Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Mejoras para la optimización de la desaladora de Antofagasta (Chile). Implantación de sistemas híbridos con membranas y sustitución de lechos filtrantes

Autor: Gloria García Diettes

Institución: OHL Medio Ambiente Inima
E-mail: ggarcia@inima.com

Otros autores: Mario Arenas Jofré (Asesor Técnico de DESALANT)

RESUMEN:

La Planta Desaladora de agua de mar de Antofagasta, en Chile, fue adjudicada en el año 2001 al CONSORCIO DESALANT. El diseño adjudicado permitirá que la Instalación en el futuro pueda alcanzar los 52.000 m3/día de producción, a partir de un caudal inicial de producción de 13.000 m3/día del Proyecto Base y tres ampliaciones sucesivas de la misma capacidad. En la actualidad y desde el año 2006, -en que se puso en servicio la 1ª Fase de Ampliación-, la Planta Desaladora produce 26.000 m3/día y está previsto que en el mes de septiembre de 2008 dicha producción se incremente en 13.000 m3/día más, por la puesta en servicio de la 2ª Fase de Ampliación. Debido a la no coincidencia en el tiempo de la puesta en servicio de las diferentes fases de la Instalación, -2002 para el Proyecto Base, 2006 para la 1ª Ampliación y 2008 para la 2ª Ampliación-, las membranas instaladas en la 1ª y 2ª Ampliaciones de la Planta son de una generación posterior a las instaladas en el Proyecto Base del año 2002. La decisión de utilizar distintos modelos de membranas en una misma Planta es porque en los últimos años, el avance en el diseño de las membranas de Ósmosis Inversa ha permitido aumentar el caudal de producción unitario de éstas y reducir la presión de operación del sistema, es decir, poder producir el mismo caudal de agua con menos presión al utilizar membranas de última generación, con el consiguiente ahorro sustantivo de energía. Teniendo en cuenta la distribución desigual de flujo que se produce en los tubos de presión cuando la membrana instalada es de un mismo modelo, y siguiendo las recomendaciones planteadas por los fabricantes de membranas en sus comunicaciones, a principios del año 2007 se optó por la implantación en los bastidores de ósmosis inversa de un sistema híbrido de membranas, mezcla de los modelos instalados en el Proyecto Base y en la 1ª Ampliación de la citada instalación, para estudiar su impacto en el consumo total de energía eléctrica de la instalación. Paralelamente a lo anterior y, con posterioridad a la puesta en servicio del Proyecto Base de la instalación, se observó que los sólidos en suspensión contenidos en el agua de alimentación no podían ser retenidos adecuadamente por los tipos de materiales filtrantes instalados, lo cual ocasionó un ensuciamiento adicional de las membranas. Por ello, durante la realización de la 1ª Fase de Ampliación se optó también por utilizar una nueva composición de lechos filtrantes, incorporando una capa de antracita y una capa de arena más fina, para estudiar su impacto aguas abajo de la etapa de filtración a presión.

PLANTA DESALADORA DE AGUA DE MAR DE ANTOFAGASTA (CHILE)

I. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA

La Planta Desaladora que abastece de agua potable a la ciudad de Antofagasta, tiene una capacidad de diseño de 52.000 m^3/día, y fue planificada en cuatro etapas: una Primera Etapa o Proyecto Base, en la cual se construyó el 100% de las obras civiles y conducciones y se instalaron 2 líneas de equipos con capacidad para producir 13.000 m^3/día, y tres Etapas de Ampliaciones futuras (solo montaje de equipos, válvulas y tuberías en el interior de la planta) de 13.000 m^3/día de capacidad cada una.

En líneas generales las instalaciones y unidades de obra de la Planta Desaladora para el abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Antofagasta se detallan a continuación.

1.1.- OBRAS MARINAS DE CAPTACION DE AGUA Y DESCARGA DE SALMUERA

La captación de agua de mar se realizó mediante toma abierta. Para ello se instaló un ducto submarino conectado por el extremo del mar a una torreta de hormigón para tomar el agua en altura, y por el otro extremo a una cántara de aspiración de bombas superficiales de eje vertical.

El ducto de captación o emisario submarino es de 1.600 mm de diámetro y el material polietileno de alta densidad, con una longitud aproximada de 300 m. y una profundidad en el punto de captación de 22 m.

