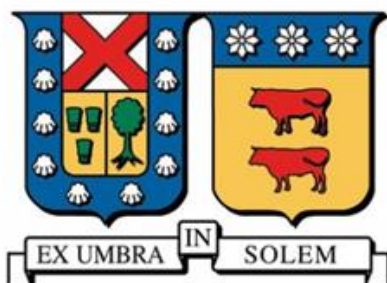


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL



**“EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS
PARA LA REMOCIÓN DE BORO DESE AGUAS
SALOBRES PARA SU USO EN LA AGRICULTURA
ALTIPLÁNICA”**

FELIPE IGNACIO CISTERNAS IBARRA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

PROFESOR GUÍA:

CLAUDIO ACUÑA P.

PROFESOR CORREFERENTE:

PAULA GUERRA

Enero 2019

Valparaíso – Chile

*Agradezco a mi familia
que siempre me apoyo en toda decisión
y a todas las personas que hicieron
posible este trabajo.*

Resumen ejecutivo

Pese a las favorables condiciones agroclimáticas presentes en el norte de Chile, existen algunos valles como el de Camarones y Lluta, cuyo desarrollo agrícola se ha visto limitado principalmente por las altas concentraciones de boro presentes en el suelo y en sus aguas de riego, permitiendo cultivar solo especies altamente tolerantes como la papa, la cebolla, el ajo y la beterraga. En comunidades como Lluta y Chiza, la concentración de boro ha alcanzado valores cercanos a los 20 ppm, mientras que en el valle de Camarones se han llegado a reportar valores de hasta 30 ppm, ambos valores muy por encima de los 0,75 ppm recomendados por la normativa chilena NCh 1.333 para agua de riego. Para resolver esta problemática, diversas compañías han desarrollado membranas para aguas salobres y eventualmente para boro. No obstante, no existen estudios comparativos que permitan cuantificar la remoción de boro en las distintas membranas disponibles en el mercado. Esto genera una brecha de oportunidad que permite la producción de agua con bajo contenido en boro mejorando la diversificación de cultivos en valles del norte de Chile.

Durante mucho tiempo las membranas convencionales de osmosis inversa para agua salobre han presentado bajos rendimientos de rechazo al boro con valores inferiores al 65% lo cual es atribuido principalmente a la forma química predominante (ácido bórico) en la cual el boro es presentando en estas aguas a un pH neutral y por su interacción con las membranas. Mejores resultados de remoción (> 90%) se han obtenido al modificar esta condición aumentando el pH de alimentación ($\text{pH} > 9$), alterando la composición del boro y reduciendo su interacción con las membranas, sin embargo, la implementación de estos sistemas requiere por lo general de un elevado consumo de reactivos además de configuraciones específicas de trabajo. Hoy en día, existen algunas membranas diseñadas en forma específica para la remoción de boro, declaradas con hasta un 83% de rechazo, sin embargo, pese a la atribución de esta capacidad específica a un grupo limitado de membranas, existe una gran cantidad de membranas cuyo desarrollo tecnológico se ha centrado en el progreso de otras características (resistencia al ensuciamiento, resistencia química, bajo consumo energético, etc.), que también presentan una buena remoción de boro como consecuencia de su diseño y que no han sido detectadas o declaradas por el fabricante respecto a su efectividad en remoción de boro. En este contexto, es que este estudio se encuentra enfocado en evaluar todas las membranas de osmosis inversa disponibles en el mercado a partir de los softwares dispuestos por sus mismos fabricantes, para evidenciar aquellas membranas que presenten un alto desempeño en remoción del boro, evaluando al mismo tiempo, su implementación para mejorar el agua de riego en las zonas agrícolas del norte de Chile afectadas por la presencia en altas concentraciones de este componente.

Dada la disponibilidad de software, las membranas consideradas fueron las de los fabricantes Hydranautics, Dow, Toray, TCK Membrane, SUEZ, Lanxess y LG, evaluadas bajo condiciones estándar de 2, 4 y 16 ppm de boro en su corriente de alimentación a un pH de 7,5 con un sistema diseñado para abastecer un terreno de 5 hectáreas con una producción de 20 m³/h, compuesto por 2 etapas y un 75% de recuperación del agua.

De un total de 341 membranas evaluadas, solo 8 de ellas tuvieron remociones superiores al 70%, 3 superiores al 89%, y solo la membrana de RE8040-BLN440 de TCK Membrana demostró, además tener una concentración menor a 0,75 ppm con remociones superiores al 98% para todos los escenarios evaluados. El costo de implementación del sistema se estimó en alrededor de 22 millones con un costo de producción de 136 CLP/m³. De estas 8 membranas, solo 2 habían sido declaradas anteriormente por el fabricante con capacidad para remover el boro. Estos resultados permiten afirmar que evidentemente existen membranas que no han sido utilizadas anteriormente para remover el boro y que su aplicación podría tener un beneficio enriquecedor en la zona.

Índice

Resumen ejecutivo	iii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Alcances	3
1.3. Metodología de trabajo	3
Capítulo 2. Potencial agrícola y tecnologías de remoción de boro	6
2.1. Efecto del boro sobre los cultivos	6
2.2. Impacto económico y social	7
2.3. Tecnologías para la remoción de boro	10
2.4. Química del boro	12
Capítulo 3. Membranas de Osmosis Inversa	13
3.1. Tipos de membranas	13
3.1.1. Módulos tubulares	13
3.1.2. Módulos de fibra hueca	14
3.1.3. Módulos enrollados en espiral	15
3.2. Materiales de fabricación	16
3.3. Modificaciones sobre sus métodos de fabricación	17
3.4. Clasificación de membranas de agua salobre	18
3.4.1. Membranas de baja energía	19
3.4.2. Membranas de alto rechazo	19
3.4.3. Membranas de bajo ensuciamiento	19
3.4.4. Módulos de membrana de baja presión diferencial	20
3.4.5. Módulos de membrana de alta productividad	20
3.4.6. Membranas para remoción de boro	20
3.4.7. Membranas sanitarias y de alta temperatura	21
3.5. Criterios de selección de membranas	21
Capítulo 4. Fabricantes de membranas y softwares de simulación	22
4.1. Hydranautics - IMSDesign	24
4.2. Dow - WAVE	27
4.3. Toray – TorayDS2	30
4.4. TCK Membrane (Toray) - CSMPPro	33

4.5. SUEZ - Winflows.....	36
4.6. Lanxess - LewaPlus.....	39
4.7. LG - NanoH ₂ O.....	42
4.8. Discusión general de softwares	44
Capítulo 5. Consideraciones y criterios de diseño.....	46
5.1. Calidad del agua.....	46
5.2. Flujo del agua de producto	48
5.3. Recuperación y flujo de alimentación	48
5.4. Configuración del sistema.....	49
5.5. Selección de membranas	50
5.6. Flujo promedio por membrana.....	51
5.7. Factor Beta y ensuciamiento de la membrana.....	52
5.8. Incrustación	53
5.9. Temperatura del agua.....	54
5.10. Criterios de aceptación	54
Capítulo 6. Simulaciones y análisis de resultados.....	55
6.1. Diseño del sistema.....	55
6.2. Resultados Primera Etapa de Simulación.....	59
6.3. Resultados Segunda Etapa de Simulación	61
6.4. Análisis de resultados	65
6.4.1. Resumen del proceso de evaluación	65
6.4.2. Análisis comparativo de membranas.....	66
Capítulo 7. Evaluación económica	68
7.1. Resumen de antecedentes técnicos.....	68
7.2. Costos de inversión	68
7.3. Costos de operación	69
Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones.....	71
8.1. Conclusiones	71
8.2. Recomendaciones	73
Referencias	74
Anexos	76
Anexo 1. Tolerancia de distintos cultivos a la presencia de boro.....	76
Anexo 2. Estándares para el agua de riego de la norma chilena 1.333.....	77

Anexo 3. Tecnologías para la desalación existentes.	78
Anexo 4. Resumen de normas y recomendaciones establecidas para aguas de riego.	78
Anexo 5. Caracterización del agua de distintas fuentes acuíferas de la zona norte de Chile.	81
Anexo 6. Membranas comerciales.....	82
Anexo 7. Estimación flujo promedio por membrana	89
Anexo 8. Detalle de los resultados de Primera Etapa de Simulación	91
A.8.1. Hydranautics - IMSDesign	91
A.8.2. Dow - WAVE	93
A.8.3. Toray - TorayDS2	95
A.8.4. TCK Membrane (Toray) - CSMPPro	98
A.8.5. SUEZ - Winflows.....	100
A.8.6. Lanxess - LewaPlus.....	104
A.8.7. LG - NanoH ₂ O.....	105
Anexo 9. Detalle de los resultados de Segunda Etapa de Simulación	107
A.9.1. Dow - WAVE	107
A.9.2. TCK Membrane (Toray) - CSMPPro	110

Abreviaciones

RO: sistemas de osmosis inversa (*Reverse Osmosis*).

TDS: concentración de los sólidos totales disueltos en una solución (*Total Dissolved Solids*).

SDI: el índice de densidad de sedimentos es un parámetro que permite establecer la cantidad de elementos como sólidos suspendidos y coloides que podrían generar ensuciamiento en la membrana (*Silt Density Index*).

LSI: el índice de saturación de Langelier es un método utilizado para cuantificar la tendencia a la incrustación y la corrosión del agua (*Langelier Saturation Index*).

Glosario

Permeado: corriente efluente que se genera a partir de la solución que traspasa una membrana, generalmente denominada como permeado o producto.

Rechazo: corriente efluente que contiene los componentes que no atraviesan la membrana, generalmente denominada como concentrado, rechazo, residuo, salmuera o solución retenida. El rechazo también es utilizado para referirse al porcentaje de una especie afluente específica que una membrana retiene, en otras palabras, corresponde a la concentración de una especie en la corriente de rechazo sobre la concentración de la misma especie sobre la corriente de alimentación.

Recuperación: término utilizado para describir el porcentaje de volumen de agua afluente que es recuperado como permeado. En otras palabras, corresponde a la fracción de flujo permeado sobre el flujo de alimentación, por lo general representado en forma porcentual.

Flujo de membrana: corresponde al flujo definido como el caudal volumétrico de un fluido que pasa a través de un área determinada. Por lo general, en sistemas de RO, el flujo es expresado en galones de agua por pie cuadrado de superficie de membrana por día (gfd).

Polarización de la concentración: efecto por el cual se acumulan los solutos de una solución sobre la superficie de la membrana. La fenomenología lo describe a partir de la difusión y convección que tiene la solución con especies sobre la capa límite de la membrana.

Factor Beta: corresponde a un término para cuantificar de alguna manera la polarización de la concentración, su valor corresponde a la relación entre la concentración de una especie en la superficie de la membrana y la concentración

en la solución desarrollada. El factor Beta es un índice que muestra que tan rápido la corriente afluyente es deshidratada a través del sistema de RO.

Ensuciamiento: resultado de la deposición de sólidos suspendidos, orgánicos o microbios en la superficie de la membrana. Típicamente en el lado de alimentación / concentrado.

Incrustación: resultado de la precipitación de sales saturadas sobre la superficie de la membrana.

Contenedor o recipiente a presión: contenedor conformado de distintos materiales dependiendo de su aplicación, utilizado para contener por lo general de 1 a 8 membranas por contenedor a presión.

Arreglo: corresponde por lo general al término utilizado para describir la configuración de un sistema de osmosis inversa. Estos arreglos, también conocidos como matrices o trenes de RO, consisten en una serie de recipientes a presión dispuestos en patrones específicos.

Arreglo en etapas: configuración de un arreglo en donde el flujo de rechazo o concentrado es utilizado para alimentar a otro conjunto de membranas, incluso si solo se trata de un recipiente a presión.

Arreglo en pasos: configuración de un arreglo en donde el flujo de permeado o producto es utilizado para alimentar a otro conjunto de membranas. Por lo general se describe a estas configuraciones como un proceso de doble paso o de dos pasadas.

Capítulo 1. Introducción

Pese a las excelentes características agroclimáticas de algunos valles en las zonas del norte de Chile, su potencial agropecuario se ha visto limitado debido principalmente a la mala calidad de sus aguas, tanto subterránea como superficial. La calidad del agua varía respecto a la zona, dependiendo de la cantidad y tipo de sales que esta contenga (DGA, 2010). Si bien varios de los minerales presentes en el agua no demuestran tener un impacto negativo considerable frente al crecimiento y desarrollo de cultivos, algunas sustancias químicas en elevadas concentraciones pueden resultar sumamente nocivas y dañinas, siendo particularmente el boro uno de los mayores acreedores en este aspecto al encontrarse sobre ciertas cantidades (FIA, 2009), permitiéndose un límite máximo recomendado de 0,75 ppm de boro, según señala la comisión nacional de riego de Chile.

Algunas de las zonas afectadas como Chiza, Lluta y Codpa, presentan valores en sus aguas entre 10 a 20 ppm de boro, siendo aún más extrema esta situación en algunos sectores del valle de Camarones, en donde se han evidenciado valores sobre los 30 ppm, restringiendo drásticamente las especies y la diversificación de cultivos (DGA, 2010).

Por otro lado, los sistemas de osmosis inversa convencionales remueven varios componentes del agua reduciendo la carga iónica global pero generalmente con un bajo rendimiento de remoción de boro debido principalmente a la forma química en la cual es presentando este componente en el agua. A valores de pH cercanos a 7, la especie predominante corresponde a ácido bórico, la cual no es removida efectivamente por estos sistemas requiriendo de configuraciones de doble paso ajustando los valores de pH a valores entre 9 y 11 para alterar la forma en la que el boro es presentado en el agua (ion borato, H_2BO_3^-) siendo así removido con mayor efectividad pero con el gran inconveniente de requerir tratamientos posteriores para neutralizar las aguas de producto más el costo asociado al incremento de pH previo al ingreso al sistema de membranas (Redondo, Busch, & Witte, 2003), sin embargo, a pesar de esta información se han evidenciado ya en otras investigaciones membranas de RO de nueva generación con buenas remociones de este elemento sin la necesidad de ajustar de pH, con eficiencias de rechazos de boro tan significativas como del 87% de remoción (Farhat, Ahmad, Hilal, & Arafat, 2013).

Hoy en día existen membranas desarrolladas en forma especificada para la remoción de boro, como por ejemplo la serie ESPAB de Hydranautics construida de poliamida y caracterizada también por su bajo consumo energético, o la serie BW30HR-440i de alto rechazo fabricada por Dow con un 80% de remoción según su especificación; sin embargo, pese a la atribución de esta característica especial por el fabricante a un grupo específico de membranas, existe una gran cantidad de

membranas cuyo desarrollo tecnológico se centra en otras cualidades (resistencia al ensuciamiento, resistencia química, bajo consumo, entre otras), que también presentan una buena remoción del elemento como consecuencia de su diseño tal como se evidencia en las investigaciones de Farhat et al., 2013; Tu el al., 2010, Redondo et al., 2003 y Rodríguez et al., 2001.

Por este motivo se establece un estudio en donde se realizará una revisión de todas aquellas membranas disponibles en el mercado con posibilidad de ser evaluadas en los paquetes de softwares dispuestos por sus mismos fabricantes para el diseño y evaluación de sistemas de osmosis inversa utilizando sus membranas específicas (Kucera, 2015), para así evidenciar aquellas que presenten un mayor desempeño de remoción de boro y que apliquen al tipo de agua caracterizada en el sector de interés.

1.1. Objetivos

Objetivo general

La presente memoria tiene como objetivo evaluar y seleccionar las membranas de osmosis inversas disponibles en el mercado que permitan remover el boro presente en las aguas salobres de las zonas agrícolas del norte de Chile, para mejorar la diversificación de la agricultura y el desarrollo económico de las comunidades. Para lograr esto se proponen los siguientes objetivos específicos.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la composición del agua a partir de referencias de estudios técnicos de fuentes hídricas en las zonas con potencial agrícola del norte de Chile.
2. Evaluar membranas para remoción de boro, a partir de proveedores y softwares específicos para configuración de plantas de tratamiento de osmosis inversa.
3. Establecer un sistema para remoción de boro bajo una condición estándar, para simular en cada paquete de software de los distintos proveedores, haciendo un análisis comparativo de cada uno de ellos.
4. Evaluar técnica y económica escenarios en base a la sensibilidad del boro en la alimentación y cumplimiento con la normativa NCh 1.333 para el agua permeada.

1.2. Alcances

El alcance de este trabajo se centra en la simulación en base a los distintos softwares dispuestos por fabricantes de membranas de osmosis inversa reconocidos en el mercado, considerando las membranas disponibles en cada paquete de software, para evaluar la remoción de boro en el sector agrícola altiplánico de la zona norte de Chile.

Como entregable se tendrán los tipos de configuración específicas por fabricante que presenten un mayor desempeño de remoción de boro junto al costo de su operación e implementación, así como los criterios de diseño y selección de la tecnología específica.

1.3. Metodología de trabajo

Con la finalidad de cumplir con los objetivos y alcance presentados se plantea la siguiente metodología de trabajo organizada por capítulos.

Capítulo 2. Potencial agrícola y tecnologías de remoción de boro:

En este capítulo se describe el efecto y limitación que genera el boro sobre los diferentes cultivos indicando algunos de los sitios del norte de Chile mayormente afectados por este motivo junto a su impacto económico y social, permitiendo definir los parámetros de remoción de boro a considerar.

Además, se presenta un análisis general sobre las tecnologías utilizadas para la remoción de boro junto a la oportunidad que ofrece la tecnología de osmosis inversa y la expectativa o criterios a considerar sobre los rendimientos de remoción.

Capítulo 3. Membranas de Osmosis Inversa:

Se presenta la clasificación, diseño y construcción de los distintos tipos de membranas de osmosis inversa destinadas para agua salobre, para así determinar cuáles serán los criterios de selección sobre las membranas a evaluar. Además, esta información permitirá realizar mejores inferencias sobre los resultados obtenidos.

Capítulo 4. Fabricantes de membranas de RO y softwares de simulación:

En este capítulo se revisan los fabricantes de membranas de mayor relevancia, identificado aquellos que presenten softwares de simulación disponibles para el diseño de sistemas de osmosis inversa y evaluación de sus membranas; Para cada uno de estos programas, se presenta una breve descripción y alcance para verificar su compatibilidad con el caso de estudio.

Capítulo 5. Consideraciones y criterios de diseño:

Se establecen las condiciones de operación y criterios de diseño con mayor relevancia que afectan al rendimiento de remoción contextualizado en la implementación de un sistema de RO por medio de softwares de diseño. En este capítulo se abordan puntos como la calidad del agua de alimentación, agua de producto, selección de membranas, flujos y recuperación del sistema, entre otros aspectos.

Capítulo 6. Simulaciones:

En este capítulo se describen los pasos de diseño utilizados para cada simulación junto al diseño de experimentos y los parámetros operacionales establecidos a partir de las consideraciones y criterios revisados en el capítulo 5. Los resultados de las simulaciones también son presentados en esta sección junto a un análisis adicional realizado sobre las membranas para validar su comportamiento a distintos valores de pH sobre la corriente de alimentación.

Capítulo 7. Evaluación económica:

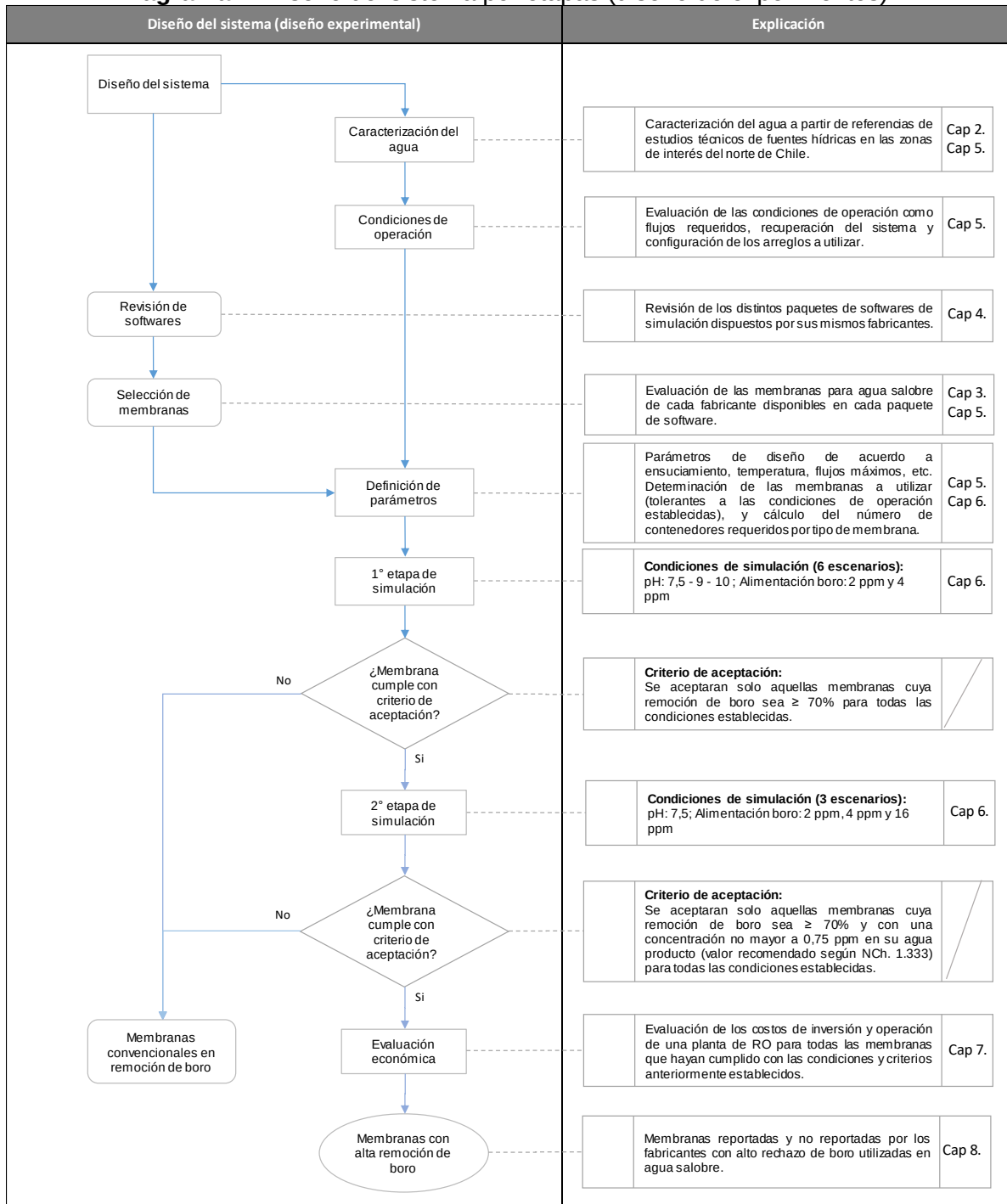
En este capítulo se realiza una evaluación económica del proyecto, considerando costos de inversión y operación para conocer la factibilidad de instalación de la implementación propuesta.

Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones:

Finalmente, este capítulo da a conocer las conclusiones que se obtuvieron luego de realizar el presente trabajo y recomendaciones para trabajos futuros. En la última sección, se podrán encontrar referencias a trabajos que fueron utilizados para el presente proyecto, además de una sección de anexos que complementará con información los capítulos anteriormente descritos.

El siguiente diagrama tiene como objetivo ilustrar la estructura del diseño del proceso (diseño experimental) junto a su relación con los capítulos anteriormente resumidos.

Diagrama 1. Diseño del sistema por etapas (diseño de experimentos).



Capítulo 2. Potencial agrícola y tecnologías de remoción de boro

2.1. Efecto del boro sobre los cultivos

Pese a las excelentes características agroclimáticas y gran disponibilidad de terrenos en la zona norte de nuestro país, el desarrollo de la actividad agrícola se ha visto limitada en gran parte por la cantidad y calidad del agua disponible para riego. La calidad es un aspecto fundamental para el crecimiento de cultivos, y varía ampliamente de acuerdo a la cantidad y tipo de sales que esta contenga. Se ha demostrado que algunos compuestos salinos presentes sobre ciertas cantidades resultan ser altamente tóxicos, lo cual a su vez limita ampliamente el espectro de especies cultivables en la zona, siendo particularmente el boro uno de los mayores acreedores en este aspecto (Ayer & Westcot, 1994). En la figura 1 se presenta la sensibilidad de las distintas especies a diferentes concentraciones de boro.

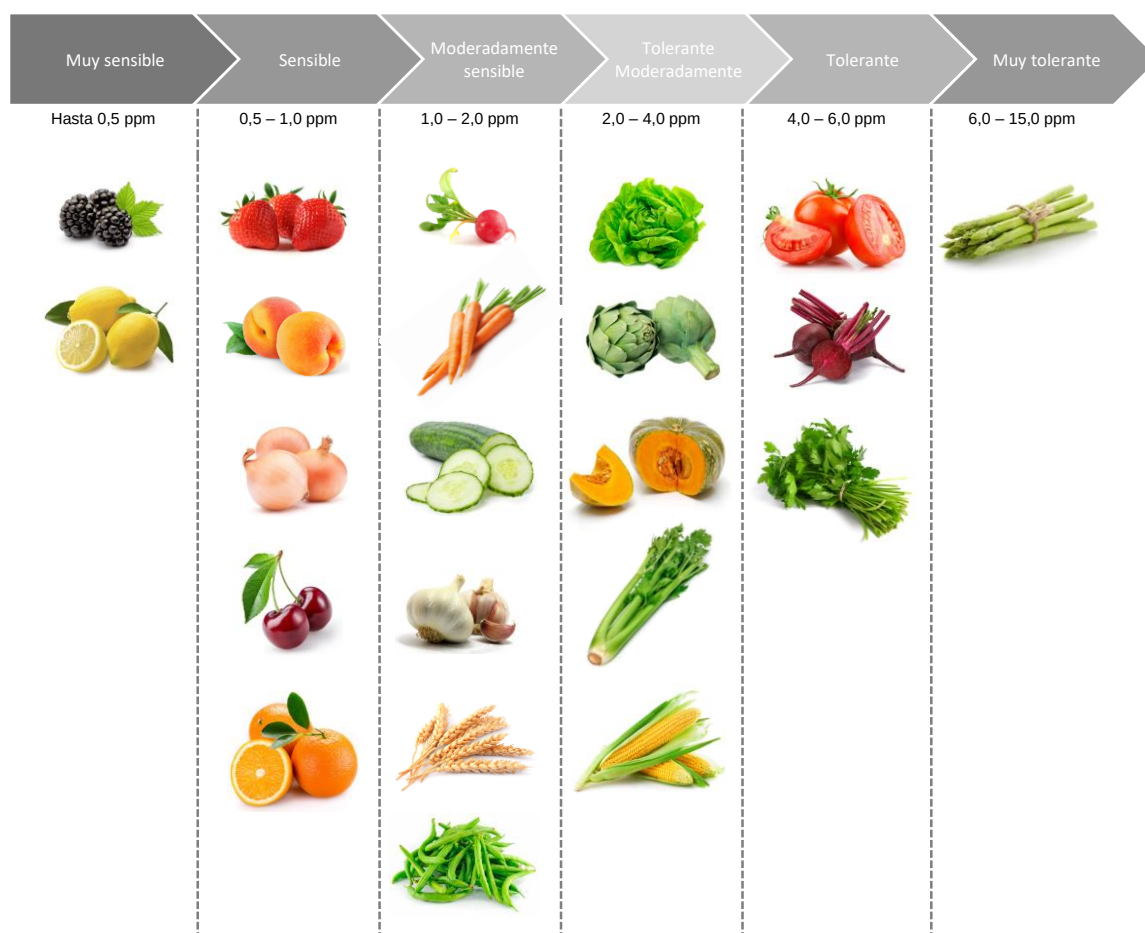


Figura 1. Grupo de cultivos clasificados según su tolerancia al boro.
(Van der Leeden, 1990) & (Servicio Agrícola y Ganadero – Gobierno de Chile, 2002)

El número de especies que son capaces de crecer y producir rendimientos aceptables en medios de alta concentración de boro son por lo general bastantes reducidas. Un amplio número de especies es abarcado en la revisión presente en el anexo 1, “Tolerancia de distintos cultivos a la presencia de boro”, describiendo estos cultivos en términos de susceptibilidad a la salinidad, al boro presente en el suelo y en el agua de riego (Ferreyra, 1997).

El fenómeno tóxico ocurre cuando ciertos compuestos químicos, tomados por la planta desde el suelo o agua de riego, se acumulan en las hojas durante el proceso de transpiración de la planta. El grado del daño depende del tiempo de exposición, así como de la concentración del compuesto toxico, los requerimientos hídricos de la planta y la sensibilidad del cultivo al compuesto.

En los estados más agudos, la presencia sucesiva del boro produce una necrosis progresiva de las hojas. Al comienzo, las extremidades y orillas se colocan amarillas hasta llegar al nervio central, luego estas extremidades y orillas parecen quemadas, hasta que finalmente toda la hoja se verá involucrada hasta su caída prematura (Oertli, 1993).

Pese a que el boro es uno de los elementos más dañinos para las plantas, en las cantidades adecuadas el boro es también uno de los micronutrientes esenciales para el desarrollo y crecimiento adecuado de cultivos, por lo cual su presencia no debe ser omitida por completo (Ayers & Westcot, 1994).

Dentro del marco regulatorio, la normativa chilena NCh. 1.333 Of 78, “Requisitos de calidad del agua para diferentes usos – requisitos de agua para riego”, se recomienda que el agua de riego contenga como máximo 0,75 mg/l de boro presente en su composición. Otras guías existentes establecen que este valor debiese ser aún más estricto no superando los 0,5 mg/l. En el anexo 4, “Normas y guías para agua de riego” se exponen otras normas y recomendaciones para el boro en agua de riesgo.

2.2. Impacto económico y social

En los casos más extremos el contenido de boro puede llegar a valores de 10 a 40 mg/l en algunos ríos del norte del país. Dentro de los sectores agrícolas mayormente afectados por el exceso de boro se encuentran el sector de Lluta y Chiza (ubicados en la región de Arica y Parinacota), cuyas concentraciones en sus cauces naturales, varía entre 10 a 20 mg/l de boro (ver tabla 1). Más extrema es aún la situación en el valle de Camarones, cuyo valor supera los 30 mg/l (ver tabla 2), forzando de manera predominante el cultivo de especies altamente tolerables.

Tabla 1. Concentración de boro en aguas para riego de olivos de distintos sectores del norte de Chile

Sector agua de riego	Fuente de agua	B mg/L
Lluta 1	Canal río Lluta Km. 15	16,6
Lluta 2	Canal río Lluta Km. 25	9,5
Chiza 1	Vertiente canalizada	2,2
Chiza 2	Vertiente en surgencia	1,9
Suca	Vertiente	1,9
Miñi-Miñe	Vertiente	1,3
Quipinta	Vertiente	3,1
Casablanca	Canal río quebrada de Tarapacá	6,0
Loanzana	Canal río quebrada de Tarapacá	4,6
Guatacondo	Vertiente	1,8
Copiapó	Canal río Copiapó.	1,4
Huasco	Canal río Huasco	0,9
Taltal	Pozo	1,2
Toconao	Canal superficial	0,6
San Pedro	Canal superficial	1,1

(Figuerola, 1998).

En la tabla 2 se presenta la concentración de boro en distintas secciones del río Camarones, las cuales se encuentran dentro de la región de Arica y Parinacota.

Tabla 2. Concentración de boro en diferentes secciones del río Camarones.

Sector (Nº de observaciones)	mg B/L
Illapata (12)	6,3 ± 0,9
Taltape (19)	9,4 ± 1,7
Conanoxa (18)	12,0 ± 3,0
Extremo Oriente Hacienda Cuya (19)	13,3 ± 3,6
Baden Hacienda Cuya (18)	17,0 ± 2,5
Puente Cuya (18)	21,2 ± 4,8
Desembocadura (15)	29,1 ± 18,8

(Zumaeta, 1981).

El río que alimenta al valle de Camarones, conocido como río Camarones, posee un caudal anual promedio de 400 l/s, cuya concentración en boro ha llegado a ser reportada en ciertas ocasiones cercana a los 40 mg/l. Producto de la mala calidad de sus aguas, el valle Camarones ha mantenido históricamente una baja productividad agrícola de sus cultivos, viéndose forzada la predominancia de cultivos destinados para forraje, seguido en menor grado de algunos cultivos de

hortalizas, destacándose el cultivo de cebolla y maíz. Gran parte de la salinidad presente en las distintas estaciones monitoreadas reportadas en la tabla 2, es atribuida a los diversos efluentes que desembocan en el río a lo largo de su transcurso.

Al comparar entre el valle de Lluta con el valle de Azapa, los cuales tienen condiciones similares de suelo y clima, es posible observar que la diferencia entre sus productividades agrícolas es bastante notoria, lo cual se refleja en el valor de sus terrenos. El valle de Azapa, cuyas aguas de riego contienen baja concentración de este elemento, contiene una agricultura altamente competitiva y rentable, incluso tomando en cuenta que en Azapa existen caudales de agua incluso inferiores a los que se observan en Lluta. Una hectárea con derechos de agua en el valle de Lluta puede llegar valer entre 3 a 8 millones de pesos, mientras que una hectárea en el valle de Azapa con derechos de agua, pueden llegar a valer entre 12 a 25 millones de pesos (ASITEC, 2008).

Como se puede observar, la rentabilidad potencial del valle de Azapa es al menos 3 veces mayor que la del valle de Lluta, el cual tiene una superficie cultivable de hasta 2.700 hectáreas. Además, el agua disponible para riego en el valle de Lluta se encuentra presente en forma superficial, por lo cual no es necesario invertir en sistemas de bombeo de pozos profundos.

Como ya se mencionó, existen otras zonas agrícolas en las regiones del norte, como el valle de Loa con una concentración de 17 mg/l de boro, y el río Loa, con una concentración de 14 mg/l con 3.500 y 500 hectáreas cultivables respectivamente, que también se encuentran fuertemente afectadas por la presencia del boro.

A pesar de que, en algunas zonas, la cantidad de boro presente en el agua de riego no limita la diversidad de los cultivos, la presencia de este elemento en cantidades considerables podría estar generando paulatinamente daños en los cultivos afectando así el rendimiento productivo del sector. Esta situación se da con mucha frecuencia en los valles de Copiapó, Huasco y Limarí, donde las concentraciones de boro son relativamente bajas (1 a 2 mg/l) pero aun así causan problemas dado por el alto consumo del agua por riego tecnificado aplicado en la zona. (Gerente Zonal UniFrutti, Comunicación Personal, 2006).

Debido a que la mayor frecuencia de boro, en aquellos casos en donde se presenta esta problemática, ronda entre los 2 a 4 ppm se evaluarán ambos valores como parámetros de análisis en el agua de alimentación, contemplando además un valor de 16 ppm para abarcar aquellos casos en donde la presencia del componente se encuentra con mayor abundancia.

2.3. Tecnologías para la remoción de boro

En general existen diversas tecnologías para la desalación del agua, las cuales pueden ser clasificadas en base a su principio de funcionamiento como las tecnologías de desalación térmicas, las tecnologías de membranas o algunas otras híbridas, sin embargo, las tecnologías que han tenido mayor aceptación cuando se trata de agua salobre, son la desalación mediante membranas semipermeables y la tecnología de intercambio iónico. En el anexo 3, Figura 30. “Diagrama de tecnologías para la desalación”, se ilustra en mayor detalle las diferentes tecnologías utilizadas para la desalación del agua.

Tecnologías de intercambio iónico: una de las técnicas más eficaces para eliminar el boro de las soluciones acuosas corresponde a la técnica de adsorción, debido a la simpleza de sus procesos y eficiencia al utilizarse en medios acuosos con baja concentración de boro, sin embargo, esta tecnología posee los inconvenientes de presentar superficies limitadas, estructura de poros desordenadas, y de requerir una estabilidad química y térmica para su uso. Al mismo tiempo, la operación de esta tecnología requiere constantemente la utilización de químicos para desorber y regenerar la matriz de resina, lo que aumenta considerablemente sus costos de operación, sobre todo si se trata de concentraciones de boro muy altas a tratar. Por lo tanto, en esta materia, la investigación se encuentra orientada en la búsqueda de nuevos adsorbentes de boro con bajo costo, aumentos en la superficie de contacto, y mejoras en la estabilidad en el tiempo (Ju, 2000).

Tecnología de Osmosis Inversa: en general esta tecnología ha sido la que ha tenido mayor crecimiento y mejora en cuanto a su eficiencia de recuperación de energía, avances configuracionales, desarrollo en separadores de alimentación de flujo, e implementación de innovadores métodos de diseño de membranas y mejoras sobre sus materiales de construcción (Wang, Guo, & Bai, 2014).

Convencionalmente los sistemas de osmosis inversas poseen una alta remoción de sales, reduciendo por lo general entre un 96 – 99 % la carga iónica del agua salobre, pero con un bajo rechazo de boro (45 – 65%). La baja remoción de boro se debe principalmente a la forma química en la cual este componente es generalmente presentando en aguas salobres. A valores de pH cercanos a la neutralidad, la especie predominante corresponde a ácido bórico, la cual, por el hecho de presentar hidrógenos ácidos y falta de carga en su estructura, es capaz de formar enlaces de puentes de hidrogeno con los grupos activos de la membrana y sin repulsiones de carga (membranas generalmente negativas), presentando una afinidad muy similar a la del agua al atravesar la membrana. (Fernanda & Arias, 2009). Otros sistemas, para aumentar el rechazo de boro, han implementado dentro de su proceso un aumento del valor del pH a condiciones alcalinas ($\text{pH} > 9$), para así modificar la presencia del boro como ion borato (H_2BO_3^-) alcanzando valores de remoción superiores al 90% debido a la exclusión

de tamaño y al cambio de carga, sin embargo, el gran inconveniente de estos sistemas son los pretratamientos para neutralizar las aguas producidas, el costo asociado al incremento de pH, y la conformación de sistemas de dos pasos (doble pasadas) para eliminar previamente los minerales de Ca y Mg para evitar la incrustación por el cambio de pH. (Redondo et al., 2003).

En los últimos años, muchos estudios se han centrado en mejorar la capacidad de eliminación de boro a través del desarrollo de membranas, a tal punto que hoy en día existen membranas desarrolladas en forma específica para la remoción de boro sin ajuste de pH, como por ejemplo la serie ESPAB de Hydranautics construida de poliamida y caracterizada también por su bajo consumo energético, o la serie BW30HR-440i de alto rechazo fabricada por Dow con un 80% de remoción según su especificación técnica; sin embargo, pese a la atribución de esta característica específica declarada por el fabricante a un grupo limitado de membranas, existe una gran cantidad de membranas cuyo desarrollo tecnológico se ha centrado en el desarrollo de otras cualidades (resistencia al ensuciamiento, resistencia química, bajo consumo, alto rechazo, etc), que también presentan una buena remoción de boro como consecuencia de su diseño y que no han sido evaluadas o declaradas por el fabricante respecto a su efectividad de remoción de boro de acuerdo a lo evidenciado en investigaciones y estudios realizados sobre algunas membranas de RO de nueva generación (Farhat et al., 2013) . En la tabla 3 se ilustran algunos resultados de remoción de boro de diferentes investigaciones, bajo condiciones específicas de trabajo.

Tabla 3. Resultado de remociones de boro en distintas investigaciones.

