
CE	uS/cm	372,0

Figura 7. Resultados de calidad de agua con membranas de alto rechazo (TM820M-400) usadas en la actualidad (3 años, 22°C, 45% y 16 Lmh)

Siguiendo con el caso más habitual, con una edad media 3 años, temperatura media 22°C, 45% de conversión y 16 Lmh, se alcanza una presión de trabajo de 60,43 bar y un consumo energético incluyendo recuperador de energía de 2,30 kWh/m<sup>3</sup> de agua producida.

El caso más desfavorable en cuanto a consumo energético (19°C, 45% y 16 Lmh) a 5 años tiene una presión de trabajo de 67,11 bar y un consumo energético de 2,60 kWh/m<sup>3</sup>.



Figura 8. Resultados de consumo energético con membranas de alto rechazo usadas en la actualidad (3 años, 22°C, 45% y 16 Lmh)

Por lo tanto, si un explotador desea seguir operando la planta con la configuración de membranas de alto rechazo al Boro que dispone pero quiere ver una mejora en el consumo de energía incrementando por tanto la concentración de Boro a la salida, la recomendación es bajar el flujo medio de trabajo a 12 Lmh y bajar la conversión al 40%, (se debe incrementar tubos de presión para asegurarse la misma producción original).

De esta manera en el caso estándar habitual comentado con anterioridad a 3 años y 22°C de temperatura media mejoramos los resultados bajando el consumo energético alcanzándose unas concentraciones que cumplirían el RD 3/2023 (ver figuras 9 y 10).

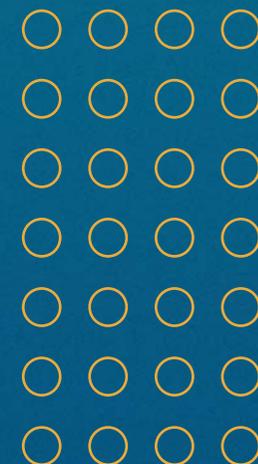
Igualmente, en este caso más habitual con edad media 3 años, temperatura media 22°C, adaptando a un 40% la conversión y 12 Lmh el flujo medio de trabajo, se alcanza una presión de trabajo con 6 bar menos (54,28 bar) y un consumo energético dos décimas inferiores de 2,1 kWh/m<sup>3</sup> de agua producida.

<b>CL</b>	mg/L	119,5
<b>B</b>	mg/L	0,735
<b>CE</b>	uS/cm	425,9

Figura 9. Resultados de calidad de agua con membranas de alto rechazo en la actualidad (3 años, 22°C, 40% y 12 Lmh)

<b>PRESIÓN DE ALIMENTACIÓN</b>	bar	54,28
<b>TEMPERATURA</b>	°C	22,00
<b>CONSUMO ESPECÍFICO DEL PROCESO DE DESALACIÓN</b>	kWh/m <sup>3</sup>	2,11

Figura 10. Resultados de consumo energético con membranas de alto rechazo en la actualidad (3 años, 22°C, 40% y 12 Lmh)



## **ANÁLISIS DE NUEVAS CONFIGURACIONES DE MEMBRANAS PARA ATENDER A LOS REQUISITOS DEL RD 3/2023**



A partir de las hipótesis de partida (configuración actual de membranas con 7 elementos de alto rechazo en bastidor), se proponen nuevas configuraciones de membranas para cumplir el RD 3/2023 a la vez que se alcanzan beneficios en la explotación como son la reducción del consumo de energía. Se exponen en este apartado solo las configuraciones más significativas, dando como resultado modificar total o parcialmente la configuración de membranas habitual actual con membranas de alto rechazo. Las tablas que a continuación aparecen muestran valores medios de todas las marcas comerciales analizadas.

### Configuración #1: 7 membranas de bajo consumo

En primer lugar se propone un diseño usando **7 elementos de bajo consumo**, con el objeto de ahorrar energía, para una edad media 3 años, temperatura media 22°C, 40% de conversión y 12 Lmh.