La descarga de salmuera, conformada por otro emisario submarino, también se realizó en polietileno de alta densidad, con una longitud de 200 m y un diámetro de 1.000 mm. En el punto de descarga se instalaron difusores.

1.2.- BOMBAS DE AGUA DE MAR

Desde la cántara se bombea el agua de mar mediante bombas centrífugas superficiales de eje vertical, directamente a los filtros de arena. Se diseñaron 2 bombas de agua de mar por etapa, con lo cual se dispondrá de 8 bombas de agua una vez finalizada la 3ª Ampliación de la instalación. Siempre existirá una bomba adicional de reserva. Las bombas son del tipo centrífugas de cámara partida. El caudal unitario de las bombas es de 561 m^3/h con una altura manométrica de 6,2 kg/cm^2. Con el caudal de cada bomba se puede poner en servicio un bastidor de la planta de O.I.

1.3.- DOSIFICACIONES QUÍMICAS

Las dosificaciones químicas previstas en el Proyecto para el pre-tratamiento son las siguientes:

a) ***Oxidación***: Dosificación de hipoclorito sódico en dosis del orden de 5 ppm como cloro libre residual, para evitar el crecimiento de materia orgánica en el lecho filtrante.

b) ***Coagulación y Floculación***: Dosificación de coagulante para la desestabilización de los posibles coloides y elementos en suspensión presentes en el agua de mar y su posterior floculación, para que esta materia pueda ser retenida por los filtros de arena. La dosis media prevista en el Proyecto está en el rango de 6 ppm. Actualmente no se dosifica ni coagulante ni floculante en el Pre-tratamiento.

c) ***Acidificación***: Dosificación de ácido sulfúrico para corregir el pH del agua de mar, incrementando el contenido en CO_2 y reduciendo el contenido de bicarbonato. Se estimó en el Proyecto una dosificación del orden de 40 a 60 ppm. Actualmente el ácido sulfúrico se dosifica en el Post-tratamiento.

d) ***Antioxidante***: Con el objeto de reducir en su totalidad el oxidante libre residual en el agua de mar antes de su alimentación a los bastidores de membrana, se adiciona metabisulfito sódico en dosis entre 1 y 2 ppm.

e) ***Antiincrustante***: Para evitar la precipitación de sales en las membranas, se adiciona antiincrustante o dispersante, después de los filtros de arena y antes de los filtros de cartucho. La dosificación media es del orden de 0,8 ppm.

1.4.- FILTROS DE ARENA

Se diseñaron 5 filtros de arena a presión por etapa, horizontales, con lo cual se dispondrá de veinte (20) filtros una vez finalizada la 3ª Ampliación de la Instalación.

La superficie de filtrado unitaria es de 33 m^2 y la velocidad de filtración es de 6,8 m/hora, con todos los filtros en operación.

Cada unidad tiene 11 metros de longitud por 3 de diámetro. Los filtros están fabricados en acero carbono y 10 de ellos están revestidos interiormente con neopreno de 3 mm de espesor. El resto estarán recubiertos de poliurea, de 3 mm de espesor.

El material filtrante que contemplaba el Proyecto estaba compuesto por una capa de Silex de 0,7 metros de altura y talla efectiva 0,9 mm, y una segunda capa del mismo material, pero de talla efectiva 2 mm, de 0,3 metros de altura.

El material filtrante existente en la actualidad está compuesto por una capa de Antracita de 0,5 metros de altura y talla efectiva 0,9 mm, y una segunda capa de Silex, de 0,3 metros de altura y talla efectiva 0,45 mm. Existe también una capa soporte de Silex, de 0,2 metros de altura.

1.5.- FILTROS DE CARTUCHO

El diseño incluye dos (2) filtros de cartucho de tipo vertical por etapa, con lo cual se dispondrá de ocho (8) filtros una vez finalizada la 3ª Ampliación de la Instalación. Los cartuchos empleados son de polipropileno de un paso efectivo máximo o corte de 5 micras.

1.6.- TURBO-BOMBAS DE ALTA PRESIÓN

Se dispondrá de ocho (8) grupos turbo-bombas de eje horizontal en operación normal, una vez finalizada la 3ª Ampliación de la Instalación. Las bombas son de cámara partida con capacidad para elevar 561 m^3/hora a 69 kg/cm^2 cada una y cuentan con un sistema de turbina Pelton adosada para recuperación de la energía residual de la salmuera.