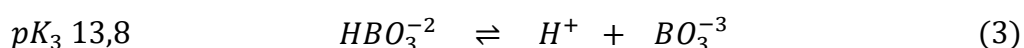
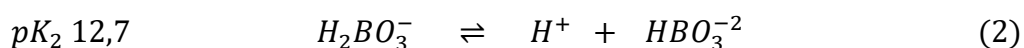
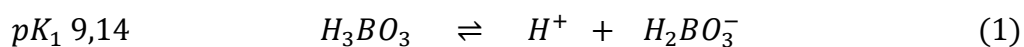
Tipo de membrana	pH	Temperatura (°C)	Condiciones experimentales	Fabricante	% B rem.	Tipo de estudio	Año
BW-30 ¹	7,5 - 8,1	23,5 - 23,8	828 - 1.773 ppm (TDS), 1,5 - 2,6 ppm de boro, 150 psi y 0,45 m/s	Dow	87%	Escala de laboratorio	2012
GE-AK ¹	7,6 - 7,8	22,5 - 24,9	1.300 -1.644 ppm (TDS), 1,0 - 1,6 ppm de boro, 150 psi y 0,45 m/s	GE	58%	Escala de laboratorio	2012
TFC-8040 ¹	7,2 - 7,4	22,4 - 23,4	917 - 1.409 ppm (TDS), 1,2 - 1,5 ppm de boro, 150 psi y 0,45 m/s	Koch	75%	Escala de laboratorio	2012
BW-30-LE ¹	6,6 - 7,0	23,5 - 24,6	1801 - 2090 ppm (TDS), 1,1 - 1,5 ppm de boro, 150 psi y 0,45 m/s	Dow	55%	Escala de laboratorio	2012
UTC-BW ¹	7,3 - 7,9	23,0 - 23,9	1587 - 2005 ppm (TDS), 0,8 - 1,1 ppm de boro, 150 psi y 0,45 m/s	Toray	73%	Escala de laboratorio	2012
XR ¹	8	29	2000 ppm (TDS), 5 ppm de boro, 150 psi	Koch	79%	Simulaciones	2012
UTC-BW ¹	7,3	24	2000 ppm (TDS), 1 ppm de boro, 150 psi	Toray	75%	Simulaciones	2012
BW-30 ²	5,5		290 psi, 5,1 ppm de boro	Dow	75%	Planta piloto	2008
GE-AG ²	5,5		290 psi, 5,1 ppm de boro	GE	80%	Planta piloto	2008
BW30-400 ³	8	25	2000 ppm NaCl, 225 psi	Dow	65%	Datos de archivos	2003
BW30LE ³	8	25	2000 ppm NaCl, 150 psi	Dow	55%	Datos de archivos	2003
SUL-C10 ⁴	9,5		Agua salobre con 4 ppm de boro	Toray	60%	Planta piloto	2001

(¹ Farhat et al., 2013; ² Tu et al., 2010, ³ Redondo et al., 2003, ⁴ Rodríguez et al., 2001)

2.4. Química del boro

El boro es un elemento químico perteneciente al grupo IIIA del sistema periódico. Su número atómico es el 5 y su peso atómico de 10,81. Presenta una química compleja, más similar a la del silicio (grupo IV) que a la del resto de los elementos de su grupo. Debido a sus características, no es posible encontrarlo en forma elemental en la naturaleza (IUPAC, 1998).

El boro presente en el agua se encuentra de forma natural como ácido bórico (H_3BO_3) o ion borato ($H_2BO_3^-$), formando un equilibrio en el que la especie predominando es el ácido bórico, debido a que el ácido bórico corresponde a un ácido muy débil con una constante de disociación de pK_a 9,14. Sin embargo, a pH superiores a 10, el anión metaborato o ion borato comienza a ser la especie predominante.



La concentración total del boro presente en el agua, la cual incluye a todas las especies en términos de peso en unidades de volumen, puede ser expresada de la siguiente manera:

$$B_{total} = [H_3BO_3] + [H_2BO_3^-] + [HBO_3^{2-}] + [BO_3^{3-}] \text{ mg/l} \quad (4)$$

Las distintas especies de borato, acorde a lo señalado en las ecuaciones (1), (2) y (3), son presentadas en la figura 2 como función del pH.

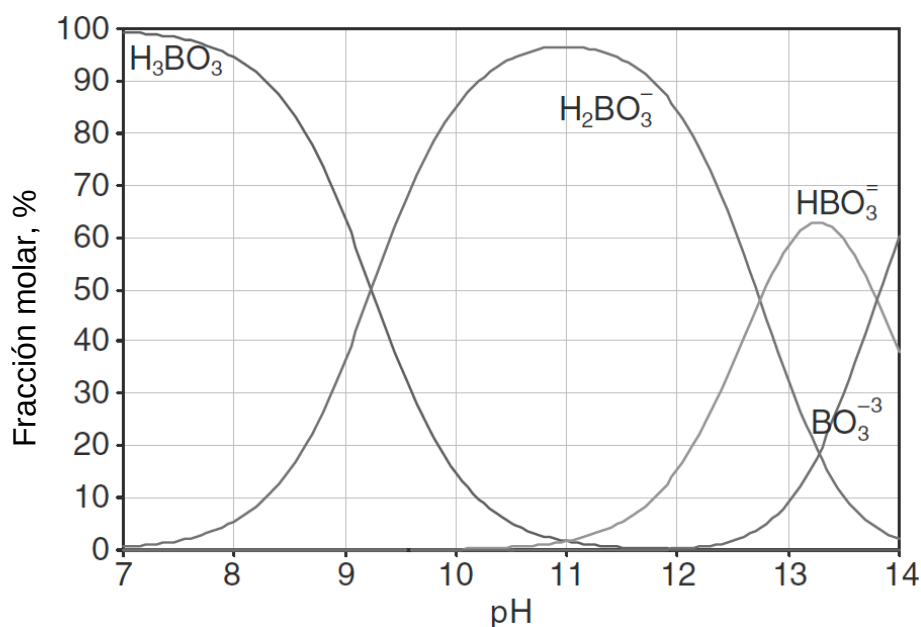


Figura 2. Disociación de las distintas especies químicas del boro.
(Faigon & Hefer, 2008)

Capítulo 3. Membranas de Osmosis Inversa

En este capítulo se tratará en forma específica los diferentes tipos de membranas de osmosis inversa desarrolladas, junto a una revisión de los materiales de construcción, clasificación en base a su aplicación o uso, avances tecnológicos, y fabricantes de membranas comerciales. Uno de los objetivos de este apartado es poder entregar algunos criterios de selección de membranas, junto a información útil para comparar y analizar las características de las membranas resultantes del estudio.

3.1. Tipos de membranas

Existen básicamente 6 diseños diferentes de módulos de membrana:

1. Módulos tubulares con diámetros de canal mayor que 3 mm (*tubular modules*)
2. Módulos de fibras huecas o de capilares hechos de tubos auto-portantes, por lo general 2 mm o menos que el diámetro interno. (*hollow fiber or capillary modules*)
3. Módulos en enrollados en espiral (*spiral-wound modules*)
4. Módulos de placas (*plate modules*)
5. Módulos de lámina plegada (*pleated sheet modules*)
6. Módulos giratorios (*rotary modules*)

De los diseños de membranas mencionados, los últimos cuatro utilizan laminas planas de membrana en varias de sus configuraciones. En este capítulo se detalla la información de los principales módulos de membranas utilizados en sistemas de RO para desalinización de agua, los cuales corresponden a los módulos tubulares, de fibra hueca y los módulos enrollados en espiral.

3.1.1. Módulos tubulares

En este tipo de modulo, un numero de membranas de forma tubular son encasilladas en un contenedor. La solución de alimentación fluye a través de los tubos mientras el flujo de permeado pasa a través de los poros contenidos en la cavidad. Los módulos tubulares son adecuados por lo general para flujos de alimentos con alta concentración de sólidos en suspensión, tales como jugos de cítricos y los flujos de residuos animales. Las principales características de los módulos tubulares son:

- Facilidad en el reemplazo de membranas
- Facilidad de limpieza en la superficie de contaminación
- Alto consumo de energía por unidad de fluido tratado
- Densidad de empaquetamiento bajas
- Alto flujo que permite reducir la contaminación de membranas
- Simple pretratamiento del flujo de alimentación

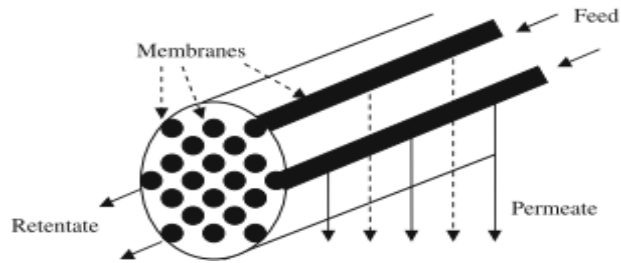


Figura 3. Esquema de un módulo tubular.

3.1.2. Módulos de fibra hueca

Los módulos de membrana de fibra hueca están constituidos de un gran número de fibras montadas juntas en un módulo. Los extremos libres de las fibras son estructuras con agentes tales como resinas epóxicas, poliuretano o gomas de silicona. Son adecuadas para corrientes de alimentación relativamente limpias con bajas concentraciones de sólidos y macromoléculas suspendidas, como en la separación de gas. También son utilizadas bastante para la desalinización del agua de mar, en donde es necesario un módulo de pretratamiento. Las principales características de los módulos de fibra hueca son:

- Presentan densidades muy altas de embalaje
- Bajo consumo de energía
- Bajo costo de inversión
- Difícil limpieza
- Baja resistencia a las fallas

Por lo general hay dos tipos básicos de arreglos para este módulo:

1. Inside-out: la solución alimentada pasa por el interior de la fibra y el permeado es colectado por afuera de la fibra.
2. Outside-in: la solución alimentada pasa por el exterior de la fibra y el permeado es colectado en el interior de la fibra.

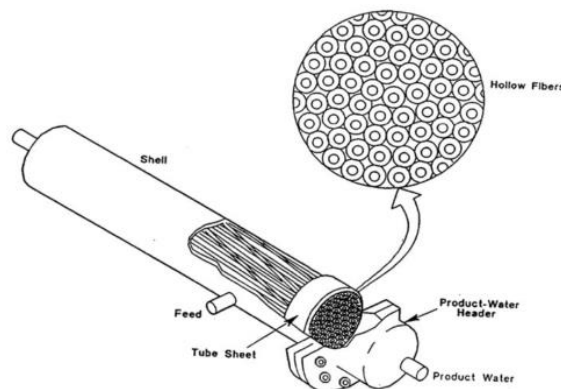


Figura 4. Esquema de un módulo de fibra hueca.

3.1.3. Módulos enrollados en espiral

El módulo en espiral es en realidad un sistema de placa-marco envueltas en torno a una tubería de colección central. La alimentación fluye a través del módulo cilíndrico en paralelo a lo largo de la tubería central. A su vez, la impregnación fluye en forma radial hacia la tubería central. Para hacer la membrana de longitud más corta se utilizan varias membranas en forma simultánea a la vez. Las principales características de los módulos en espiral son:

- Estructura compacta
- Buena resistencia a presiones elevadas
- Menos contaminación
- Menos caída de presión en el canal de permeado
- Concentración mínima de polarización

Usualmente un número de módulos en espiral son montados en un recipiente a presión, siendo conectados por la tubería central de permeado. Su uso es preferible para corrientes con pocos sólidos en suspensión debido al uso de espaciadores en sus canales de alimentación. Por otro lado, estos módulos son los de más bajo costo y consumo de energía. La tendencia en la industria de alimentos y bebidas parece estar enfocada hacia este tipo de módulos (Kucera, 2015).

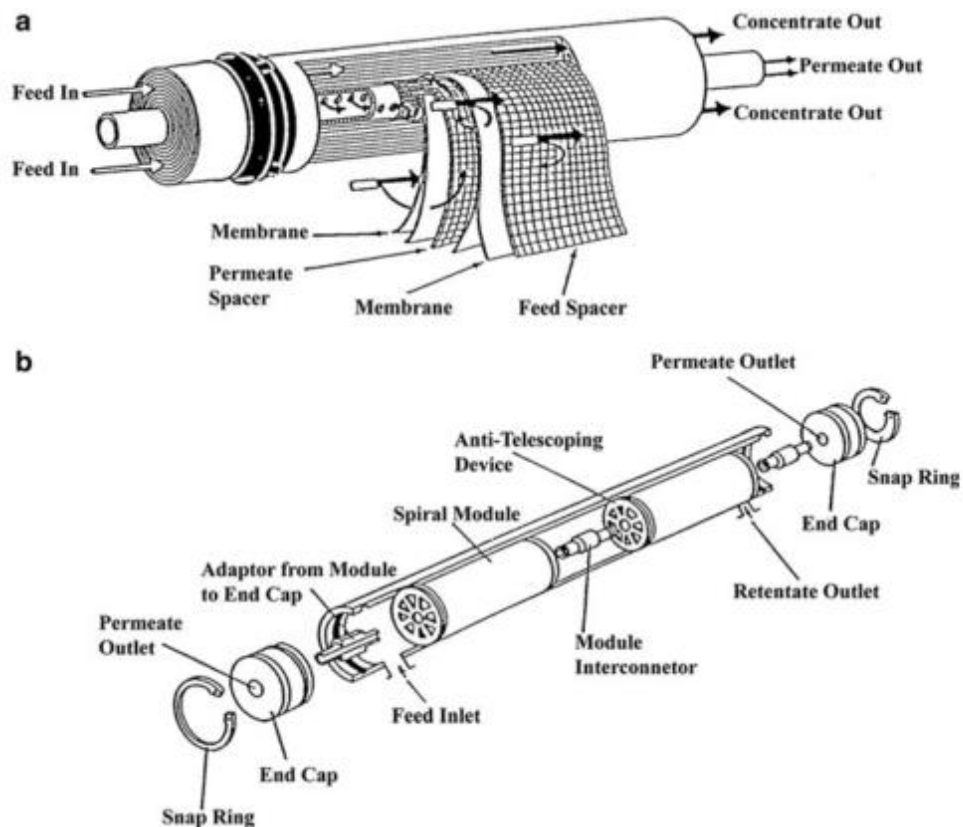


Figura 5. Esquema de un módulo en espiral.

A continuación, se presenta una tabla resumen en donde se comparan los módulos descritos en este capítulo, a modo tener en cuenta sus principales atributos.

Tabla 4. Resumen de las características de los módulos de membrana.

Tipo de modulo	Tubular	Fibra hueca	Espiral
Tamaño de canal (mm)	> 10	< 3	< 1,5
Espaciador	No	No	Si
Prefiltración	No	Si	Si
Tipo de flujo	Turbulento	Laminar	Turbulento
Flujo	Alto	Intermedio	Bajo
Área / volumen	Baja	Alta	Alta
Densidad empacado (m ² /m ³)	30-200	500 - 9,000	200-800
Energía / flujo	Alta	Intermedia	Baja
Resistente al ensuciamiento	Muy buena	Pobre	Moderada
Facilidad de limpieza	Excelente	Pobre	Mala
Variedad de materiales de construcción	Pocas	Pocas	Muchas
Costo relativo	Alto	Bajo	Bajo
Aplicaciones	RO, UF	D, RO, GS, UF	D, RO, PV, UF, MF

(Elaboración propia, año 2018)

Los módulos en espiral y de fibra hueca son los módulos de membrana más usados normalmente, siendo la unidad en espiral destacada en sistemas de agua salobre por la capacidad de flujos capaces de procesar pese a la mayor superficie por unidad de volumen que las membranas de fibra hueca ofrecen.

3.2. Materiales de fabricación

En base a su composición y estructura, una membrana también puede ser clasificada como simétrica o asimétrica, solida o liquida, como también puede clasificarse por su carga positiva, negativa o neutra, sin embargo, cuando se trata de sus materiales de fabricación por lo general se hablan de membranas homogéneas (uniformes en su composición y estructura física, también conocidas como isotrópicas) o heterogéneas (no uniformes en toda su sección transversal o anisotrópica). Esta última, por lo general consisten en varias capas (Melrose, Perroy, & Careas, 2015).

Existe una amplia gama de materiales de membranas disponibles para la purificación de agua y tratamiento de aguas residuales, sin embargo, para sistemas de agua salobre las membranas utilizadas son generalmente fabricadas

a partir de acetato de celulosa (CA) y de películas finas de polímeros (TFC) con poliamidas aromáticas (PA). Las membranas TFC consisten típicamente en tres capas, una capa selectiva de poliamida ultrafina, una capa de soporte microporosa y un sustrato de tejido de poliéster. (Li et al., 2016).

En los últimos años, se han fabricado nuevas membranas de RO con un diseño especial para el tratamiento de agua rica en boro, por medio de una capa selectiva ajustada con una afinidad reducida por el boro y una mayor afinidad por el agua. Entre algunos de los materiales utilizados que tratan esta selectividad se tiene el hexafluoroalcohol (HFAPA) utilizado sobre la superficie de las capas de poliamida convencional en membranas TFC, el monómero de diamina sulfona dipolar 4,4 – (1;2 etanodiildimino) bis (ácido bencenosulfónico) (EDBSA) por medio de una polimerización interfacial, y el metacrilato de glicidilo (GMA) mediante injerto de radicales con concentración de polarización en una solución diluida (Li et al., 2016).. Como estos casos, existen aun varios materiales que, en conjunto con el método de fabricación, otorgan a las membranas una mayor selectividad y rechazo de boro, sin embargo, dado que los materiales de construcción representan en parte la diferencia del valor agregado comercial en sus productos, esta información es por lo general omitida dentro de la especificación técnica de los módulos comerciales.

3.3. Modificaciones sobre sus métodos de fabricación

Las mejoras en el rendimiento global de las membranas se basan en la modificación del material de construcción o en su estructura. Los objetivos para la modificación de las membranas son aumentar el flujo, la selectividad y la resistencia química (resistencia a los disolventes, resistencia a la inflamación y la resistencia a las incrustaciones). Algunos de los métodos de modificación de membranas más comúnmente practicadas se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Listado de métodos de modificación de membranas.

Métodos de modificación	Efecto
Tratamiento térmico	Diminución del tamaño de poro
Tratamiento con solvente	Mejora en resistencia a incrustaciones
Fluoración	Mejora en selectividad y reducción de flujo
Pirolisis	Mejora en rendimiento de remoción

(Melorose, Perroy, & Careas, 2015)

El tipo de tratamiento es fundamental para general de manera específica el desarrollo de la selectividad en una membrana, lo cual depende en gran parte de la química de los componentes utilizados, junto a la iteración entre los tratamientos descritos en la tabla 5.

Otro tipo de mejoras a nivel de método de fabricación y diseño es realizado en los separadores de alimentación del flujo, los cuales permiten distribuir el flujo

reduciendo el ensuciamiento y mejorando la superficie de interacción del fluido con la membrana (Kucera, 2015).

Hoy en día, los fabricantes de membrana invierten bastantes recursos en innovación y desarrollo de membranas con mejoras en cuanto a su rendimiento, sin embargo, el detalle del método de fabricación utilizado por el fabricante, al igual que los materiales de fabricación, no es una especificación propiamente tal en la ficha técnica de sus membranas, limitando la evaluación de los rendimientos únicamente a los atributos adquiridos y tipo de membrana.

3.4. Clasificación de membranas de agua salobre

Las membranas de agua salobre están diseñadas para tratar aguas de alimentación de baja salinidad, de hasta 4.000 a 5.000 ppm (TDS) pese a mayores valores de sólidos presentes en este tipo de agua (ver Diagrama 2). La presión máxima de funcionamiento para membranas de agua salobre es típicamente de 600 psi. Estas membranas se prueban típicamente en las siguientes condiciones:

- Concentración de agua de alimentación: 1.500 a 2.000 ppm de NaCl (las membranas de baja energía se prueban a 500 - 2.000 ppm de NaCl)
- Presión de funcionamiento: 225 psi (las membranas de baja energía se prueban a 100 - 150 psi)
- Temperatura: 22 ° C
- pH del agua de alimentación: 6,5 - 7
- Recuperación por módulo: 15%

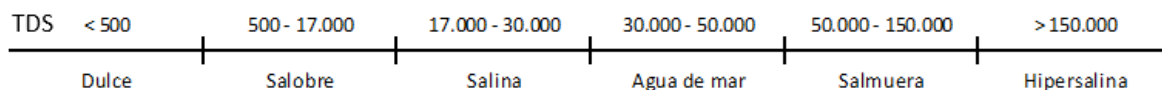


Diagrama 2. Clasificación de la calidad del agua respecto a su contenido salido.

Dado que no hay una condición de prueba uniforme para todas las membranas de agua salobre, los valores citados anteriormente deberán ser tomados como referencia. Una comparación directa entre fabricantes requerirá de una revisión más exhausta de las condiciones de la prueba (Kucera, 2015).

En general, las características atribuidas a cada membrana son producto o consecuencia de tres factores: su estructura (espiral, fibra, etc), su composición, y el método por el cual haya sido fabricada. Al momento de diseñar y construir una membrana, se deberán verificar sus características y condiciones de operación por medio de pruebas de desempeño, siendo posteriormente clasificada de acuerdo a las condiciones de pruebas aprobadas y atributos evidenciados. A continuación, se presentarán las distintas clasificaciones de membranas de agua salobre utilizadas en el mercado junto a sus aspectos de mayor interés

3.4.1. Membranas de baja energía

Las membranas de bajo consumo son diseñadas para poder reducir la energía requerida para producir el permeado. En la mayoría de los casos, estas membranas presentan una productividad similar a las membranas de RO estándar, pero a presiones de operación relativamente más bajas (≤ 150 psi). Una menor presión de trabajo es una ventaja cuando los costos de energía son altos o cuando la temperatura del agua de alimentación es baja, debido a que a menor temperatura el caudal de agua decrece si la presión se mantiene constante. Una limitación en las membranas de baja presión es que el rechazo es menor en comparación a las membranas estándar de agua salobre. En algunos casos, se puede llegar a niveles en donde el rechazo es la mitad del rechazo producido en membranas de agua salobre estándar (Kucera, 2015).

3.4.2. Membranas de alto rechazo

Las membranas de agua salobre de alto rechazo ofrecen varias décimas de un porcentaje de rechazo mayor que las membranas de agua salobre estándar. Mientras que el rechazo estándar es típicamente cerca de 99,0% a 99,5%, las membranas del alto rechazo pueden alcanzar remociones tan altas como de 99,75%. Pasar de 99,5% de rechazo (0,5% de paso de sal) a 99,7% de rechazo (0,3% de paso de sal) disminuye el paso de sal en un 67%, lo cual puede ser crítico en aplicaciones de alta pureza (Kucera, 2015).

3.4.3. Membranas de bajo ensuciamiento

Membranas de bajo ensuciamiento son ofrecidas por algunos fabricantes. Estas membranas pueden ser modificadas de varias maneras para reducir el potencial ensuciamiento por agentes contaminantes presentes en el agua de alimentación.

Un ejemplo de una membrana de baja incrustación es la membrana compacta LFC3-LD de baja ensuciamiento de Hydranautics. Esta membrana presenta el mismo rendimiento que la membrana estándar de alto rechazo Hydranautics CPA3, pero un rechazo ligeramente superior. La principal diferencia se encuentra en la carga superficial de la membrana. La membrana estándar de agua salobre tiene una carga negativa, mientras que la membrana de baja incrustación tiene una carga superficial neutra. Esto minimiza el ensuciamiento provocado por polímeros catiónicos, así como por otras especies cargadas positivamente que podrían ensuciar la membrana cargada negativamente. Adicionalmente, los módulos de membrana para este tipo de aplicación son por lo general construidos con sistemas de alimentación de 31 mil espaciadores en comparación a los espaciadores estándar de 28 mil. Espaciadores más gruesos son aún más tolerantes al ensuciamiento de sólidos en suspensión en comparación a los espaciadores más delgados (Kucera, 2015).

3.4.4. Módulos de membrana de baja presión diferencial

Los módulos de membrana de baja presión diferencial pueden considerarse como un subconjunto de las membranas de bajo ensuciamiento, las cuales operan a valores por debajo de los 150 psi. La particularidad de los módulos de membrana de baja presión diferencial es que por lo general poseen espaciadores de alimentación más gruesos. En lugar del espaciador estándar de 28 mil de espesor, estas membranas de baja presión diferencial tienen espaciadores de espesor de 31 o 34 milésimas de pulgada. Lo cual genera menos resistencia al flujo a través de los canales de alimentación, dando como resultados menores caídas de presión a través de los módulos de membrana. Además, los canales de alimentación son obstaculizados con menor frecuencia con sólidos en suspensión, impurezas e incrustaciones (Kucera, 2015)..

Ejemplos de módulos de membrana de baja presión diferencial son FilmTec BW30-400-34i (con un separador de alimentación de 34 mil) e Hydranautics CPA3-LD (con un espaciador de alimentación de 31 mil).

3.4.5. Módulos de membrana de alta productividad

Los módulos de membrana de alta productividad poseen un área mayor de membrana en comparación con las membranas de agua salobre estándar a pesar de encajar en el mismo módulo de membrana de tamaño. Para conseguir membranas con una mayor área, es necesario utilizar técnicas de ensamblaje de módulos más sofisticadas. La instalación cuidadosa de las líneas de pegamento en las hojas de la membrana junto al montaje automatizado de módulos, son dos mejoras en el ensamblaje del módulo que han permitido incluir más área a las membranas. Mientras que una membrana estándar de agua salobre posee típicamente alrededor de 365 ft² de área de membrana, los módulos de membrana de alta productividad pueden llegar a valores de 400 ft² o hasta de 440 ft² de área de membrana. La productividad fuera del módulo de membrana es mayor debido al área adicional de la membrana. En general, un módulo de membrana de 400 ft² produce aproximadamente un 10% más de permeado que un módulo de membrana de 365 ft² bajo condiciones operativas similares (Water & Process Solutions FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, n.d.).

3.4.6. Membranas para remoción de boro

Las membranas de nueva generación desarrolladas para remoción de boro exhiben hasta alrededor de un 80% de rechazo (sin requerir de ajustes sobre el pH), mientras que las membranas estándar o convencionales rechazan generalmente entre 45 – 65% (Li, Yan, & Wang, 2016). Las membranas para boro son generalmente de TFC enrolladas en espiral, en donde la capa selectiva es desarrollada con materiales que reducen la afinidad por el boro o alteran la carga eléctrica para mejorar la repulsión (ver capítulo 3.2. “Materiales de fabricación” y

3.3. “Modificaciones sobre sus métodos de fabricación”. Para una mayor revisión sobre la interacción química del boro sobre la membrana revisar capítulo 2.3. “Tecnologías para la remoción de boro”.

3.4.7. Membranas sanitarias y de alta temperatura

Existen más tipos de membranas y módulos disponibles, los cuales poseen aplicaciones particulares que membranas estándar no son capaces de realizar como las desarrolladas para procesos sanitarios.

Membranas sanitarias: estos módulos tienen una envoltura exterior especial en lugar de la envoltura estándar de fibra de vidrio y se denominan a veces módulos de ajuste completo. Estos módulos están diseñados con un bypass (sin sellos) que permite eliminar las áreas estancadas o "muertas" dentro de los módulos donde las bacterias pudiesen crecer y las impurezas pudiesen acumularse. Típicamente 20% del flujo de alimentación pasa por los módulos de membrana. Además, estos módulos funcionan con patrones de flujo cruzado más altos a presiones diferenciales más altas para mantener mejor la limpieza. Estas membranas son menos eficientes que los módulos RO convencionales enrollados en espiral. Algunos módulos de membrana sanitaria pueden ser desinfectados por períodos cortos de tiempo a temperaturas de hasta 85 °C (Kucera, 2015).

Membranas de alta temperatura: la mayoría de las membranas de alta temperatura son básicamente las mismas que las membranas estándar sanitarias de RO. La diferencia principal entre ambas membranas es que los módulos de membrana de alta temperatura vienen revestidos con un envoltorio adicional (en lugar de fibra de vidrio), y algunos de sus materiales, tales como adhesivos y separadores de flujo, son fabricados para favorecer las condiciones de mayor temperatura y presión cuando se presentan con mayor frecuencia en su operación (Kucera, 2015).

3.5. Criterios de selección de membranas

Cada uno de los diseños de módulos tiene sus propias aplicaciones especiales, ventajas y desventajas. En la selección de un módulo junto a su arreglo configuracional, se deben considerar normalmente los siguientes aspectos:

1. Características de corriente de alimentación que puedan afectar la biocompatibilidad de las membranas.
2. Requisitos de flujo de la corriente de alimentación.
3. Requisitos de rechazo, en cuanto a objetivos y eficiencia requerida.

Adicionalmente se deberá considerar en forma operacional, la facilidad de limpieza, la facilidad de manteniendo y la posibilidad de remplazo de las membranas. Una revisión más detallada sobre las membranas evaluadas en este estudio es realizada en el capítulo 5.5. “Selección de membranas”.

Capítulo 4. Fabricantes de membranas y softwares de simulación

Como se revisó anteriormente existen varios tipos de membranas para diversas aplicaciones, las cuales a son clasificadas en base a sus materiales, composición, y características funcionales por sus distintos fabricantes. A continuación, se presenta una recopilación de los principales fabricantes de RO industriales presentes en el mercado.

Tabla 6. Principales fabricantes de membranas de RO industriales.

Productores	Marca	Ubicación
Applied Membranes	AMI	Estados Unidos
Axeon		Estados Unidos
Big Brand Water Filter Inc		Estados Unidos
DDS		Dinamarca
Dow Water & Process Solutions	FilmTec™	Estados Unidos
Du Pont	Permasep Products	Estados Unidos
GE's Water & Process Tech. (SUEZ)	Desal, Osmonics	Estados Unidos
Hydranautics		Estados Unidos / Japon
Inge Watertechnologies AG		Alemania
Koch Membrane Systems	Koch, Fluid System	Estados Unidos
Lanxess AG	LewaBrane®	Alemania
LG NanoH ₂ O		Corea / Estados Unidos
Mann-Hummel Fluid		Brasil
Membranium		Rusia
Microdyn Nadir	NADIR®	Alemania
Millipore Membranes		Estados Unidos
Nanostone Water		Estados Unidos / Alemania
Osmosis Technology	Osmotik	Estados Unidos
Parker membranes		Estados Unidos
Pentair RO membranes	X-Flow	Estados Unidos
Pentair X-Flow		Países Bajos
Ropur membranes		Suiza
Sumitomo Chemical Co	POREFLON™	Japon
TCK Membrane America (Toray)	CSM®	Corea / Estados Unidos
Toray Company	ROMEMBRA®	Estados Unidos / Japon
Toyobo	HOLLOSEP®	Japon
TriSep Corporation (Microdyn)		Estados Unidos
US Filter/Memtec		Estados Unidos
Ultura	SEPRO	Estados Unidos

(Elaboración propia, año 2018)

Muchos fabricantes de membranas crean sus propias marcas registradas, las cuales en muchos casos han sido traspasadas o heredadas a otras compañías por cambios organizacionales o adquisiciones sobre los derechos de está. Este es el caso por ejemplo de TCK Membrane America, la cual es adquirida en abril del 2016 por Toray Company, Toray continúa manteniendo la venta de membranas bajo la marca de CSM®. También está el caso de GE's Water & Process Technologies (Desal y Osmonics), la cual es adquirida por SUEZ en septiembre del 2017. Otro gran cambio a nivel organizacional es el de TriSep, compañía que es adquirida en noviembre del 2016 por Microdyn Nadir. Cabe destacar que muchas veces, independiente del modelo o la marca, las membranas cumplen con las mismas características tanto, así como en sus métodos como en los materiales de construcción, aunque esto resulta ser más difícil de averiguar debido a la limitada información que el fabricante dispone de sus membranas.

De todos los fabricantes expuestos en la tabla 6, sólo 10 de ellos disponen de softwares de simulación propios y extendidos para el público en general, para el diseño y evaluación de sistemas de osmosis inversa utilizando sus membranas específicas. En la tabla 7 se presentan los distintos programas de diseño dispuesto por cada fabricante de RO.

Tabla 7. Programas de diseño de los distintos fabricantes de membranas RO.

Nº	Fabricante de membrana	Programa software de diseño	Versión	Última actualización
1	Hydranautics	IMSDesign (Integrated Membrane Solution TM)	217.74	Ene, 2017
2	Dow Water Solutions - FilmTec	WAVE (Water Application Value Engine)	1.50	Ene, 2018
3	Toray Membrane	TorayDS2 (Toray Design System)	2.0.11.136	Nov, 2017
4	TCK Membrane America (Toray)	CSMPro (Customer Satisfaction Membrane)	5.0	Ene, 2018
5	GE's Water & Process Tech. (SUEZ)	Winflows	3.3.2	Jul, 2016
6	Koch Membrane System*	KMS ROPRO®	8.05	Oct, 2010
7	TriSep Corporation (Microdyn Nadir)	TROI	2.5.0	Dic, 2017
8	Microdyn Nadir	ROAM	1.0.0	Dic, 2017
9	Lanxess Energizing Chemistry	LewaPlus®	1.15.0	Dic, 2017
10	LG Chem Nanocomposite	NanoH ₂ O	2.4	Ene, 2017

(Elaboración propia, 2018)

(*) El software de Koch dejó de estar disponible para el público en general vía descarga directa.

De los 10 programas señalados en la tabla 7, sólo 7 de ellos son considerados en esta evaluación. Los softwares TROI y ROAM son dejados fuera de revisión debido a que dentro de su diseño no se contempla la remoción de boro como parámetro de análisis, mientras que el programa KMS ROPRO no es considerado debido a que la versión del software no ha sido actualizada desde el año 2010.

Regularmente los programas de diseño realizan actualizaciones periódicas una vez al año, si es que no es más seguido. En el momento que la segunda edición es publicada, la versión del programa pasara a estar obsoleta.

En general, la selección del software a utilizar depende totalmente del diseñador, siendo en la mayoría de los casos recomendable ejecutar varios programas y comparar las diferencias entre ellos para seleccionar que tipo de sistema cumple con los requisitos de la aplicación de interés. Aunque cada programa es único en base a las membranas de su fabricante en particular, existen varias similitudes en su forma de trabajo. Cada paquete de software, aunque difieren en su presentación, ofrecen los mismos resultados: diseño de la unidad de RO, incluyendo matriz de arreglo, presión de funcionamiento, índices de incrustación, y cualidades del agua producida y concentrada. Los softwares en general dan aviso cuando se sobrepasen los parámetros de funcionamiento básicos del sistema, tales como altos niveles de recuperación o bajo flujos de concentrado en base al sistema y membranas evaluadas.

A continuación, se presenta una breve descripción de los 7 softwares que son evaluados en esta revisión junto al detalle de sus parámetros de entrada, alcance y algunas otras consideraciones relevantes a tener en cuenta para su uso de acuerdo a la revisión realizada en cada uno de ellos.

4.1. Hydranautics - IMSDesign

El programa IMSDesign permite simular el comportamiento de membranas de RO y NF disponibles por Hydranautics. Una de las principales ventajas de este programa es que sugiere al usuario una cantidad de bastidores y de módulos recomendada.

En las figuras 6 y 7, se presentan las visualizaciones del programa para los valores de entrada al sistema tanto para las características del agua a tratar, como para los parámetros de diseño base.

Además de los iones presentados en la figura 6, el programa también permite especificar algunos iones especiales como cobre, cromo, manganeso, fierro, cobalto, níquel, molibdeno, bromo, yodo y azufre; y seleccionar la temperatura de alimentación como target de ajuste. Una vez ingresados todos los valores considerados respecto a la calidad del agua de alimentación, el programa entregara como resultado la cantidad de TDS, la presión osmótica y el índice de Langelier para las condiciones del agua establecidas.

pH	7,50	CO3	0,000	mg/l	CO2	0,006	mg/l	Conductividad	0,1	µs/cm
----	------	-----	-------	------	-----	-------	------	---------------	-----	-------

Cationes			Aniones		
	mg/l	mg/l CaCO3		mg/l	mg/l CaCO3
Ca	0,00	0,00	HCO3	0,10	0,08
Mg	0,00	0,00	SO4	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	Cl	0,00	0,00
K	0,00	0,00	F	0,00	0,00
NH4	0,00	0,00	NO3	0,00	0,00
Ba	0,000	0,00	PO4	0,00	0,00
Sr	0,000	0,00	SiO2	0,00	
	0,000	0,00	B	0,00	
	0,000	0,00		0,000	0,00
	0,000	0,00		0,000	0,00
Total, meq/l		0,00	Total, meq/l		0,00

Saturaciones		
TDS Calculado	0,100	mg/l
Presión osmótica	0,0	bar
Ca3(PO4)2 SI	0,00	
CCPP	0,00	mg/l
Langelier SI	0,0	
CaSO4	0,0	%
BaSO4	0,0	%
SrSO4	0,0	%
CaF2	0,0	%
Silica	0,0	%

Figura 6. Interface del software IMSDesign – valores de entrada características del agua de alimentación.

Trenes		Paso1	Paso1	
pH alimentación		7,00	Producto químico	None
Conversión	%	0,00	Concentración de la solución,%	100
Caudal de permeado / tren,	m3/h	0,00	Tasa de dosificación de productos químico	mg/l
Flujo promedio	lmh	0,000	Edad membrana	años
Caudal de alimentación,	m3/h	0,00	Disminución Fluj por año	5,00
Caudal de rechazo	m3/h	0,00	Factor de ensuciamiento	1,00
			Incremento de paso de sales/año, %	7,0

Especificación del Sistema		
Tipo de elemento	Etapas	2
Elementos / tubo de presión	Paso1	
Nº de tubos de presión		

Figura 7. Interface del software IMSDesign – valores de entrada de los parámetros de diseño.

Una vez definida las condiciones del fluido de alimentación se deberá definir los valores y parámetros requeridos por el sistema en la sección de diseño (ver figura 7). La información mínima requerida a ingresar se detalla a continuación.

1. Flujo permeado.
2. Recuperación del sistema.
3. Número de pasos, con un máximo de 2 pasos.
4. Número de etapas, con un máximo de 6 etapas por paso.
5. Número de contenedores a presión por etapa.
6. Número de membranas por contenedor a presión. El programa restringe este valor entre 1 a 8 elementos.
7. Elección de membrana. El software extiende una nueva ventana para mostrar los modelos disponibles por el sistema, junto a las especificaciones de cada elemento.

Otros factores que son posibles especificar o incluir en el programa son expuestos a continuación.

- pH y dosificación de químicos. Es posible ajustar el valor de pH adicionando HCl, H_2SO_4 y NaOH en la corriente de alimentación.
- Vida útil membrana. Se puede definir la utilidad de las membranas, lo cual, en términos prácticos representa indirectamente el rendimiento considerado por el usuario para las membranas en base a su posible ensuciamiento y/u operación.
- Disminución del flujo por año. Corresponde al valor porcentual recomendado en base a la calidad del agua. Se define como el factor de ensuciamiento.
- Incremento del paso de sal por año. Corresponde a un valor recomendado en base a la calidad del agua, el cual es útil para proyectar el rendimiento en el tiempo.
- Recalculo del arreglo seleccionado. Como se mencionó al inicio de este capítulo, el software permite ajustar el arreglo seleccionado por uno más apropiado en base a las condiciones previas establecidas.
- Presión de permeado por etapa. El ingreso de este valor repercutirá directamente sobre la calidad del agua y el factor Beta.
- Presión de compensación, o también llamada bomba booster. Corresponde a la presión que debe ser solventada para la alimentación del siguiente paso o etapa en el sistema.
- Dispositivo de recuperación de energía. Es posible establecer una turbina o un intercambiador de presión para reducir el gasto energético. El valor de la presión de permeado debe ser previamente estimado para ser ingresado.
- Recirculación de concentrado y bypass, se puede definir una cantidad de flujo que será retornado al sistema a partir del flujo concentrado producido.

- Sistema híbrido de membranas. El software permite evaluar diferentes tipos de membrana en el mismo sistema acorde a lo requerido por el usuario.
- Evaluación de los costos operacionales, incluyendo el consumo de químicos.

Una vez ingresados todos los parámetros a considerar, el software proyectará la calidad del agua producida y los flujos por etapa, junto a los índices de ensuciamiento y alertas sobre resultados fuera de los límites recomendados. Adicionalmente el software permite visualizar la proyección por elemento de membrana incluyendo al factor Beta.

4.2. Dow - WAVE

El programa WAVE permite la modelación de membranas de RO, UF, y procesos de intercambio iónico (IX) siendo capaz de evaluar estos procesos de forma independientes o integrados en un sólo sistema, según se muestra en la figura 8.

El software WAVE es una versión mejorada de ROSA (*Reverse Osmosis System Analysis*), software desarrollado por la misma compañía para simulaciones de sistemas de RO. Prácticamente la nueva plataforma alberga todos los alcances incorporados en ROSA con la posibilidad de integrar simulaciones de procesos batch, realizar evaluaciones económicas e incorporar procesos de UF y IX alineados con el rechazo o concentrado de un sistema de RO, entre sus incorporaciones más relevantes.