Cl	mg/L	151,6
B	mg/L	1,319
CE	uS/cm	537,1

Figura 11. Resultados de calidad de agua con membranas de bajo consumo (3 años, 22°C, 40% y 12 Lmh)

PRESIÓN DE ALIMENTACIÓN	bar	51,42
TEMPERATURA	°C	22,00
CONSUMO ESPECÍFICO DEL PROCESO DE DESALACIÓN	kWh/m <sup>3</sup>	2,00

En este caso, para membranas de bajo consumo, se alcanza una presión de trabajo con 9 bar menos (51,42 bar) y un consumo energético de 2,00 kWh/m<sup>3</sup>, tres décimas inferior si lo comparamos con la situación actual usando membranas de alto rechazo.

Figura 12. Resultados de consumo energético con membranas de bajo consumo (3 años, 22°C, 40% y 12 Lmh)

El escenario más desfavorable de esta configuración en cuanto a calidad de aguas es a 25°C, 40%, 12 Lmh y 5 años. No obstante, también cumple los nuevos requisitos del RD 3/2023.

Cl	mg/L	203,9
B	mg/L	1,664
CE	uS/cm	716,5

Figura 13. Resultados de calidad de agua con membranas de bajo consumo (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh)

### Configuración #2: 7 membranas de ultra bajo consumo

Se muestran a continuación los resultados de usar una configuración de membranas de **7 elementos de ultra bajo consumo**, con el objeto aún más energía para una edad media 3 años, temperatura media 22°C, 40% de conversión y 12 Lmh.

Cl	mg/L	226,4
B	mg/L	1,828
CE	uS/cm	793,4

Figura 14. Resultados de calidad de agua con membranas de ultra bajo consumo (3 años, 22°C, 40% y 12 Lmh)

PRESIÓN DE ALIMENTACIÓN	bar	49,07
TEMPERATURA	°C	22,00
CONSUMO ESPECÍFICO DEL PROCESO DE DESALACIÓN	kWh/m <sup>3</sup>	1,92

En este caso para una edad media 3 años, temperatura media 22°C, un 40% de conversión y 12 Lmh el flujo medio de trabajo, se alcanza una presión de trabajo con 11 bar menos (49,07 bar) y un consumo energético tres décimas inferiores l de 1,92 kWh/m<sup>3</sup> de agua producida, respecto a un diseño de membranas actual.

Figura 15. Resultados de consumo energético con membranas de ultra bajo consumo (3 años, 22°C, 40% y 12 Lmh)

En el escenario más desfavorable en cuanto a calidad de aguas a 25°C, 40%, 12 Lmh y 5 años, ya no cumplen los nuevos requisitos de RD 3/2023. El cloruro no está por debajo de 250 mg/L, aunque es un caso excepcional.

Cl	mg/L	303,9
B	mg/L	1,675
CE	uS/cm	1.064,8

Figura 16. Resultados de calidad de agua con membranas de ultra bajo consumo (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh)

### Configuración #3: Diseño híbrido 4+3: 4 membranas de bajo consumo y 3 membranas de ultra bajo consumo

De todas las configuraciones híbridas analizadas, se propone como más significativa la configuración formada por 4 membranas de bajo consumo en cabezera del tubo de presión y 3 membranas de ultra bajo consumo en la parte final del mismo.

Las proyecciones con este diseño se han realizado tanto a un flujo medio de trabajo de 12 Lmh, que es el más bajo posible para reducir al mínimo el consumo energético, como trabajando a un flujo medio más habitual no superior a 16 Lmh.

En todos los casos se cumple el RD 3/2023 para aguas de consumo humano, siendo el factor limitante los 250 mg/L de Cloruros a los 5 años. Si en la configuración #2, el caso a 5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh, no cumplía (solo membranas de ultra bajo consumo), con en el caso híbrido si entra en norma.

<b>Cl</b>	mg/L	249,0
<b>B</b>	mg/L	1,887
<b>CE</b>	uS/cm	870,9

Figura 17. Resultados de calidad de agua con diseño híbrido 4LE+3ULE (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh)

<b>PRESIÓN DE ALIMENTACIÓN</b>	bar	49,82
<b>TEMPERATURA</b>	°C	25,00
<b>CONSUMO ESPECÍFICO DEL PROCESO DE DESALACIÓN</b>	kWh/m <sup>3</sup>	1,95

Figura 18. Resultados de consumo energético con diseño híbrido 4LE+3ULE (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh)