1.7.- BASTIDORES DE MEMBRANAS

La planta ha sido diseñada considerando la instalación de 7 membranas de poliamida con arrollamiento en espiral por cada tubo de presión. El diseño realizado es de un solo paso y en una etapa, con las siguientes características, una vez finalizada la 3ª Ampliación:

- Numero de Bastidores: 8
- Sub-bastidores por Bastidor: 3
- Unidad de Reserva: 1 Sub-bastidor
- Total Sub-bastidores : 25
- Tubos de presión por Sub-bastidor: 30
- Membranas por tubo: 7
- Total tubos de presión: 750
- Total membranas: 5.250
- Fabricante: Hydranautics
- Modelo Membrana: SWC5 (*)
- Producción de Agua por Sub-Bastidor: 2.167 m3/día
- Producción por Bastidor: 6.500 m3/día
- Producción por Etapa: 13.000 m3/día
- Total Producción Planta: 52.000 m3/día

(*) Originalmente la planta utilizó membranas SWC3.

Las tuberías y fittings de alimentación a los bastidores de membranas son de acero inoxidable 904L de resistencia ANSI #600 en el Proyecto Base y la 1ª Ampliación y de acero inoxidable AISI 254-SMO, de resistencia ANSI #600 en la 2ª Ampliación. Está considerado este último material para la 3ª Ampliación futura. Las tuberías de recogida de salmuera son del mismo material en cada caso.

1.8.- SISTEMA DE POST-TRATAMIENTO

El agua producida antes de ser enviada a la red recibe un post-tratamiento mediante filtros de dolomita, hidróxido de sodio, hipoclorito de sodio y fluoruro cálcico para adaptar su calidad a la requerida por el Cliente para el agua potable producida.

Se dispondrá de veinticuatro (24) filtros de dolomitas, cilíndricos verticales, una vez finalizada la 3ª Ampliación de la Instalación.

Los filtros están construidos en PRFV y sus dimensiones unitarias son de 4 m. de diámetro y 5,4 m de altura. La velocidad de paso en operación normal es inferior a 7 m/h con todos los filtros en operación.

1.9.- DEPÓSITO DE AGUA PRODUCTO

El agua producto final es almacenada en un depósito de hormigón armado de 2.000 m^3 de capacidad, desde el cual aspiran las bombas de agua tratada.

Esto permite mantener constante la entrega de agua al cliente aún cuando algún bastidor deje de producir momentáneamente. La parada de una línea de producción hasta por 8 horas no interrumpe el suministro normal al cliente.

Cabe señalar que la producción de la planta se entrega en 3 estanques de distribución de la ciudad, lo que ayuda a la regulación de la producción de la planta.

1.10. BOMBAS E IMPULSIÓN DE AGUA TRATADA

Para la impulsión del agua producto se dispondrá de nueve (9) bombas centrífugas horizontales, una de ellas con variador y otra de reserva, una vez finalizada la 3ª Ampliación de la Instalación. El caudal unitario de las bombas es de 271 m^3/h con una

altura manométrica de 15 kg/cm^2. Las descargas de las bombas van a un colector común de impulsión, de acero carbono revestido con polietileno de alta densidad.

La línea de impulsión tiene una longitud de 11,9 Km., con un trazado que atraviesa la ciudad y tiene entregas en camino. El material de esta línea es fundición dúctil con revestimiento interior de mortero.

1.11.- OBRAS CIVILES, ELECTRICAS Y COMPLEMENTARIAS

Los edificios son de dimensiones adecuadas para permitir la maniobrabilidad que ha demandado la instalación de equipos, y que demandará el montaje de las etapas futuras y el mantenimiento de la planta.

Todas las canalizaciones para tendidos eléctricos, neumáticos y de control, son subterráneas, y cumplen las exigencias de las normativas vigentes.

Para alimentar de energía eléctrica a los equipos electromecánicos, se cuenta con una sub-estación eléctrica de 14 MW.