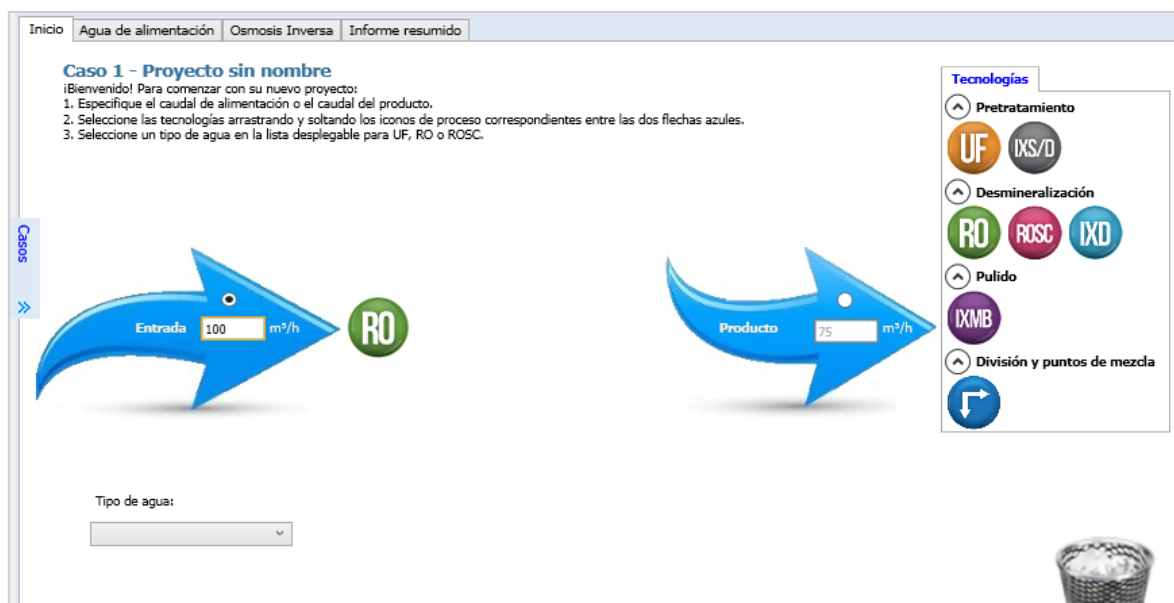


Figura 8. Interface del software WAVE.

Las características del agua de alimentación, tales como cationes, iones y elementos neutros, son ingresadas en la sección de “Agua de alimentación” según se muestra en la figura 9. Adicionalmente es posible especificar la cantidad de turbidez (NTU), el índice de sedimentos (SDI) y los sólidos totales en suspensión

(TSS), al igual que la cantidad de carbono orgánico total (TOC), los cuales son utilizados para identificar y guiar si el diseño es apropiado para el usuario.

Una vez ingresado los valores de los componentes del agua, es posible realizar un ajuste para el equilibrio de carga de la alimentación, el cual es realizado adicionando cationes, aniones, ambos o cambiando el pH de la solución (modificando la cantidad de HCO_3 , CO_3 y CO_2 en equilibrio).

La información mínima requerida a ingresar en la sección de parámetros de configuración del sistema (ver figura 10) se detalla a continuación.

1. Flujo permeado.
2. Recuperación del sistema.
3. Numero de pasos, con un máximo de 2 pasos.
4. Numero de etapas, con un máximo de 5 etapas por paso.
5. Número de contenedores a presión por etapa.
6. Número de membranas por contenedor a presión. El programa restringe este valor entre 1 a 8 elementos.
7. Elección de membrana. El programa también muestra la especificación de las distintas membranas.

Agua de alimentación - Corriente 1

Definición de corriente: Corriente 1 100.00 %

Parámetros de alimentación:

Tipo de agua:

Sub-tipo de agua:

Contenido de sólidos:

Turbidez: 0.00 NTU

Sólidos suspendidos totales (SST): 0.00 mg/L

SDI₁₅: 0.00

Contenido Orgánico:

Orgánicos (TOC): 0.00 mg/L

Temperatura:

Mínimo: 10.0 °C, Diseño: 25.0 °C, Máximo: 40.0 °C

pH: 7.00

Información adicional sobre el agua de alimentación:

Cationes

Símbolo	mg/L	ppm CaCO_3	meq/L
NH_4	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00
Sr	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00
Total cationes:	0.00		0.00

Aniones

Símbolo	mg/L	ppm CaCO_3	meq/L
CO_2	0.00	0.00	0.00
HCO_2	0.00	0.00	0.00
NO_2	0.00	0.00	0.00
Cl	0.00	0.00	0.00
F	0.00	0.00	0.00
SO_4	0.00	0.00	0.00
Total aniones:	0.00		0.00

Neutros

Símbolo	mg/L
SiO_2	0.00
B	0.00
CO_2	0.00
Total neutros:	0.00

Sólidos Disueltos Totales (TDS): 0.00 mg/L

Balance de carga: 0.000000 meq/L

Conductividad estimada: 0.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Figura 9. Interface del software WAVE – valores de entrada características del agua de alimentación.

Otros factores que son posibles especificar o incluir en el programa son expuestos a continuación.

- Ajuste de pH.
- Presión de permeado por etapa.
- Presión de aumento entre etapas.
- Presión de alimentación, si esté campo es definido, el programa calculará la recuperación en base a este parámetro.
- Dosificación de químicos. Es posible incorporar antiescalantes y reactivos para la decoloración.
- Factor de permeabilidad, el cual es utilizado para simular las peores condiciones en términos de rechazo y demanda energética.
- Sistema híbrido de membranas.
- En general el software también permite definir configuraciones específicas para el sistema como recirculaciones, bypass y alineaciones del permeado, con una amplia variedad de configuraciones disponibles para el usuario.
- Evaluación del consumo energético y del costo de consumo de reactivos.

Estos otros alcances son optativos para la resolución del programa, sin embargo, su especificación otorgará un resultado aún más concreto.

Configuración del paso de osmosis inversa

Configuration for Pass 1

Número de etapas: ☐ 1 ☒ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5

Factor de permeabili:

Temperatura: Diseño °C

Contrapresión de paso: bar

Caudales

Caudal alimentación: m³/h

Conversión: %

Caudal permeado: m³/h

Flujo: LMH

Flujo recirculación: m³/h

Caudal bypass: m³/h

	Etapa 1	Etapa 2
Nº. Tubos/Etapa	10	5
Nº. Elementos/Tubo	6	6
Tipo de elemento	ECO PRO 400	XLE-440
Especificaciones		
Nº. Elementos/Etapa	60	30
ΔP pre-etapa (bar)	0,31	0,20
Contrapresión perm (bar)	0,00	0,00
Pres. entre etapas (Bo)	N/A	0
Presión alim. (bar)	0	N/A
% de conc. a alim.	0,00	0,00

Configuración del sistema

Feed → [Membrane Unit] → Concentrate (red arrow) and Permeate (blue arrow)

Figura 10. Interface del software WAVE – valores de entrada de los parámetros de diseño.

La cantidad de químicos a considerar es posible establecerla en base a algunos criterios sobre el ajuste de químicos, tales como el pH final de permeado, la temperatura, y la desgasificación (remoción de CO₂). El software estimará la concentración del permeado y el riesgo de saturación e incrustación en base a los valores de LSI y SDI de la corriente efluente.

Una vez ingresados todos los parámetros a considerar, el software proyectará la calidad del agua producida y los flujos por etapa, junto a los índices de ensuciamiento y alertas sobre resultados fuera de los límites recomendados. Adicionalmente el software permite visualizar la proyección por elemento de membrana incluyendo al factor Beta.

4.3. Toray – TorayDS2

El software Toray DS2 se encuentra diseñado exclusivamente para la evaluación de sistemas de RO. Una de las ventajas de este programa es la variedad de configuraciones específicas disponibles, que al igual que WAVE, permite establecer arreglos con recirculaciones, bypass, y de varias combinaciones con el permeado. También el software permite evaluar varios dispositivos de recuperación de energía dentro del diseño del sistema.

En las figuras 11, 12 y 13, se presentan las visualizaciones del programa para los valores de entrada al sistema de las características del agua a tratar, junto a los parámetros de diseño base.

Sólidos Disueltos Totales:

Información sobre corriente:

Tipo de agua: RO permeado

Número de corrientes de ali.: 1

Corriente de la alimentación: 1

Porcentaje de la corriente en la: 100 %

Parámetros de alimentación:

Temperatura: 25 deg C Caudal: 1.00 m3/hr

pH: 7.00 TDS: 0.180

Est nos

Establecer TDS como NaCl

Balance:

% Excess Anion: 0.000 %

Carga / Revisión Análisis

Balance con NaCl

Equilibrar con MgSO4

AutoBalance

datos de solubilidad:

Especies	% Saturación en Alimentación	Conc.
CaSO4	0.00	% of Max solubilidad
BaSO4	0.00	% of Max solubilidad
SrSO4	0	% of Max solubilidad
PO4	0	% of Max solubilidad
SiO2	0.0	% of Max solubilidad
CaF2	0.0	% of Max solubilidad

Cationes

Corriente actual: 1

iones	mg/l	mEq / L	ppm de CaCO3
Ca	0.05	0.0025	0.12
Mg			
Na			
K			
Ba			
Sr			
NH4			
Fe			
Totales	0.0500	0.0025	0.1249

Aniones

iones	mg/l	mEq / L	ppm de CaCO3
HCO3	0.10	0.0016	0.08
CL	0.03	0.0009	0.04
SO4			
NO3			
F			
Br			
SiO2			
PO4			
CO3	0.00	0.0000	0.00
CO2	0.02	0.0004	0.02
Totales	0.1303	0.0025	0.1249

Restablecer

Figura 11. Interface del software Toray DS2 – valores de entrada características del agua de alimentación.

Las características del agua de alimentación son ingresadas en la sección “Datos de alimentación”. Es posible establecer múltiples fuentes de alimentación,

definiendo para cada fuente valores de pH, temperatura y concentraciones específicas de iones.

Una vez ingresado los valores de los componentes del agua, es posible realizar un ajuste para el equilibrio de carga de la alimentación, el cual es realizado ajustando con NaCl o MgSO₄.

La información mínima requerida a ingresar, además de la calidad del agua, se detalla a continuación (ver figura 12 y 13):

1. Flujo permeado (o de alimentación).
2. Recuperación del sistema.
3. Número de pasos, con un máximo de 2 pasos.
4. Número de etapas, con un máximo de 10 etapas por paso.
5. Número de contenedores a presión por etapa.
6. Número de membranas por contenedor a presión. El programa restringe este valor entre 1 a 10 elementos.
7. Elección de membrana. El software presenta los modelos disponibles por el sistema, junto las especificaciones de cada elemento.

The screenshot displays the Toray DS2 software interface for configuring a water treatment system. The top menu bar includes 'Inicio', 'Proyecto', 'Datos de alimentación', 'Diseño OI', and 'Informe'. The left sidebar contains a 'Configurar' section with icons for 'Paso', 'Etapa', 'Caja de presión', 'Elemento', 'Dosificación', 'Desgasificación', 'Presión', 'Bomba', 'ERD', and 'Unidades'. Below this are buttons for 'Contrapresión de permeado', 'Interbanc Boost/DP', 'Calc. Reemplazo', 'Alimentación / Bomba', and 'Control Incrustación'. The main area features a flow diagram with nodes labeled 4, 9, 10, 14, and 20. A 'calcular ahora' button is present. The right panel, titled 'Visión general del sistema', shows input fields for 'Paso 1' and 'Paso 2' across various parameters like 'Presión', 'TDS Permea', 'Rechazo me', 'Beta Max', 'PTM entrada', 'PTM salida', 'kW principal', 'kWh / m^3', 'Alim / Prod kW', 'KW Guardado / Ut...', 'SYS kW / kWh / m...', 'Temperatura del...', and 'Información del Flujo (l/m2/hr)'. A table at the bottom right shows 'En total' and 'Etapa 1' through 'Etapa 10' with values like 625.00 and 100.00. The bottom status bar includes 'Diagra...', 'Configu...', 'selecci...', 'Resultados', 'Errores / Advertencias', 'Diagrama de flujo', and 'Visión...', 'Dosific...', 'Desga...', 'Presión'.

Figura 12. Interface del software Toray DS2 – valores de entrada de los parámetros de diseño.

Otros factores que son posibles especificar o incluir en el programa son expuestos a continuación.

- Configuraciones específicas para el sistema como recirculaciones, bypass y alineaciones del permeado, con una amplia variedad de configuraciones disponibles para el usuario.
- Variedad de dispositivo de recuperación de energía (ver figura 14) para el diseño del sistema. El valor de la presión de permeado debe ser previamente estimado para ser ingresado.
- Disminución del flujo por año.
- Incremento del paso de sal por año.
- Calculo de remplazo de membranas y vida útil.
- Presión de permeado por etapa.
- Presión de aumento entre etapas.
- Dosificación de reactivos para ajustes sobre el pH, LSI o dureza.
- Desgasificación (remoción de CO₂).
- Sistema híbrido de membranas.
- Evaluación del consumo energético.

Estos otros alcances son optativos para la resolución del programa, sin embargo, su especificación otorgará un resultado aún más concreto.

The screenshot displays the TorayDS2 software interface. On the left is a 'seleccionar' (select) panel with a list of membrane elements. The main area contains input fields for system configuration and a detailed view of a selected element.

seleccionar

- TM710, BWRO
- TM710D, BWRO
- TM710D-087-28, BWRO
- TM710D-087-34, BWRO
- TM720-370, BWRO
- TM720-400, BWRO
- TM720-430, BWRO
- TM720-440, BWRO
- TM720C-440, BWRO
- TM720D-400, BWRO
- TM720D-440, BWRO
- TM720L-400, BWRO
- TM720L-440, BWRO
- TM740-1760, BWRO
- TM740C-1760, BWRO
- TM740D-1760, BWRO
- TM810C, SWRO
- TM810C-073-34, SWRO
- TM810E, SWRO
- TM810E-073-34, SWRO
- TM810F, SWRO
- TM810L-1900, SWRO
- TM810R, SWRO
- TM810R-087-34, SWRO
- TM810S, SWRO
- TM810V, SWRO

Input Parameters:

- Pasar: 1, Total de etapas: 1, Etapa actual: 1, Elementos Totales en E: 1
- Cajas de presión p.: 1, Elementos por caja d.: 1
- ☒ Todos los elementos iguales
- ☒ Todas las etapas de la misma

Información del Elemento

4" Standard BWRO element, Eliminada pronto! TM710

Elemento Edad: 3,00 Años, Tipo de elemento: TM710, BWRO

factor de ensuciam.: 0,848, aumento del paso de s.: 5,00, % anual: 15,76%

tipo	TM710, BWRO	Presión	bar	Caudal m3/hr
Diámetro, pulg...	4,000	Recuperación...	15,000	Area
			8,000	Rechazo sale...
			99,7	Caudal de Per...
			0,379	
Presión máxima	41,00	Presión de Test	15,513	TDS de test
			2000	Grosor del espaciador
			31	mil

☒ edad determina ensuciam ☐ ¿Edad misma?

Result

Item						
Presión						
Caudal						
pH						
TDS						
CL						
HCO3						

Figura 13. Interface del software TorayDS2 – valores de entrada para los módulos y membranas.

Otra opción particular del software es que permite elegir el método de cálculo utilizado para la simulación del sistema de RO. El diseñador puede seleccionar el método TEOS10 o el método Pitzer (método más utilizado). Esta evaluación considera sólo el comportamiento sobre el método Pitzer.

El programa ofrece una opción para estudiar la tasa de reemplazo de membranas, permitiendo evaluar cada membrana en forma individual con sus respectivos valores de antigüedad, definiendo elementos viejos o más nuevos, con diferentes niveles de ensuciamiento o paso de sales.

La disponibilidad de dispositivos de recuperación de energía puede ser establecida para cada etapa. El software ofrece valores de referencia respecto al rendimiento de cada dispositivo, comparando estos valores entre dispositivos de ERD de tipo pistón, isobárico, turbocompresor, y para turbina pelton.

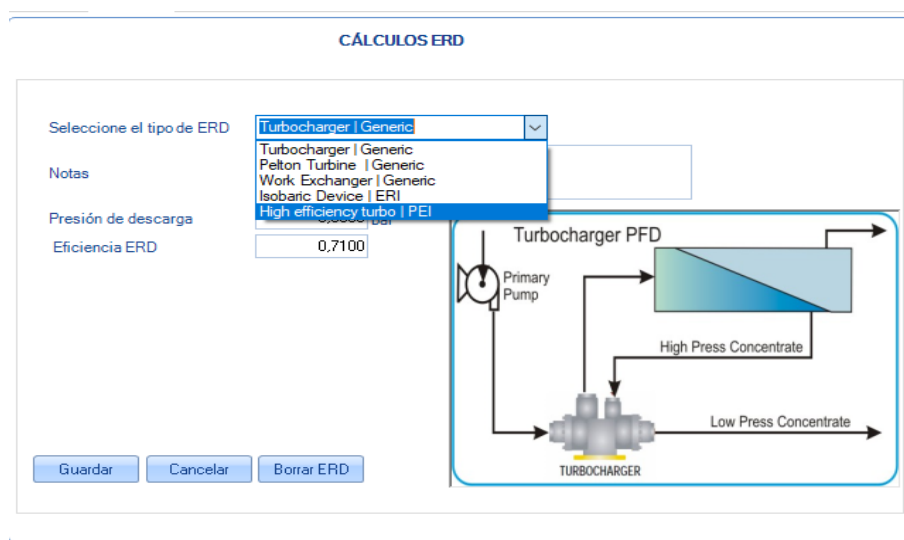


Figura 14. Interface del software TorayDS2 – sistemas de recuperación de energía.

Una vez ingresados todos los parámetros a considerar, el software proyectará la calidad del agua producida y los flujos por etapa, junto a los índices de ensuciamiento y alertas sobre resultados fuera de los límites recomendados para el sistema en general o por cada elemento.

4.4. TCK Membrane (Toray) - CSMPPro

El programa CSMPPro permite la simulación de membranas de RO y NF de TCK Membrane (perteneciente a Toray). Una de las ventajas del programa es la evaluación de incrustaciones en las membranas por compuesto químico permitiendo estimar valores con mayor efectividad sobre la operación.

En las figuras 15 y 16, se presentan las visualizaciones del programa para los valores de entrada al sistema de las características del agua a tratar, junto a los parámetros de diseño base.

Las características del agua de alimentación son ingresadas en la sección “Alimentación”. Es posible establecer múltiples fuentes de alimentación, estableciendo para cada fuente valores de pH, temperatura y concentraciones específicas de iones.

Una vez ingresado los valores de los componentes del agua, es posible realizar un ajuste para el equilibrio de carga de la alimentación, el cual es realizado ajustando con NaCl.

La información mínima requerida a ingresar, además de especificación de la calidad del agua, se detalla a continuación (ver figura 16).

1. Flujo permeado (de alimentación o concentrado).
2. Recuperación del sistema.
3. Número de pasos, con un máximo de 2 pasos.
4. Número de etapas, con un máximo de 10 etapas por paso.
5. Número de contenedores a presión por etapa.
6. Número de membranas por contenedor a presión. El programa restringe este valor entre 1 a 9 elementos.
7. Elección de membrana. El software presenta los modelos disponibles por el sistema, junto a algunas especificaciones para cada elemento.

Proyecto: [] Diseñado por: [] Empresa: [] Email: [] Página Web: [] Observaciones: []

Caso: 1 Versión: 1.0 Fecha: 15-03-2018

Unidades: Caudal: m3/hr Presión: Bar Flujo: l/mh Temperatura: C

Alimentación Cálculo de Incrustaciones Sistema Resultado

Num. Aliment.: 1 Fecha: 15-03-2018 Open Water Profile Save Water Profile

Aliment 1

Procedencia del agua: Agua pozo SDI<3 Alimentación: 6,813 m3/hr 100,00 %

TDS mg/l como ion: 0,00 Temperatura: 25,00

☐ Análisis Iónico

	mg/l como ion	ppm como CaCO3	meq/l	Unidades
Na	0,00	0,00	0,00	as Ion
K	0,00	0,00	0,00	as Ion
NH4	0,00	0,00	0,00	as Ion
Ca	0,00	0,00	0,00	as Ion
Mg	0,00	0,00	0,00	as Ion
Fe	0,00	0,00	0,00	as Ion
Ba	0,00	0,00	0,00	as Ion
Sr	0,00	0,00	0,00	as Ion
Cl	0,00	0,00	0,00	as Ion
NO3	0,00	0,00	0,00	as Ion
SO4	0,00	0,00	0,00	as Ion
F	0,00	0,00	0,00	as Ion
HCO3	0,00	0,00	0,00	as Ion
CO3	0,00	0,00	0,00	as Ion
CO2	0,00	0,00	0,00	as Ion
B	0,00			as Ion
SiO2	0,00			as Ion
Alcalinidad Total	0,00			as CaCO3

	Unidad	Corriente 1	Corriente 2	Total
SDI	15 min			
Turbidez	NTU			
TOC	mg/l as O2			
DQO	mg/l as O2			
DBO	mg/l as O2			
Cl2	mg/l as Cl2			

etc.

Conductividad: 0 uS/Cm pH aliment.: 7,0

Total Cationes: 0,00 Auto Balance

Total Aniones: 0,00

Extra ion: 0,00

Buttons: Na, NaCl, Cl, Resetear

Figura 15. Interface del software CSMPPro – valores de entrada características del agua de alimentación.

Otros alcances relevantes que incluye el programa son especificados a continuación.

- Recirculación de rechazo, se puede definir una cantidad de flujo que será retornado al sistema a partir del flujo concentrado producido.
- Vida útil membrana.
- Disminución del flujo por año.
- Incremento del paso de sal por año.
- Sistema híbrido de membranas.
- Presión de permeado por etapa.
- Presión de compensación entre etapas.
- Presión de alimentación.
- Dosificación de reactivos para ajustes sobre el pH, LSI o dureza. Existe una sección especial para evaluar la descalcificación del agua.
- Evaluación de la inversión del sistema.
- Evaluación de costos de consumo de químicos y energéticos.

Proyecto: [] Diseñado por: [] Empresa: [] Email: [] Página Web: [] Observaciones: []

Caso: 1 + - Versión: 1.0 Fecha: 15-03-2018

Unidades: Caudal: m3/hr Presión: Bar Flujo: l/mh Temperatura: C

ABRIR GUARDAR

Alimentación Cálculo de Incrustaciones Sistema Resultado

Numero de Pasos: 1 Temperatura: 25,00 C

	Paso 1	Unidad
Permeado	5,11	m3/hr
Conversión	75,00	%
Alimentación	6,81	m3/hr
Disminución del flujo en	7,00	%
Inc. paso sales%/año	10,00	%
Edad Membrana (años)	0,00	yr
Flujo promedio	137,51	l/mh
Mezcla permeado	0,00	m3/hr
Numero de etapas	1	
Desvío	0,00	m3/hr

	Recirculación Etapa	Unidad
Desde Etapa	0	0 Etapa
Hacia Etapa	0	0 Etapa
Cantidad	0,00	0,00 m3/hr

Opción:

☒ Diseño automático de etapa ☐ Mezcla de permeado

☐ Misma contrapresión ☐ Desvío

☐ No BAP 2º paso ☐ Recirc. Concentrado

☐ Híbrido

☒ Mismo tipo de membrana dentro del paso

☒ Misma longitud de tubo dentro del paso

Ajuste de pH en 2nd Paso

Producto Químico: []

Concentración: 0 %

Ajuste de pH: 7

Post tratamiento

Químico: []

Concentración: 0 %

Ajuste de pH: 7

CSM®

Diagrama necesita valor de SDT en la casilla de la alimentación

Figura 16. Interface del software CSMPro – valores de entrada de los parámetros de diseño.

Estos otros alcances son optativos para la resolución del programa, sin embargo, su especificación otorgará un resultado aún más concreto.

Una vez ingresados todos los parámetros a considerar, el software proyectará la calidad del agua producida y los flujos por etapa, junto a los índices de ensuciamiento y alertas sobre resultados fuera de los límites recomendados para el sistema en general o por cada elemento.

4.5. SUEZ - Winflows

El programa Winflows permite la modelación de membranas de RO y procesos de electrodesionización (EDI) siendo capaz de evaluar estos procesos de forma independiente o integrada en un sólo sistema. El software también permite incorporar pre-filtros tipo cartuchos, además de dispositivos de recuperación de energía.

En las figuras 17, 18, 19 y 20, se presentan las visualizaciones del programa para los valores de entrada al sistema de las características del agua a tratar, junto a los parámetros de diseño base.

The screenshot displays the Winflows software interface for water analysis. It is divided into several sections:

- Water Type:** Includes dropdowns for 'Select Water Source' (Brackish Surfacewater (Conventional)) and 'Select Water Type' (User Defined).
- Feed Water Analysis:** A table with columns for Ion, mg/l, meq/l, and ppm as CaCO3. The table lists various ions (Calcium, Magnesium, Sodium, Potassium, Ammonia, Barium, Strontium, Iron, Manganese, Sulfate, Chloride, Fluoride, Nitrate, Bromide, Phosphate, Boron, Silica, Hydrogen Sulfide, Bicarbonate, Carbon Dioxide, Carbonate) and their respective concentrations, all set to 0.00. Summary rows for 'Total Cations' and 'Total Anions' also show 0.00.
- Parameters:** A section on the right with input fields for Total Alkalinity (120.00), TDS (0.00), pH (7.00), Temperature (25.00), SDI (4.00), and Recovery (75%).
- Saturation Data (Feed Water):** A section on the right listing various salts (BaSO4, CaF2, CaSO4, SiO2, SrSO4, Struvite, LSI, Stiff-Davis Index, Osmotic Pressure, Conductivity at 25C, Density) and their percentages or values.
- Buttons:** Includes 'Multiple Feed', 'Design Guidelines', 'Add Sodium', 'Add Chloride', 'Clear Values', 'Balance', 'Export', 'Import', 'Cancel', and 'OK'.
- Note:** A note at the bottom states: 'Note -> Alkalinity is user-input. Execute "Balance" button first. If required, click on "Add Sodium/Chloride".'

Figura 17. Interface del software Winflows – valores de entrada características del agua de alimentación.

Las características del agua de alimentación son ingresadas en la sección “Análisis del agua de alimentación”. Es posible establecer múltiples fuentes de alimentación, estableciendo para cada fuente valores de pH, temperatura y concentraciones específicas de iones.

Una vez ingresado los valores de los componentes del agua, es posible realizar un ajuste para el equilibrio de carga de la alimentación, el cual es realizado ajustando con NaCl.

La información mínima requerida a ingresar, además de la calidad del agua, se detalla a continuación (ver figura 18):

1. Flujo permeado (de alimentación o concentrado).
2. Recuperación del sistema.
3. Número de pasos, con un máximo de 3 pasos.
4. Número de etapas, con un máximo de 6 etapas por paso.
5. Número de contenedores a presión por etapa.
6. Número de membranas por contenedor a presión. El programa restringe este valor entre 1 a 8 elementos.
7. Elección de membrana. El software presenta los modelos disponibles por el sistema, junto a algunas especificaciones para cada elemento.

Flow Rates

Flow

☒ Specify Product 0.00 gpm

☐ Specify Feed gpm

☐ Specify Concentrate gpm

RO Recoveries

Recovery 75.00 %

Concentrate Recycle

☐ Specify Flow Rate ☒ Specify Percent

RO1 to RO1Feed 0.00 %

Feed Bypass

☒ Specify Flow Rate 0.00 gpm

☐ Specify Percent 0 %

Cancel OK

Figura 18. Interface del software Winflows – valores de entrada del flujo y recuperación del sistema.

Otros factores que son posibles especificar o incluir en el programa son expuestos a continuación.

- Especificación de configuraciones predefinidas como recirculaciones, bypass, y alineaciones del permeado.
- Dispositivo de recuperación de energía. Es posible establecer distintos dispositivos para reducir el gasto energético (ver figura 19). El valor de la presión de permeado debe ser previamente estimado para ser ingresado.

- Vida útil membrana.
- Disminución del flujo por año.
- Incremento del paso de sal por año.
- Presión de permeado por etapa.
- Presión de aumento entre etapas.
- Dosificación de reactivos para ajustes sobre el pH, LSI o dureza.
- Desgasificación (remoción de CO₂).
- Sistema híbrido de membranas.
- Evaluación de la inversión del sistema.
- Evaluación de costos de consumo de químicos y energéticos.

Flowsheet Configuration X

Flowsheet Type

☒ Single Pass
 ☐ Two Pass
 ☐ Brine Staged
☐ Three Pass-Conc recycle to 1st pass feed
☐ Three Pass-Conc recycle to 2nd pass feed

Options

Dosing

☐ After Feed Dosing ☐ Product 2 Dosing
☐ Pre Feed Dosing ☐ Pre Product Dosing
☐ Interpass Dosing ☐ Argo Analyzer Feed
☐ Product 1 Dosing ☐ Argo Analyzer Conc

Stripper

☐ Feed Stripper ☐ Product Stripper
☐ Interpass Stripper ☐ Pre Product Stripper

Others

☐ Feed Bypass
☐ Interpass Pump
☐ Pre Product Pump
☐ EDI

Energy Recovery Device

☒ None
☐ Work/Pressure Exchanger
☐ Turbo
☐ Pelton Wheel

Cancel
OK

Figura 19. Interface del software Winflows – valores de entrada para la configuración del sistema.

RO Element Data

Pass 1

RO Parameters

RO Machine Model Perm Flow gpm

☐ Split Permeate (Upstream Part) (gpm) 0.00

☐ Permeate bypass (gpm) 0.00

☐ None

☐ Recycle Permeate from Last Stage to Feed Pump

Stage	Pressure Vessels	Elements Per Vessel	Application	Element Group	Element Model	Element Age (yr)	Rux Annual % Change	Salt Passage Annual % Change	Permeate Pressure (psi)	Interstage Pressure Loss (psi)	Interstage Boost Pressure (psi)	Boost Energy Efficiency %	Element Info
1	3	6	BW RO PA	High Rejection	AG-400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			...
2	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
3	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
4	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
5	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
6	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...

Check Web for New Database Element Age Calculator Cancel OK

Type AG HR Brackish Water RO High Rejection

Area	399.83 ft ²	Rejection	99.80 %
Nominal Flow	7.29 gpm	Test TDS, mg/L	2000 NaCl
Test Pressure	225.00 psi	Max Pressure	600.00 psi

Figura 20. Interface del software Winflows – valores de entrada para los módulos y membranas.

Una vez ingresados todos los parámetros a considerar, el software proyectará la calidad del agua producida y los flujos por etapa, junto a los índices de ensuciamiento y alertas sobre resultados fuera de los límites recomendados para el sistema en general o por cada elemento.

4.6. Lanxess - LewaPlus

El programa LewaPlus permite la simulación de membranas de RO y procesos de intercambio iónico (IX) siendo capaz de evaluar estos procesos de forma independiente o integrada en un sólo sistema. Una de las principales ventajas de este programa es que, al igual que IMSDesign, sugiere al usuario una cantidad de bastidores y de módulos más adecuada en base a los parámetros ingresados, y al tipo de membrana seleccionada.

En las figuras 21 y 22, se presentan las visualizaciones del programa para los valores de entrada al sistema tanto para las características del agua a tratar como para los parámetros de diseño base.

Las características del agua de alimentación son ingresadas en la sección “Análisis completo”. Es posible establecer múltiples fuentes de alimentación, estableciendo para cada fuente valores de pH, temperatura y concentraciones específicas de iones. Adicionalmente es posible incorporar la cantidad de TOC.

Una vez ingresado los valores de los componentes del agua, es posible realizar un ajuste automático para el equilibrio de carga de la alimentación.

Origen del agua: **Aguas termales**
 Tipo de agua: **Pozo de agua salobre**
 País: **Chile**

Caudal de aporte: **26,67** [m3/h]

☒ **Análisis completo**
☐ Análisis corto basado en TDS: **1848,5513** [mg/l]
 ☐ Análisis corto basado en conductividad: **2757,8804** [uS/cm]

Cationes	Original	Unidad	[meq/l]	Aniones	Original	Unidad	[meq/l]
Na:	500,0121	mg/l	21,74911	Cl:	770,9757	mg/l	21,74826
Ca:	2	mg/l	0,09980	SO4:	0	mg/l	
Mg:	0	mg/l		CO3:	0	mg/l	
K:	300	mg/l	7,67263	HCO3:	0	mg/l	
Sr:	0	mg/l		NO3:	0	mg/l	
Ba:	0	mg/l		F:	0	mg/l	
NH4:	0	mg/l		SiO2:	0	mg/l	
Fe(II):	0	mg/l		B:	0	mg/l	
Mn:	0	mg/l		PO4:	0	mg/l	
H+:	0,0001	meq/l	0,00010	OH-	0,0001	meq/l	0,00009
Suma C:			29,52155	Suma A:			21,74826
+ Na:			0,00000	+ Cl:			7,77330

Otros: ☐ Análisis extendido

Temperatura: **18** °C **18,00** [°C]
 pH: **7** ☒ Calcular dióxido de carbono
 CO2: **0** mg/l **0,00** [mg/l]
 Turbidez: **0** [NTU]
 SDI: **0**
 TSS: **0** [ppm]
 TOC: **0** [ppm]
 Fe (total): **0** [ppm]
 Cloro libre: **0** [ppm]
 H2S: **0** [ppm]

Resumen
 TDS: **1848,55** [mg/l]
 Conductividad: **2757,88** [uS/cm]
 Presión osmótica: **144,44** [kPa]
 Fuerza iónica: **0,026**

Figura 21. Interface del software LewaPlus – valores de entrada características del agua de alimentación

La información mínima requerida por el sistema es detalla a continuación (ver figura 22):

1. Flujo permeado (de alimentación).
2. Recuperación del sistema.
3. Número de pasos, con un máximo de 2 pasos.
4. Número de etapas, con un máximo de 4 etapas por paso.
5. Número de contenedores a presión por etapa.
6. Número de membranas por contenedor a presión. El programa restringe este valor entre 1 a 10 elementos.
7. Elección de membrana. El software presenta los modelos disponibles por el sistema, junto a algunas especificaciones para cada elemento.

Otros factores que son posibles especificar en el programa son expuestos a continuación.

- Configuraciones de recirculación de permeado y concentrado.
- Recalculo del arreglo seleccionado. El software permite ajustar el arreglo seleccionado por uno más apropiado de acuerdo a los parámetros definidos.
- Vida útil membrana.
- Disminución del flujo por año.
- Incremento del paso de sal por año.
- Presión de permeado por etapa.

- Presión de aumento entre etapas.
- Presión de alimentación.
- Ajuste de pH y dosificación de reactivos.
- Especificación de TOC. Permite estimar el ensuciamiento por biocarga.
- Sistema híbrido de membranas, y dispositivos de recuperación de energía.
- Evaluación de la inversión del sistema.
- Evaluación de costos de consumo de químicos y energéticos.

Parámetros del sistema
Tipo de agua: Pozo de agua salobre

Temperatura: 18 [°C]
Recuperación: 75 [%]
Recuperación hidráulica: 75,00 [%]
☐ Caudal del agua de aporte: 26,67 [m3/h]
☐ Caudal del agua cruda de alimentación: 26,67 [m3/h]
☐ Caudal de aporte, etapa 1: 26,67 [m3/h]
☒ Caudal del permeado, paso 1: 20 [m3/h]
Caudal del permeado en el sistema: 20,00 [m3/h]

Ajuste del pH
pH: 7
Producto químico:
Dosificación (100%): 0,00 [mg/l]

Parámetros de la membrana
Edad de membrana promedio: 3 [a]
Tasa disminución, caudal: 10 [%]
Aumento de paso de sal: 10 [%/a]
Flujo medio del permeado: 22,40 [l/m2/h]

Configuración del sistema
2 etapas
☐ Permeado, reducción
☐ Permeado, mezcla: 0 [m3/h]
☐ Permeado, recirculación: 0 [m3/h]
☐ Rechazo, recirculación: 0 [m3/h]
Sin booster o ERD

Seleccionar bomba booster o ERD si es apropiado.

☐ Mismos elementos en todas las etapas
☒ Configuración híbrida

Etapa Tipo de elemento
1 RO B400 FR ASD
2 RO B400 FR ASD

Reiniciar Config. por defecto

	Etapa 1	Etapa 2
Tubos	2	2
Elementos por tubo	6	6
Presión de la agua de aporte [kPa]	1427,47	1267,38
Presión del concentrado [kPa]	1267,38	1212,69
Presión del permeado [kPa]	0	0
Permeado, flujo [l/m2/h]	26,08	18,72
Caudal de agua de aporte por tubo [m3/h]	13,33	7,51
Caudal del concentrado por tubo [m3/h]	7,51	3,33

Permeado Concentrado Detalles del elemento Consumo de energía

Conductividad: 52,0221 [uS/cm] CO2: 0,0000 [mg/l] LSI:
TDS: 30,4973 [mg/l] pH: 7,00 CCPP:
Composición [mg/l]
Na: 5,12593 Ba: 0,00000 Cl: 16,21336 F: 0,00000
Ca:

Figura 22. Interface del software LewaPlus – valores de entrada de los parámetros de diseño.

Una vez ingresados todos los parámetros a considerar, el software proyectará la calidad del agua producida y los flujos por etapa, junto a los índices de ensuciamiento y alertas sobre resultados fuera de los límites recomendados para el sistema en general o por cada elemento.

4.7. LG - NanoH₂O

El software NanoH₂O se encuentra diseñado exclusivamente para la evaluación de sistemas de RO. La interface del sistema y la simplicidad de acceso, facilitan la operación y el manejo del programa.

En las figuras 23 y 24, se presentan las visualizaciones del programa para los valores de entrada al sistema tanto para las características del agua a tratar como para los parámetros de diseño base.

Las características del agua de alimentación son ingresadas en la sección “Agua de alimentación”. Es posible establecer múltiples fuentes de alimentación, estableciendo para cada fuente valores de pH, temperatura y concentraciones específicas de iones.

Una vez ingresado los valores de los componentes del agua, es posible realizar un ajuste para el equilibrio de carga de la alimentación, el cual es realizado ajustando cationes, aniones e iones en específicos.

The screenshot shows the 'Agua de alimentación' (Feed Water) window. It includes a table for ion concentrations, a panel for feed parameters, and a panel for design steps.

Ión	ppm	ppm balance...
Ammonium(NH ₄)	0,00	0,00
Sodium(Na)	0,00	0,00
Potassium(K)	0,00	0,00
Magnesium(Mg)	0,00	0,00
Calcium(Ca)	0,00	0,00
Strontium(Sr)	0,00	0,00
Barium(Ba)	0,00	0,00
Fluoride(F)	0,00	0,00
Chloride(Cl)	0,00	0,00
Sulfate(SO ₄)	0,00	0,00
Nitrate(NO ₃)	0,00	0,00
Carbonate(CO ₃)	0,00	0,00
Bicarbonate(HCO ₃)	0,00	0,00
Boron(B)	0,00	0,00
Bromide(Br)	0,00	0,00
Silica(SiO ₂)	0,00	0,00

Parámetros de alimentación

Fuente de agua: Agua de mar-Toma a... Tipo de agua: NaCl

Temperatura: 25 °C
pH: 7,8
Solidos Disueltos Totales: 0 ppm
Presión osmótica total: 0 psi
Balance iónico: 0,00
Balance
Selección de iones...

Paso #1

Pérdida de Caudal: 7 %
Aumento del paso de sal: 7 %
Factor de seguridad: 1
Años de operación: 0
Fouling Factor: 1

Aceptar Cancelar

Figura 23. Interface del software NanoH₂O – valores de entrada características del agua de alimentación.

La información mínima requerida a ingresar, además de la calidad del agua, se detalla a continuación (ver figura 24):

1. Flujo permeado (de alimentación o concentrado).
2. Recuperación del sistema.
3. Número de pasos, con un máximo de 3 pasos.
4. Número de etapas, con un máximo de 6 etapas por paso.
5. Número de contenedores a presión por etapa.
6. Número de membranas por contenedor a presión. El programa restringe este valor entre 1 a 8 elementos.
7. Elección de membrana. El software presenta los modelos disponibles por el sistema, junto a algunas especificaciones para cada elemento.

The screenshot displays the 'Datos del Sistema' (System Data) window of the NanoH2O software. The interface is divided into two main sections: a left sidebar for data entry and a right main area for a schematic diagram.

Left Sidebar (Data Entry):

- Datos del Sistema:**
 - AGUA DE ALIMENTAC...:**
 - Tipo de agua: NaCl (dropdown)
 - Temperatura: 25 °C
 - pH: 7,8
 - Edad de la membrana paso 1: 0
 - Introduzca analisis... (button)
 - CAUDAL: paso n.º1:**
 - Permeado: [] gpd
 - Alimentacion OI: [] gpd
 - Concentrado: [] gpd
 - Recuperación: [] %
 - EFICIENCIA ENERGÉT...:**
 - Tipo RDE: Ninguno (dropdown)
 - Eficiencia de la bomba: 100 %
 - Especificar eficiencias... (button)

Right Main Area (Schematic Diagram):

- The diagram shows a two-stage membrane system. A green arrow indicates the inlet flow from the top left.
- Stage 1 (Top):**
 - N.º de cajas de presión: 1
 - N.º de membranas: 1
 - Membrane model: LG BW 400 R (dropdown)
 - Pressure difference: Δ 0 psi
- Stage 2 (Bottom):**
 - N.º de cajas de presión: 1
 - N.º de membranas: 1
 - Membrane model: LG BW 400 R (dropdown)
 - Pressure difference: Δ 0 psi
- A yellow arrow indicates the outlet flow from the bottom right.
- A red line connects the pressure difference outputs of both stages.
- A button '+ Añadir etapa' (Add stage) is located between the two stages.