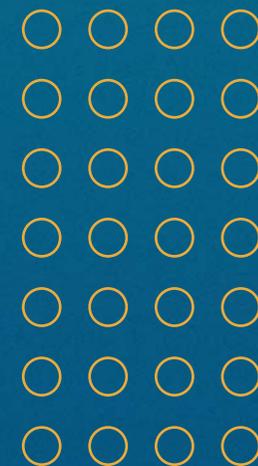
A modo de ejemplo, la figura 19 muestra dos hibridaciones con membranas Toray a 5 años: la primera (4+3) formada por TM820V-440 (alto consumo) y TSW-440LE (ultra bajo consumo) y la segunda (1+6) usando TM820M-440 (alto rechazo) y TSW-440LE.

Claramente se observan los beneficios de usar una configuración 4+3 en cuanto a reducción de consumo de energía cumpliendo el RD 3/2023, si bien el factor limitante en este caso serían la alta concentración de los Cloruros.



HÍBRIDOS	CONVERSIÓN (%)	FLUJO MEDIO (Lmh)	Cl (mg/L)	B (mg/L)	Ce (uS/cm)	P (bar)	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m³)
4 x TM820V-440 + 3 x TSW-440LE	40	12,1	249,00	1,89	870,90	49,82	1,95
1 x TM820M-440 + 6 x TSW-440LE	45	15,8	247,90	1,86	867,2	54,80	2,09

Figura 19. Resultados de calidad de agua comparando dos configuraciones híbridas con membranas de bajo consumo (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh).



**PROPUESTAS DE CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS  
PARA OPTIMIZAR EL CONSUMO ENERGÉTICO Y  
CALIDAD DE AGUA ACORDE AL RD 3/2023**

Como conclusión de todo el estudio de configuraciones de membranas realizado con las cuatro casas comerciales consideradas, se proponen las siguientes configuraciones de membranas para cumplir la calidad de agua de consumo humano requerida en el nuevo RD 3/2023 con el menor consumo energético posible.

En este sentido, para obtener el menor consumo energético posible cumpliendo la calidad de aguas requerida, y considerando el escenario de diseño más restrictivo (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh) para alcanzar una concentración de B < 2,4 mg/l, se muestran a continuación las propuestas de configuración híbrida.

FABRICANTES	CONFIGURACIÓN	Cl (mg/L)	B (mg/L)	CE (uS/cm)	P (bar)	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m³)
DUPONT	4 x SW30XLE-440 + 3 x SEAMAXX-440	223,10	1,52	770,00	50,00	1,96
HYDRANAUTICS	1 x SWC5 + 6 x SWC6	203,04	1,99	702,01	53,00	2,08
LG	5 x SW440R + 2 x SW440 ES	221,15	1,50	763,27	51,82	2,03
TORAY	4 x TM820V-440 + 3 x TSW-440LE	249,00	1,89	870,90	49,82	1,95

Figura 20. Resultados de calidad de agua y consumo de energía usando configuraciones propuestas de membranas híbridas y obtener un B < 2,4 mg/l (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh)

FABRICANTES	CONFIGURACIÓN	Cl (mg/L)	B (mg/L)	Ce (uS/cm)	P (bar)	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m <sup>3</sup> )
DUPONT	7 x SW30XLE-440	148,80	1,28	518,00	51,80	2,03
HYDRANAUTICS	7 x SWC5	184,50	1,77	648,33	53,40	2,09
LG	7 x SW440R	150,16	1,20	527,66	53,26	2,08
TORAY	7 x TM820V-440	203,90	1,66	716,50	50,91	1,99

Tabla 21. Resultados de calidad de agua y consumo de energía usando configuraciones propuestas de membranas no híbridas y obtener un B <2,4 mg/l (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh)

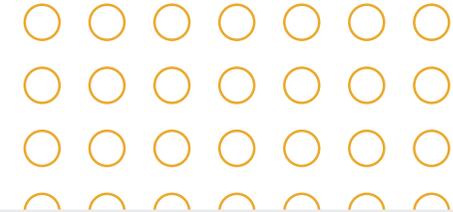
Si se decide operar con una configuración de membranas no híbrida, se proponen los siguientes diseños para cumplir la calidad de agua de consumo humano requerida en el nuevo RD 3/2023 con el menor consumo energético posible, para el escenario de estudio (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh).