II. LECHOS FILTRANTES

2.1.- PROYECTO BASE

El diseño ofertado para la Planta Desaladora de Antofagasta contempló la instalación de una sola etapa de filtración a presión, compuesta por un total de 20 filtros de arena a presión para las cuatro etapas del proyecto, esto es 5 filtros para el Proyecto Base y 5 filtros adicionales por cada una de las fases de ampliación.

Las características del diseño de dicha etapa de filtración son las indicadas en la Tabla 1 a continuación.

PLANTA DESALADORA DE ANTOFAGASTA CALCULO DE LA FILTRACIÓN					
3.1.- FILTRACIÓN POR ARENA		1ª FASE	2ª FASE	3ª FASE	4ª FASE
Caudal de agua mar a filtrar:	m^3/h	1.121	2.243	3.364	4.486
Tipo de filtros:		de presión	de presión	de presión	de presión
Posición de los filtros:		Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Velocidad de filtración maxima:	m/h	7	7	7	7
Superficie de cada filtro:	m^2	33	33	33	33
Número de filtros:	Uds.	5	10	15	20
Diametro del filtro:	m	3	3	3	3
Longitud del filtro:	m	11	11	11	11
Presión de diseño del filtro:	bars	6	6	6	6
Velocidad de filtración en operación:	m/h	6,8	6,8	6,8	6,8
Número de filtros en lavado simultaneo:	Uds.	1	1	1	1
Velocidad de filtración mientras lava:	m/h	8,5	7,6	7,3	7,2
Pérdida de carga minima en filtros:	m.c.a	1,7	1,7	1,7	1,7
Pérdida de carga máxima en filtros:	m.c.a	10,0	10,0	10,0	10,0
Número de boquillas por filtro:	Uds./m2	50	50	50	50
Número de capas filtrantes:		2	2	2	2
Material de la 1ª capa:		Silex	Silex	Silex	Silex
Altura de la 1ª capa:	m	0,7	0,7	0,7	0,7
Talla efectiva de la 1ª capa:	mm.	0,9	0,9	0,9	0,9
Coeficiente de uniformidad:		1,4	1,4	1,4	1,4
Poder de corte del material:	micras	139	139	139	139
Material de la 2ª capa		Silex	Silex	Silex	Silex
Altura de la 2ª capa	m	0,3	0,3	0,3	0,3
Talla efectiva de la 2ª capa	mm	2,0	2,0	2,0	2,0
Coeficiente de uniformidad		1,4	1,4	1,4	1,4
Poder de corte del material	micras	309	309	309	309

Tabla 1. Características del diseño original de los filtros de arena.

Como se aprecia en la tabla anterior, el medio filtrante instalado incluía una doble capa de arena silícea de 2 mm y de 0,9 mm de talla efectiva, adecuadas para las condiciones del agua de mar obtenida durante las mediciones realizadas para la Línea Base del proyecto, en el año 2000, en el marco del desarrollo del estudio de impacto ambiental.

Durante el período de construcción, de 20 meses, y en los primeros años de la operación de la planta, el agua de mar en la bahía de Antofagasta sufrió algunos cambios en sus características, principalmente un fuerte incremento de la turbidez en los períodos de verano, que a modo de ejemplo pasó de un máximo medido de 0,81 NTU en el período de ejecución de la Línea Base (año 2000) a un máximo medido de 2,02 NTU entre octubre y diciembre del año 2006, y gran parte de esta turbidez causada por partículas de muy pequeño tamaño. En los meses restantes, el aumento de turbidez detectado fue leve, entre un 5% superior en los meses de invierno y un 10% en primavera y otoño.

Otro cambio sustantivo fue la aparición, también en períodos estivales, de gran cantidad de medusas en todo el norte de Chile a contar de fines del año 2002. Aún no se tiene certeza de que causó este cambio, que se ha mantenido estacionalmente hasta la fecha.

En períodos de turbiedad normal en el agua de mar (menor a 1 NTU), los filtros de arena funcionaban relativamente bien, entregando a los filtros de cartucho aguas con turbidez menor a 0,2 NTU.

El problema se presentaba cuando la calidad del agua de mar empeoraba, pues los filtros de arena no eran capaces de mantener la calidad en el agua de salida, llegando a valores de 0,4 – 0,5 NTU, lo que aceleraba el cambio de cartuchos en forma significativa.