Figura 24. Interface del software NanoH₂O – valores de entrada de los parámetros de diseño.

Otros factores que son posibles especificar o incluir en el programa son expuestos a continuación.

- Configuración de bypass y recirculación disponibles.
- Dispositivo de recuperación de energía.
- Presión de permeado.
- Sistema híbrido de membranas.
- Ajuste de pH y dosificación de reactivos

Una vez ingresados todos los parámetros a considerar, el software proyectará la calidad del agua producida y los flujos por etapa, junto alertas sobre resultados fuera de los límites recomendados para el sistema en general.

4.8. Discusión general de softwares

Por lo general, los softwares solo proyectan rendimientos de sistemas de osmosis inversa desde un set de datos controlados por el usuario. Los programas no juzgan si el diseño en evaluación requiere o contiene un pretratamiento, si posee directrices de diseño razonables, o si es evaluado en base a la experiencia (Water & Process Solutions FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, n.d.). Por lo tanto, la experiencia y el sentido común son fundamentalmente necesarios para asegurar que el diseño seleccionado de cualquier tipo de software de diseño sea realista, en especial para corrientes de alimentación de fuentes relativamente limpias, tales como agua de pozo con SDI (Kucera, 2015).

La operación de estos softwares está basada en el rendimiento nominal estable que alcanzan las membranas en condiciones de operación. El rendimiento real podría variar entre $\pm 15\%$ del nominal, de acuerdo con lo señalado en el Manual Técnico de Dow Water and Process Solution – FilmTec. La diferencia se mantiene en sistemas con al menos 36 membranas. En el caso de sistemas más pequeños se podría llegar hasta 1,5 veces el traspaso de sales en comparación a los valores proyectados.

En la tabla 8 se resumen las características más relevantes de los programas evaluados junto a las restricciones configuracionales de cada uno de ellos.

Tabla 8. Comparación programas de simulación RO.

Parámetros y alcances	Programas	IMSDesign	WAVE	Toray DS2	CSMPro	Winflows	LewaPlus	NanoH ₂ O
Restricciones de diseño								
Nº máximo de pasos		2	2	2	2	3	2	3
Nº máximo de etapas por paso		6	5	10	10	6	4	6
Número máximo de elementos por contenedor		8	8	10	9	8	10	8
Procesos de simulación agregados		NF	UF, IX		NF	EDI	IX	
Alcances adicionales								
Sistema desgasificación			✓	✓		✓		
Dosificación químicos			✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rechazo de carga biológica (por especificación de TOC)			✓				✓	
Recirculación de flujos		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Split de permeado		✓	✓	✓		✓		✓

Parámetros y alcances	Programas	IMSDesign	WAVE	Toray DS2	CSMPro	Winflows	LewaPlus	NanoH ₂ O
Bomba booster (presión de compensación)		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Balance de carga (ajuste sobre el agua de alimentación)			✓	✓	✓	✓	✓	✓
Estimación número de membranas requeridas		✓					✓	
Filtro cartucho						✓		
Postratamiento químico		✓			✓			
Sistema híbrido de membranas		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dispositivos de recuperación de energía		✓		✓		✓	✓	✓
Cálculo consumo energético		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Evaluación de reemplazo membrana				✓				
Costo de operación		✓	✓		✓	✓	✓	
Costo de inversión		✓			✓	✓	✓	

(Elaboración propia). NF: nano filtración; UF: ultrafiltración; IX: intercambio iónico; EDI: electrodesionización.

Capítulo 5. Consideraciones y criterios de diseño

Las condiciones de operación y criterios de diseño con mayor relevancia que afectan al rendimiento en la implementación de un sistema de RO por medio de softwares de diseño son descritos y abordados en este capítulo. Estos puntos corresponden a los siguientes:

- Calidad del agua de alimentación
- Calidad del agua requerida o agua producto
- Flujo de alimentación y de producto
- Recuperación y configuración del sistema
- Tipo de membrana utilizada
- Ensuciamiento, incrustación y factor Beta

5.1. Calidad del agua

La calidad del agua de alimentación es establecida a partir de distintas fuentes bibliográficas que evalúan las características del agua de diferentes zonas del altiplano del norte de Chile. A partir de esta información se formula un vector de trabajo que considera los patrones más semejantes sobre los componentes del agua. En la tabla 9 se presentan las características establecidas para el agua de alimentación que serán los parámetros de entrada al sistema en evaluación, junto a los valores recomendados para el agua de riego por la NCh 1.333. En el anexo 5, “Caracterización del agua de distintas fuentes acuíferas de la zona norte de Chile”, se presenta una tabla con el detalle de cada fuente hídrica considerada para la formulación de este vector junto a la referencia de la fuente de información.

Tabla 9. Características del agua de alimentación

Nombre	-	Unidad	Valor	NCh 1.333
Aluminio	Al	mg/L	7	5
Amoníaco	NH ₃	mg/L	0,08	N/A
Arsénico	As	mg/L	1,5	0,1
Bario	Ba	mg/L	0	4
Boro	B	mg/L	2	0,75
Calcio	Ca	mg/L	150	-
Cianuros	CN ⁻	mg/L	0	0,2
Cloruros	Cl ⁻	mg/L	800	200
Cobalto	Co	mg/L	0,01	0,050
Cobre	Cu	mg/L	0,05	0,20
Cromo	Cr	mg/L	0,035	0,10
Fluoruro	F ⁻	mg/L	0,5	1,0
Hierro	Fe	mg/L	3	5
Litio	Li	mg/L	4	2,5

Nombre	-	Unidad	Valor	NCh 1.333
Magnesio	Mg	mg/L	30	N/A
Manganeso	Mn	mg/L	0,08	0,2
Mercurio	Hg	mg/L	0,001	0,001
Molibdeno	Mo	mg/L	0,02	0,01
Nitrato	NO ₃ ⁻	mg/L	6,2	N/A
Plata	Ag	mg/L	0,01	0,2
Potasio	K	mg/L	50	-
Sodio	Na	mg/L	400	35% *
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	mg/L	300	250,00
Dióxido de silicio	SiO ₂	mg/L	11,82	-
pH	-	-	7,5	5,5 - 9,0
Conductividad específica	-	µS/cm	2100	7500
Turbiedad	-	NTU	8	N/A
Solido totales disueltos	TDS	mg/L	1750 - 1850	N/A
Alcalinidad	-	mgCaCO ₃ /L	200	N/A

(*) La cantidad de sodio presente en el agua de riego, establecida según la NCh 1.333, es definida en forma porcentual en base a la concentración del ion sodio y la suma de las concentraciones de los iones sodio, calcio, magnesio y potasio, de acuerdo a la siguiente expresión: $Na \% = (Na / (Na + Ca + Mg + K)) \times 100$.

Respecto a la cantidad de boro que será evaluada en la corriente de alimentación se considero una cantidad de 2, 4 y 16 ppm, con una evaluación adicional en respuesta a distintos valores de pH (7,5 – 9 – 10). La siguiente tabla, resume las condiciones de evaluación para el diseño del trabajo en cuestión, lo cual se obedece a su vez a la información ilustrada en el diagrama 1, del Capítulo 1.3. Metodología de trabajo”.

Tabla 10. Condiciones y parámetros sensibilizados en cada etapa de simulación.

Condiciones	Primer conjunto de simulaciones	Segundo conjunto de simulaciones
Concentración boro en alimentación	2 – 4 ppm	2, 4 y 16 ppm
pH en alimentación	7,5 – 9 – 10	7,5 (según tabla 9)
Escenarios de evaluación (B x pH)	6 escenarios	3 escenarios
TDS y características del agua de alimentación	2.100 – 2.200, condición libre de Mg y Ca, y compensada en NaCl.	Agua caracterizada de acuerdo a contenido en tabla 9.

Según como es indicado en la tabla 10, las simulaciones de la primera etapa serán realizadas bajo una condición libre de Mg y Ca, lo cual fue determinado como una condición práctica para evitar posibles problemas de alertas por incrustaciones al momento de evaluar un pH de elevada alcalinidad en los diferentes softwares de diseño. La fuerza iónica de la corriente de alimentación es compensada en estos casos con NaCl hasta valores de 2.100 y 2.200 TDS.

Las cantidades de boro establecidas para ser evaluadas en el caso de estudio corresponden al resultado del análisis de impacto en la zona (Ver capítulo 2.2).

Dado que lo que se busca obtener es agua con una calidad de riego adecuada para cultivos, la calidad del agua producida finalmente será comparada y evaluada respecto a los requisitos establecidos por la normativa NCh 1.333, “Requisitos de calidad del agua para diferentes usos – requisitos de agua para riego”.

5.2. Flujo del agua de producto

El flujo del agua de producto o requerida, es un parámetro establecido en base a un estimativo del consumo promedio por hectárea de agua, el cual es considerado de aproximadamente 40 m³/día para riego tecnificado de cultivos de hortalizas en zonas áridas de Chile. Para el caso de estudio, se establece que el diseño será dimensionado para abastecer un terreno de 5 hectáreas, lo cual busca representar el área cultivable promedio de un agricultor de la zona. En la tabla 11 se detalla el requerimiento hídrico para el diseño del sistema, calculado en base a 10 horas de operación diarias de una planta (Astaburuaga, 2004).

Tabla 11. Requerimiento hídrico y flujo producido por el sistema.

Consumo agrícola	[m ³ /día ha]	40
Hectáreas de cálculo	[ha]	5
Requerimiento hídrico diario	[m ³]	200
Horas funcionamiento	[horas]	10
Flujo permeado	[m ³ /hora]	20

5.3. Recuperación y flujo de alimentación

Dado que el enfoque del trabajo se centra en determinar qué tipos de membrana presentan una mejor oportunidad de implementación, sumado a la buena calidad del agua caracterizada (en términos de cantidad de sólidos disueltos y formadores de incrustación), la recuperación del sistema será establecida en un 75% dado que este valor representa un caso práctico de análisis para la mayor cantidad de los sistemas de diseño. En consecuencia, definido este punto, se pueden establecer los flujos alimentación y concentrado del sistema, los cuales son presentados en la siguiente tabla (Kucera, 2015).

Tabla 12. Recuperación y flujo del sistema.

Flujo permeado	[m ³ /hora]	20
Recuperación:	[%]	75%
Flujo alimentación	[m ³ /hora]	26,667
Flujo concentrado	[m ³ /hora]	6,667

Cabe destacar que el valor definido de recuperación es solo un buen caso de referencia para la evaluación general del trabajo, sin embargo, es posible, en base a la calidad del agua, evaluar recuperaciones aún mayores, las cuales pueden ser diseñadas variando la cantidad de membranas, la configuración del arreglo, o también con una etapa adicional de recirculación del concentrado para obtener altas recuperaciones.

5.4. Configuración del sistema

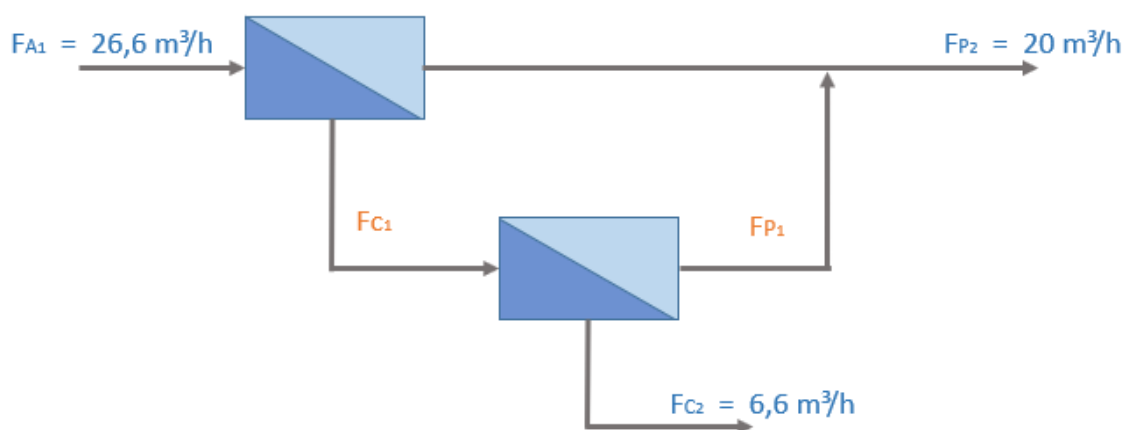
La configuración del sistema será diseñada para contenedores a presión de capacidad para 6 membranas, debido a que este tipo de contenedor se presenta mayor frecuencia y disponibilidad en el mercado. Mientras que, por otro lado, establecer un tipo de contenedor en base a su capacidad mejorara la comparación entre los rendimientos y remoción para todas las membranas en evaluación.

Luego, para poder abarcar una recuperación del 75% se utilizará un sistema de dos etapas de acuerdo con los valores recomendados en la tabla 13, “para valores recomendados de número de etapas para un sistema de agua salobre”. En este caso, el flujo de concentrado generado en la primera etapa será utilizado para alimentar a la segunda. El número de membranas a utilizar será una de las variables que permitirá adecuar la producción para la consistencia del sistema.

Tabla 13. Numero de etapas para un sistema de agua salobre.

Recuperación del sistema (%)	Numero elementos en serie	Numero de etapas (6 membranas por contenedor)
40 – 60	6	1
70 – 80	12	2
85 – 90	18	3

(Water & Process Solutions FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, n.d.)



Esquema 1. Configuración determinada en base a la recuperación del sistema establecida.

5.5. Selección de membranas

Según lo revisado en el capítulo 3.4., existe una extensa variedad de membranas clasificadas de acuerdo a su aplicación, características y diseño; si bien algunas de estas se estas membranas son específicamente diseñadas para la remoción de boro, existe un amplio espectro de membranas que a pesar de que su desarrollo tecnológico se encuentra centrado en otras cualidades, presentan de todas maneras un buen rechazo de boro como consecuencia de su diseño. Por lo tanto, los criterios sobre la selección de membranas inicialmente serán basados sólo en que estas sean capaces de tolerar las condiciones de trabajo definidas. De acuerdo con esto, se considerarán todas las membranas diseñadas para tratar agua salobre, o que han sido probadas bajo condiciones similares de operación (entre los 1.500 y 2.000 ppm, y de 100 a 425 psi), dejando fuera de evaluación todas aquellas membranas caracterizadas para procesar flujos de alta concentración de sales, como agua de mar o algunos fluidos de procesos.

Existe también un subconjunto de membranas que son clasificadas dentro de las membranas de bajo consumo energético. Estas requieren según especificación un agua de alimentación con mayor nivel de pureza en donde sobrepasar estas condiciones puede repercutir en daños estructurales en los módulos. Estas membranas son probadas por lo general a 100 psi con una concentración de sales de 500 ppm, por lo que no pueden ser consideradas dentro del caso de estudio.

Otro factor importante considerado para la selección de membranas trata sobre el área necesaria por modulo adecuada para el sistema. Muchos fabricantes de membrana han desarrollan un mismo modelo de membrana en varios tamaños o formatos de dimensiones, por ejemplo, la membrana TML720 de Toray se encuentra disponible en los formatos de 370, 400 y 440 ft² por modulo, sin embargo, hay que tener en cuenta que algunas membranas también presentan ligeras diferencias al cambiar el área de trabajo, este es el caso por ejemplo de la membrana de 365 ft², modelo BW30-365 de Dow Water and Process Solutions la cual lleva un espaciador de alimentación de 34 mil, mientras que su versión para 400 ft², BW30-400 lleva un espaciador de 28 mil. El modelo BW30-365 está recomendado para aguas de alimentación más sucias debido al espaciador de alimentación más grueso, por lo cual se estima conveniente evaluar de todas maneras ambos formatos de trabajo.

En general, las variedades de membranas respecto a su área nominal de trabajo van desde los 25 ft² hasta los 1.700 ft². Aquellas membranas bajo los 70 ft² son consideradas normalmente para producciones de baja escala o para usos domiciliarios, mientras que las variedades con área sobre los 1.600 ft², son consideradas para producciones de gran escala.

Debido a que el diseño de un sistema con membranas de área muy pequeña demandaría una cantidad de módulos muy elevada, se establece que las

membranas que serán evaluadas serán de 70 ft² a 440 ft². Por otro lado, las membranas sobre los 440 ft², son solo aquellas disponibles en los formatos de 1.600 y 1.700 ft², las cuales presentan una sobredimensión sobre el requerimiento del sistema propuesto.

En la tabla 14, se resumen las características consideradas para las membranas evaluadas en esta revisión.

Tabla 14. Criterios de selección de membranas.

Aspecto	Valores
Presión de prueba	100 – 425 psi
Concentración de prueba	1.500 a 2.000 ppm
Área por modulo	70 – 440 ft ²

(Elaboración propia).

En el anexo 6, se detallan todos los módulos por fabricante de membrana que son considerados en esta evaluación, junto a sus condiciones de pruebas, aplicación y algunas características específicas de su diseño.

En términos prácticos, la selección del tipo de membranas generalmente es también una consecuencia de la calidad del agua de alimentación, la aplicación de interés, el capital de inversión y el costo de operación asociado.

5.6. Flujo promedio por membrana

El flujo promedio por membrana es un parámetro que se determina usualmente a partir de información en operación, experiencia del fabricante, o es estimado a partir de la clasificación de la fuente de alimentación como se indica en la tabla 15.

Tabla 15. Flujo recomendado por membrana en función de la fuente de agua de alimentación.

Fuente de alimentación	SDI	Flujo recomendado (gfd)	Recuperación máxima por elemento
Permeado de RO	< 1	21 – 23	30
Agua de buena calidad	< 3	16 – 20	19
Agua superficial de buena calidad	< 3	13 – 17	17
Agua superficial	< 5	12 – 16	15
Efluentes municipales (pretratamiento con microfiltración)	< 3	10 – 14	14
Efluentes municipales (tratamiento convencional)	< 5	8 – 12	12

(Water & Process Solutions FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, n.d).

Inicialmente se utilizará la información disponible en la tabla 3 para el valor del flujo promedio, tomando como referencia la categoría de “fuente de agua superficial de buena calidad”, sin embargo, este valor será ajustado indirectamente mediante algunos de los softwares que proporcionan un cálculo de la cantidad membranas requeridas por el sistema, para obtener un valor aún más preciso. El flujo promedio por membrana será obtenido en base a las ecuaciones empíricas que utiliza el simulador para hacer el cálculo del número de membranas del sistema. Los softwares que permiten esta condición son IMSDesign de Hydranautics y LewaPlus de Lanxess (ver capítulo 4.1. y 4.8. respectivamente).

El software IMSDesign y LewaPlus proporcionan la configuración del arreglo en base a los valores ingresados en el programa. El cálculo de los flujos promedios por membrana es elaborado una vez que todas las simulaciones hayan sido realizadas en estos softwares. Luego, los valores de los flujos serán ajustados por medio de la función de análisis de hipótesis presente Excel, y en base a la ecuación definida para el cálculo de número de membranas (ver capítulo 6.1).

Para esta interacción, la función objetivo utilizada corresponderá a la diferencia entre los módulos calculados por defecto en el simulador en comparación a los módulos calculados por la ecuación presentada, ajustando el valor de los flujos por membrana para cada etapa. En la tabla 16, se presentan los valores de los flujos obtenidos por etapa (ver anexo 7, “Flujo promedio por membrana” para el detalle del cálculo).

Tabla 16. Cálculo del flujo por membrana por etapa.

Alimentación por etapa	Flujo por membrana (gfd)
Primera etapa	16,45
Segunda etapa	11,00

(Elaboración propia).

Adicionalmente los valores presentes en la tabla 16, son comparados con los valores expuestos por Dow Water and Process Solutions presentes en la tabla 15, para “valores recomendados de flujos en base al SDI por fuente de alimentación”. A partir de estos valores es realizado el cálculo del número de membranas para el diseño del sistema en los otros softwares evaluados.

5.7. Factor Beta y ensuciamiento de la membrana

El factor Beta representa la relación entre la concentración de una especie en la superficie de la membrana y la solución desarrollada en la membrana. Beta no es una propiedad de membrana, ni tampoco un valor que pueda ser solicitado al fabricante. Es una función de la rapidez con la que la corriente afluyente se deshidrata a través del sistema RO. Por lo tanto, Beta es una consecuencia del diseño del sistema que se seleccione y permite evitar las fallas por ensuciamiento en la membrana.

En términos prácticos, Beta es siempre mayor que 1,0, y por lo tanto, la polarización de la concentración siempre existe, sin embargo, esta puede ser minimizada en base al criterio que se tenga en el diseño del sistema.

- El factor Beta puede cambiar ajustando la presión de permeado en cada etapa individual.
- Pueden realizarse ajustes en el arreglo del sistema RO.
- Aumentar en el número de recipientes a presión en una etapa posterior también disminuirá la presión aplicada requerida por la etapa anterior, disminuyendo así el flujo y el factor Beta para esa etapa previa.
- Ajustar el valor de la recuperación del sistema.
- Utilizar valores recomendados para los flujos de concentrado puede minimizar también los efectos de la polarización de la concentración.

La experiencia, en procesos convencionales demuestran que valores de Beta inferiores a 1,2 en un diseño de RO minimiza el ensuciamiento y la incrustación de las membranas. En la tabla 17 se enumeran los valores Beta recomendados por Hydranautics en función de la calidad del agua de alimentación.

Tabla 17. Valores de Beta recomendados por Hydranautics en función de la calidad de la fuente de alimentación.

Beta	Permeado de RO	Agua salobre de buena calidad	Agua salobre superficial	Aguas terciarias
Conservator	1,3	1,18	1,18	1,18
Maximo	1,7 *	1,2	1,2	1,2

(*) Considerado para un diseño exigido, un valor típico de esta variable es de 1,4. (Kucera, 2015).

Si bien es recomendable no exceder estos valores, los softwares de diseño en general, despliegan una advertencia cuando se obtienen valores fuera de la capacidad en consecuencia a su diseño. Este valor será considerado como un criterio de ajuste, el cual permitirá establecer una configuración más adecuada para el diseño del sistema.

5.8. Incrustación

Para cuantificar la tendencia a la incrustación y corrosión del agua se puede utilizar el índice de saturación de Langelier (LSI), el cual se estima a partir de los valores de pH y de temperatura del agua de la solución. El índice de saturación de Langelier debe ser considerado cuando se presentan los tipos de sales presentes en la tabla 18. Un mayor detalle sobre su cálculo es presentado en el documento Reverse Osmosis, Industrial Applications and Processes, Kucera, 2015, el cual puede ser consultado en caso de presentarse este factor como crítico de análisis.

La tabla 18 enumera las pautas de agua generalmente aceptadas para minimizar la incrustación en membranas de RO.

Tabla 18. Guía de calidad de agua aceptada para minimizar la incrustación en sistemas de RO.

Especie	Medida	Valor
Silicio (soluble)	ppm	200*
Bario, estroncio	ppm	< 0,05
Calcio	LSI	< 0**

*En la corriente de rechazo de un sistema de RO.

** Puede ir de 2 a 2,5 con un apropiado antiescalante.
(Kucera, 2015).

Para realizar una revisión más minuciosa se deberá determinar el potencial incrustamiento de una sal, comparando los productos iónicos de la sal en la corriente de rechazo con el producto soluble bajo las condiciones de operación.

5.9. Temperatura del agua

Por otro lado, para definir la temperatura del agua de trabajo, se analizó la tendencia climatológica del agua en la zona, la cual refleja tener un comportamiento estacional que por lo general fluctúa entre los 2 y los 32 °C, variando por la altitud y zona geográfica específica donde de monitoreo (más cercano a la cordillera o hacia la costa), sin embargo, la temperatura sobre los sectores con mayor actividad agrícola (valles y planicies), varía más bien entre los 6 y 26 °C durante el transcurso del año. Por efecto de análisis, y dadas las favorables condiciones climatológicas de la zona, el valor de la temperatura será evaluado en 18 °C (DGA, 2015).

5.10. Criterios de aceptación

De acuerdo a lo establecido en la metodología de trabajo en el capítulo 1, una vez realizadas todas las simulaciones contempladas, se consideraran como membranas con una buena capacidad de remoción de boro a todas aquellas que presenten un rendimiento de remoción sobre el 70% de este componente y que a su vez cumplan con el requisito mínimo establecido por la normativa NCh 1.333 para agua de riego, en la cual se establece que esta agua debe cumplir con una cantidad no superior a 0,75 ppm para su uso.

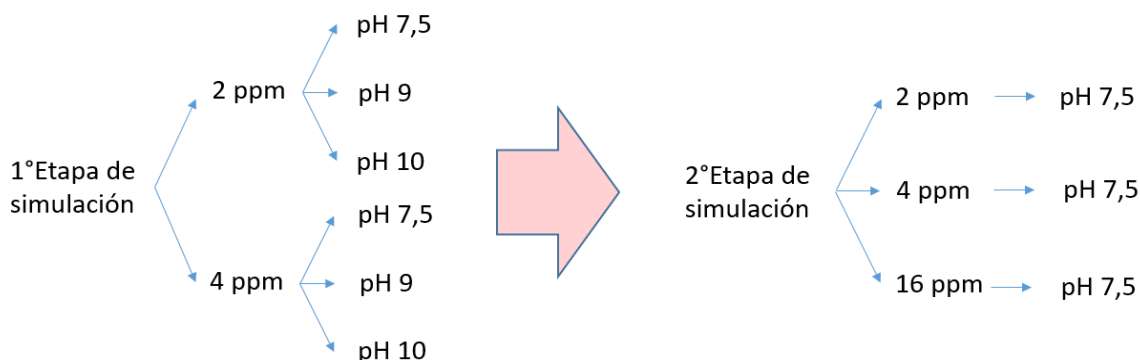
El requisito sobre el 70% de remoción de boro es definido de acuerdo a los resultados presentes en otras investigaciones como las presentadas en la tabla 3, del capítulo 2.3. “Tecnologías de remoción de boro”, en donde para rendimientos sobre este valor han sido consideradas como buenos resultados de estudio.

Capítulo 6. Simulaciones y análisis de resultados

6.1. Diseño del sistema

El diseño de un sistema de RO incorpora a todos los puntos considerados desde el capítulo 2 al 5. El diseño de experimentos o el proceso de evaluación corresponde al descrito a continuación.

Diagrama 3. Diseño experimental para el proceso de simulación (escenarios).



Tal como se describe en el capítulo 1.3. “Metodología de trabajo”, las membranas evaluadas en la 1ª etapa de simulación corresponden a aquellas que cumplen con las características y condiciones establecidas para procesar el agua caracterizada y tolerar las condiciones de operación definidas (ver capítulo 5.5. “Selección de membranas”). Luego, solo aquellas membranas cuya remoción de boro sea superior o igual al 70% de remoción serán evaluadas en la 2ª etapa de simulación para todos los escenarios presentados.

A continuación, se presentan la serie de pasos realizada para la simulación de cada membrana junto a las consideraciones más relevantes establecidas en el diseño de estos sistemas (Capítulo 5). La estructura de la secuencia de pasos para el diseño un sistema de RO es realizada de acuerdo a la información otorgada en el manual técnico de Water & Process Solutions y la guía de Kucera, J. (2015). “Reverse Osmosis, Industrial Applications and Processes”.

1) Establecer la calidad del agua de alimentación y la del agua requerida.

La calidad del agua de alimentación disponible y el requisito de uso, son definidos en la tabla 9, para el sector agrícola altiplánico del norte de Chile a una temperatura de alimentación de 18 °C de acuerdo a lo establecido en los capítulos 5.1., “Calidad del agua”, y 5.8., “Temperatura del agua” respectivamente.

Cabe destacar que, pese a la caracterización previa del agua, cada programa de simulación presenta su propio set de trabajo respecto a los componentes que permiten evaluar dentro de su paquete de simulación (minerales o elementos

específicos). Una vez ingresado los valores del agua, el software realizará un balance de sus componentes químicos los cuales abarcan un rango de 1.750 a 1850 TDS (realizado con NaCl). Dado que la diferencia presentada sobre la cantidad de solidos totales disueltos no supera las 100 unidades, se considerará este punto como una diferencia de impacto menor sobre los resultados finales obtenidos (para revisar en detalle los componentes ingresados en cada programa revisar Capítulo 4).

2) Definir el flujo de alimentación, de producto y recuperación del sistema.

El flujo de producto es determinado en 20 m³/hora, el cual corresponde al caudal necesario para abastecer un terreno de 5 hectáreas, calculado en base a 10 horas de operación diarias. Las consideraciones establecidas para la corriente de alimentación son descritas en el capítulo 5.2, “Flujo del agua de producto”.

Por otro lado, la recuperación del sistema es establecida en 75% respecto al agua de alimentación, el cual corresponde a un valor recomendado por la fuente de origen (calidad del agua) y las prácticas de diseño según se indica en el capítulo 5.3, “Recuperación y flujo producto”. Finalmente, el flujo de alimentación requerido para producir 20 m³/hora con una recuperación del 75%, corresponderá a 26,67 m³/hora, con un flujo de concentrado de 6,67 m³/hora.

3) Seleccionar la configuración del sistema.

Para poder trabajar con una recuperación del 75% se establece el uso de un sistema de 2 etapas, de acuerdo a los valores recomendados por Dow Water Solutions presentes en la tabla 13 del capítulo 5.4. “Configuración del Sistema”, para el numero de etapas por porcentaje de recuperación requerido. En este caso la operación será continua y sin requerimientos de una configuración de pasos.

4) Seleccionar el tipo de membrana.

Las membranas evaluadas corresponden a todas aquellas listadas en el anexo 6, en base a las consideraciones y criterios establecidos en el capítulo 5.5, “Selección de membranas”. En la siguiente tabla se resumen las características de las membranas consideradas.

Tabla 19. Resumen de las características de las membranas consideradas.

Presión de prueba	100 – 425 psi
Concentración de prueba	1.500 a 2.000 ppm
Área por modulo	70 – 440 ft ²
Proveedor	Hydranautics, Dow, Toray, CSMPPro, SUEZ, Lanxess, LG.
Tipo de membrana	Membranas diseñadas para tratar agua salobre, industrial, o con remoción específica de boro.

5) Definir el flujo promedio por membrana

El flujo promedio por membrana es una característica particular de cada módulo, el cual puede ser determinado en operación o estimado en base a la calidad del agua de alimentación.

El flujo promedio por membrana es considerado inicialmente a partir de los valores definidos y recomendados por Dow Water Solutions para agua salobre de buena calidad según se indica en la tabla 15 del capítulo 5.6., “Flujo promedio por membrana”. En donde, posteriormente este valor es ajustado en base a algunos de los softwares que proporcionan un cálculo de la cantidad membranas requeridas por el sistema y la ecuación (1) definida para el cálculo del número de membranas presente en el punto a continuación. Las consideraciones junto al detalle del método utilizado se encuentran descritas en el capítulo 5.6.

Finalmente, el flujo resultante definido para la primera y segunda etapa del sistema corresponde respectivamente a 16,45 y 11,0 gfd, de acuerdo a las consideraciones establecidas. Cabe destacar que estos valores estimados y utilizados en forma referencial son usados únicamente como punto de partida para el dimensionamiento y cálculo del número de membranas por etapa (siguiente paso) dado que, en forma posterior, una vez realizada la simulación, el número de membranas establecidas como parámetro de entrada deberá ser ajustado (si es necesario) de acuerdo a las alertas de sobredimensionamiento por flujos excedidos, índices de saturación e índices de incrustamientos predefinidos por cada fabricante para cada una de sus membranas.

6) Calcular el número de membranas por etapa

Una vez definidos todos los puntos anteriores, es posible utilizar la ecuación 1 definida para el flujo por membrana y para calcular la cantidad de membranas requeridas a por el sistema.

$$J_w = \frac{F_p}{MA \cdot N} \quad (1)$$

Donde

J_w : flujo promedio por membrana, gfd (galones por ft² por día)

F_p : caudal de producto, galones por día

MA : área de membrana por contenedor a presión

N : número de contenedores

El cálculo de la cantidad de membranas debe ser realizado para cada etapa y para todas las variedades de membranas respecto al área disponible por modulo. Una vez calculado este valor, será posible ingresar todos los parámetros de entrada anteriormente establecidos para correr las simulaciones en cada programa de diseño.

7) Análisis y optimización del sistema

Una vez estimado el arreglo, es posible optimizar con respecto a otras variables de diseño, incluyendo flujos, índices de incrustación, recuperación y factor Beta. Por ejemplo, si el simulador advierte que ha sido excedido en algún parámetro de flujo mínimo por membrana, o en algún índice de ensuciamiento e incrustación, se podrá variar la cantidad de membranas para ajustar estos valores de acuerdo a las capacidades de cada membrana, evaluadas en cada programa (Water & Process Solutions FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, n.d.)

8) Resumen de consideraciones y parámetros de entrada.

De acuerdo con lo definido en la metodología de trabajo, las simulaciones son realizadas en dos etapas, cuyas consideraciones en detalle se resumen a continuación.

Tabla 20. Resumen condiciones de simulación.

Aspecto	Simulación preliminar (primera fase)	Simulación sistema (segunda fase)
Concentración boro	2 – 4 ppm	2, 4 y 16 ppm
pH	7,5 – 9 – 10	7,5
TDS	2.100 a 2.200 ⁽¹⁾	1.750 a 1.850 ⁽²⁾
Membranas ⁽³⁾	Características (condición de prueba): Presión: 100 – 425 psi Alimentación: 1.500 a 2.000 ppm Área por módulo 70 – 440 ft ² .	Todas aquellas membranas con resultados de remoción de boro iguales o mayores al 70% en la primera fase de simulación.

⁽¹⁾ Condición libre de Mg y Ca, y compensada en NaCl.

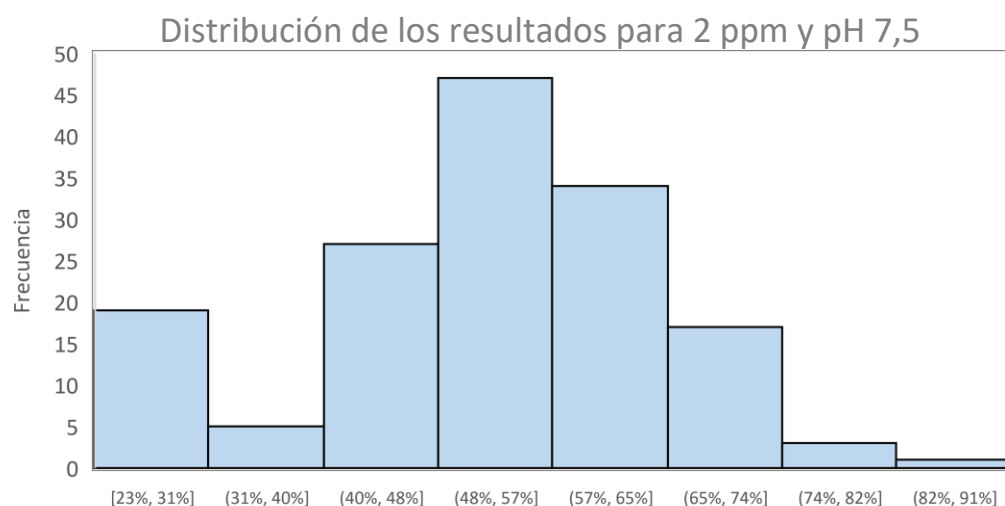
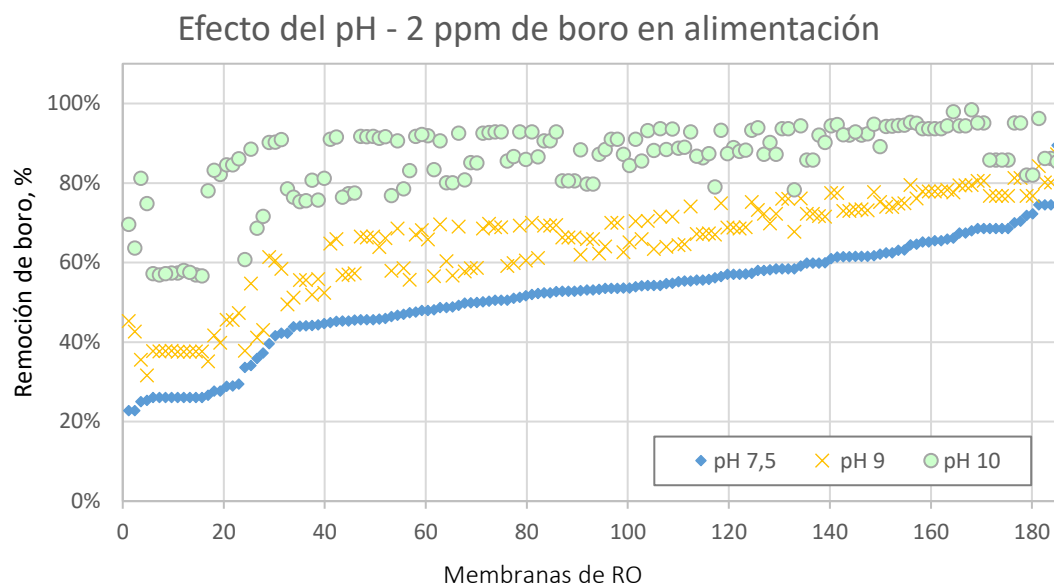
⁽²⁾ Resultante del balance iónico al ingresar las especificaciones de calidad del agua definidas en tabla 9 – Capítulo 5.1., “Calidad del agua”.

⁽³⁾ Todos los módulos de membrana considerados en esta evaluación son detallados en el Anexo 6, en base a las consideraciones establecidas en el capítulo 5.5, “Selección de membranas”.

Una vez establecida las todas las condiciones de operación y consideraciones de diseño, como la calidad del agua de trabajo, la recuperación y flujos de proceso, la configuración del sistema, la cantidad de membranas por contenedores a presión, la estimación del flujo promedio por membrana, y el cálculo del número de contenedores a presión por etapa, es posible simular los casos de análisis para estos escenarios, y para las dos etapas de simulación de trabajo.

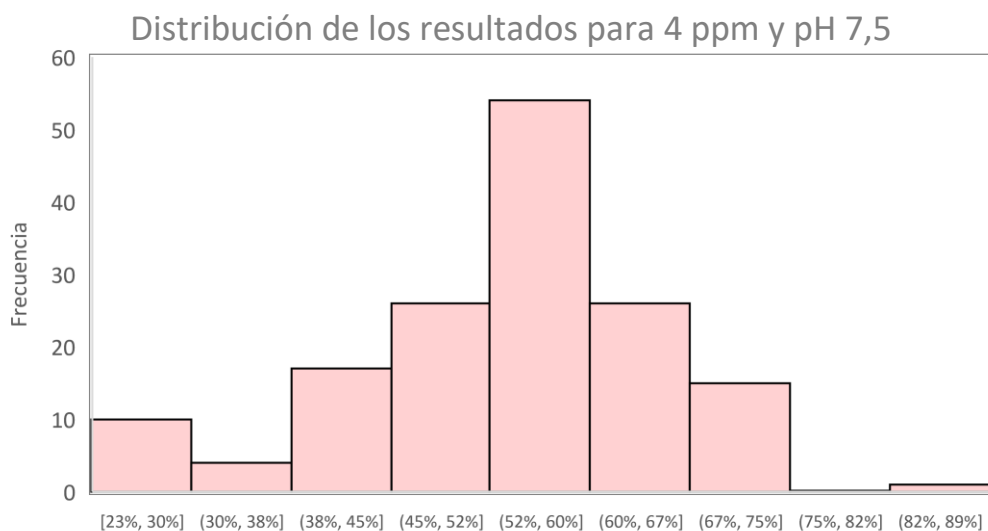
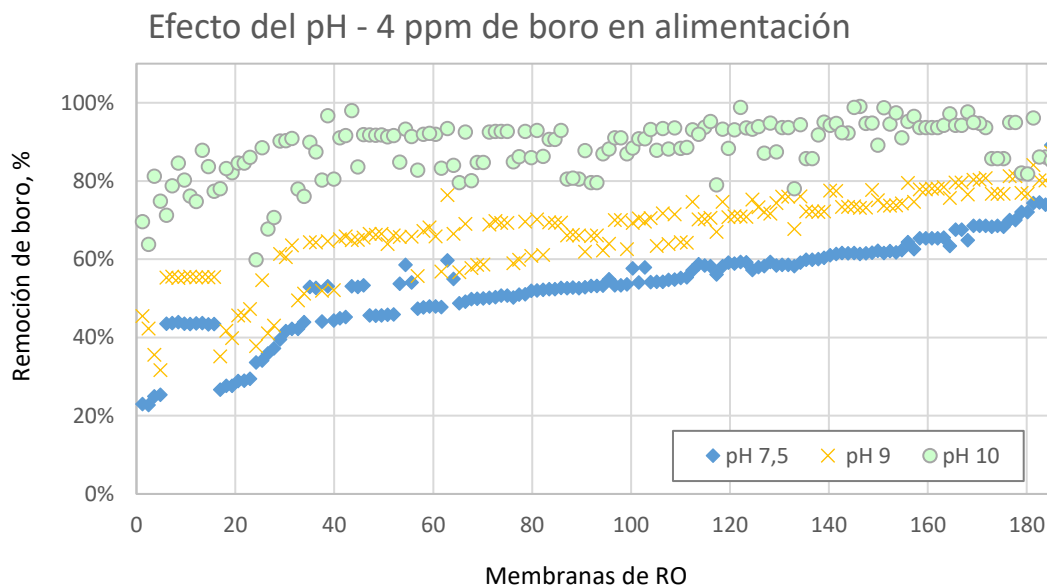
6.2. Resultados Primera Etapa de Simulación

A continuación, se presenta una gráfica con el resultado de remoción de boro de todas las membranas evaluadas, para una alimentación de 2 ppm de boro frente a una variación de pH de 7,5 – 9 y 10. Los resultados de cada membrana junto a la especificación de los modelos de membranas evaluados, son presentados en detalle en el Anexo 8, “Detalle de los resultados de Primera Etapa de Simulación”. de su modelo y fabricante son presentados a continuación en la siguiente tabla.