Para el resto de los escenarios, a menor temperatura, inferior edad de la membrana y mayor flujo medio de trabajo los resultados en calidad de aguas son aún mejores, por lo que cumplen con más holgura el RD 3/2023 de aguas de consumo humano. Por lo tanto el escenario (5 años, 25°C, 40% y 12

Lmh) por un lado, es el más desfavorable en cuanto a calidad de agua desalada, y se proponen estas configuraciones que cumple el RD 3/2023 para todos sus parámetros, y por otro es el más favorable desde el punto de vista de la reducción del consumo de energía.

En el caso de limitar el Boro en el permeado a 1,5 mg/L, se proponen las siguientes configuraciones híbridas de membranas (ver figura 22). Cumplen la calidad de agua de consumo humano requerida en el nuevo RD 3/2023 aunque sube el consumo energético (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh).

En la figura 23 se muestran las mejores configuraciones propuestas no híbridas (pagina siguiente).



FABRICANTES	CONFIGURACIÓN	Cl (mg/L)	B (mg/L)	Ce (uS/cm)	P (bar)	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m³)
DUPONT	5 x SW30XLE-440 + 2 x SEAMAXX-440	223,10	1,52	770,00	50,00	1,96
HYDRANAUTICS	3 x SWC4 + 4 x SWC5	161,61	1,50	569,05	54,30	2,13
LG	5 x SW440R + 2 x SW440 ES	221,15	1,50	763,27	51,82	2,03
TORAY	2 x TM820M-440 + 5 x TM820V-440LE	191,70	1,48	675,0	51,61	2,01

Figura 22. Resultados de calidad de agua y consumo de energía usando configuraciones propuestas de membranas híbridas y obtener un B < 1,5 mg/l (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh)

FABRICANTES	CONFIGURACIÓN	Cl (mg/L)	B (mg/L)	Ce (uS/cm)	P (bar)	T (°C)	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m³)
DUPONT	7 x SW30XLE-440	148,80	1,28	518,00	51,80	25	2,03
HYDRANAUTICS	7 x SWC5	131,32	1,09	464,48	57,90	25	2,13
LG	7 x SW440R	150,16	1,20	527,66	53,26	25	2,08
TORAY	7 x TM820V-440	160,70	0,97	568,4	53,62	25	2,09

Figura 23. Resultados de calidad de agua y consumo de energía usando configuraciones propuestas de membranas no híbridas y obtener un B < 1,5 mg/l (5 años, 25°C, 40% y 12 Lmh)

Finalmente, se analizó el comportamiento de los diseños simples e híbridos propuestos con membranas de bajo y ultra consumo, al incremento de la producción (45% conversión y 16Lmh), respetando los valores límite de B de 1,5 y 2,4 mg/l respectivamente, y

cumpliendo el RD 3/23 en relación a los Cloruros. La tabla siguiente muestra a modo de ejemplo el caso con membranas Toray, el comportamiento de las dos mejores configuraciones a diferentes temperaturas de agua de mar (25 y 19 °C). Se aprecian reducciones

de energía consumida en cualquiera de los escenarios, observándose un mínimo de 2,07 kWh/m3 en la configuración simple de bajo consumo frente a los 2,30 kWh/m3 obtenidos en una configuración actual de bajo rechazo (10% de reducción).

CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS	Cl (mg/L)	B (mg/L)	Ce (uS/cm)	P (bar)	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m <sup>3</sup> )
7 x TSW-440LE (B < 2,4 mg/L , 25°C)	245,3	1,91	858,2	54,12	2,07
6 x TM820V-440 + 1 x TSW-440LE (B < 1,5 mg/L , 19°C)	177,3	1,47	625,6	56,72	2,16
7 x TSW-440LE (B < 2,4 mg/L, 25°C)	177,0	1,49	624,5	56,04	2,14
6 x TM820V-440 + 1 x TSW-440LE (B < 1,5 mg/L, 19°C)	128,6	1,12	457,4	59,45	2,27

Tabla 24. Resultados de calidad de agua y consumo de energía para maximizar producción, usando configuraciones propuestas de membranas Toray para obtener B <1,5 mg/l y 2,4 mg/l a diferentes temperaturas (5 años, 45%, 16 Lmh)

## “Retorno de la inversión de un cambio de membranas al reducirse el consumo de energía”

Atendiendo a la pregunta de si es rentable un cambio de membranas para cumplir el RD 3/23, a la vez que se reduce el consumo de energía, se expone a continuación un caso comparativo de forma simple.