De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede apreciar claramente que la simulación en cada membrana responder a una diferencia sobre el valor de remoción de boro al aumentar el pH, mientras que por otro lado la distribución de los datos demuestra que los valores típicos de remoción se encuentran acotados entre el 40 – 65% de remoción.

A continuación, se presenta una gráfica con los resultados de remoción de boro para una alimentación de 4 ppm de boro frente a una variación de pH de 7,5 – 9 y 10. Adicionalmente se presenta la distribución de los resultados para 4 ppm de boro y un pH de 7,5.



De manera similar a los resultados obtenidos para una alimentación de 2 ppm, se puede apreciar un aumento en la remoción de cada membrana frente al aumento de pH para una alimentación de 4 ppm.

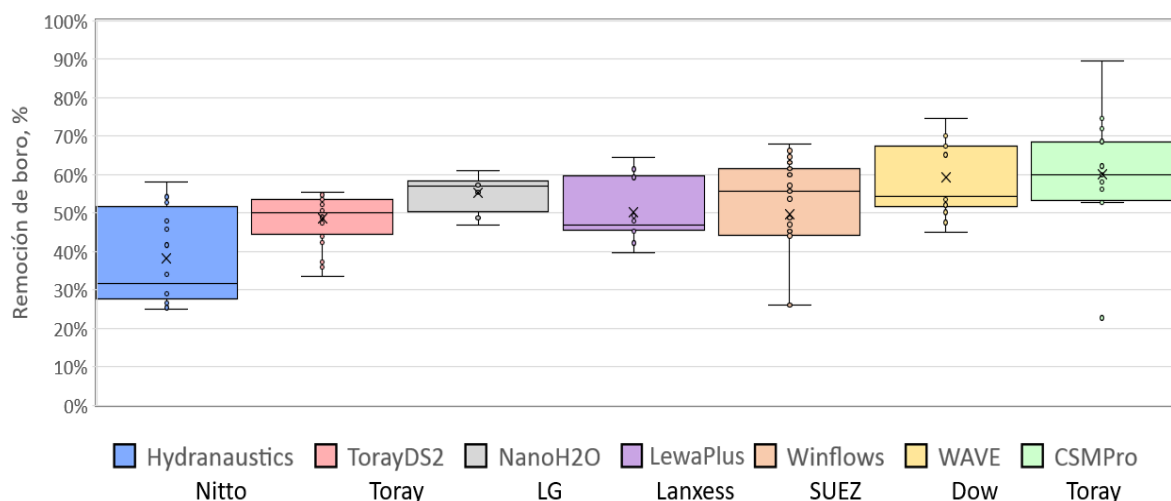
Dentro de los resultados obtenidos cuyo valor supera el 70% de remoción, se presentan solo 8 membranas que cumplen esta con esta condición para todos los escenarios evaluados (2 – 4 ppm B y 7,5 – 9 – 10 pH en la corriente de alimentación [6 escenarios]). Los resultados de cada membrana junto al detalle de su modelo y fabricante son presentados a continuación en la tabla 21.

Tabla 21. Resumen resultados membranas con remoción superior al 70%.

Software	Serie	Modelo	Área (s.q.ft)	Contenedores 1° etapa	Contenedores 2° etapa	Remoción boro (%)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
WAVE	LC	LC HR-4040	94	11	6	74,5%	0,68	21,10
WAVE	BW30	BW30HR-440	440	3	2	70,4%	0,79	27,58
WAVE	BW30	BW30HR-440i	440	3	2	70,0%	0,80	28,28
CSMPro	BL	RE8040-BLN440	440	3	2	89,5%	0,28	65,34
CSMPro	BW	RE8040-BE440	440	3	2	74,5%	0,68	29,93
CSMPro	F	RE8040-FEn440	440	3	2	74,5%	0,68	29,93
CSMPro	BL	RE4040-BLR	85	12	6	72,3%	0,74	32,56
CSMPro	F	RE4040-FLR	85	12	6	71,9%	0,75	32,56

(*) El porcentaje de remoción de boro corresponde al resultado evaluado con una alimentación de 2 ppm de boro a pH de 7,5, y 18 °C.

El detalle de los resultados de simulación para cada membrana, son presentados en el Anexo 8, “Detalle de los resultados de Primera Etapa de Simulación”. Un análisis adicional realizado sobre los resultados de remoción de boro agrupados por fabricante, demuestran que los mejores resultados se presentan para Toray, Dow y SUEZ.



6.3. Resultados Segunda Etapa de Simulación

En esta sección la simulación es realizada bajo condiciones de 2, 4, y 16 ppm de boro, utilizando las especificaciones de calidad del agua definidas para el sector objetivo (ver capítulo 5.1, tabla 11) a un pH de 7,5, y para todas aquellas membranas con resultados de remoción de boro iguales o mayores al 70% durante la primera etapa de simulación.

De acuerdo a los resultados obtenidos para valores superiores al 70% de remoción de boro en la primera etapa de simulación, las membranas que serán consideradas para esta segunda etapa corresponden a 3 membranas del fabricante Dow Water Solutions (WAVE) y 5 membranas de Toray (CSMPro).

Condiciones de entrada:

En la siguiente imagen se muestran las condiciones de alimentación ingresadas en el software WAVE para las condiciones descritas anteriormente con 2 ppm de boro.

Feed Water - Stream 1

Stream Definition: Stream1 100.00 %

Water Type: Surface Water

Water Sub-type: SDI < 3

Temperature: 5.0 °C (Minimum), 18.0 °C (Design), 40.0 °C (Maximum)

pH: 7.50

Additional Feedwater Information:

Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
NH ₄	0.08	0.22	0.00
K	50.00	64.00	1.28
Na	407.01	885.98	17.70
Mg	30.00	123.54	2.47
Ca	150.00	374.60	7.49
Sr	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00
Total Cations:	637.09		28.94

Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
CO ₃	0.00	0.00	0.00
HCO ₃	0.00	0.00	0.00
NO ₃	6.12	4.94	0.10
Cl	800.00	1,129.25	22.57
F	0.50	1.32	0.03
SO ₄	300.00	312.57	6.25
Total Anions:	1,106.62		28.94

Symbol	mg/L
SiO ₂	11.82
B	2.00
CO ₂	0.00
Total Neutrals:	13.82

Total Dissolved Solids : 1,767.01 mg/L

Charge Balance: -0.000048 meq/L

Estimated Conductivity: 3,276.41 µS/cm

Figura 25. Condición de calidad de agua de ingreso – software WAVE.

De manera similar se establecen las condiciones de calidad del agua y parámetros en el software CSMPPro de Toray mostradas en las figuras 26 y 27.

Numero de Pasos: 1

Temperatura: 18.00 °C

	Paso 1	Unidad
Permeado	20,00	m3/hr
Conversión	75,00	%
Alimentación	26,66	m3/hr
Disminución del flujo en	7,00	%
Inc. paso sales%/año	10,00	%
Edad Membrana (años)	0,00	yr
Flujo promedio	16,31	lmh
Mezcla permeado	0,00	m3/hr
Numero de etapas	2	
Desvío	0,00	m3/hr

CSMPPro

Schematic diagram showing flow from F to P and C.

Figura 26. Parámetros de entrada – TCK Membrane CSMPPro.

CSMPRO v5.0 - [DESIGN]
 Archivo Opciones Ayuda Actualizar

Proyecto: Simulacion
 Diseñado por: Felipe Cisternas
 Email: cister.felipe@gmail.com
 Observaciones:

Empresa:
 Página Web:

Caso: 1
 Versión: 10
 Fecha: 02-02-2018

Unidades:
 Caudal: m3/hr
 Presión: Bar
 Flujo: l/mh
 Temperatura: C

ABRIR GUARDAR

Simulacion

Alimentación Cálculo de Incrustaciones Sistema Resultado

Num. Aliment.: 1 Fecha: 14-06-2018 Open Water Profile Save Water Profile

Aliment 1

Procedencia del agua: Agua Superficial SDI <3 Alimentación: 26,66 m3/hr 100 %
 TDS mg/l como ion: 1.760,79 Temperatura: 18,00

☒ Análisis Iónico

	mg/l como ion	ppm como CaCO3	meq/l	Unidades
Na	405,13	883,18	17,62	as Ion
K	50,00	64,00	1,28	as Ion
NH4	0,08	0,24	0,00	as Ion
Ca	150,00	375,00	7,50	as Ion
Mg	30,00	123,00	2,46	as Ion
Fe	3,00	5,37	0,11	as Ion
Ba	0,00	0,00	0,00	as Ion
Sr	0,00	0,00	0,00	as Ion
Cl	800,00	1.128,00	22,54	as Ion
NO3	6,20	5,02	0,10	as Ion
SO4	300,00	312,00	6,24	as Ion
F	0,50	1,31	0,03	as Ion
HCO3	0,10	0,08	0,00	as Ion
CO3	0,00	0,00	0,00	as Ion
CO2	0,00	0,01	0,00	as Ion
B	2,00			as Ion
SiO2	11,82			as Ion
Alcalinidad Total	0,10			as CaCO3

	Unidad	Corriente 1	Corriente 2	Total
SDI	15 min	16,50		
Turbidez	NTU			
TOC	mg/l as O2			
DQO	mg/l as O2			
DBO	mg/l as O2			
Cl2	mg/l as Cl			

etc.

Conductividad: 3.420,17 uS/Cm pH aliment.: 7,5

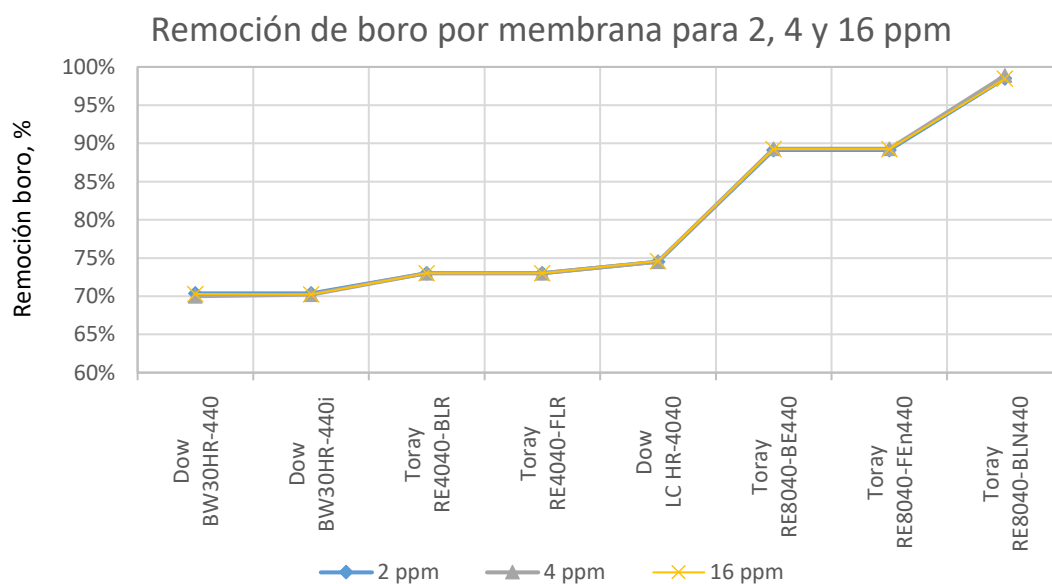
Total Cationes: 28,956 Auto Balance
 Total Aniones: 28,956
 Extra ion: 0,000

Na NaCl
 Cl Resetear

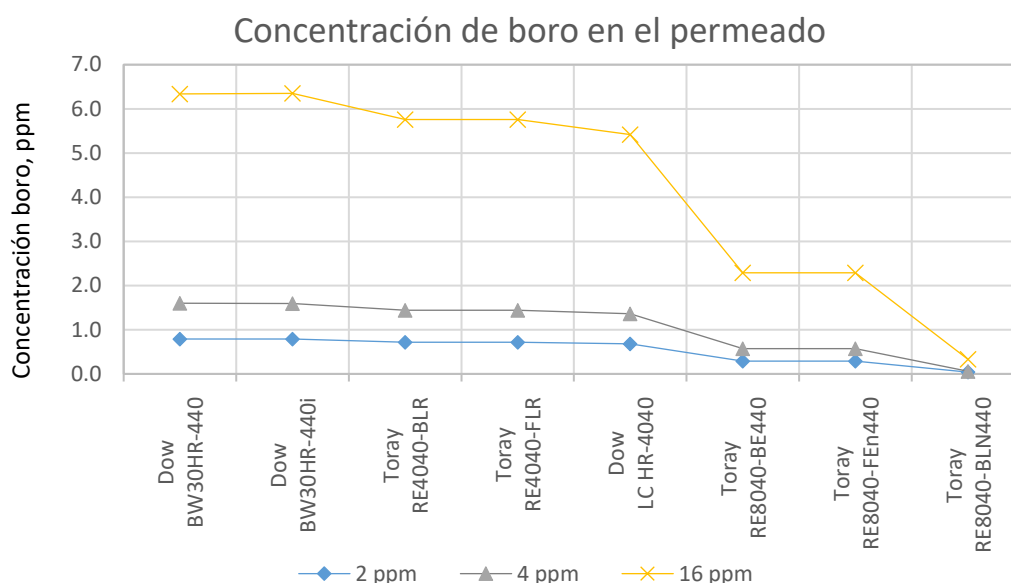
Figura 27. Condición de calidad de agua de ingreso – TCK Membrane CSMPPro.

Resultados:

A continuación, se presenta una gráfica con el resultado de remoción de boro de las 8 membranas evaluadas, para una alimentación de 2, 4 y 16 ppm de boro a un pH de 7,5.



En la siguiente gráfica se presentan la concentración de boro obtenida en el permeado de las 8 membranas evaluadas, para una alimentación de 2, 4 y 16 ppm de boro a un pH de 7,5.



En la tabla 22 se resumen todos los resultados obtenidos, evaluados bajo las condiciones de 2 – 4- 16 ppm de boro, pH de 7,5, y para todos los componentes del agua de alimentación caracterizados y resumidos en la tabla 11 del capítulo 5.1. “Calidad del agua”.

Tabla 22. Resumen de resultados de simulación de sistema.

Boro alimentación				2 ppm			4 ppm			16 ppm		
pH alimentación				pH 7,5			pH 7,5			pH 7,5		
Temperatura alimentación				18 °C			18 °C			18 °C		
N°	Fabricante	Software	Modelo	Remoción boro (%)	Boro (ppm)	TDS (ppm)	Remoción boro (%)	Boro (ppm)	TDS (ppm)	Remoción boro (%)	Boro (ppm)	TDS (ppm)
1	Dow	WAVE	LC HR-4040	74,50%	0,68	15,87	74,50%	1,36	19,74	74,59%	5,42	42,99
2	Dow	WAVE	BW30HR-440	70,38%	0,79	20,94	70,00%	1,60	25,65	70,28%	6,34	52,77
3	Dow	WAVE	BW30HR-440i	70,38%	0,79	20,97	70,19%	1,59	25,52	70,23%	6,35	52,83
4	Toray	CSMPro	RE8040-BLN440	98,50%	0,04	49,46	98,88%	0,06	51,00	98,45%	0,33	63,11
5	Toray	CSMPro	RE8040-BE440	89,13%	0,29	23,32	89,31%	0,57	25,00	89,27%	2,29	35,11
6	Toray	CSMPro	RE8040-FEn440	89,13%	0,29	23,39	89,31%	0,57	25,00	89,27%	2,29	35,11
7	Toray	CSMPro	RE4040-BLR	73,00%	0,72	21,89	73,00%	1,44	23,09	73,00%	5,76	67,27
8	Toray	CSMPro	RE4040-FLR	73,00%	0,72	21,89	73,00%	1,44	23,09	73,00%	5,76	31,60

Tal como se puede apreciar todos los resultados en esta etapa presentan rendimientos superiores al 70% de remoción de boro, sin embargo, solo para el modelo RE8040-BLN440 de Toray se cumple que para todas sus simulaciones (2 – 4 – 16 ppm de boro sobre la corriente de alimentación) se obtienen valores por debajo de los 0,75 ppm según sugiere la normativa NCh 1.333 para agua de riego.

Los reportes y resultados de todas las simulaciones se encuentran adjuntos en el Anexo 9, “Detalle de los resultados de Segunda Etapa de Simulación” de este mismo documento, en el cual se presentan los resultados y componentes del agua de producto (permeado), junto a los flujos de proceso y condiciones de operación ingresadas en cada software.

6.4. Análisis de resultados de simulación

Antes de presentar el análisis comparativo sobre las membranas con mayor desempeño de remoción de boro (membranas resumidas en tabla 22), se presentará a modo de contexto un resumen de todas las membranas contempladas en los diferentes procesos de evaluación durante el desarrollo de este trabajo.

6.4.1. Resumen del proceso de evaluación

De un total de 185 membranas evaluadas en los programas o paquetes de simulación, sólo 8 de ellas presentaron resultados favorables con rendimientos sobre el 70% de remoción de boro, y solo una de ellas presento valores bajo los 0,75 ppm de boro para todos los escenarios evaluados en la segunda etapa de simulación. En la siguiente tabla se resumen todas las membranas evaluadas por cada fabricante en cada proceso contemplado a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Tabla 23. Membranas contempladas por fabricante y proceso de evaluación.

Proceso o etapa			Cantidad total de membranas	Revisión de especificaciones	Resultados de simulación 1ª etapa	Resultados de simulación 1ª etapa
Nº	Fabricante de membrana	Software de diseño	Membranas para agua salobre o con salinidad similar (1)	Membranas que cumplen criterios operativos (2)	Membranas con rendimiento sobre 70% remoción (3)	Membranas con cumplimiento de NCh 1.333 (4)
1	Hydranautics	IMSDesign	40	24		
2	Dow Water Solutions	WAVE	36	36	3	
3	Toray Membrane	TorayDS2	72	36		
4	TCK Membrane America (Toray)	CSMPro	57	23	5	1
5	GE's (SUEZ)	Winflows	110	44		
6	LG Chem Nanocomposite	NanoH ₂ O	9	8		
7	Lanxess Energizing Chemistry	LewaPlus®	17	14		
Total membranas			341	185	8	1

(1) Membranas para agua salobre o con salinidad similar, disponibles y actualizadas en cada paquete de software.

(2) Membranas que cumplen con las especificaciones de diseños para evaluar el caso de estudio (Presión de prueba de 100 a 425 psi, Concentración de prueba de 1.500 a 2.000 ppm y área por modulo entre 70 ft² a 440 ft²). La primera etapa de simulación considera a todas las membranas que cumplen estas condiciones, para

luego evaluar su rendimiento de remoción bajo condiciones de 2 – 4 ppm de boro, pH de 7,5 – 9 – 10, y para una condición libre de Ca y Mg sobre el agua de alimentación.

(3) Membranas que presentan rendimientos de remoción sobre el 70% de boro en la primera etapa de simulación. La segunda etapa de simulación considera a todas las membranas que cumplen esta condición, para luego evaluar su rendimiento de remoción bajo condiciones de 2 – 4- 16 ppm de boro, pH 7,5, y para todos los componentes del agua de alimentación caracterizados en este trabajo.

(4) Membranas que presentan rendimientos de remoción sobre el 70% de boro en la segunda etapa de simulación y que cumplen con el criterio de cantidad de boro no superior a 0,75 ppm sobre el agua de producto de acuerdo a NCh 1.333 para agua de riego y para todos los escenarios de sensibilización de boro (2 – 4- 16 ppm).

6.4.2. Análisis comparativo de membranas

De acuerdo con los resultados expuestos en la tabla 22, los mejores rendimientos se obtuvieron sobre las membranas del fabricante Toray con desempeños de hasta 98,8 y 89,3% de remoción de boro para los modelos RE8040-BLN440 y RE8040-BE440 a una condición de 4 ppm sobre la corriente de alimentación, sin embargo al evaluar las características físicas de estas membranas, es posible observar que las 8 membranas cuya remoción es superior al 70% de boro presentan varias características en común, entre las cuales destaca la configuración enrollada en espiral compuestas de poliamida de película fina, lo cual concuerda con las características evaluadas en el Capítulo 3, “Membranas de Osmosis Inversa” para el rechazo específico de boro en membranas.

Tabla 24. Características de las membranas resultantes.

Modelo	Aplicación	Configuración elemento	Tipo de membrana	Material membrana	Rechazo estabilizado (boro %)	Carga superficial
LC HR-4040	Para agua salobre HR	Enrollados en espiral	TFC	PA	80,0%	Neutra
BW30HR-440	Para agua salobre HR	Enrollados en espiral	TFC	PA	SE	Neutra
BW30HR-440i	Para agua salobre HR, BR	Enrollados en espiral	TFC	PA	83,0%	Neutra
RE8040-BLN440	Para agua salobre HF, LE, HR	Enrollados en espiral envueltos en FRP	TFC	PA	SE	Negativa
RE8040-BE440	Para agua salobre HR, LE	Enrollados en espiral envueltos en FRP	TFC	PA	SE	Neutra
RE8040-FEn440	Para agua salobre LF, LE, HR	Enrollados en espiral envueltos en FRP	TFC	PA	SE	Neutra
RE4040-BLR	Para agua salobre HF, LE, HR	Enrollados en espiral envueltos en FRP	TFC	PA	SE	Negativa
RE4040-FLR	Para agua salobre ULF, LE, HR	Enrollados en espiral envueltos en FRP	TFC	PA	SE	Neutra

SE: sin especificación / PA: poliamida / THF: composición de película fina (*Thin-Film Composite*) / FRP: polímeros reforzados en fibra (*fiber reinforced polymer*).

Abreviación	Descripción de característica	Criterio
HF	alto flujo (<i>high flux</i>)	Especificación ficha técnica
HR	alto rechazo (<i>high rejection</i>)	[99,5% - 99,8%[
LF	bajo ensuciamiento (<i>low fouling</i>)	Especificación en ficha
UL	muy bajo ensuciamiento (<i>ultra low fouling</i>)	Especificación en ficha
LE	bajo consumo energético (<i>low energy</i>)	]110 psi - 150 psi]
ULF	muy bajo consumo energético (<i>ultra low energy</i>)	≤ 110 psi
BR	Eliminación de boro (boron removal)	Especificación ficha técnica

Por otro lado, según detalla el fabricante, la membrana RE8040-BLN440 de Toray (membrana con mejores resultados) presenta una superficie negativa, lo cual genera una mayor repulsión con el ácido bórico favoreciendo de esta manera el rechazo de boro. Aunque este efecto no se presenta de la misma manera para la membrana RE4040-BLR (también con carga negativa), se puede establecer que este factor no es el único determinante para el mejor rechazo de boro.

Es importante destacar que las membranas con mejores resultados no habían sido declaradas anteriormente por el fabricante como membranas favorables hacia la remoción de boro, como el caso del modelo LC-HR-4040 y BW30HR-440 que presentan un rechazo de boro de 80% y 83% respectivamente (de acuerdo a la especificación del fabricante).

Al realizar un análisis adicional sobre la permeabilidad por membrana (tabla 25), se puede observar que las membranas más pequeñas (85 ft² y 94 ft²) presentan una mejor distribución el área activa, aprovechando de mejor manera la disposición sobre estas mismas, sin embargo, desde un punto de vista económico – operacional, las membranas que presentan una mejor alternativa corresponden a aquellas que presentan una menor cantidad de membranas requeridas por etapas, siendo la configuración de 3 y 2 contenedores a presión, para la primera y segunda etapa respectivamente, la configuración con menos membranas representadas por aquellas membranas con un área activa de 440 ft².

Tabla 25. Tamaño de modulo y número de contenedores por membrana.

N°	Fabricante	Software	Serie	Modelo	Tamaño (in x in)	Área (s.q.ft)	Contenedores 1° etapa	Contenedores 2° etapa	Permeabilidad (Kg/m ² día)
1	Dow	WAVE	LC	LC HR-4040	4 x 40	94	11	6	5,00
2	Dow	WAVE	BW30	BW30HR-440	8 x 40	440	3	2	3,91
3	Dow	WAVE	BW30	BW30HR-440i	8 x 40	440	3	2	3,91
4	Toray	CSMPro	BL	RE8040-BLN440	8 x 40	440	3	2	3,91
5	Toray	CSMPro	BW	RE8040-BE440	8 x 40	440	3	2	3,91
6	Toray	CSMPro	F	RE8040-FEn440	8 x 40	440	3	2	3,91
7	Toray	CSMPro	BL	RE4040-BLR	4 x 40	85	12	6	5,07
8	Toray	CSMPro	F	RE4040-FLR	4 x 40	85	12	6	5,07

Capítulo 7. Evaluación económica

Dado que la membrana RE8040-BLN440 de Toray, es la única que cumple con los todas las condiciones y criterios técnicos establecidos, se presentarán los antecedentes económicos de la implementación de este único sistema.

7.1. Resumen de antecedentes técnicos.

A continuación, en la tabla 47 y 48 se resumen las especificaciones generales del sistema a evaluar.

Tabla 26. Especificaciones generales del sistema de RO.

Especificaciones sistema RO		
Flujo permeado	[m³/hora]	20
Recuperación	[%]	75%
Flujo alimentación	[m³/hora]	26,667
Flujo concentrado	[m³/hora]	6,667
Concentración boro	2, 4 y 16 ppm	
pH	7,5	
TDS flujo alimentación	1.750 a 1.850	
Configuración	2 etapas	
Membranas por contenedor	6	
Contenedores 1° etapa	3	
Membranas 1° etapa	18	
Contenedores 2° etapa	2	
Membranas 2° etapa	12	
Total membranas	30	

Tabla 27. Especificaciones de la membrana seleccionada.

Fabricante	TCK Membrane (Toray)
Modelo	RE8040-BLN440
Características	Para agua salobre HF, LE, HR
Tipo	PA, THF, enrollada en espiral
Dimensiones	8 in x 40 in
Área	440 ft²
Superficie	Negativa

7.2. Costos de inversión

Para la determinar el costo de inversión de un equipo, se evaluó el costo de adquisición de membranas junto a la evaluación de la bomba necesaria para abastecer al sistema, los cuales fueron cotizados en 181.333 y 342.000 respectivamente. Los costos de instalación, construcción e implementación de

servicios fueron estimados a partir de reglas heurísticas y a partir de la estructura de costos presentada en la figura 28.

Tabla 28. Resumen de costos de inversión.

Equipos	\$ 4.352.000
Instrumentación	\$ 1.958.400
Piping/Tuberías	\$ 652.800
Sistemas eléctricos	\$ 1.740.800
Construcciones	\$ 4.352.000
Membranas	\$ 5.440.000
Instalaciones de equipos/servicios	\$ 3.264.000
Total	\$ 21.760.000

De acuerdo con los valores expuestos en la tabla 49, la implementación de este sistema tiene un costo aproximado de 21.760.000 millones de pesos chilenos.

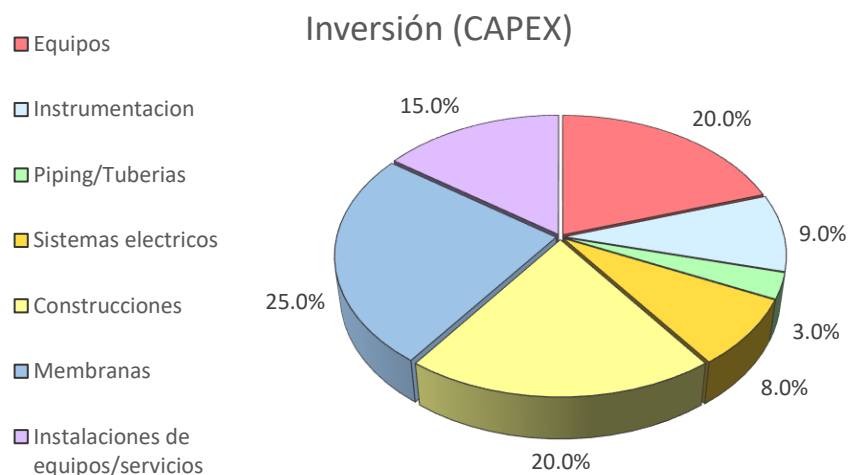


Figura 28. Estructura de costos de inversión.
(OSMOFLO, 2015) (Befesa, 2010)

7.3. Costos de operación

Los costos de operación fueron definidos a partir del consumo energético para abastecer al sistema, para ello se consideró el resultado de la simulación del equipo en donde para abastecer una presión de operación de 12,5 bar, se requirió un consumo de 114 kWh/día considerando 10 horas de operación diarias.

Tabla 29. Consumo energético.

kWh/día (10 horas aprox.)	114
\$/kWh	\$ 100
Consumo anual (\$/año)	\$ 4.161.000
kWh/m ³	0,57

Finalmente, con un consumo eléctrico anual de 4.161.000 millones de pesos chilenos junto al costo de adición de químicos (\$495.357), se estimaron los costos de mantención, limpieza y operación a partir de la estructura de costos presentada en la figura 29. La tabla 51 resumen los costos operacionales anuales del sistema evaluado.

Tabla 30. Resumen de costos de operación anuales.

Mantenimiento y limpieza	\$ 693.500
Reemplazo de membranas	\$ 495.357
Operación directa	\$ 396.286
Reparaciones	\$ 3.665.643
Costo eléctrico	\$ 4.161.000
Adición de químicos y otros	\$ 495.357
Total	\$ 9.907.143
CLP/m ³	\$ 136

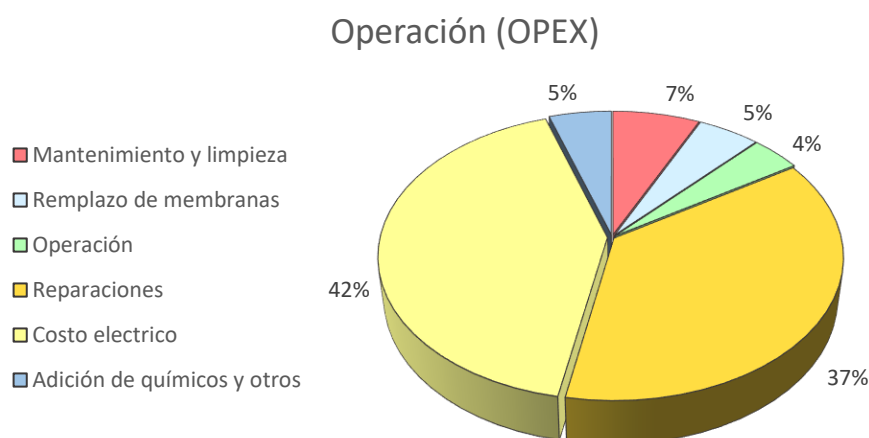


Figura 29. Estructura de costos de operación.
(OSMOFLO, 2015) (Befesa, 2010)

Del resumen de costos operacionales se establece que el costo por metro cubico de agua tendrá un valor aproximado de 136 pesos chilenos, con un consumo energético de 0,57 kWh por metro cubico de agua producida.

Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones

De un total de 341 membranas evaluadas, se obtuvieron efectivamente 8 membrana que presentaron remociones de boro superiores al 70%, de las cuales solo 2 de ellas habían sido declaradas anteriormente por el fabricante con capacidad para remover el boro. De estas 8 membranas, solo la membrana RE8040-BLN440 de Toray fue capaz de remover el boro obteniendo valores por debajo de una concentración de 0,75 ppm en su agua producto (valor recomendado por la guía de agua para riego NCh 1.333), con remociones superiores al 98%, bajo las condiciones de 2, 4 y 16 ppm de boro y un pH de 7,5 sobre la corriente de alimentación. La configuración de este sistema fue establecida para operar con dos etapas de 3 y 2 contenedores a presión respectivamente (con 6 membranas de 440 ft² por contenedor a presión), dimensionada para abastecer un caudal de 20 m³/h con una recuperación de un 75% del flujo de alimentación, con un costo de producción de 136 CLP/m³ y con una inversión de alrededor de los 22 millones de pesos.

La calidad del agua de alimentación fue establecida a partir de diversas fuentes bibliográficas en donde habían caracterizado aguas de causas cercanos a las zonas agrícolas de interés. El agua evaluada contempla una cantidad de TDS de 1.750 a 1.850 mg/L con una conductividad de 2.100 µS/cm. Entre los elementos químicos presentes en el agua caracterizada, se destacan el Sodio, Cloruros, Sulfatos y Arsénico por su presencia sobre el límite máximo recomendado por la NCh 1.333, mientras que el boro, fue evaluado para concentraciones de 2, 4 y 16 ppm en base a la presencia y frecuencia del elemento evidenciada en los lugares en donde este elemento es encontrado en exceso. Respecto a la calidad del agua producto, todos los componentes evaluados presentaron valores por debajo de lo establecido en la NCh 1.333, dado que por lo general los sistemas de RO remueven prácticamente todos los otros minerales del agua con rendimientos superiores al 95%.

Dentro de los 29 fabricantes de membranas industriales con mayor relevancia en el mercado, sólo 10 de ellos disponen de softwares de simulación propios y extendidos para el público en general, para el diseño y evaluación de sistemas de osmosis inversa utilizando sus membranas específicas. De estos 10 softwares finalmente 7 fueron considerados para esta revisión de acuerdo a su capacidad dentro de su diseño para evaluar la remoción de boro como parámetro de análisis y de acuerdo a la actualización de su base de datos en sus paquetes de simulación. Dentro de la revisión realizada, cabe destacar al software Winflows de Suez por presentarse como uno de los softwares más completos en términos de flexibilidad de evaluación de parámetros, seguido de LewaPlus, IMSDesign, y WAVE el cual destaca también por la disponibilidad de otros procesos de

tratamiento incorporados en el mismo programa. Respecto a las membranas evaluadas se consideraron todas aquellas todas las membranas diseñadas para tratar agua salobre, o que han sido probadas bajo condiciones similares de operación (entre los 1.500 y 2.000 ppm, y de 100 a 425 psi), dejando fuera de evaluación todas aquellas membranas caracterizadas para procesar flujos de alta concentración de sales, como agua de mar o algunos fluidos de procesos. Por otro lado, debido a que el diseño de un sistema con membranas de área muy pequeña demandaría una cantidad de módulos muy elevada, se estableció que las membranas evaluadas tuviesen un área de 70 ft² a 440 ft².

Es importante destacar que las simulaciones realizadas logran evidenciar membranas con alta remoción de boro que no habían sido reportadas anteriormente con características favorables hacia la remoción de boro, como el caso del modelo LC-HR-4040 y BW30HR-440 que presentan un rechazo de boro de 80% y 83% respectivamente (de acuerdo a la especificación del fabricante). Los rechazos de boro obtenidos de 3 membranas fueron **aún mejor** que los valores comerciales reportados para membranas específicas para la remoción de este elemento. Por otro lado, todas presentaron una configuración enrollada en espiral compuestas de poliamida de película fina, lo cual concuerda con la expectativa de otras investigaciones (Li, Yang & Wang. 2016) sobre el rechazo específico de boro por membranas. Pese a que la información sobre los materiales de fabricación de estas membranas no es especificada sus fichas técnicas, se puede hacer la observación sobre la superficie negativa de la membrana RE8040-BLN440 de Toray (membrana con mejores resultados), lo cual genera una mayor repulsión con el ácido bórico favoreciendo de esta manera el rechazo de boro. Aunque este efecto no se presenta de la misma manera para la membrana RE4040-BLR (también con carga negativa), se puede establecer que este factor no es el único determinante para el mejor rechazo de boro.

Respecto al costo de implementación de un sistema con una producción de 20 m³/hora en base a una recuperación del 75% del agua alimentada, se estima una inversión de 21.760.000 millones, con un consumo energético de 0,57 kWh por metro cubico de agua producida y un costo operacional de 136 pesos chilenos por metro cubico.

En general y en base a las simulaciones realizadas, es posible concluir que existen membranas cuyas características y desarrollo demuestran presentar rendimientos bastantes favorables hacia la remoción de boro, obteniendo resultados de hasta 98 a 99% de remoción de este componente sin requerir de ajustes sobre el pH de alimentación, verificando además que éstas permiten producir agua con calidad de riego adecuada para la diversificación de cultivos en las zonas agrícolas con excesos de este componente.

8.2. Recomendaciones

Se recomienda, como primer punto, hacer un estudio posterior en el cual se puedan hacer las pruebas experimentales sobre las membranas que han sido evidenciadas con alta remoción de boro.

En base a este estudio se sugiere evaluar en a modo de mejora configuraciones o arreglos con recirculación, bypass o adición de sistemas mixtos con intercambio iónico y/o separación por ultrafiltración, además de dispositivos de recuperación de energía o paneles solares que permitan disminuir los gastos operacionales al momento de evaluar el desempeño de un proyecto.

Por otro lado, cabe destacar que existe un grupo de membranas que también poseen características afines para la remoción de boro pero que no han sido evaluadas en esta revisión dado que sus condiciones técnicas de trabajo se encuentran limitadas a porcentajes de salinidad inferiores o condiciones de flujo insuficientes entre otros factores, como es el caso de la serie ESPAB de Hydranautics, la cual se encuentra diseñada para tratar agua salobre con presencia de boro pero condicionada a una alimentación con menor salinidad operando a presiones inferiores a las requeridas en el caso de estudio. Dado este tipo de situaciones se recomienda considerar este grupo de membranas en caso de evaluar un proyecto en el cual se presencie agua de alimentación de mejor calidad.

La evidencia de membranas con alto rechazo de boro hace a este tipo de tecnología relevante al momento de evaluar un sistema que permita mejorar las condiciones del agua de riego, municipal, industrial o algún tipo flujo de proceso, sobre todo en sistemas en los cuales la cantidad de boro presente pueda ser un parámetro crítico o de interés a eliminar, lo que también puede ser controlado bajo cierta extensión ante la presencia de fluctuaciones en el pH de la corriente de alimentación, siempre teniendo en cuenta que cualquier tipo de implementación deberá estar sujeto a la evaluación económica de acuerdo a la necesidad o requerimiento específico que se busque satisfacer.

Referencias

- Aguirre, M. (1957). Reconocimiento de suelos de la hacienda Camarones.
- ASITEC. (2008). Comercialización de equipos económicos para la eliminación de boro presente en aguas, con fines agronómicos e industriales.
- Astaburuaga, R. (2004). El agua en las zonas áridas de Chile.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0717-69962004005700018>
- Befesa. (2010). Sistemas de Ósmosis Inversa: Aspectos relevantes en la operación y mantenimiento.
- Cornejo, L., Lienqueo, H., Arenas, M., Acarapi, J., Contreras, D., Yáñez, J., & Mansilla, H. D. (2008). In field arsenic removal from natural water by zero-valent iron assisted by solar radiation. *Environmental Pollution*, 156(3), 827–831. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.05.022>
- DGA. (2010). Plan de Acción Estratégico Para El Desarrollo Hidrico de La Región de Arica y Parinacota. *Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile*, 90.
- DGA. (2015). Dirección General de Aguas. Mapa de Chile con temperaturas de referencia en cuerpos de aguas superficiales continentales, (c), 1–4. <https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>
- Faigon, M., & Hefer, D. (2008). Boron rejection in SWRO at high pH conditions versus cascade design, 223, 10–16.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.070>
- Farhat, A., Ahmad, F., Hilal, N., & Arafat, H. A. (2013). Boron removal in new generation reverse osmosis (RO) membranes using two-pass RO without pH adjustment. *Desalination*, 310, 50–59.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.10.003>
- Fernanda, M., & Arias, C. (2009). Reducción de boro en aguas procedentes de la desalación. *Universidad de Alicante - Tesis Doctoral*.
- FIA. (2009). Resultados y Lecciones en Reducción de Boro.
- Gatter, R. (2001). Relevamiento de Comunidades Rurales de America Latina, (c), 1–4. <https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>
- Kucera, J. (2015). Reverse Osmosis, Industrial Applications and Processes. *John Wiley&Sons, New Jersey, USA*. <https://doi.org/10.1002/9780470882634>
- Li, D., Yan, Y., & Wang, H. (2016). Recent advances in polymer and polymer composite membranes for reverse and forward osmosis processes. *Progress in Polymer Science*. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.03.003>
- Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). *Membrane and Desalination*

Technologies. Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015 (Primera, Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

OSMOFLO. (2015). Desalinización: El mar como fuente de agua para el norte de Chile.

Redondo, J., Busch, M., & Witte, J. De. (2003). Boron removal from seawater using FILMTECTM high rejection S WRO membranes, *156*(May), 229–238.

Roberto, J., & Alfaro, V. (2013). Caracterización de la cuenca del río San José en Arica para la evaluación a nivel de perfil de un sistema de recarga artificial de acuíferos.

Wang, B., Guo, X., & Bai, P. (2014). Accepted. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.12.049>

Water & Process Solutions FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual. (n.d.).

Anexos

Anexo 1. Tolerancia de distintos cultivos a la presencia de boro.

Tabla 31. Tolerancia relativa de distintos cultivos a la presencia de altos niveles de boro y salinidad en el agua de riego.

Cultivo	% de emergencia	% de sobrevivencia	Efecto observado de la salinidad y el boro	Tolerancia a la salinidad	Tolerancia al boro
Espárrago	90	90	1	T	VT
Betarraga	70	100	1	T	T
Remolacha	90	30	1	T	T
Acelga	100	95	1	T	-
Tuna	90	100	1		-
Alcachofa	90	90	2	MT	MT
Cebolla	95	90	2	S	VT
Espinaca	50	30	2	MS	-
Haba	70	40	3	S	S
Zanahoria	30	10	3	S	MS
Apio	30	30	3	MS	VT
Papa	95	70	3	MS	MS
Chalote	100	90	3	-	-
Cilantro	30	0	4	-	-
Gladiolos	90	40	4	-	MS
Maíz híbrido	80	10	4	MS	MT
Poroto	20	0	5 +	-	S
Frambuesa	100	0	5 +	S	MT
Garbanzo	25	0	5 +	-	-
Algodón	0	0	5	T	VT
Pepino Ens.	10	0	5 +	MS	MS
Lenteja	70	0	5 +	-	-
Poroto lima	0	0	5	S	-
Lupino	80	0	5 +	-	-
Melón	60	0	5 +	-	-
Pepino dulce	50	0	5 +	-	-
Perejil	0	0	5 +	-	T
Arveja	80	0	5	S	MS
Maní	40	0	5 +	-	-
Pimiento	60	0	5 +	MS	MS
Mora	90	0	5	S	-
Soya	30	0	5	-	-
Zapallo	10	0	5 +	MT	T
Frutilla	80	0	5	S	S
Camote	60	0	5 +	MS	S
Tomate	0	-	1	MS	VT
Sandía	30	0	5 +	MS	-

(Ferreyra, 1997)

Efecto combinado observado de la salinidad y el boro.

- 1: No hay daño visible.
- 2: Ligera necrosis y reducción de crecimiento.
- 3: Necrosis moderada y reducción moderada a severa del crecimiento.
- 4: Necrosis intensa y severa, reducción severa del crecimiento.
- 5: Letal, presenta nula a escasa emergencia, seguida de muerte inmediata.

Tolerancia a salinidad y boro

VT: Muy tolerante

T: Tolerante

MT: Moderadamente tolerante

MS: Moderadamente sensible

S: Sensible

Anexo 2. Estándares para el agua de riego de la norma chilena 1.333.

Tabla 32. Límite máximo – estándares para aguas de regadío (NCh. 1.333).

Contaminantes	Unidad	Límite Máximo Permitido
Aluminio	mg/l	5
Arsénico	mg/l	0,10
Bario	mg/l	4
Boro	mg/l	0,75
Cadmio	mg/l	0,01
Cianuro	mg/l	0,20
Cloruros	mg/l	400
Cobalto	mg/l	0,05
Cobre	mg/l	0,20
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1.000
Conductividad específica	umhos/cm	750 – 7.500
Cromo	mg/l	0,1
Fluoruros	mg/l	1
Hierro	mg/l	5
Litio	mg/l	2,5
Litio (cítricos)	mg/l	0,075
Manganeso	mg/l	0,20
Mercurio	mg/l	0,001
Molibdeno	mg/l	0,01
pH	pH	5,5 – 9
Plata	mg/l	0,20
Plomo	mm	5
Selenio	mg/l	0,02
Sodio	%	35
Sólidos suspendidos totales	mg/l	500 – 5.000
Sulfatos	mg/l	250
Vanadio	mg/l	0,10
Zinc	mg/l	3

La cantidad de sodio presente en el agua de riego, establecida según la NCh 1.333, es definida en forma porcentual en base a la concentración del ion sodio y la suma de las concentraciones de los iones sodio, calcio, magnesio y potasio, de acuerdo a la siguiente expresión: $\text{Na \%} = (\text{Na} / (\text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K})) \times 100$.

Anexo 3. Tecnologías para la desalación existentes.

Tecnologías de desalación térmica convencionales:
▪ Destilación flash de multi-etapas (<i>Multi-stage flash distillation</i>, MSF) ▪ Destilación de multi-efectos (<i>Multi-effect distillation</i>, MED/ME) ▪ Compresión de vapor (<i>Vapor Compression</i>, MVC) + Compresión mecánica de vapor (<i>Mechanical Vapor Compression</i>, MVC) + Compresión térmica de vapor (<i>Thermal Vapor Compression</i>, TVC)
Otros tipos de tecnologías de desalación térmicas:
▪ Desalación solar (<i>Solar desalation</i>, DH¹ & MEH²) ▪ Desalación geotérmica (<i>Geothermal desalination</i>)
Tecnologías de membrana:
▪ Osmosis inversa, OI (<i>Reverse Osmosis</i>, RO) ▪ Electrodialisis y Electrodialisis Inversa (<i>Electrodialysis and Electrodialysis reversal</i>, ED/EDR) ▪ Electrodesionización (<i>Electro Deionisation</i>, EDI) ▪ Osmosis directa (<i>Forward Osmosis</i>, FO) ▪ Nanofiltración (<i>Nanofiltration</i>, NF) ▪ Ultrafiltración (<i>Ultrafiltration</i>, UF) ▪ Microfiltración (<i>Microfiltration</i>, MF)
Otras tecnologías:
▪ Destilación por membranas (<i>Membrane distillation</i>, MD) ▪ Intercambio iónico (<i>Ion exchange</i>) ▪ Desalación mediante formación de hidratos (<i>Clathrate or hydrate formation process</i>) ▪ Desalación por congelación (<i>Freezing desalination</i>, FS) ▪ Desalación usando un refrigerante secundario (<i>Secondary refrigerant Freezing</i>)
Tecnologías híbridas:
▪ Osmosis inversa & Destilación flash de multi-etapas ▪ Destilación de multi-efectos & Compresión mecánica de vapor ▪ Desalación de multi-efectos híbrida solar-gas basada en colectores solares estáticos ▪ Desalación de multi-efectos híbrida solar-fósil

Figura 30. Diagrama de tecnologías para la desalación.

(Clayton, 2015), (Desalación y potabilización de agua, 2007), (Van der Vegt, 2011)

Anexo 4. Resumen de normas y recomendaciones establecidas para aguas de riego.

Tabla 33. Normas y recomendaciones para boro en aguas de riego.

Recomendación	Valores	Jurisdicción	Fecha	Referencias
La concentración de boro total en aguas de riego no debería exceder 0,5 mg/L para plantas sensibles, pero podría ser tan alta como 6,0 mg/L para plantas tolerantes	0,5 – 0,6 mg/L	Canadá	1987	CCREM (1987) CCME (1999)
Se recomienda 0,75mg/L para aguas usadas continuamente sobre todo el suelo y 2,0 mg/L para aguas usadas sobre 20 años en suelos de textura fina de pH 6,0 a 8,5	0,75 – 2,0 mg/L	Ontario, Canadá	1984	Ontario Ministry of the Environment (1984)
Se recomienda 0,5 mg/L para aguas de riego usadas como una fuente única, 1,0 mg/L para protección de suelos de textura fina a media sobre los 20 años	0,5 – 2,0 mg/L	Manitota, Canadá	1983	Williamson (1983)
Guías de Calidad de Aguas para usos agrícolas	0,5 – 6,0 mg/L	Alberta, Canadá	1999	Alberta Environment (1999)
La concentración máxima de boro recomendada para aguas de riego de todos los tipos de suelo son 2,0 mg/L para cultivos tolerantes, 1,0 mg/L para plantas semitolerantes y 0,3 mg/L para cultivos sensibles	0,3 – 2,0 mg/L	Australia	1974	Hart (1974)
La concentración de boro en aguas de riego y suelos no debería exceder concentraciones de contameinante de 0,5 mg/L.	0,5 mg/L	Australia	1999	Australia and New Zealand Environment and Conservation Council (1999)
Cultivos sensibles	0,3 – 1,25 mg/L	USA	1987	Sprague (1972), Papachristou et al (1987), EPA (1975) in Eisler (1990)
Cultivos semitolerantes	0,65 – 2,5 mg/L	USA	1987	Sprague (1972), Papachristou et al (1987), EPA (1975) in Eisler (1990)

Recomendación	Valores	Jurisdicción	Fecha	Referencias
Cultivos Tolerantes	1 – 4 mg/L	USA	1987	Sprague (1972), Papachristou et al (1987), EPA (1975) in Eisler (1990)
Concentración segura máxima	4 mg/L	USA	1987	Papachristou et al (1987), EPA (1975) in Eisler (1990)
El siguiente patrón numérico no debe ser excedido: Boro disuelto	0,75 mg/L	New Mexico Streams, USA	1995	New Mexico Water Quality Control Comm. (1995)
Aguas de riego que contienen más que 1,0 ppm de boro puede causar acumulación de niveles tóxicos para cultivos sensibles	1,0 mg/L	Nebraska, USA	1977	Hergert et al (1977)
Carácter del cultivo: Sensible Semitolerante Tolerante	0,3 – 1,0 mg/L 1 – 2 mg/L 2 – 4 mg/L	USA	1935	Eaton (1935) in Butterwick et al (1989)
Sensible Semitolerante Tolerante	0,5 – 1,0 mg/L 1, - 2 mg/L 2 – 10 mg/L	Food and Agriculture Organization (UNESCO)	1976	Gupta (1983) in Butterwick et al (1989)
Todos los Cultivos	0,7 mg/L	Israel		Gupta (1983) in Butterwick et al (1989)
Todos los suelos/ Grandes periodos en suelos de textura fina por 20 años	1,0 mg/L 2,0 mg/L	USA	1972	Gupta (1983) in Butterwick et al (1989)
Todos los suelos/ Grandes periodos en suelos neutros y alcalinos de textura fina por 20 años	0,75 mg/L 2,0 mg/L	USA	1973	Gupta (1983) in Butterwick et al (1989)
Grado de problema Sin problema Problema en aumento Problema grave	< 0,5 mg/L 0,5 – 2,0 mg/L 2,0 – 10,0 mg/L	Food and Agriculture Organization	1976	Ayers et al (1976) in Butterwick et al (1989)

Anexo 5. Caracterización del agua de distintas fuentes acuíferas de la zona norte de Chile.

Tabla 34. Características del agua de distintas fuentes bibliográficas, de la zona norte de Chile.

Nombre	-	Unidades	NCh 1.333	Agua sub. Azapa	Agua sup. Azapa	Cuenca Camarones	Cuenta Camarones	Cuenta Camarones	Esquiña - Illapata	Taltape	Conanoxa
Aluminio	Al	mg/L	5	0,8	2,9	6,27					12,76
Amoniaco	NH ₃	mg/L	N/A	s/i	0,08						
Arsénico	As	mg/L	0,1	0,015	0,076	1,04			0,75	0,5	0,89
Bario	Ba	mg/L	4	s/i	s/i						
Berilio	Be	mg/L	0,1	s/i	s/i						
Boro	B	mg/L	0,75	2,16	1,54	15,68			6,3	10,07	26,56
Cadmio	Cd	mg/L	0,010	0,010	0,010						
Calcio	Ca	mg/L					210				
Cianuros	CN ⁻	mg/L	0,2	s/i	s/i						
Cloruros	Cl ⁻	mg/L	200	720	49	541	788	663,85	553,8	390,5	1216,5
Cobalto	Co	mg/L	0,050	0,010	0,010						
Cobre	Cu	mg/L	0,20	0,011	0,014	0,1					
Cromo	Cr	mg/L	0,10	0,014	0,010	0,05					
Fluoruro	F ⁻	mg/L	1,0	s/i	s/i						
Hierro	Fe	mg/L	5	0,12	1,2	0,1	0,8	5,52			2,87
Litio	Li	mg/L	2,5	s/i	s/i	1,71					5,55
Litio (*)	Li (cítrico)	mg/L	0,075	s/i	s/i						
Magnesio	Mg	mg/L	N/A	43	30		36				
Manganeso	Mn	mg/L	0,2	0,03	0,08	0,05					
Mercurio	Hg	mg/L	0,001	0,001	0,001						
Molibdeno	Mo	mg/L	0,01	0,02	0,02						
Níquel	Ni	mg/L	0,2	0,011	12						
Nitrato	NO ₃ ⁻	mg/L	N/A	13	0,2						
Plata	Ag	mg/L	0,2	0,01	0,01						
Plomo	Pb	mg/L	5	0,02	0,03	0,05					
Potasio	K	mg/L									
Selenio	Se	mg/L	0,02	0,002	0,001						
Sodio	Na	mg/L						401,62	352,11		
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	mg/L	250	482	142	154	345	232,54	141	158,4	384,8
Vanadio	V	mg/L	0,1	s/i	s/i						
Zinc	Zn	mg/L	2			0,1					
pH	-		5,5 - 9,0	7,3	8,0	8,3	7,7		8,53	6,64	7,94
Conductividad específica	µS/cm		7.500	3325	744	2200		2620	2210	2400	3000
Turbidez	NTU		N/A								
TDS	mg/L		N/A			1650	1820	1834	1547	1600	2000
Alcalinidad	mgCaCO ₃ /L		N/A					204,42	126,47	180	220
Temperatura	°C										

(Cornejo et al., 2008) (Roberto & Alfaro, 2013) (Gatter, 2001) (Aguirre, 1957) (Roberto & Alfaro, 2013)

Anexo 6. Membranas comerciales

Nomenclatura general de membranas según su aplicación.

Abreviación	Descripción de característica	Criterio
HF	alto flujo (<i>high flux</i>)	Especificación ficha técnica
HR	alto rechazo (<i>high rejection</i>)	[99,5% - 99,8%[
UHR	muy alto rechazo (<i>ultra high rejection</i>)	≥ 99,8%
LF	bajo ensuciamiento (<i>low fouling</i>)	Especificación en ficha
UFL	muy bajo ensuciamiento (<i>ultra low fouling</i>)	Especificación en ficha
LE	bajo consumo energético (<i>low energy</i>)	]110 psi - 150 psi]
ULE	muy bajo consumo energético (<i>ultra low energy</i>)	≤ 110 psi
HP	alta presión (<i>high pressure</i>)	≥ 400 psi
DC	facilidad de limpieza (<i>durability and cleaning effective</i>)	Especificación ficha técnica
SR	membranas esterilizables (<i>sterilization resistance</i>)	Especificación ficha técnica
HWS	resistentes a altas temperaturas (<i>hot water sanitization</i>)	Especificación ficha técnica
C	resistente al cloro (<i>chlorine resistance</i>)	Especificación ficha técnica
ECT	resistencia química (<i>enhanced chemical tolerance</i>)	Especificación ficha técnica
BR	eliminación de boro (<i>boron removal</i>)	Especificación ficha técnica
FF	ajuste completo sin áreas estancadas (<i>fullfit</i>)	Especificación ficha técnica

1. Membranas Hydranautics

Serie	Modelo	Clasificación según aplicación / características predominantes (*)	Producción nominal (gpd)	Rechazo de sal (%)	Tamaño (in x in)	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Concentración de prueba NaCl (ppm)	Presión de prueba (psi)
CPA6	CPA6-LD	Para agua salobre HR, LF	8800	99,70	8 x 40	400	34	1500	225
CPA5	CPA5-LD4040	Para agua salobre HR, LF	2100	99,70	4 x 40	80	34	1500	225
CPA6	CPA6 MAX	Para agua salobre HR	8800	99,70	8 x 40	440	28	1500	225
CPA7	CPA7-LD	Para agua salobre HR, LF, DC	11500	99,70	8 x 40	400	34	1500	225
ESPA2	ESPAB MAX	Para agua salobre LE, BR	9000	99,30	8 x 40	440	28	1500	150
CPA5	CPA5-LD	Para agua salobre HR, LF	11000	99,70	8 x 40	400	34	1500	225
CPA5	CPA5 MAX	Para agua salobre HR	12000	99,70	8 x 40	440	28	1500	225
LFC3	LFC3-LD4040	Para agua salobre ULE, HR, ULF	2100	99,70	4 x 40	80	34	1500	225
ESPA2	ESPA2-LD4040	Para agua salobre LE, HR, LF	2000	99,60	4 x 40	80	34	1500	150
CPA3	CPA3	Para agua salobre HR	11000	99,70	8 x 40	400	31	1500	225
LFC3	LFC3-LD	Para agua salobre ULE, HR, ULF	11000	99,70	8 x 40	400	34	1500	225
CPA2	CPA2	Para agua salobre HR	10000	99,70	8 x 40	365	34	1500	225
ESPA2	ESPA2-LD	Para agua salobre LE, HR, LF	10000	99,60	8 x 40	400	34	1500	150
ESPA2	ESPA2 MAX	Para agua salobre LE, HR	12000	99,60	8 x 40	440	28	1500	150
ESPA1	ESPA1	Para agua salobre LE	12000	92,00	8 x 40	400	31	1500	150
CPA2	CPA2-4040	Para agua salobre HR	2250	99,50	4 x 40	85	28	1500	225
CPAE	CPA-4040E	Para agua salobre HR, LF	2250	99,50	4 x 40	65	34	1500	225
ESPA1	ESPA1-4040	Para agua salobre LE	2600	99,40	4 x 40	85	28	1500	150
ESPA2	ESPA2-1640	Para agua salobre LE, HR	41000	99,60	16 x 40	1700	28	1500	150
ESPA2	ESPAB-1640	Para agua salobre LE, BR	32700	99,30	16 x 40	1600	28	1500	150

Clasificación series

- ESPA1 membranas de alta producción y ahorro de energía
- ESPA2 membranas de alta productividad, rechazo y minimización del bioincrustamiento
- ESPAB membranas de tipo de ESPA2 especiales para el rechazo de boro
- ESPA3 membranas de alto rendimiento
- ESPA4 membranas de baja presión de operación y alto rechazo
- CPA2 membranas de baja cantidad de SDT en el permeado y alto rechazo

CPA3	membranas de mayor área que modelo CPA2
CPA5	membranas de alto rechazo
CPA6	membranas con mayor presión de trabajo (alimentación) que modelo CPA5
CPA7	membranas de alto rechazo y poca limpieza
CPAE	membranas con diseño especial

2. Membranas Dow Water Solutions (FilmTec™)

Serie	Modelo	Clasificación según aplicación / características predominantes (*)	Producción nominal (gpd)	Rechazo de sal (%)	Tamaño (in x in)	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Concentración de prueba NaCl (ppm)	Presión de prueba (psi)
LC	LC HR-4040	Para agua salobre HR	2900	99,70	4 x 40	94	28	2000	225
BW30	BW30HR-440	Para agua salobre HR	12650	99,70	8 x 40	440	28	2000	225
BW30	BW30HR-440i	Para agua salobre HR, BR	12650	99,70	8 x 40	440	28	2000	225
BW30	BW30XFR-400/34	Para agua salobre LF, HR	11500	99,65	8 x 40	400	34-LDP	2000	225
BW30	BW30XFR-400/34i	Para agua salobre LF, HR	11500	99,65	8 x 40	400	34-LDP	2000	225
ECO	ECO PRO 400	Para agua salobre HR, LE	11500	99,70	8 x 40	400	34-LDP	2000	150
ECO	ECO PRO 400i	Para agua salobre HR, LE	11500	99,70	8 x 40	400	34-LDP	2000	150
FORTILIFE	FORTILIFE CR100	Para agua salobre HR, LF	11500	99,70	8 x 40	400	S.I.	2000	225
ECO	ECO PLATINUM 440	Para agua salobre HR, LE	12650	99,70	8 x 40	440	28-LDP	2000	150
ECO	ECO PLATINUM 440i	Para agua salobre HR, LE	12650	99,70	8 x 40	440	28-LDP	2000	150
ECO	ECO PRO 440	Para agua salobre HR, LE	12650	99,70	8 x 40	440	28	2000	150
ECO	ECO PRO 440i	Para agua salobre HR, LE	12650	99,70	8 x 40	440	28	2000	150
RO	RO-4040-FF	Uso alimenticio FF, HR	2650	99,50	4 x 40	90	S.I.	2000	225
LC	LC LE-4040	Para agua salobre LE	2500	99,20	4 x 40	94	28	2000	125
BW30	BW30XFRLE-400/34	Para agua salobre LF, LE	11500	99,3	8 x 40	400	34-LDP	2000	150
BW30	BW30XFRLE-400/34i	Para agua salobre LF, LE	11500	99,30	8 x 40	400	34-LDP	2000	150
BW30	BW30-2540	Para agua salobre	1000	98,00	2,5 x 40	28	28	2000	225
BW30	BW30HRLE-440	Para agua salobre LE	12650	99,30	8 x 40	440	28	2000	150
BW30	BW30HRLE-440i	Para agua salobre LE	12650	99,30	8 x 40	440	28	2000	150
BW30	BW30-4040	Para agua salobre HR	2400	99,50	4 x 40	78	34	2000	225
BW30	BW30-365	Para agua salobre HR	9500	99,50	8 x 40	365	34	2000	225
BW30	BW30-400/34	Para agua salobre HR	10500	99,50	8 x 40	400	34	2000	225
BW30	BW30-400/34i	Para agua salobre HR	10500	99,50	8 x 40	400	34	2000	225
BW30	BW30-400	Para agua salobre HR	10500	99,50	8 x 40	400	28	2000	225
RO	HYPER SHELL RO-390	Uso alimenticio HWS, HR	10800	99,50	8 x 40	390	S.I.	S.I.	225
RO	RO-390-FF	Uso alimenticio FF, HR	13700	99,50	8 x 40	390	S.I.	2000	225

Clasificación series

BW30	membranas estándar de agua salobre.
ECO	membranas con alto rechazo y bajo consumo energético.
FORTILIFE	membranas de alto rechazo, con alta resistencia al ensuciamiento y con un consumo energético moderado.
HRLE	membranas con alto rechazo y bajo consumo energético.
HSRO	membranas sanitarias con resistencia a cargar térmicas.
LC	membranas de bajo costo.
LE	membranas con bajo consumo energético.
LP	membranas con presiones de operación moderadas.
RO	membranas de osmosis inversa.
TW30	membranas generalmente utilizadas en forma domiciliaria con alto nivel de rechazo.
HR	membranas con alto rechazo
XFRLE	membranas con alta resistencia al ensuciamiento y bajo consumo energético.
XLE	membranas con muy bajo consumo energético.
XUS	membranas industriales y municipales.

3. Membranas Toray (ROMEMBRA®)

Serie	Modelo	Clasificación según aplicación / características predominantes (*)	Producción nominal (gpd)	Rechazo de sal (%)	Tamaño (in x in)	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Concentración de prueba NaCl (ppm)	Presión de prueba (psi)
TMLD	TML10D-073-31	Para agua salobre ULF	1900	99,80	4 x 40	73	31	2000	225
TM700D	TM710D-087-28	Para agua salobre HR,ECT	2600	99,80	4 x 40	87	28	2000	225
TMLD	TML10D	Para agua salobre ULF	1900	99,80	4 x 40	73	34	2000	225
TM700D	TM710D-087-31	Para agua salobre HR,ECT	2600	99,80	4 x 40	87	34	2000	225
TM700	TM710	Para agua salobre HR	2400	99,70	4 x 40	87	31	2000	225
TM700D	TM710D	Para agua salobre HR,ECT	2600	99,80	4 x 40	87	31	2000	225
TM700	TM720-370	Para agua salobre HR	9500	99,70	8 x 40	370	31	2000	225
TMRONW	TMROD4040NW	Uso farmacéutico HWS, HR	9000	99,75	4 x 40	85	31	2000	225
TM700	TM720-400	Para agua salobre HR	10200	99,70	8 x 40	400	31	2000	225
TMLD	TML20D-370	Para agua salobre ULF	9700	99,80	8 x 40	370	34	2000	225
TM700C	TM720C-440	Para agua salobre LE	9000	99,20	8 x 40	440	28	2000	150
TMLD	TML20D-400	Para agua salobre ULF	10500	99,80	8 x 40	400	34	2000	225
TM700	TM720-440	Para agua salobre HR	11300	99,70	8 x 40	440	28	2000	225
TM700D	TM720D-400	Para agua salobre HR,ECT	11000	99,80	8 x 40	400	34	2000	225
TMG(D)	TMG10D-087-28	Para agua salobre ULE, ECT	2400	99,70	4 x 40	87	28	2000	150
TMG(D)	TMG10D	Para agua salobre ULE, ECT	2850	99,70	4 x 40	87	34	2000	150
TMLD	TML20D-440	Para agua salobre ULF	10500	99,80	8 x 40	440	28	2000	225
TM700D	TM720D-440	Para agua salobre HR,ECT	12100	99,80	8 x 40	440	28	2000	225
TMROHS	TMRO4040HS	Uso alimenticio, HWS	1975	99,50	4 x 40	85	31	2000	150
TM700L	TM720L-400	Para agua salobre LE, HR	8500	99,50	8 x 40	400	31	2000	150
TMROHS	TMRO8040HS	Uso alimenticio, HWS	9000	99,50	8 x 40	390	31	2000	150
TM700	TM740-1760	Para agua salobre HR	44600	99,70	16 x 40	1760	28	2000	225
TM700L	TM720L-440	Para agua salobre LE, HR	9400	99,50	8 x 40	440	28	2000	150
TMG(D)	TMG20D-400	Para agua salobre ULE, ECT	12100	99,70	8 x 40	400	34	2000	150
TMG(D)	TMG20D-440	Para agua salobre ULE, ECT	13300	99,70	8 x 40	440	28	2000	150
TMRONW	TMROH4040NW	Uso farmacéutico HWS, LE	2300	99,10	4 x 40	85	31	2000	100

Clasificación series

TM700	membranas para agua salobre
TM700D	membranas de alto rechazo y resistencia química
TM700C	membranas para agua salobre de baja presión
TM700L	membranas para agua salobre de baja presión
TMG	membranas para agua salobre de muy baja presión
TMH	membranas para agua salobre de muy baja presión
TMG(D)	membranas para agua salobre de muy baja presión con resistencia química
TMLD	membranas con alta resistencia al ensuciamiento
TMRO	membranas santizables por calor
SU-700	membranas para agua salobre
SU-700L	membranas para agua salobre de baja presión
SUL-G	membranas para agua salobre de muy baja presión
SU-700R	membranas de alto rechazo
P	membranas para agua pura de alta elusión
TS	membranas santizables por calor

4. Membranas TCK Membrane (CSM[®])

Serie	Modelo	Clasificación según aplicación / características predominantes (*)	Producción nominal (gpd)	Rechazo de sal (%)	Tamaño (in x in)	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Concentración de prueba NaCl (ppm)	Presión de prueba (psi)
BL	RE8040-BLN440	Para agua salobre HF, LE, HR	13000	99,50	8 x 40	440	S.I.	1500	150
BW	RE8040-BE440	Para agua salobre HR, LE	12000	99,70	8 x 40	440	S.I.	2000	225
F	RE8040-FEn440	Para agua salobre LF, LE, HR	12000	99,70	8 x 40	440	S.I.	2000	225
BL	RE4040-BLR	Para agua salobre HF, LE, HR	2100	99,60	4 x 40	85	S.I.	1500	150
F	RE4040-FLR	Para agua salobre ULF, LE, HR	2100	99,60	4 x 40	85	S.I.	1500	150
F	RE8040-Fen	Para agua salobre LF, HR	11000	99,70	8 x 40	400	S.I.	2000	225
BW	RE8040-BE34	Para agua salobre HR	11000	99,70	8 x 40	400	34	2000	225
BW	RE8040-BE	Para agua salobre HR	11000	99,70	8 x 40	400	S.I.	2000	225
F	RE8040-FEn34	Para agua salobre LF, HR	11000	99,70	8 x 40	400	34	2000	225
BL	RE8040-BLN	Para agua salobre HF, LE, HR	12000	99,50	8 x 40	400	S.I.	1500	150
BW	RE4040-BE	Para agua salobre HR	2400	99,70	4 x 40	85	S.I.	2000	225
F	RE4040-FEn	Para agua salobre LF, HR	2400	99,70	4 x 40	85	S.I.	2000	225
BW	RE8040-BR	Para agua salobre HR	6000	99,75	8 x 40	380	32	2000	225
F	RE8040-FLF440	Para agua salobre ULF, LE, HR	13000	99,60	8 x 40	440	S.I.	1500	150
BW	RE8040-BR400	Para agua salobre HR	6300	99,75	8 x 40	400	S.I.	2000	225
F	RE8040-FLF34	Para agua salobre ULF, LE, HR	12000	99,60	8 x 40	400	34	1500	150
BL	RE8040-BLR440	Para agua salobre HF, LE, HR	11000	99,60	8 x 40	440	S.I.	1500	150
F	RE8040-FLR440	Para agua salobre ULF, LE, HR	11000	99,60	8 x 40	440	S.I.	1500	150
BL	RE8040-BLR	Para agua salobre HF, LE, HR	10000	99,60	8 x 40	400	S.I.	1500	150
F	RE8040-FLR34	Para agua salobre ULF, LE, HR	10000	99,60	8 x 40	400	34	1500	150
F	RE8040-FLR	Para agua salobre ULF, LE, HR	10000	99,60	8 x 40	400	S.I.	1500	150
BW	RE4040-CE	Para agua salobre	2280	99,00	4 x 40	85	S.I.	2000	225

Clasificación específica

- BW membranas para agua salobre
- BL membranas de bajo consumo energético
- F membranas con resistencia al ensuciamiento.

5. Membranas SUEZ

Serie	Modelo	Clasificación según aplicación / características predominantes (*)	Producción nominal (gpd)	Rechazo de sal (%)	Tamaño (in x in)	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Concentración de prueba NaCl (ppm)	Presión de prueba (psi)
AG HR LF	AG-90 LF	Para agua salobre HF, UHR, LF	2200	99,80	4 x 40	90	28	2000	225
Duratherm STD	DTh STD RO 4040	Uso industrial HWS	2300	99,50	4 x 40	90	31	2000	225
OSMO HR (PA)	411-HR(PA)	Para agua salobre HR	1600	99,50	4 x 40	75	34	2000	225
AG HR	AG-365	Para agua salobre HF, UHR	9600	99,80	8 x 40	365	34	2000	225
AG HR	AG-90	Para agua salobre HF, UHR	2200	99,80	4 x 40	90	28	2000	225
Duratherm HWS	DTh HWS RO 8040 HR	Uso industrial HWS	9000	99,50	8 x 40	374	31	2000	225
Duratherm STD	DTh STD RO 8040	Uso industrial HWS	9000	99,50	8 x 40	374	31	2000	225
AG HR LF	AG-400 LF, 34	Para agua salobre HF, UHR, LF	10500	99,80	8 x 40	400	34	2000	225
MUNI RO HR	MUNI-RO-400-HR	Uso municipal UHR	10500	99,80	8 x 40	400	31	2000	225
AG LF	AG-4040F LF	Para agua salobre HF, HR, ULF	2200	99,50	4 x 40	85	27	2000	225
AG HR	AG-400	Para agua salobre HF, UHR	10500	99,80	8 x 40	400	31	2000	225
AG HR	AG-400, 34	Para agua salobre HF, UHR	10500	99,80	8 x 40	400	34	2000	225
MUNI RO HR	MUNI-RO-430-HR	Uso municipal UHR	11500	99,80	8 x 40	440	28	2000	225
AG HR	AG-440	Para agua salobre HF, UHR	11500	99,80	8 x 40	440	28	2000	225
OSMO HR (PA)	815-HR(PA)	Para agua salobre HR	9000	99,50	8 x 40	330	31	2000	225
AG	AG-4040C	Para agua salobre HF, HR	2400	99,50	4 x 40	90	28	2000	225
AG	AG-8040F	Para agua salobre HF, HR	10000	99,50	8 x 40	365	31	2000	225
OSMO HR (PA)	811-HR(PA)	Para agua salobre HR	9600	99,50	8 x 40	350	31	2000	225
AG	AG-4040FM	Para agua salobre HF, HR	2400	99,50	4 x 40	85	27	2000	225
AG	AG-8040N 400	Para agua salobre HF	10500	99,20	8 x 40	400	27	2000	225
AG	AG-8040F 400	Para agua salobre HF, HR	11000	99,50	8 x 40	400	27	2000	225
AG LF	AG-8040F 400 LF	Para agua salobre HF, HR, ULF	10500	99,50	8 x 40	400	27	2000	225
AG FR	AG-8040F400FR,34	Para agua salobre HF, HR, LF, DC	11000	99,50	8 x 40	400	32	2000	225
AG	AG-8040C	Para agua salobre HF, HR	10000	99,50	8 x 40	380	28	2000	225
AG	AG-8040N	Para agua salobre HF	9600	99,20	8 x 40	365	31	2000	225
OSMO USPG	416-USPG	Uso farmacéutico SR	2400	99,00	4 x 40	90	31	2000	225
OSMO HR (PA)	416-HR(PA)	Para agua salobre	2200	99,00	4 x 40	80	31	2000	225
Duratherm HWS	DTh HWS RO 4040 HR	Uso industrial HWS	2300	99,50	4 x 40	90	31	2000	225
OSMO BEV RO	BEV-RO-FF	Uso alimenticio LF	10000	99,00	8 x 40	365	31	2000	225
OSMO HR (PA)	817-HR(PA)	Para agua salobre	9600	99,00	8 x 40	350	31	2000	225
OSMO HR (PA)	813-HR(PA)	Para agua salobre	10200	99,00	8 x 40	375	31	2000	225
OSMO USPG	817-USPG	Uso farmacéutico SR	10000	99,00	8 x 40	400	31	2000	225
OSMO USPG	813-USPG	Uso farmacéutico SR	10000	99,00	8 x 40	400	31	2000	225
OSMO HR (CA)	813-HR(CA)	Para agua salobre C,HP	7800	97,50	8 x 40	400	31	2000	425
CD	CD8040F	Para agua salobre C,HP	6300	98,50	8 x 40	390	28	2000	425
OSMO HR (CA)	811-HR(CA)	Para agua salobre C,HP	7300	97,50	8 x 40	380	31	2000	425
CE	CE8040F	Para agua salobre C,HP	6700	97,50	8 x 40	350	28	2000	425
OSMO HR (CA)	817-HR(CA)	Para agua salobre C,HP	7200	97,50	8 x 40	350	31	2000	425
OSMO HR (CA)	815-HR(CA)	Para agua salobre C,HP	6800	97,50	8 x 40	330	31	2000	425
CE	CE4040FM	Para agua salobre C,HP	2000	97,50	4 x 40	90	27	2000	425
OSMO HR (CA)	416-HR(CA)	Para agua salobre C,HP	1750	97,50	4 x 40	80	31	2000	425
OSMO HR (CA)	411-HR(CA)	Para agua salobre C,HP	1700	97,50	4 x 40	75	31	2000	425

Clasificación series

A-series	membranas estándar de agua salobre, permite altos flujos y altos rechazos.
AG	membranas de alto rechazo con presiones de operación cercanas a los 200 psi y ahorro moderado de energía.
AG FR	membranas recomendadas para requerimientos de durabilidad y la limpieza efectiva, con espaciadores más largos para disminuir el ensuciamiento.
AG HR	membranas recomendadas para concentración de sales entre 1.000 a 10.000 mg/L.
AG HR LF	membranas construidas con una carga más neutras para reducir incrustaciones.
AG LF	membranas con superficies resistentes al ensuciamiento recomendadas para concentración de sales entre 1.000 a 10.000 mg/L.
AK	membranas de alto rechazo con presiones de operación cercanas a los 100 psi y ahorro alto de energía.

AK HR	membranas con muy alto rechazo con niveles de sales de 5.000 mg/L.
AK LE	membranas recomendadas para alto flujo, alto rechazo y presiones de trabajo bajas.
AP	membranas recomendadas para flujos muy altos y presiones bajas.
C-series	membranas de mezcla de triacetato con diacetato, soportan altos flujos y mayor estabilidad mecánica que las de acetato de celulosa estándar. Resistentes al cloro.
CD	membranas de alto rechazo utilizadas para la desalinización del agua y concentración de otras corrientes de proceso.
CE	membranas utilizadas para la desalinización del agua y concentración de otras corrientes de proceso.
CG	membranas utilizadas para grandes flujos.
Duraslick	membranas compuestas de un diseño de tres capas para obtener mejores rechazos con bajo nivel de ensuciamiento.
Duratherm STD	membranas destinadas para trabajar con agua purificada sobre los 70 °C con capacidad de soportar exposiciones de 90 °C en sistemas que requieran sanitización.
Duratherm HWS	membranas destinadas para trabajar con agua purificada sobre los 50 °C con capacidad de soportar exposiciones de 90 °C en sistemas que requieran sanitización.
INDUSTRIAL	membranas utilizadas para corrientes de proceso con alta cantidad de sólidos. También es posible concentrar algunos ácidos.
MUNI-series	membranas recomendadas para la purificación de agua potable.
MUNI RO HR	membranas con alto rechazo y alta capacidad de flujo.
MUNI RO HR LE	membranas con alto rechazo y bajo consumo energético.
MUNI RO LE	membranas con bajo consumo energético.
MUNI RO ULE	membranas con muy bajo consumo energético.
OSMO BEV	membranas recomendadas para alimentos y agua embotellada
OSMO BEV RO LE	membranas con alto rechazo y bajo consumo energético en base a su diseño.
OSMO BEV CA	membranas tolerantes al cloro
OSMO BEV RO	membranas con un alto rechazo
OSMO BEV ULE	membranas con muy bajo consumo energético.
OSMO USPG	membranas uso farmacéutico esterilizables en base a normativa USP
OSMO HR (PA)	membranas de alto rechazo
OSMO HR (CA)	membranas de alto rechazo tolerantes al cloro

6. Membranas de Lanxess AG (LewaBrane®)

Serie	Modelo	Clasificación según aplicación / características predominantes (*)	Producción nominal (gpd)	Rechazo de sal (%)	Tamaño (in x in)	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Concentración de prueba NaCl (ppm)	Presión de prueba (psi)
LEWABRANE	RO B400 HR	Para agua salobre HR, BR	10000	99,70	8 x 40	400	31	2000	225
LEWABRANE	RO B400 FR ASD	Para agua salobre HF, LF, HR	11000	99,70	8 x 40	400	34	2000	225
LEWABRANE	RO B440 HR	Para agua salobre HR, BR	11000	99,70	8 x 40	440	28	2000	225
LEWABRANE	RO B370 HR	Para agua salobre HR, BR	9300	99,70	8 x 40	370	31	2000	225
LEWABRANE	RO B085 LE 4040	Para agua salobre LE, LF, HR	2000	99,50	4 x 40	85	34	2000	150
LEWABRANE	RO B400 LE	Para agua salobre LE, HR	9200	99,50	8 x 40	400	34	2000	150
LEWABRANE	RO B400 LE ASD	Para agua salobre HF, LE, HR	9600	99,50	8 x 40	400	34	2000	150
LEWABRANE	RO B440 LE	Para agua salobre LE, HR	10100	99,50	8 x 40	440	28	2000	150
LEWABRANE	RO B085 FR 4040	Uso industrial LF HR	2400	99,50	4 x 40	85	34	2000	225
LEWABRANE	RO B400 FR	Para agua salobre LF, HR	10500	99,50	8 x 40	400	34	2000	225
LEWABRANE	RO B400 HF	Para agua salobre HR	10500	99,50	8 x 40	400	31	2000	225
LEWABRANE	RO B085 HF 4040	Para agua salobre HR	2400	99,50	4 x 40	85	31	2000	225
LEWABRANE	RO B440 HF	Para agua salobre HR	11600	99,50	8 x 40	440	28	2000	225
LEWABRANE	RO B370 FR	Para agua salobre LF, HR	9800	99,50	8 x 40	370	34	2000	225

Clasificación series

LEWABRANE membranas compuestas de tecnología de THF enrolladas en espiral diseñadas para aplicaciones de tratamiento de agua.