Se ha realizado una estimación económica para una planta desaladora estándar de agua de mar y producción 5000 m<sup>3</sup>/d ante un posible cambio de membranas, usando la configuración híbrida propuesta en este estudio.

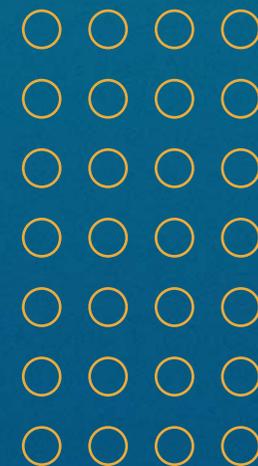
Como resultado se obtiene un ahorro económico por consumo de energía de 300 €, que en 5 años supone 547500 EUR. Considerando un coste de la membrana de 550 euros y un total de membranas de 420 unidades, la inversión es de 231000 euros. Por tanto, la inversión en membranas es inferior al ahorro energético. Esto demuestra que el reemplazo de membranas es rentable y se amortiza en poco más de dos años.

### OPCIÓN 1

No hay reemplazo de membranas y seguimos trabajando igual. El caso más desfavorable en cuanto a consumo energético 19°C, 45% y 16 Lmh a 5 años tiene una presión de trabajo de 67,11 bar y un consumo energético de 2,6 kWh/m<sup>3</sup>. Teniendo en cuenta un precio estimado de 0,1 EUR/kWh producir 5.000 m<sup>3</sup> al día conlleva un coste en energía de 1.300 €.

### OPCIÓN 2

Reemplazo por un sistema 4+3 híbrido de membranas de bajo y ultra bajo consumo energético, en las mismas condiciones de 5 años y 19°C, variando la conversión al 40% y el flujo a 12 Lmh (incrementando tubos para mantener la misma producción). En este caso se alcanzaría un consumo de energía de 2,0 kWh/m<sup>3</sup>.



5.

## CONCLUSIONES

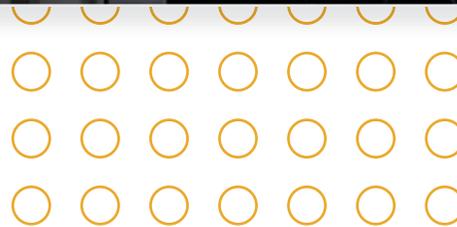
**Tras la realización de ese estudio se concluye:**

Es posible alcanzar niveles de Boro inferiores a 1,5 o 2,4 mg/l a la vez que se cumple el RD 3/23 y se consigue eficiencia energética o se incrementa producción (diseños híbridos y no híbridos).

Sin reemplazar membranas, manteniendo el modelo actual de alto rechazo en las desaladoras de agua de mar de Canarias, es posible trabajar a menor flujo medio de permeado (mínimo 12 Lmh) y conversión del 40% (incrementando tubos de presión), reduciendo la presión de entrada 6 bar bajando el consumo específico a 2,1 kWh/m<sup>3</sup> (B = 0,7 mg/L).

Reemplazar por membranas de bajo consumo, en ese mismo escenario medio de trabajo, puede suponer una reducción entre 9 bar bajando el consumo a 2,0 kWh/m<sup>3</sup> (B: 0,97- 1,77 mg/L).

Reemplazando por membranas de ultra bajo consumo, se reduce presión hasta 11 bar, bajando el consumo a 1,9 kWh/m<sup>3</sup>. No siempre se cumple en esta configuración estar por debajo de los 250 mg/L de Cloruros (B: 1,49 – 1,91 mg/L).



Es decisión del operador de la planta decantarse por una membrana u otra, configuración híbrida o no. Se deben valorar los costes que acarrea las limpiezas químicas, pretratamiento, la vida útil y el precio de las membranas. En cualquier caso las reducciones de presión de trabajo hace amortizable la inversión (2-3 años para bastidores completos).