7. Membranas de LG Chem Nanocomposite

Serie	Modelo	Clasificación según aplicación / características predominantes (*)	Producción nominal (gpd)	Rechazo de sal (%)	Tamaño (in x in)	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Concentración de prueba NaCl (ppm)	Presión de prueba (psi)
R	LG BW 4040 R	Para agua salobre HR	2500	99,60	4 x 40	85	28	2000	225
AFR	LG BW 400 AFR	Para agua salobre LF, HR	10500	99,60	8 x 40	400	34	2000	225
R	LG BW 400 R	Para agua salobre HR	10500	99,60	8 x 40	400	34	2000	225
ES	LG BW 400 ES	Para agua salobre LE, HR	10500	99,60	8 x 40	400	34	2000	150
R	LG BW 440 R	Para agua salobre HR	11550	99,60	8 x 40	440	28	2000	225
ES	LG BW 440 ES	Para agua salobre LE, HR	11550	99,60	8 x 40	440	28	2000	150
ES	LG BW 4040 ES	Para agua salobre LE, HR	2500	99,50	4 x 40	85	28	2000	150
AFR	LG BW 4040 AFR	Para agua salobre LF, HR	2300	99,60	4 x 40	80	34	2000	225

Clasificación series

R membranas de alto rechazo y durabilidad.

ES membranas con bajo consumo energético.

AFR membranas con superficies resistentes al ensuciamiento.

UES membranas con muy bajo consumo energético.

Anexo 7. Estimación flujo promedio por membrana

Para la estimación del flujo promedio por membrana se utiliza la siguiente ecuación:

$$J_w = \frac{F_p}{MA \cdot N}$$

Donde

J_w : flujo promedio por membrana, gfd (galones por ft² por día)

F_p : caudal de producto, galones por día

MA : área de membrana por contenedor a presión

N : número de contenedores (6 membranas por contenedor)

Luego, se despeja el número de contenedores.

$$N = \frac{F_p}{MA \cdot J_w}$$

Esta ecuación es utilizada para definir el campo de las columnas de “Cálculo de contenedores de presión 1° y 2° etapa”. Luego este valor es comparado con el valor estimado por el simulador de Hydranautics correspondiente a los valores presentes en las columnas de “Contenedores sugeridos 1° y 2° etapa” para cada membrana.

Serie	Modelo	Cálculo de contenedores de presión 1° etapa	Cálculo de contenedores de presión 2° etapa	Contenedores sugeridos 1° etapa (IMSDesign)	Contenedores sugeridos 2° etapa (IMSDesign)	Diferencia 1° etapa	Diferencia 2° etapa
CPA6	CPA6-LD	3	2	3	2	0	0
CPA5	CPA5-LD4040	13	7	12	7	1	0
CPA6	CPA6 MAX	3	2	3	2	0	0
CPA7	CPA7-LD	3	2	3	2	0	0
ESPA2	ESPAB MAX	3	2	3	2	0	0
CPA5	CPA5-LD	3	2	3	2	0	0
CPA5	CPA5 MAX	3	2	3	2	0	0
LFC3	LFC3-LD4040	13	7	12	7	1	0
ESPA2	ESPA2-LD4040	13	7	12	7	1	0
CPA3	CPA3	3	2	3	2	0	0
LFC3	LFC3-LD	3	2	3	2	0	0
CPA2	CPA2	3	2	4	2	-1	0
ESPA2	ESPA2-LD	3	2	3	2	0	0
ESPA2	ESPA2 MAX	3	2	3	2	0	0
ESPA1	ESPA1	3	2	3	2	0	0
CPA2	CPA2-4040	12	6	12	6	0	0
CPAE	CPA-4040E	15	8	15	8	0	0
ESPA1	ESPA1-4040	12	6	12	6	0	0

F. Objetivo	4	0
-------------	---	---

Flujo por membrana		
1° etapa	gfd	16,45
2° etapa	gfd	11,00

Finalmente, utilizando una celda objetivo, la cual contiene a la sumatoria de la diferencia entre el valor calculado y el valor estimado por el simulador por etapa, se puede estimar el flujo promedio por etapa (celda cambiada) a partir del complemento SOLVER.

Cabe destacar que este valor calculado es utilizado solo de referencia para realizar los otros cálculos de cantidad de membranas o cantidad de contenedores a presión necesarios para los otros softwares (ya que, en los otros simuladores, esta cantidad es un parámetro a ser ingresado). El hecho de ocupar un valor aproximado para efecto de dimensionamiento no generará un impacto en el diseño debido a que cada software alerta si el arreglo ha sido sobre-o-sub dimensionado, debiendo ajustar el numero de membranas para satisfacer alertas por ensuciamiento, incrustación, factor Beta o flujo mínimo.

Anexo 8. Detalle de los resultados de Primera Etapa de Simulación

A.8.1. Hydranautics - IMSDesign

Los resultados obtenidos para las series de Hydranautics indican que la remoción de boro, para 2 ppm y pH 7,5, no supera el 58% (CPA 6-LD). A un pH de 9, ya se evidencia una remoción superior al 70% para tres, y para pH 10, todas las series evaluadas remueven sobre este valor.

Tabla 35. Resultados simulación membranas Hydranautics en software IMSDesign.

Serie	Modelo	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Contenedores 1° etapa	Contenedores 2° etapa	Remoción boro (%)
CPA6	CPA6-LD	400	34	3	2	58%
CPA5	CPA5-LD4040	80	34	12	7	55%
CPA6	CPA6 MAX	440	28	3	2	54%
CPA7	CPA7-LD	400	34	3	2	53%
ESPA2	ESPAB MAX	440	28	3	2	48%
CPA5	CPA5-LD	400	34	3	2	46%
CPA5	CPA5 MAX	440	28	3	2	42%
LFC3	LFC3-LD4040	80	34	12	7	34%
ESPA2	ESPA2-LD4040	80	34	12	7	29%
CPA3	CPA3	400	31	3	2	29%
LFC3	LFC3-LD	400	34	3	2	29%
CPA2	CPA2	365	34	4	2	28%
ESPA2	ESPA2-LD	400	34	3	2	28%
ESPA2	ESPA2 MAX	440	28	3	2	27%
ESPA1	ESPA1	400	31	3	2	25%
CPA2	CPA2-4040	85	28	12	6	25%
CPAE	CPA-4040E	65	34	15	8	25%
ESPA1	ESPA1-4040	85	28	12	6	-
ESPA2	ESPA2-1640	1700	28	N.A.	N.A.	-
ESPA2	ESPAB-1640	1600	28	N.A.	N.A.	-

(*) El porcentaje de remoción de boro corresponde al resultado evaluado con una alimentación de 2 ppm de boro a pH de 7,5.

Clasificación series

- ESPA1 membranas de alta producción y ahorro de energía.
- ESPA2 membranas de alta productividad, rechazo y minimización de bioincrustamiento.
- ESPAB membranas de tipo de ESPA2 especiales para el rechazo de boro.
- ESPA4 membranas de baja presión de operación y alto rechazo.
- CPA2 membranas de baja cantidad de SDT en el permeado y alto rechazo.
- CPA3 membranas de mayor área que modelo CPA2.
- CPA5 membranas de alto rechazo.
- CPA6 membranas con mayor presión de trabajo (alimentación) que modelo CPA5.
- CPA7 membranas de alto rechazo y poca limpieza.
- CPAE membranas con diseño especial.

Tabla 36. Resultados simulaciones IMSDesign - 2 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
CPA6	CPA6-LD	1,12	33,52	0,714	36,87	0,163	54,05
CPA5	CPA5-LD4040	1,205	35,33	0,76	38,84	0,171	56,95
CPA6	CPA6 MAX	1,222	38,02	0,787	41,85	0,182	61,34
CPA7	CPA7-LD	1,261	39,85	0,816	43,87	0,19	64,27
ESPA2	ESPAB MAX	1,388	113,31	0,911	125,24	0,216	181,8
CPA5	CPA5-LD	1,446	48,86	0,964	53,85	0,233	78,83
CPA5	CPA5 MAX	1,558	55,5	1,053	61,2	0,259	89,55
LFC3	LFC3-LD4040	1,758	43,81	1,209	48,12	0,306	70,04
ESPA2	ESPA2-LD4040	1,882	57,25	1,406	63,16	0,372	92,047
CPA3	CPA3	1,894	57,12	1,452	63,02	0,411	91,74
LFC3	LFC3-LD	1,896	60,39	1,45	66,62	0,411	96,79
CPA2	CPA2	1,929	63,03	1,555	69,67	0,449	101,4
ESPA2	ESPA2-LD	1,929	72,46	1,605	80,17	0,476	116,59
ESPA2	ESPA2 MAX	1,957	93,56	1,73	103,66	0,585	150,46
ESPA1	ESPA1	1,992	170,28	1,824	188,06	0,671	268,18
CPA2	CPA2-4040	2,001	69,29	1,719	76,74	0,502	111,75
CPAE	CPA-4040E	2,001	88,24	1,92	98	0,626	142,68
ESPA1	ESPA1-4040	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ESPA2	ESPA2-1640	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ESPA2	ESPAB-1640	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Tabla 37. Resultados simulaciones IMSDesign – 4 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
CPA6	CPA6-LD	2,240	34,65	1,427	37,59	0,326	54,23
CPA5	CPA5-LD4040	2,410	36,54	1,521	39,61	0,343	57,14
CPA6	CPA6 MAX	2,444	39,26	1,575	42,65	0,365	61,54
CPA7	CPA7-LD	2,523	41,12	1,633	44,70	0,380	64,48
ESPA2	ESPAB MAX	2,777	114,70	1,823	126,16	0,432	182,02
CPA5	CPA5-LD	2,891	50,32	1,927	54,83	0,465	79,09
CPA5	CPA5 MAX	3,115	57,06	2,106	62,27	0,518	89,94
LFC3	LFC3-LD4040	3,517	45,57	2,418	49,33	0,613	70,35
ESPA2	ESPA2-LD4040	3,764	59,14	2,812	64,57	0,745	92,42
CPA3	CPA3	3,789	59,02	2,904	64,49	0,822	92,18
LFC3	LFC3-LD	3,793	62,30	2,899	68,09	0,821	97,26
CPA2	CPA2	3,858	64,97	3,110	71,24	0,898	101,88
ESPA2	ESPA2-LD	3,858	74,39	3,210	81,78	0,952	117,07
ESPA2	ESPA2 MAX	3,914	95,52	3,460	105,39	1,170	151,05
ESPA1	ESPA1	3,984	172,31	3,648	189,94	1,342	268,90
CPA2	CPA2-4040	4,002	71,31	3,438	78,47	1,002	112,28
CPAE	CPA-4040E	4,003	90,26	3,840	99,94	1,251	143,34
ESPA1	ESPA1-4040	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ESPA2	ESPA2-1640	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ESPA2	ESPAB-1640	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Dentro de las series fabricadas por Hydranautics para agua salobre, existe una serie específica para la remoción de Boro, la cual corresponden al tipo ESPAB, sin embargo, estas no son evaluadas en esta revisión debido a que su condición de uso es establecida para concentraciones inferiores a los 500 ppm (agua de mejor calidad o con algún pre-tratamiento).

A.8.2. Dow - WAVE

Dentro de las 25 membranas de Dow evaluadas, para 2 ppm y pH 7,5; 3 de ellas exhiben tener una remoción superior al 70%, las cuales corresponden a las series LC-HR-4040, BW30HR-440, y BW30HR-440i.

Tabla 38. Resultados simulación membranas Dow en software WAVE.

Serie	Modelo	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Contenedores 1° etapa	Contenedores 2° etapa	Remoción boro (%)
LC	LC HR-4040	94	28	11	6	74,5%
BW30	BW30HR-440	440	28	3	2	70,4%
BW30	BW30HR-440i	440	28	3	2	70,0%
BW30	BW30XFR-400/34	400	34-LDP	3	2	68,5%
BW30	BW30XFR-400/34i	400	34-LDP	3	2	68,5%
ECO	ECO PRO 400	400	34-LDP	3	2	67,4%
ECO	ECO PRO 400i	400	34-LDP	3	2	67,4%
FORTILIFE	FORTILIFE CR100	400	S.I.	3	2	65,9%
ECO	ECO PLATINUM 440	440	28-LDP	3	2	65,5%
ECO	ECO PLATINUM 440i	440	28-LDP	3	2	65,5%
ECO	ECO PRO 440	440	28	3	2	65,1%
ECO	ECO PRO 440i	440	28	3	2	65,1%
RO	RO-4040-FF	90	S.I.	11	6	54,3%
LC	LC LE-4040	94	28	11	6	53,9%
BW30	BW30XFRLE-400/34	400	34-LDP	3	2	53,5%
BW30	BW30XFRLE-400/34i	400	34-LDP	3	2	53,5%
BW30	BW30-2540	28	28	35	18	53,5%
BW30	BW30HRLE-440	440	28	3	2	52,4%
BW30	BW30HRLE-440i	440	28	3	2	52,4%
BW30	BW30-4040	78	34	13	7	52,0%
BW30	BW30-365	365	34	3	2	51,3%
BW30	BW30-400/34	400	34	3	2	50,5%
BW30	BW30-400/34i	400	34	3	2	50,5%
BW30	BW30-400	400	28	3	2	50,1%
RO	HYPERSELL RO-390	390	S.I.	3	2	47,5%
RO	RO-390-FF	390	S.I.	3	2	44,9%

(*) El porcentaje de remoción de boro corresponde al resultado evaluado con una alimentación de 2 ppm de boro a pH de 7,5.

Clasificación series

BW30 membranas estándar de agua salobre.

ECO membranas con alto rechazo y bajo consumo energético.

FORTILIFE membranas de alto rechazo, con alta resistencia al ensuciamiento y con un consumo energético moderado.

HRLE	membranas con alto rechazo y bajo consumo energético.
HSRO	membranas sanitarias con resistencia a cargas térmicas.
LC	membranas de bajo costo.
LE	membranas con bajo consumo energético.
LP	membranas con presiones de operación moderadas.
RO	membranas de osmosis inversa.
HR	membranas con alto rechazo
XFRLE	membranas con alta resistencia al ensuciamiento y bajo consumo energético.
XLE	membranas con muy bajo consumo energético.

La diferencia entre los módulos de BW30HR-440 y BW30HR-440i, recae principalmente a que este último contiene tecnología iLec, la cual consta de terminaciones (tapas de extremos) para generalmente reducir el costo del sistema y el riesgo de fugas que pueden generar una disminución en la calidad del agua. Se han considerado ambos casos para evaluar si esta diferencia de diseño presenta alguna diferencia sobre la eficiencia de remoción.

Tabla 39. Resultados simulaciones WAVE - 2 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
LC	LC HR-4040	0,68	21,10	0,42	17,95	0,10	16,24
BW30	BW30HR-440	0,79	27,58	0,50	24,92	0,13	22,98
BW30	BW30HR-440i	0,80	28,28	0,50	24,97	0,13	23,03
BW30	BW30XFR-400/34	0,84	28,60	0,52	25,18	0,13	23,11
BW30	BW30XFR-400/34i	0,84	28,64	0,52	25,22	0,13	23,14
ECO	ECO PRO 400	0,87	28,98	0,55	25,06	0,15	23,03
ECO	ECO PRO 400i	0,87	29,09	0,55	25,16	0,15	23,14
FORTILIFE	FORTILIFE CR100	0,910	32,80	0,580	29,50	0,150	27,30
ECO	ECO PLATINUM 440	0,92	32,88	0,59	28,57	0,17	26,43
ECO	ECO PLATINUM 440i	0,92	33,04	0,59	28,72	0,17	26,58
ECO	ECO PRO 440	0,93	33,67	0,59	29,29	0,17	27,16
ECO	ECO PRO 440i	0,93	33,84	0,59	29,45	0,17	27,32
RO	RO-4040-FF	1,220	32,50	0,760	27,93	0,170	24,67
LC	LC LE-4040	1,23	48,98	0,79	42,94	0,24	40,09
BW30	BW30XFRLE-400/34	1,24	61,59	0,80	54,63	0,24	51,75
BW30	BW30XFRLE-400/34i	1,24	61,79	0,80	54,82	0,24	51,95
BW30	BW30-2540	1,24	33,47	0,77	28,81	0,18	25,50
BW30	BW30HRLE-440	1,27	67,31	0,82	59,93	0,25	57,04
BW30	BW30HRLE-440i	1,27	67,61	0,82	60,21	0,25	57,33
BW30	BW30-4040	1,28	36,18	0,80	31,27	0,19	27,86
BW30	BW30-365	1,30	37,86	0,82	32,80	0,19	29,33
BW30	BW30-400/34	1,32	38,91	0,83	33,76	0,19	30,27
BW30	BW30-400/34i	1,32	39,01	0,83	33,85	0,19	30,35
BW30	BW30-400	1,33	40,17	0,84	34,92	0,20	31,38
RO	HYPERSHELL RO-390	1,400	46,39	0,880	40,64	0,220	36,96
RO	RO-390-FF	1,470	56,27	0,940	489,80	0,240	25,99

Tabla 40. Resultados simulaciones WAVE - 4 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
LC	LC HR-4040	1,37	25,00	0,85	20,42	0,21	16,98
BW30	BW30HR-440	1,60	32,82	1,00	27,87	0,27	23,96
BW30	BW30HR-440i	1,60	32,88	1,00	27,93	0,27	24,01
BW30	BW30XFR-400/34	1,68	33,42	1,05	29,26	0,27	24,08
BW30	BW30XFR-400/34i	1,68	33,46	1,05	28,30	0,28	24,11
ECO	ECO PRO 400	1,73	33,95	1,09	28,32	0,31	24,21
ECO	ECO PRO 400i	1,73	34,08	1,09	28,43	0,31	24,31
FORTILIFE	FORTILIFE CR100	1,840	38,68	1,150	32,94	0,310	28,40
ECO	ECO PLATINUM 440	1,85	38,20	1,17	32,07	0,34	27,72
ECO	ECO PLATINUM 440i	1,85	38,37	1,17	32,22	0,34	27,88
ECO	ECO PRO 440	1,85	39,00	1,18	32,81	0,34	28,47
ECO	ECO PRO 440i	1,85	39,18	1,18	32,98	0,34	28,64
RO	RO-4040-FF	2,440	39,45	1,510	32,25	0,350	25,77
LC	LC LE-4040	2,45	55,94	1,58	47,59	0,49	41,87
BW30	BW30XFRLE-400/34	2,49	68,69	1,60	59,36	0,48	53,54
BW30	BW30XFRLE-400/34i	2,49	68,91	1,60	59,57	0,48	53,74
BW30	BW30-2540	2,47	40,53	1,53	33,21	0,35	26,63
BW30	BW30HRLE-440	2,54	74,54	1,63	64,80	0,50	58,92
BW30	BW30HRLE-440i	2,54	74,86	1,64	65,09	0,50	59,22
BW30	BW30-4040	2,56	43,49	1,59	35,84	0,38	29,06
BW30	BW30-365	2,61	45,28	1,62	37,45	0,39	30,56
BW30	BW30-400/34	2,63	46,42	1,64	38,47	0,39	31,52
BW30	BW30-400/34i	2,63	46,51	1,64	38,56	0,39	31,61
BW30	BW30-400	2,66	47,74	1,66	39,67	0,40	32,66
RO	HYPERSELL RO-390	2,790	54,32	1,750	45,65	0,430	38,55
RO	RO-390-FF	2,940	64,60	1,860	55,13	0,480	47,55

A condiciones de pH superiores a 9, la gran mayoría de las membranas evaluadas presenta una remoción superior al 70%, y para pH superiores a 10, todas las series evaluadas remueven sobre este valor.

A.8.3. Toray - TorayDS2

Las remociones evaluadas para las series de Toray, presentan valores similares a los resultados obtenidos para las series de Hydranautics. A una alimentación de 2 ppm de boro y pH 7,5, los valores no superan el 56% de remoción.

Tabla 41. Resultados simulación membranas Toray en software Toray DS2.

Serie	Modelo	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Contenedores 1° etapa	Contenedores 2° etapa	Remoción boro (%)
TMLD	TML10D-073-31	73	31	14	7	55,4%
TM700D	TM710D-087-28	87	28	12	6	55,2%
TMLD	TML10D	73	34	14	7	54,7%
TM700D	TM710D-087-31	87	34	12	6	54,2%
TM700	TM710	87	31	12	6	53,6%

TM700	TM720-370	370	31	3	2	53,2%
TMRONW	TMROD4040NW	85	31	12	6	52,9%
TM700	TM720-400	400	31	3	2	52,2%
TMLD	TML20D-370	370	34	3	2	51,6%
TM700C	TM720C-440	440	28	3	2	51,0%
TMLD	TML20D-400	400	34	3	2	50,5%
TM700	TM720-440	440	28	3	2	50,0%
TM700D	TM720D-400	400	34	3	2	49,9%
TMG(D)	TMG10D-087-28	87	28	12	6	49,8%
TMG(D)	TMG10D	87	34	12	6	48,8%
TMLD	TML20D-440	440	28	3	2	48,1%
TM700D	TM720D-440	440	28	3	2	47,4%
TMROHS	TMRO4040HS	85	31	12	6	44,7%
TM700L	TM720L-400	400	31	3	2	44,1%
TMROHS	TMRO8040HS	390	31	3	2	43,8%
TM700	TM740-1760	1760	28	1	1	42,8%
TM700L	TM720L-440	440	28	3	2	42,3%
TMG(D)	TMG20D-400	400	34	3	2	37,2%
TMG(D)	TMG20D-440	440	28	3	2	35,9%
TMRONW	TMROH4040NW	85	31	12	6	33,6%

(*) El porcentaje de remoción de boro corresponde al resultado evaluado con una alimentación de 2 ppm de boro a pH de 7,5.

Clasificación series

TM700	membranas para agua salobre.
TM700D	membranas de alto rechazo y resistencia química.
TM700C	membranas para agua salobre de baja presión.
TM700L	membranas para agua salobre de baja presión.
TMG	membranas para agua salobre de muy baja presión.
TMH	membranas para agua salobre de muy baja presión.
TMG(D)	membranas para agua salobre de muy baja presión con resistencia química.
TMLD	membranas con alta resistencia al ensuciamiento.
TMRO	membranas santizables por calor.
SU-700	membranas para agua salobre.
SU-700L	membranas para agua salobre de baja presión.
SUL-G	membranas para agua salobre de muy baja presión.
SU-700R	membranas de alto rechazo.

Tabla 42. Resultados simulaciones Toray DS2 - 2 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
TMLD	TML10D-073-31	1,190	17,12	0,944	22,76	0,293	31,59
TM700D	TM710D-087-28	1,195	19,90	0,951	25,99	0,301	35,69
TMLD	TML10D	1,207	17,85	0,962	23,34	0,309	32,06
TM700D	TM710D-087-31	1,221	21,18	0,977	27,72	0,315	38,16
TM700	TM710	1,238	26,90	0,998	33,89	0,340	43,93

TM700	TM720-370	1,247	29,80	1,006	37,49	0,341	48,50
TMRONW	TMROD4040NW	1,256	25,55	1,015	33,62	0,312	47,15
TM700	TM720-400	1,275	31,49	1,037	39,60	0,359	51,22
TMLD	TML20D-370	1,290	21,68	1,053	29,38	0,375	41,06
TM700C	TM720C-440	1,307	85,89	1,071	109,10	0,357	140,10
TMLD	TML20D-400	1,320	23,02	1,089	32,11	0,386	45,38
TM700	TM720-440	1,334	36,11	1,103	45,30	0,398	58,45
TM700D	TM720D-400	1,337	24,05	1,105	31,42	0,397	43,10
TMG(D)	TMG10D-087-28	1,339	37,93	1,127	45,04	513,000	56,54
TMG(D)	TMG10D	1,365	39,81	1,155	47,40	0,531	59,70
TMLD	TML20D-440	1,384	26,53	1,158	35,74	0,445	48,17
TM700D	TM720D-440	1,404	27,99	1,182	36,80	0,450	50,30
TMROHS	TMRO4040HS	1,476	45,71	1,270	59,85	0,502	78,08
TM700L	TM720L-400	1,490	50,19	1,283	64,32	0,515	82,65
TMROHS	TMRO8040HS	1,498	51,49	1,303	65,95	0,628	85,16
TM700	TM740-1760	1,525	53,89	1,330	67,38	0,581	86,62
TM700L	TM720L-440	1,540	58,16	1,347	74,81	0,573	95,71
TMG(D)	TMG20D-400	1,674	50,92	1,520	58,89	0,757	75,01
TMG(D)	TMG20D-440	1,710	61,04	1,571	72,15	0,837	89,88
TMRONW	TMROH4040NW	1,771	158,30	1,658	207,40	1,047	284,90

Tabla 43. Resultados simulaciones Toray DS2 - 4 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
TMLD	TML10D-073-31	2,380	18,39	1,911	23,22	0,609	31,12
TM700D	TM710D-087-28	2,390	21,02	1,902	26,84	0,621	35,96
TMLD	TML10D	2,414	19,14	1,925	24,39	0,633	32,34
TM700D	TM710D-087-31	2,441	22,32	1,955	28,60	0,649	38,16
TM700	TM710	2,476	28,25	1,996	35,01	0,696	44,26
TM700D	TM710D	2,409	21,61	1,921	27,62	0,631	36,76
TM700	TM720-370	2,493	30,94	2,012	38,36	0,696	48,57
TMRONW	TMROD4040NW	2,514	26,93	2,030	34,76	0,651	47,24
TM700	TM720-400	2,550	32,90	2,074	40,78	0,732	51,59
TMLD	TML20D-370	2,566	22,79	2,087	30,50	0,748	41,37
TM700C	TM720C-440	2,615	89,05	2,142	110,60	0,734	149,50
TMLD	TML20D-400	2,656	24,17	2,189	33,24	0,804	45,38
TM700	TM720-440	2,668	37,31	2,205	46,25	0,816	58,47
TM700D	TM720D-400	2,675	25,51	2,211	32,66	0,813	43,44
TMG(D)	TMG10D-087-28	2,679	39,47	2,256	46,39	1,065	56,94
TMG(D)	TMG10D	2,732	41,39	2,312	48,79	1,089	60,11
TMLD	TML20D-440	2,786	27,49	2,303	35,48	0,894	48,57
TM700D	TM720D-440	2,809	29,76	2,365	38,13	0,921	50,70
TMROHS	TMRO4040HS	2,969	48,66	2,553	61,35	1,043	78,60
TM700L	TM720L-400	2,981	53,17	2,566	65,86	1,055	83,16
TMROHS	TMRO8040HS	2,993	54,17	2,602	67,59	1,277	85,78
TM700	TM740-1760	3,050	55,65	2,661	68,95	1,185	87,16
TM700L	TM720L-440	3,081	59,48	2,693	73,73	1,176	93,19
TMG(D)	TMG20D-400	3,348	52,40	3,041	61,70	1,564	75,62
TMG(D)	TMG20D-440	3,420	63,09	3,142	74,07	1,722	90,55

A.8.4. TCK Membrane (Toray) - CSMPro

Los resultados para las series de TCK Membrana de muestran la existencia de 5 membranas con remoción de boro superior a 70%, las cuales corresponden a las series RE8040-BLN440, RE8040-BE440, RE8040-FEn440, RE4040-BLR y RE4040-FLR.

Además, la serie RE8040-BLN440 se encuentra diseñada bajo condiciones de grandes flujos y bajo consumo energético.

Tabla 44. Resultados simulación membranas TCK Membrane en software CSMPro.

Serie	Modelo	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Contenedores 1° etapa	Contenedores 2° etapa	Remoción boro (%)
BL	RE8040-BLN440*	440	S.I.	3	2	89,5%
BW	RE8040-BE440*	440	S.I.	3	2	74,5%
F	RE8040-FEn440*	440	S.I.	3	2	74,5%
BL	RE4040-BLR*	85	S.I.	12	6	72,3%
F	RE4040-FLR	85	S.I.	12	6	71,9%
F	RE8040-FEn*	400	S.I.	3	2	68,5%
BW	RE8040-BE34	400	34	3	2	68,5%
BW	RE8040-BE*	400	S.I.	3	2	68,5%
F	RE8040-FEn34	400	34	3	2	68,5%
BL	RE8040-BLN*	400	S.I.	3	2	62,1%
BW	RE4040-BE*	85	S.I.	12	6	59,9%
F	RE4040-FEn	85	S.I.	12	6	59,9%
BW	RE8040-BR	380	32	3	2	58,4%
F	RE8040-FLF440	440	S.I.	3	2	58,4%
BW	RE8040-BR400	400	S.I.	3	2	58,0%
F	RE8040-FLF34	400	34	3	2	56,1%
BL	RE8040-BLR440*	440	S.I.	3	2	53,1%
F	RE8040-FLR440*	440	S.I.	3	2	53,1%
BL	RE8040-BLR*	400	S.I.	3	2	52,8%
F	RE8040-FLR34	400	34	3	2	52,8%
F	RE8040-FLR*	400	S.I.	3	2	52,8%
BW	RE4040-CE*	85	S.I.	12	6	22,8%
BW	RE8040-CE*	400	S.I.	3	2	22,8%

(*) El porcentaje de remoción de boro corresponde al resultado evaluado con una alimentación de 2 ppm de boro a pH de 7,5.

Clasificación específica

- BW membranas para agua salobre.
- BL membranas de bajo consumo energético.
- F membranas con resistencia al ensuciamiento.

Por lo general, las membranas de TCK Membrane destacan por su buena capacidad de remoción de boro, en base a lo revisado en este documento.

Tabla 45. Resultados simulaciones CSMPPro - 2 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
BL	RE8040-BLN440*	0,28	65,34	0,34	64,65	0,39	63,94
BW	RE8040-BE440*	0,68	29,93	0,53	29,54	0,37	29,13
F	RE8040-FEn440*	0,68	29,93	0,53	29,54	0,37	29,11
BL	RE4040-BLR*	0,74	32,56	0,62	32,14	0,48	31,70
F	RE4040-FLR	0,75	32,56	0,62	32,14	0,48	31,69
F	RE8040-FEn*	0,84	21,38	0,62	26,84	0,38	26,27
BW	RE8040-BE34	0,84	27,26	0,62	26,70	0,38	26,14
BW	RE8040-BE*	0,84	27,36	0,62	26,83	0,38	26,25
F	RE8040-FEn34	0,84	27,26	0,62	26,72	0,38	26,17
BL	RE8040-BLN*	1,01	13,44	0,66	12,71	0,29	11,93
BW	RE4040-BE*	1,07	21,87	0,74	21,13	0,38	20,34
F	RE4040-FEn	1,07	21,87	0,74	21,13	0,38	20,34
BW	RE8040-BR	1,11	15,41	0,74	14,61	0,34	13,76
F	RE8040-FLF440	1,11	61,04	0,86	60,36	0,58	59,64
BW	RE8040-BR400	1,12	16,15	0,74	15,35	0,34	14,49
F	RE8040-FLF34	1,17	54,97	0,88	54,23	0,56	53,45
BL	RE8040-BLR440*	1,25	49,24	0,91	48,44	0,54	47,59
F	RE8040-FLR440*	1,25	49,24	0,91	48,42	0,54	47,56
BL	RE8040-BLR*	1,26	44,36	0,9	43,51	0,52	42,61
F	RE8040-FLR34	1,26	44,13	0,90	43,28	0,52	42,36
F	RE8040-FLR*	1,26	44,36	0,90	43,15	0,52	42,61
BW	RE4040-CE*	2,06	52,20	1,46	54,39	0,81	53,59
BW	RE8040-CE*	2,06	49,16	1,53	80,39	0,97	79,59

Tabla 46. Resultados simulaciones CSMPPro - 4 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
BL	RE8040-BLN440*	0,580	67,61	0,680	66,26	0,790	64,75
BW	RE8040-BE440*	1,36	31,30	1,06	30,51	0,74	29,62
F	RE8040-FEn440*	1,39	31,30	1,06	30,54	0,74	29,66
BL	RE4040-BLR*	1,49	34,09	1,24	33,24	0,97	32,38
F	RE4040-FLR	1,49	34,08	1,23	33,22	0,96	32,35
F	RE8040-FEn*	1,68	29,07	1,03	28,00	0,34	26,82
BW	RE8040-BE34	1,69	28,95	1,24	27,86	0,76	26,72
BW	RE8040-BE*	1,680	29,05	1,240	27,97	0,760	26,81
F	RE8040-FEn34	1,69	28,95	1,24	27,88	0,76	26,73
BL	RE8040-BLN*	2,02	15,46	1,33	14,00	0,58	26,41
BW	RE4040-BE*	2,14	24,02	1,48	22,53	0,76	20,94
F	RE4040-FEn	2,14	24,02	1,48	22,53	0,76	20,94
BW	RE8040-BR	2,22	17,63	1,37	16,04	0,67	14,32
F	RE8040-FLF440	2,23	63,32	1,72	61,94	1,17	60,55
BW	RE8040-BR400	2,230	18,39	1,490	16,79	0,690	15,08

F	RE8040-FLF34	2,34	57,35	1,76	55,86	1,12	54,27
BL	RE8040-BLR440*	2,500	51,77	1,820	50,17	1,090	48,36
F	RE8040-FLR440*	2,50	51,77	1,81	50,16	1,09	48,36
BL	RE8040-BLR*	2,530	46,92	1,810	45,26	1,040	43,40
F	RE8040-FLR34	2,52	46,68	1,80	45,05	1,03	43,18
F	RE8040-FLR*	2,53	46,92	1,81	45,25	1,04	43,44
BW	RE4040-CE*	4,11	57,27	2,91	55,69	1,62	54,06
BW	RE8040-CE*	4,120	82,16	3,080	81,67	1,930	80,02

A.8.5. SUEZ - Winflows

Los resultados de simulación de las membranas de SUEZ (antes GE's Water & Process Technologies), son presentados a continuación en la tabla 33.

Tabla 47. Resultados simulación membranas SUEZ en software Winflows.

Serie	Modelo	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Contenedores 1° etapa	Contenedores 2° etapa	Remoción boro (%)
AG HR LF	AG-90 LF	90	28	11	6	67,9%
Duratherm STD	DTh STD RO 4040	90	31	11	6	66,1%
OSMO HR (PA)	411-HR(PA)	75	34	13	7	64,6%
AG HR	AG-365	365	34	3	2	63,1%
AG HR	AG-90	90	28	11	6	63,1%
Duratherm HWS	DTh HWS RO 8040 HR	374	31	3	2	62,4%
Duratherm STD	DTh STD RO 8040	374	31	3	2	62,4%
AG HR LF	AG-400 LF, 34	400	34	3	2	61,6%
MUNI RO HR	MUNI-RO-400-HR	400	31	3	2	61,6%
AG LF	AG-4040F LF	85	27	12	6	61,6%
AG HR	AG-400	400	31	3	2	61,5%
AG HR	AG-400, 34	400	34	3	2	61,5%
MUNI RO HR	MUNI-RO-430-HR	440	28	3	2	60,0%
AG HR	AG-440	440	28	3	2	59,9%
OSMO HR (PA)	815-HR(PA)	330	31	3	2	58,2%
AG	AG-4040C	90	28	11	6	57,1%
AG	AG-8040F	365	31	3	2	57,1%
OSMO HR (PA)	811-HR(PA)	350	31	3	2	57,1%
AG	AG-4040FM	85	27	12	6	57,1%
AG	AG-8040N 400	400	27	3	2	55,8%
AG	AG-8040F 400	400	27	3	2	55,6%
AG LF	AG-8040F 400 LF	400	27	3	2	55,6%
AG FR	AG-8040F400FR,34	400	32	3	2	54,1%
AG	AG-8040C	380	28	3	2	53,6%
AG	AG-8040N	365	31	3	2	48,7%
OSMO USPG	416-USPG	90	31	11	6	46,9%
OSMO HR (PA)	416-HR(PA)	80	31	13	7	46,4%
Duratherm HWS	DTh HWS RO 4040 HR	90	31	11	6	45,5%
OSMO BEV RO	BEV-RO-FF	365	31	3	2	45,3%
OSMO HR (PA)	817-HR(PA)	350	31	3	2	45,3%
OSMO HR (PA)	813-HR(PA)	375	31	3	2	44,3%
OSMO USPG	817-USPG	400	31	3	2	44,1%
OSMO USPG	813-USPG	400	31	3	2	44,0%
OSMO HR (CA)	813-HR(CA)	400	31	3	2	26,0%
CD	CD8040F	390	28	3	2	26,0%
OSMO HR (CA)	811-HR(CA)	380	31	3	2	26,0%
CE	CE8040F	350	28	3	2	26,0%
OSMO HR (CA)	817-HR(CA)	350	31	3	2	26,0%
OSMO HR (CA)	815-HR(CA)	330	31	3	2	26,0%
CE	CE4040FM	90	27	11	6	26,0%
OSMO HR (CA)	416-HR(CA)	80	31	13	7	26,0%
OSMO HR (CA)	411-HR(CA)	75	31	13	7	26,0%

(*) El porcentaje de remoción de boro corresponde al resultado evaluado con una alimentación de 2 ppm de boro a pH de 7,5.

Los resultados obtenidos para las series de SUEZ indican que la remoción de boro, para 2 ppm y pH 7,5, no supera el 67,9% (AG-90LF). A un pH de 9, ya se evidencia una mayor cantidad de remoción superior al 70%, y para pH 10, todas las series evaluadas remueven sobre este valor.

Clasificación series

A-series	membranas estándar de agua salobre, permite altos flujos y altos rechazos.
AG	membranas de alto rechazo con presiones de operación cercanas a los 200 psi y ahorro moderado de energía.
AG FR	membranas recomendadas para requerimientos de durabilidad y la limpieza efectiva. Espaciadores de alimentación más largos para disminuir el ensuciamiento.
AG HR	membranas recomendadas para concentración de sales entre 1.000 a 10.000 mg/L.
AG HR LF	membranas construidas con una carga más neutras para reducir incrustaciones.
AG LF	membranas con superficies resistentes al ensuciamiento recomendadas para concentración de sales entre 1.000 a 10.000 mg/L.
AK	membranas de alto rechazo con presiones de operación cercanas a los 100 psi y ahorro alto de energía.
AK HR	membranas con muy alto rechazo con niveles de sales de 5.000 mg/L.
AK LE	membranas recomendadas para alto flujo, alto rechazo y presiones de trabajo bajas.
AP	membranas recomendadas para flujos muy altos y presiones bajas.
C-series	membranas de mezcla de triacetato con diacetato, soportan altos flujos y mayor estabilidad mecánica que las de acetato de celulosa estándar. Resistentes al cloro.
CD	membranas de alto rechazo utilizadas para la desalinización del agua y concentración de otras corrientes de proceso.
CE	membranas utilizadas para la desalinización del agua y concentración de otras corrientes de proceso.
CG	membranas utilizadas para grandes flujos.
Duraslick	membranas compuestas de un diseño de tres capas para obtener mejores rechazos con bajo nivel de ensuciamiento.
Duratherm STD	membranas destinadas para trabajar con agua purificada sobre los 70 °C con capacidad de soportar exposiciones de 90 °C en sistemas que requieran sanitización.
Duratherm HWS	membranas destinadas para trabajar con agua purificada sobre los 50 °C con capacidad de soportar exposiciones de 90 °C en sistemas que requieran sanitización.
INDUSTRIAL	membranas utilizadas para corrientes de proceso con alta cantidad de sólidos. También es posible concentrar algunos ácidos.
MUNI RO HR	membranas con alto rechazo y alta capacidad de flujo.
OSMO BEV	membranas recomendadas para alimentos y agua embotellada.
OSMO BEV CA	membranas tolerantes al cloro.
OSMO BEV RO	membranas con un alto rechazo.
OSMO BEV ULE	membranas con muy bajo consumo energético.
OSMO USPG	membranas uso farmacéutico esterilizables en base a normativa USP.
OSMO HR (PA)	membranas de alto rechazo.
OSMO HR (CA)	membranas de alto rechazo tolerantes al cloro.

Tabla 48. Resultados simulaciones Winflows - 2 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
AG HR LF	AG-90 LF	0,86	19,99	0,55	20,44	0,04	17,92
Duratherm STD	DTh STD RO 4040	0,90	23,23	0,60	23,57	0,06	21,20
OSMO HR (PA)	411-HR(PA)	0,95	25,47	0,64	25,79	0,13	23,44
AG HR	AG-365	0,98	20,86	0,67	21,33	0,15	19,01
AG HR	AG-90	0,99	23,30	0,67	23,65	0,15	21,22
Duratherm HWS	DTh HWS RO 8040 HR	1,00	29,13	0,69	29,45	0,16	27,31
Duratherm STD	DTh STD RO 8040	1,00	29,13	0,70	29,51	0,15	27,27
AG HR LF	AG-400 LF, 34	1,03	21,09	0,71	21,42	0,21	19,04
MUNI RO HR	MUNI-RO-400-HR	1,03	21,1	0,72	21,43	0,20	19,01
AG LF	AG-4040F LF	1,03	29,77	0,71	30,17	0,19	27,87
AG HR	AG-400	1,03	22,85	0,72	22,57	0,21	21,03
AG HR	AG-400, 34	1,03	22,78	0,72	22,34	0,21	20,80
MUNI RO HR	MUNI-RO-430-HR	1,07	23,08	0,76	23,42	0,26	21,13
AG HR	AG-440	1,07	25,01	0,76	24,54	0,21	22,87
OSMO HR (PA)	815-HR(PA)	1,12	36,49	0,80	36,82	0,26	34,37
AG	AG-4040C	1,14	37,43	0,83	37,74	0,31	35,34
AG	AG-8040F	1,15	38,73	0,84	39,13	0,32	36,79
OSMO HR (PA)	811-HR(PA)	1,15	38,69	0,83	39,06	0,30	36,84
AG	AG-4040FM	1,15	37,53	0,83	38,01	0,34	35,41
AG	AG-8040N 400	1,18	67,24	0,87	67,72	0,34	65,16
AG	AG-8040F 400	1,19	42,42	0,88	42,85	0,35	40,43
AG LF	AG-8040F 400 LF	1,19	42,22	0,88	42,63	0,36	40,25
AG FR	AG-8040F400FR,34	1,22	44,95	0,91	45,30	0,39	43,08
AG	AG-8040C	1,24	48,52	0,93	48,97	0,42	46,48
AG	AG-8040N	1,37	61,39	1,06	61,71	0,53	59,34
OSMO USPG	416-USPG	1,42	66,02	1,10	66,45	0,57	63,9
OSMO HR (PA)	416-HR(PA)	1,43	68,02	1,12	68,45	0,62	66,02
Duratherm HWS	DTh HWS RO 4040 HR	1,45	24,22	1,14	24,55	0,60	22,2
OSMO BEV RO	BEV-RO-FF	1,46	76,34	1,15	76,82	0,61	74,24
OSMO HR (PA)	817-HR(PA)	1,46	76,31	1,15	76,79	0,63	74,39
OSMO HR (PA)	813-HR(PA)	1,49	80,61	1,18	81,10	0,65	78,77
OSMO USPG	817-USPG	1,49	82,06	1,18	82,49	0,65	80,23
OSMO USPG	813-USPG	1,49	82,06	1,19	82,46	0,66	80
OSMO HR (CA)	813-HR(CA)	1,97	137,83	1,66	138,27	1,16	135,75
CD	CD8040F	1,97	69,21	1,66	69,67	1,15	67,08
OSMO HR (CA)	811-HR(CA)	1,97	129,79	1,67	130,18	1,13	127,92
CE	CE8040F	1,97	145,98	1,67	146,31	1,14	143,99
OSMO HR (CA)	817-HR(CA)	1,97	127,83	1,67	128,22	1,12	125,75
OSMO HR (CA)	815-HR(CA)	1,97	121,42	1,66	121,74	1,14	119,56
CE	CE4040FM	1,97	123,04	1,66	123,52	1,15	121,04
OSMO HR (CA)	416-HR(CA)	1,97	119,39	1,66	119,82	1,14	117,31
OSMO HR (CA)	411-HR(CA)	1,97	116,21	1,66	116,51	1,14	114,13

Tabla 49. Resultados simulaciones Winflows - 4 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
AG HR LF	AG-90 LF	1,88	20,25	1,25	20,46	0,13	20,06
Duratherm STD	DTh STD RO 4040	1,96	24,23	1,30	23,45	0,15	21,13
OSMO HR (PA)	411-HR(PA)	2,00	25,80	1,35	25,92	0,19	24,54
AG HR	AG-365	2,01	21,85	1,37	21,31	0,48	18,44
AG HR	AG-90	2,04	23,71	1,40	23,76	0,14	22,17
Duratherm HWS	DTh HWS RO 8040 HR	2,05	30,43	1,40	29,56	0,07	28,52
Duratherm STD	DTh STD RO 8040	2,03	28,73	1,40	29,38	0,29	26,97
AG HR LF	AG-400 LF, 34	2,06	22,23	1,44	21,43	0,05	20,22
MUNI RO HR	MUNI-RO-400-HR	2,05	22,56	1,43	21,35	0,28	19,48
AG LF	AG-4040F LF	2,05	29,44	1,41	29,96	0,06	29,95
AG HR	AG-400	2,05	24,11	1,42	23,35	0,41	21,09
AG HR	AG-400, 34	2,05	23,81	1,42	23,02	0,41	20,86
MUNI RO HR	MUNI-RO-430-HR	2,12	23,77	1,48	23,43	0,26	23,39
AG HR	AG-440	2,13	24,45	1,49	25,25	0,44	25,75
OSMO HR (PA)	815-HR(PA)	2,17	37,16	1,51	36,82	0,28	36,32
AG	AG-4040C	2,17	37,89	1,56	37,69	0,34	35,03
AG	AG-8040F	2,17	40,26	1,55	38,93	0,06	37,74
OSMO HR (PA)	811-HR(PA)	2,19	39,71	1,55	38,93	0,37	38,91
AG	AG-4040FM	2,18	37,65	1,56	37,77	0,62	36,97
AG	AG-8040N 400	2,23	66,92	1,57	67,68	0,26	65,19
AG	AG-8040F 400	2,20	42,05	1,59	42,86	0,43	42,08
AG LF	AG-8040F 400 LF	2,22	43,65	1,59	42,55	0,34	41,74
AG FR	AG-8040F400FR,34	2,25	45,07	1,62	45,24	0,49	43,79
AG	AG-8040C	2,26	49,60	1,64	48,90	0,62	46,83
AG	AG-8040N	2,40	61,67	1,79	61,71	0,85	60,59
OSMO USPG	416-USPG	2,45	66,42	1,83	66,29	0,46	63,70
OSMO HR (PA)	416-HR(PA)	2,47	67,76	1,83	68,35	0,81	65,77
Duratherm HWS	DTh HWS RO 4040 HR	2,49	23,93	1,84	24,50	0,44	22,40
OSMO BEV RO	BEV-RO-FF	2,51	76,20	1,87	76,68	0,88	73,92
OSMO HR (PA)	817-HR(PA)	2,50	76,35	1,87	76,57	0,11	74,70
OSMO HR (PA)	813-HR(PA)	2,50	80,47	1,89	80,96	0,18	80,21
OSMO USPG	817-USPG	2,53	81,67	1,91	82,42	0,67	81,30
OSMO USPG	813-USPG	2,51	82,730	1,90	82,330	0,54	82,530
OSMO HR (CA)	813-HR(CA)	3,02	137,56	2,38	138,09	1,21	137,44
CD	CD8040F	3,02	69,21	2,38	69,65	0,87	67,75
OSMO HR (CA)	811-HR(CA)	3,01	131,33	2,38	130,24	0,65	127,60
CE	CE8040F	3,02	146,95	2,37	146,28	1,27	146,46
OSMO HR (CA)	817-HR(CA)	3,01	128,45	2,38	128,23	1,35	126,12
OSMO HR (CA)	815-HR(CA)	3,01	121,59	2,38	121,89	1,05	119,55
CE	CE4040FM	3,00	123,91	2,37	123,45	1,13	121,90
OSMO HR (CA)	416-HR(CA)	2,99	120,23	2,39	119,85	0,82	117,60
OSMO HR (CA)	411-HR(CA)	3,01	117,53	2,38	116,67	1,53	114,10

A.8.6. Lanxess - LewaPlus

Los resultados obtenidos para las series de Lanxess (Lewabrane ®) indican que la remoción de boro, para 2 ppm y pH 7,5, no supera el 64,5% (RO B400 HR). A un pH de 9, ya se evidencia una remoción superior al 70% para las cuatro primeras series, y para pH 10, todas las series evaluadas remueven sobre este valor.

Tabla 50. Resultados simulación membranas Lanxess en software LewaPlus.

Serie	Modelo	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Contenedores 1° etapa	Contenedores 2° etapa	Remoción boro (%)
LEWABRANE	RO B400 HR	400	31	4	1	64,5%
LEWABRANE	RO B400 FR ASD	400	34	4	1	61,7%
LEWABRANE	RO B440 HR	440	28	4	1	61,3%
LEWABRANE	RO B370 HR	370	31	4	1	59,2%
LEWABRANE	RO B085 LE 4040	85	34	12	7	50,3%
LEWABRANE	RO B400 LE	400	34	4	1	49,3%
LEWABRANE	RO B400 LE ASD	400	34	4	1	48,0%
LEWABRANE	RO B440 LE	440	28	4	1	45,9%
LEWABRANE	RO B085 FR 4040	85	34	12	7	45,6%
LEWABRANE	RO B400 FR	400	34	3	1	45,6%
LEWABRANE	RO B400 HF	400	31	4	1	45,6%
LEWABRANE	RO B085 HF 4040	85	31	12	7	45,2%
LEWABRANE	RO B440 HF	440	28	4	1	42,2%
LEWABRANE	RO B370 FR	370	34	4	1	39,6%

(*) El porcentaje de remoción de boro corresponde al resultado evaluado con una alimentación de 2 ppm de boro a pH de 7,5.

Clasificación series

LEWABRANE membranas compuestas de tecnología de película fina enrolladas en espiral diseñadas específicamente para aplicaciones de tratamiento de agua.

Tabla 51. Resultados simulaciones LewaPlus - 2 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
LEWABRANE	RO B400 HR	0,95	23,82	0,55	22,48	0,13	22,28
LEWABRANE	RO B400 FR ASD	1,02	26,13	0,60	24,69	0,14	24,46
LEWABRANE	RO B440 HR	1,03	26,43	0,6	24,97	0,14	24,74
LEWABRANE	RO B370 HR	1,09	28,23	0,64	26,67	0,15	26,44
LEWABRANE	RO B085 LE 4040	1,326	37,15	0,81	35,18	0,20	34,90
LEWABRANE	RO B400 LE	1,35	38,03	0,83	36,02	0,20	35,73
LEWABRANE	RO B400 LE ASD	1,39	39,38	0,85	37,31	0,21	37,02
LEWABRANE	RO B440 LE	1,443	42,33	0,904	40,21	0,223	39,91
LEWABRANE	RO B085 FR 4040	1,45	42,03	0,899	39,87	0,222	39,58
LEWABRANE	RO B400 FR	1,45	41,56	0,89	39,38	0,22	39,08
LEWABRANE	RO B400 HF	1,45	41,56	0,89	39,38	0,22	39,08
LEWABRANE	RO B085 HF 4040	1,461	42,76	0,91	40,54	0,23	40,24
LEWABRANE	RO B440 HF	1,54	46,09	1,11	51,89	0,24	43,40
LEWABRANE	RO B370 FR	1,61	49,23	1,03	46,73	0,26	46,41

Dentro de las series fabricadas por Lanxess para agua salobre, existen algunas que su diseño ha sido específicamente orientado a la remoción de boro junto a otras características, como la serie RE B400 HR, RE B440 HR y RE B370 HR. Sin embargo, las remociones evaluadas no presentan resultados sobre la especificación de interés.

Tabla 52. Resultados simulaciones LewaPlus - 4 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
LEWABRANE	RO B400 HR	1,90	24,77	1,09	23,04	0,25	22,42
LEWABRANE	RO B400 FR ASD	2,05	27,17	1,19	25,29	0,28	24,62
LEWABRANE	RO B440 HR	2,06	27,47	1,20	25,58	0,28	24,90
LEWABRANE	RO B370 HR	2,18	29,33	1,28	27,33	0,30	26,61
LEWABRANE	RO B085 LE 4040	2,65	38,49	1,61	36,00	0,39	35,12
LEWABRANE	RO B400 LE	2,71	39,40	1,65	36,86	0,40	35,96
LEWABRANE	RO B400 LE ASD	2,78	40,78	1,70	38,18	0,42	37,26
LEWABRANE	RO B440 LE	2,886	43,85	1,810	41,13	0,447	40,16
LEWABRANE	RO B085 FR 4040	2,906	43,53	1,799	40,79	0,444	39,82
LEWABRANE	RO B400 FR	2,90	43,02	1,79	40,29	0,44	39,33
LEWABRANE	RO B400 HF	2,90	43,02	1,79	40,29	0,44	39,33
LEWABRANE	RO B085 HF 4040	2,92	44,23	1,82	41,46	0,45	40,48
LEWABRANE	RO B440 HF	3,08	47,67	1,95	44,71	0,49	43,67
LEWABRANE	RO B370 FR	3,23	50,86	2,06	47,78	0,52	46,70

A.8.7. LG - NanoH₂O

Los resultados obtenidos para las series de LG indican que la remoción de boro, para 2 ppm y pH 7,5, no supera el 61,0% (LG BW 4040 R).

Tabla 53. Resultados simulación membranas LG en software NanoH₂O.

Serie	Modelo	Área (s.q.ft)	Espaciador (mil)	Contenedores 1° etapa	Contenedores 2° etapa	Remoción boro (%)
R	LG BW 4040 R	85	28	12	6	61,0%
AFR	LG BW 400 AFR	400	34	3	2	58,4%
R	LG BW 400 R	400	34	3	2	58,4%
ES	LG BW 400 ES	400	34	3	2	57,3%
R	LG BW 440 R	440	28	3	2	56,5%
ES	LG BW 440 ES	440	28	3	2	55,4%
ES	LG BW 4040 ES	85	28	12	6	48,6%
AFR	LG BW 4040 AFR	80	34	13	7	46,8%

(*) El porcentaje de remoción de boro corresponde al resultado evaluado con una alimentación de 2 ppm de boro a pH de 7,5.

Clasificación series

- R membranas de alto rechazo y durabilidad.
- ES membranas con bajo consumo energético.
- AFR membranas con superficies resistentes al ensuciamiento.
- UES membranas con muy bajo consumo energético.

Tabla 54. Resultados simulaciones NanoH₂O - 2 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
R	LG BW 4040 R	1,04	24,22	0,60	32,80	0,15	38,93
AFR	LG BW 400 AFR	1,11	27,78	0,64	37,88	0,17	45,00
R	LG BW 400 R	1,11	27,78	0,64	37,88	0,17	45,00
ES	LG BW 400 ES	1,14	32,46	0,66	43,9	0,18	52,21
R	LG BW 440 R	1,16	31,09	0,67	42,42	0,18	50,41
ES	LG BW 440 ES	1,19	36,67	0,69	49,60	0,19	58,99
ES	LG BW 4040 ES	1,37	64,89	0,81	87,90	0,25	104,72
AFR	LG BW 4040 AFR	1,42	62,63	0,84	84,90	0,25	100,54

Tabla 55. Resultados simulaciones NanoH₂O - 4 ppm Boro en agua alimentación.

Concentración de boro en la alimentación		4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm
pH en la alimentación		pH 7,5	pH 7,5	pH 9	pH 9	pH 10	pH 10
Temperatura en la alimentación		18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C	18 °C
Serie	Modelo	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)	Boro perm. (ppm)	TDS (ppm)
R	LG BW 4040 R	2,08	25,27	1,20	33,40	0,31	39,07
AFR	LG BW 400 AFR	2,210	28,89	1,280	38,51	0,340	45,15
R	LG BW 400 R	2,21	28,89	1,28	38,51	0,34	45,15
ES	LG BW 400 ES	2,280	33,61	1,32	44,56	0,36	52,37
R	LG BW 440 R	2,23	32,26	1,35	43,09	0,36	50,57
ES	LG BW 440 ES	2,285	37,83	1,35	55,32	0,37	59,14
ES	LG BW 4040 ES	2,15	35,74	1,26	48,06	0,35	56,62
AFR	LG BW 4040 AFR	2,21	19,63	27,05	50,67	0,36	59,71

Anexo 9. Detalle de los resultados de Segunda Etapa de Simulación

A.9.1. Dow - WAVE

Las membranas presentadas a continua de Dow evaluadas en esta sección corresponden las siguientes:

- a) LC-HR-4040
- b) BW30HR-440
- c) BW30HR-440i

a) LC-HR-4040

RO Flow Table (Stage Level) - Pass 1

Stage	Elements	#PV	#Els per PV	Feed				Concentrate			Permeate			
				Feed Flow	Recirc Flow	Feed Press	Boost Press	Conc Flow	Conc Press	Press Drop	Perm Flow	Avg Flux	Perm Press	Perm TDS
				(m³/h)	(m³/h)	(bar)	(bar)	(m³/h)	(bar)	(bar)	(m³/h)	(LMH)	(bar)	(mg/L)
1	LC HR-4040	11	6	26.66	0.00	12.07	0.00	12.07	10.72	1.35	14.59	25.3	0.00	10.67
2	LC HR-4040	6	6	12.07	0.00	10.52	0.00	6.67	9.40	1.12	5.41	17.2	0.00	30.61

RO Solute Concentrations - Pass 1

Concentrations (mg/L as ion)						
	Feed	Concentrate		Permeate		
		Stage1	Stage2	Stage1	Stage2	Total
NH ₄ ⁺	0.08	0.17	0.31	0.00	0.00	0.00
K ⁺	50.00	110.11	198.69	0.28	0.88	0.44
Na ⁺	407.01	896.35	1,617	2.28	7.07	3.57
Mg ⁺²	30.00	66.18	119.68	0.07	0.22	0.11
Ca ⁺²	150.00	330.93	598.43	0.35	1.06	0.54
Sr ⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba ⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₃ ⁻²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NO ₃ ⁻	6.12	13.35	23.84	0.14	0.42	0.21
Cl ⁻	800.00	1,762	3,181	4.11	12.76	6.45
F ⁻	0.50	1.10	1.98	0.01	0.02	0.01
SO ₄ ⁻²	300.00	662.07	1,198	0.53	1.60	0.82
SiO ₂	11.82	26.09	47.21	0.02	0.04	0.03
Boron	2.00	3.81	5.97	0.51	1.14	0.68
CO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TDS ^a	1,767	3,890	7,020	10.67	30.61	16.06
pH	7.50	7.50	7.51	6.85	6.75	6.80

Footnotes:

^aTotal Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B(OH)₃. It does not include NH₃ and CO₂

b) BW30HR-440

RO Flow Table (Stage Level) - Pass 1

Stage	Elements	#PV	#Els per PV PV	Feed				Concentrate			Permeate			
				Feed Flow	Recirc Flow	Feed Press	Boost Press	Conc Flow	Conc Press	Press Drop	Perm Flow	Avg Flux	Perm Press	Perm TDS
				(m³/h)	(m³/h)	(bar)	(bar)	(m³/h)	(bar)	(bar)	(m³/h)	(LMH)	(bar)	(mg/L)
1	BW30HR-440	3	6	26,66	0,00	10,03	0,00	12,70	8,89	1,14	13,96	19,0	0,00	13,10
2	BW30HR-440	2	6	12,70	0,00	8,69	0,00	6,67	7,96	0,73	6,04	12,3	0,00	39,91

RO Solute Concentrations - Pass 1

Concentrations (mg/L as ion)						
	Feed	Concentrate		Permeate		
		Stage1	Stage2	Stage1	Stage2	Total
NH ₄ ⁺	0,08	0,16	0,31	0,00	0,00	0,00
K ⁺	50,00	104,58	198,22	0,36	1,20	0,61
Na ⁺	407,01	851,36	1.614	2,88	9,54	4,89
Mg ⁺²	30,00	62,89	119,58	0,09	0,29	0,15
Ca ⁺²	150,00	314,44	597,95	0,44	1,44	0,74
Sr ⁺²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba ⁺²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₃ ⁻²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HCO ₃ ⁻	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NO ₃ ⁻	6,12	12,71	23,83	0,13	0,42	0,22
Cl ⁻	800,00	1.674	3.174	5,23	17,34	8,89
F ⁻	0,50	1,04	1,97	0,01	0,02	0,01
SO ₄ ⁻²	300,00	629,12	1.197	0,66	2,15	1,11
SiO ₂	11,82	24,79	47,18	0,02	0,07	0,04
Boron	2,00	3,57	5,62	0,58	1,30	0,79
CO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TDS ^a	1.767	3.695	7.006	13,10	39,91	21,20
pH	7,50	7,51	7,52	6,82	6,76	6,79

Footnotes:

^aTotal Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B(OH)₃. It does not include NH₃ and CO₂

c) BW30HR-440i

RO Flow Table (Stage Level) - Pass 1

Stage	Elements	#PV	#Els per PV	Feed				Concentrate			Permeate			
				Feed Flow	Recirc Flow	Feed Press	Boost Press	Conc Flow	Conc Press	Press Drop	Perm Flow	Avg Flux	Perm Press	Perm TDS
				(m³/h)	(m³/h)	(bar)	(bar)	(m³/h)	(bar)	(bar)	(m³/h)	(LMH)	(bar)	(mg/L)
1	BW30HR-440i	3	6	26,66	0,00	9,96	0,00	12,67	8,82	1,14	14,00	19,0	0,00	13,10
2	BW30HR-440i	2	6	12,67	0,00	8,62	0,00	6,67	7,90	0,73	6,01	12,2	0,00	40,17

RO Solute Concentrations - Pass 1

Concentrations (mg/L as ion)						
	Feed	Concentrate		Permeate		
		Stage1	Stage2	Stage1	Stage2	Total
NH ₄ ⁺	0,08	0,17	0,31	0,00	0,00	0,00
K ⁺	50,00	104,86	198,22	0,36	1,21	0,61
Na ⁺	407,01	853,64	1.614	2,88	9,61	4,90
Mg ⁺²	30,00	63,06	119,58	0,09	0,29	0,15
Ca ⁺²	150,00	315,29	597,94	0,44	1,45	0,74
Sr ⁺²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba ⁺²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₃ ⁻²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HCO ₃ ⁻	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NO ₃ ⁻	6,12	12,74	23,83	0,13	0,43	0,22
Cl ⁻	800,00	1.678	3.174	5,23	17,46	8,90
F ⁻	0,50	1,05	1,97	0,01	0,02	0,01
SO ₄ ⁻²	300,00	630,81	1.197	0,66	2,16	1,11
SiO ₂	11,82	24,86	47,18	0,02	0,07	0,04
Boron	2,00	3,58	5,62	0,58	1,30	0,79
CO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TDS ^a	1.767	3.705	7.006	13,10	40,17	21,23
pH	7,50	7,51	7,52	6,82	6,76	6,79

Footnotes:

^aTotal Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B(OH)₃. It does not include NH₃ and CO₂

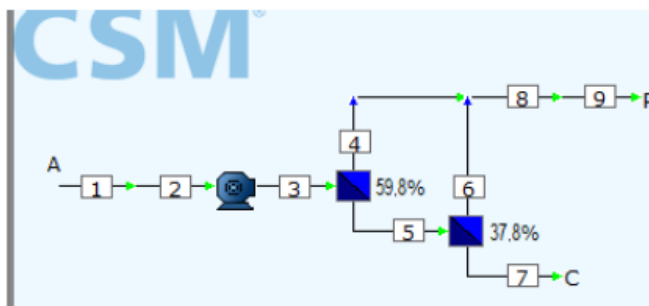
A.9.2. TCK Membrane (Toray) - CSMPro

Las membranas presentadas a continua de Dow evaluadas en esta sección corresponden las siguientes:

- a) RE8040-BLN440
- b) RE8040-BE440
- c) RE8040-Fen440
- d) RE4040-BLR
- e) RE4040-FLR

a) RE8040-BLN440

Flow Diagram



Tag	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flow(m3/hr)	26,7	26,7	26,7	16,0	10,7	4,0	6,7	20,0	20,0
Press(Bar)	0,0	0,0	6,9	0,0	6,1	0,0	5,2	0,0	0,0
TDS(mg/l)	1.760,8	1.760,8	1.760,8	28,6	4.338,9	132,0	6.888,9	49,5	49,5

System Configuration

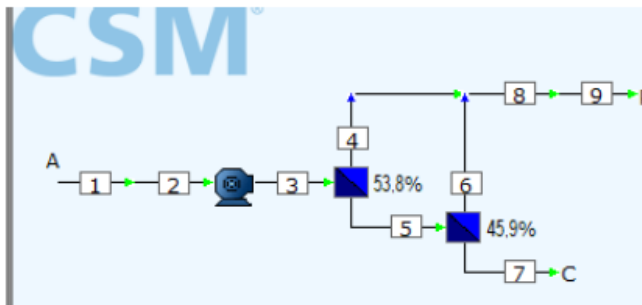
<Pass 1>

Designated Product Flow	20,00 m3/hr	No. of Pressure Vessel	5
Membrane Type and Model	RE8040-BLN440	No. of Element	30
Array Configuration	2 Array, 3-2 , 6 elements/pressure vessel		
Recover Ratio	75 %	Average Permeate Flux	16,31 lmh

	Unit	Raw Water	Feed Water	Concentrate		Total	Permeate		Product
				Stage1	Stage2		Stage1	Stage2	
NH4	as lon	0,1	0,1	0,2	0,3	0,01	0,00	0,01	0,01
K	as lon	50,0	50,0	122,8	193,9	2,04	1,14	5,58	2,04
Na	as lon	405,1	405,1	998,4	1.583,2	12,45	6,95	34,19	12,45
Mg	as lon	30,0	30,0	74,3	118,6	0,47	0,26	1,28	0,47
Ca	as lon	150,0	150,0	371,6	593,0	2,33	1,29	6,40	2,33
Sr	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	as lon	3,0	3,0	7,5	11,9	0,03	0,02	0,08	0,03
Ba	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
HCO3	as lon	0,1	0,1	0,2	0,4	0,01	0,00	0,01	0,01
NO3	as lon	6,2	6,2	15,1	23,6	0,39	0,22	1,06	0,39
Cl	as lon	800,0	800,0	1.971,6	3.126,3	24,59	13,72	67,51	24,59
F	as lon	0,5	0,5	1,2	2,0	0,01	0,00	0,02	0,01
Boron	as lon	2,0	2,0	1,9	1,8	0,04	0,05	0,00	0,04
SO4	as lon	300,0	300,0	743,2	1.186,1	4,65	2,59	12,81	4,65
SiO2	as lon	11,8	11,8	29,1	46,1	0,41	0,23	1,12	0,41
CO2	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
CO3	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
pH	-	7,5	7,5	7,9	8,0	6,26	6,02	6,69	6,26
TDS	mg/L	1.760,8	1.760,8	4.338,9	6.888,9	49,46	28,55	131,99	49,46
SDI	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
TOC	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
COD	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
BOD	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Hardness	as CaCO3	498,00	498,00	1.233,65	1.968,88	7,73	4,29	21,26	7,73

b) RE8040-BE440

Flow Diagram



Tag	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flow(m3/hr)	26,7	26,7	26,7	14,3	12,3	5,7	6,7	20,0	20,0
Press(Bar)	0,0	0,0	9,2	0,0	8,2	0,0	7,3	0,0	0,0
TDS(mg/l)	1.760,8	1.760,8	1.760,8	13,9	3.792,7	47,4	6.970,1	23,4	23,4

System Configuration

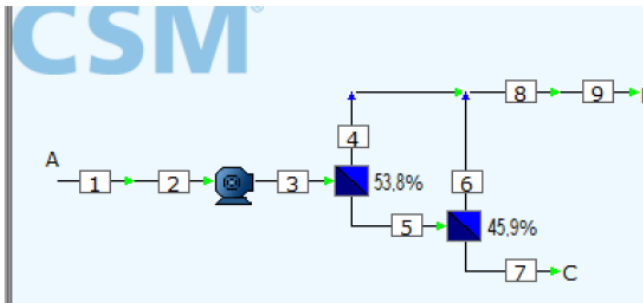
<Pass 1>

Designated Product Flow	20,00 m3/hr	No. of Pressure Vessel	5
Membrane Type and Model	RE8040-BE440	No. of Element	30
Array Configuration	2 Array, 3-2 , 6 elements/pressure vessel		
Recover Ratio	75 %	Average Permeate Flux	16,31 lmh

	Unit	Raw Water	Feed Water	Concentrate		Total	Permeate		Product
				Stage1	Stage2		Stage1	Stage2	
NH4	as Ion	0,1	0,1	0,2	0,3	0,00	0,00	0,00	0,00
K	as Ion	50,0	50,0	107,5	197,2	0,94	0,57	1,89	0,94
Na	as Ion	405,1	405,1	872,3	1.603,3	5,74	3,45	11,52	5,74
Mg	as Ion	30,0	30,0	64,8	119,4	0,21	0,13	0,43	0,21
Ca	as Ion	150,0	150,0	323,7	596,8	1,07	0,64	2,15	1,07
Sr	as Ion	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	as Ion	3,0	3,0	6,5	12,0	0,01	0,01	0,03	0,01
Ba	as Ion	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
HCO3	as Ion	0,1	0,1	0,2	0,4	0,00	0,00	0,00	0,00
NO3	as Ion	6,2	6,2	13,3	24,3	0,18	0,11	0,36	0,18
Cl	as Ion	800,0	800,0	1.722,6	3.166,1	11,33	6,81	22,75	11,33
F	as Ion	0,5	0,5	1,1	2,0	0,00	0,00	0,01	0,00
Boron	as Ion	2,0	2,0	3,9	4,1	0,29	0,40	0,02	0,29
SO4	as Ion	300,0	300,0	647,5	1.193,6	2,13	1,28	4,29	2,13
SiO2	as Ion	11,8	11,8	25,4	46,7	0,19	0,11	0,38	0,19
CO2	as Ion	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
CO3	as Ion	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
pH	-	7,5	7,5	7,8	8,0	5,93	5,72	6,23	5,93
TDS	mg/L	1.760,8	1.760,8	3.792,7	6.970,1	23,39	13,91	47,40	23,39
SDI	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
TOC	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
COD	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
BOD	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Hardness	as CaCO3	498,00	498,00	1.074,77	1.981,42	3,54	2,13	7,12	3,54

c) RE8040-Fen440

Flow Diagram



Tag	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flow(m3/hr)	26,7	26,7	26,7	14,3	12,3	5,7	6,7	20,0	20,0
Press(Bar)	0,0	0,0	9,2	0,0	8,2	0,0	7,3	0,0	0,0
TDS(mg/l)	1.760,8	1.760,8	1.760,8	13,9	3.792,7	47,4	6.970,1	23,4	23,4

System Configuration

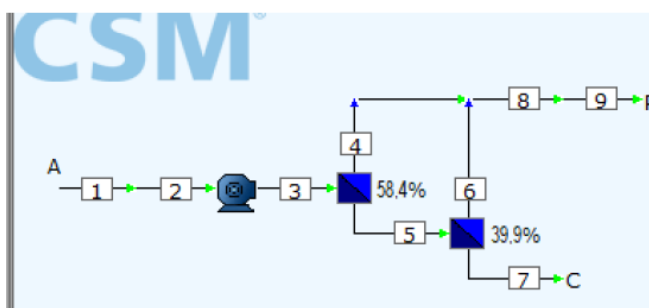
<Pass 1>

Designated Product Flow	20,00 m3/hr	No. of Pressure Vessel	5
Membrane Type and Model	RE8040-FEn440	No. of Element	30
Array Configuration	2 Array, 3-2 , 6 elements/pressure vessel		
Recover Ratio	75 %	Average Permeate Flux	16,31 lmh

	Unit	Raw	Feed	Concentrate		Total	Permeate		Product
		Water	Water	Stage1	Stage2		Stage1	Stage2	
NH4	as Ion	0,1	0,1	0,2	0,3	0,00	0,00	0,00	0,00
K	as Ion	50,0	50,0	107,5	197,2	0,94	0,57	1,89	0,94
Na	as Ion	405,1	405,1	872,3	1.603,3	5,74	3,45	11,52	5,74
Mg	as Ion	30,0	30,0	64,8	119,4	0,21	0,13	0,43	0,21
Ca	as Ion	150,0	150,0	323,7	596,8	1,07	0,64	2,15	1,07
Sr	as Ion	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	as Ion	3,0	3,0	6,5	12,0	0,01	0,01	0,03	0,01
Ba	as Ion	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
HCO3	as Ion	0,1	0,1	0,2	0,4	0,00	0,00	0,00	0,00
NO3	as Ion	6,2	6,2	13,3	24,3	0,18	0,11	0,36	0,18
Cl	as Ion	800,0	800,0	1.722,6	3.166,1	11,33	6,81	22,75	11,33
F	as Ion	0,5	0,5	1,1	2,0	0,00	0,00	0,01	0,00
Boron	as Ion	2,0	2,0	3,9	4,1	0,29	0,40	0,02	0,29
SO4	as Ion	300,0	300,0	647,5	1.193,6	2,13	1,28	4,29	2,13
SiO2	as Ion	11,8	11,8	25,4	46,7	0,19	0,11	0,38	0,19
CO2	as Ion	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
CO3	as Ion	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
pH	-	7,5	7,5	7,8	8,0	5,93	5,72	6,23	5,93
TDS	mg/L	1.760,8	1.760,8	3.792,7	6.970,1	23,39	13,91	47,40	23,39
SDI	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
TOC	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
COD	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
BOD	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Hardness	as CaCO3	498,00	498,00	1.074,77	1.981,42	3,54	2,13	7,12	3,54

d) RE4040-BLR

Flow Diagram



Tag	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flow(m3/hr)	26,7	26,7	26,7	15,6	11,1	4,4	6,7	20,0	20,0
Press(Bar)	0,0	0,0	9,1	0,0	8,3	0,0	7,2	0,0	0,0
TDS(mg/l)	1.760,8	1.760,8	1.760,8	14,4	4.214,7	48,2	6.977,7	21,9	21,9

System Configuration

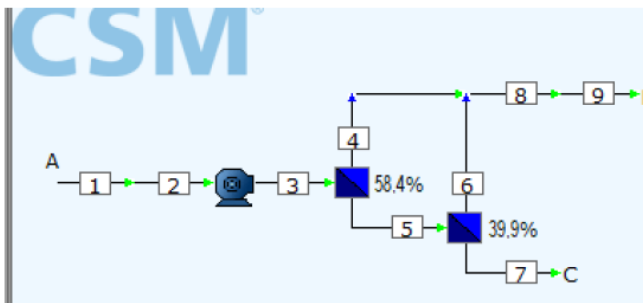
<Pass 1>

Designated Product Flow	20,00 m3/hr	No. of Pressure Vessel	18
Membrane Type and Model	RE4040-BLR	No. of Element	108
Array Configuration	2 Array, 12-6 , 6 elements/pressure vessel		
Recover Ratio	75 %	Average Permeate Flux	23,45 l/mh

	Unit	Raw	Feed	Concentrate		Total	Permeate		Product
		Water	Water	Stage1	Stage2		Stage1	Stage2	
NH4	as lon	0,1	0,1	0,2	0,3	0,00	0,00	0,00	0,00
K	as lon	50,0	50,0	119,4	197,2	0,93	0,61	2,06	0,93
Na	as lon	405,1	405,1	964,8	1.589,2	10,44	6,85	23,09	10,44
Mg	as lon	30,0	30,0	72,0	119,6	0,15	0,10	0,33	0,15
Ca	as lon	150,0	150,0	360,4	598,9	0,37	0,24	0,82	0,37
Sr	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	as lon	3,0	3,0	7,2	12,0	0,01	0,01	0,02	0,01
Ba	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
HCO3	as lon	0,1	0,1	0,2	0,4	0,00	0,00	0,00	0,00
NO3	as lon	6,2	6,2	14,7	24,1	0,22	0,15	0,49	0,22
Cl	as lon	800,0	800,0	1.917,9	3.179,6	6,83	4,46	15,15	6,83
F	as lon	0,5	0,5	1,2	2,0	0,00	0,00	0,01	0,00
Boron	as lon	2,0	2,0	4,1	5,8	0,72	0,51	1,44	0,72
SO4	as lon	300,0	300,0	720,3	1.195,9	1,38	0,90	3,06	1,38
SiO2	as lon	11,8	11,8	28,3	46,9	0,13	0,08	0,29	0,13
CO2	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
CO3	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
pH	-	7,5	7,5	7,9	8,1	5,77	5,59	6,12	5,77
TDS	mg/L	1.760,8	1.760,8	4.214,7	6.977,7	21,89	14,43	48,19	21,89
SDI	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
TOC	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
COD	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
BOD	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Hardness	as CaCO3	498,00	498,00	1.196,37	1.987,48	1,52	0,99	3,38	1,52

e) RE4040-FLR

Flow Diagram



Tag	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flow(m3/hr)	26,7	26,7	26,7	15,6	11,1	4,4	6,7	20,0	20,0
Press(Bar)	0,0	0,0	9,1	0,0	8,3	0,0	7,2	0,0	0,0
TDS(mg/l)	1.760,8	1.760,8	1.760,8	14,4	4.214,7	48,2	6.977,7	21,9	21,9

System Configuration

<Pass 1>

Designated Product Flow	20,00 m3/hr	No. of Pressure Vessel	18
Membrane Type and Model	RE4040-FLR	No. of Element	108
Array Configuration	2 Array, 12-6 , 6 elements/pressure vessel		
Recover Ratio	75 %	Average Permeate Flux	23,45 lmh

	Unit	Raw Water	Feed Water	Concentrate		Total	Permeate		Product
				Stage1	Stage2		Stage1	Stage2	
NH4	as lon	0,1	0,1	0,2	0,3	0,00	0,00	0,00	0,00
K	as lon	50,0	50,0	119,4	197,2	0,93	0,61	2,06	0,93
Na	as lon	405,1	405,1	964,8	1.589,2	10,44	6,85	23,09	10,44
Mg	as lon	30,0	30,0	72,0	119,6	0,15	0,10	0,33	0,15
Ca	as lon	150,0	150,0	360,4	598,9	0,37	0,24	0,82	0,37
Sr	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	as lon	3,0	3,0	7,2	12,0	0,01	0,01	0,02	0,01
Ba	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
HCO3	as lon	0,1	0,1	0,2	0,4	0,00	0,00	0,00	0,00
NO3	as lon	6,2	6,2	14,7	24,1	0,22	0,15	0,49	0,22
Cl	as lon	800,0	800,0	1.917,9	3.179,6	6,83	4,46	15,15	6,83
F	as lon	0,5	0,5	1,2	2,0	0,00	0,00	0,01	0,00
Boron	as lon	2,0	2,0	4,1	5,8	0,72	0,51	1,44	0,72
SO4	as lon	300,0	300,0	720,3	1.195,9	1,38	0,90	3,06	1,38
SiO2	as lon	11,8	11,8	28,3	46,9	0,13	0,08	0,29	0,13
CO2	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
CO3	as lon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
pH	-	7,5	7,5	7,9	8,1	5,77	5,59	6,12	5,77
TDS	mg/L	1.760,8	1.760,8	4.214,7	6.977,7	21,89	14,43	48,19	21,89
SDI	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
TOC	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
COD	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
BOD	mg/L	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Hardness	as CaCO3	498,00	498,00	1.196,37	1.987,48	1,52	0,99	3,38	1,52