En la Figura 1 siguiente se muestra el período junio – septiembre de 2006, en que hubo promedios de turbidez del agua de mar por sobre 1 NTU en los 3 primeros meses y los filtros fueron sobrepasados, y en el último mes una turbidez similar a la de la línea base, en que respondieron adecuadamente.

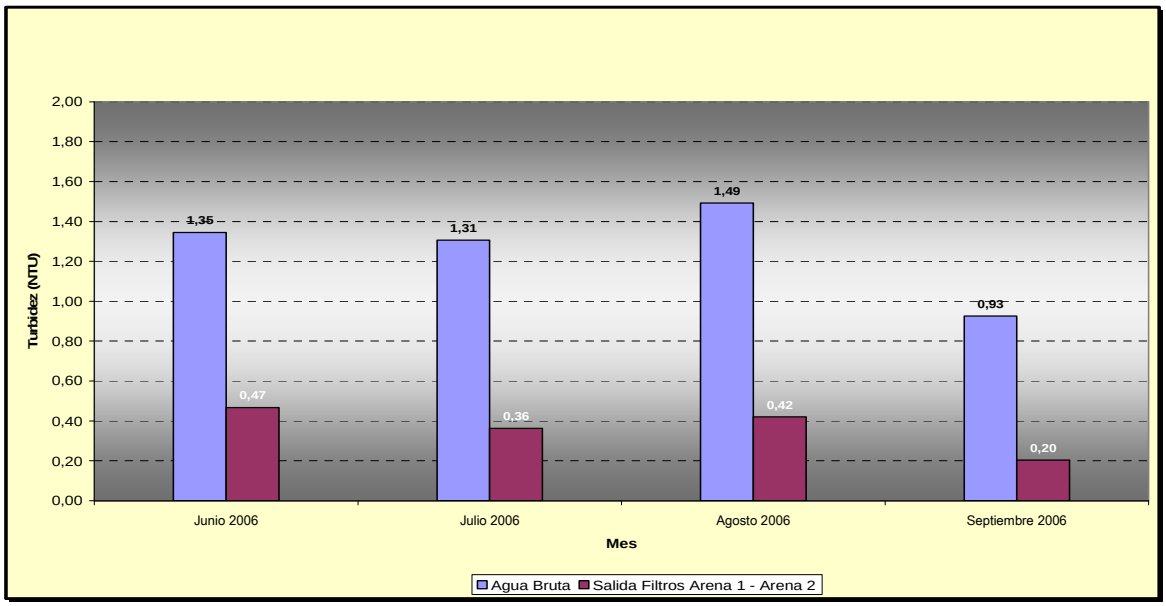

Figura 1. Comportamiento Filtros de Arena según Calidad Agua de Mar

Se hicieron diversas pruebas con distintos floculantes y coagulantes disponibles en el mercado, pero los resultados no variaron mucho la situación.

2.2.- SUSTITUCIÓN DE LOS LECHOS FILTRANTES

En el año 2005, el cliente de la planta desaladora de Antofagasta solicitó la materialización de la 1ª Ampliación, para llevar la producción de 13.000 a 26.000 m^3/día.

A la luz del comportamiento de los filtros de arena del Proyecto Base frente a las variaciones de calidad en el agua de mar de alimentación, para los filtros de esta 1ª Ampliación se optó por un cambio en la conformación de los lechos filtrantes, pasando de un lecho arena-arena a uno de arena-antracita.

El diseño de este nuevo lecho filtrante consideró un espesor de capa de 0,30 m. para la arena filtrante y de 0,50 m. para la antracita, además de una capa de arena gruesa para soporte de 0,20 m. Para la arena filtrante se especificó una talla efectiva de 0,45 mm., y para la antracita una talla efectiva de 0,90 mm.

La puesta en servicio de estos cinco filtros de arena de la 1ª Ampliación, con el nuevo diseño del manto filtrante, se realizó en el mes de octubre de 2006, y funcionaron simultáneamente con los cinco filtros de arena del Proyecto Base hasta finales del mes de diciembre del mismo año.

Los resultados obtenidos con estos nuevos lechos fueron satisfactorios, puesto que han permitido asegurar una calidad de agua constante a la salida de ellos, con independencia de la turbidez del agua bruta de mar, como se muestra en la figura 2 siguiente.

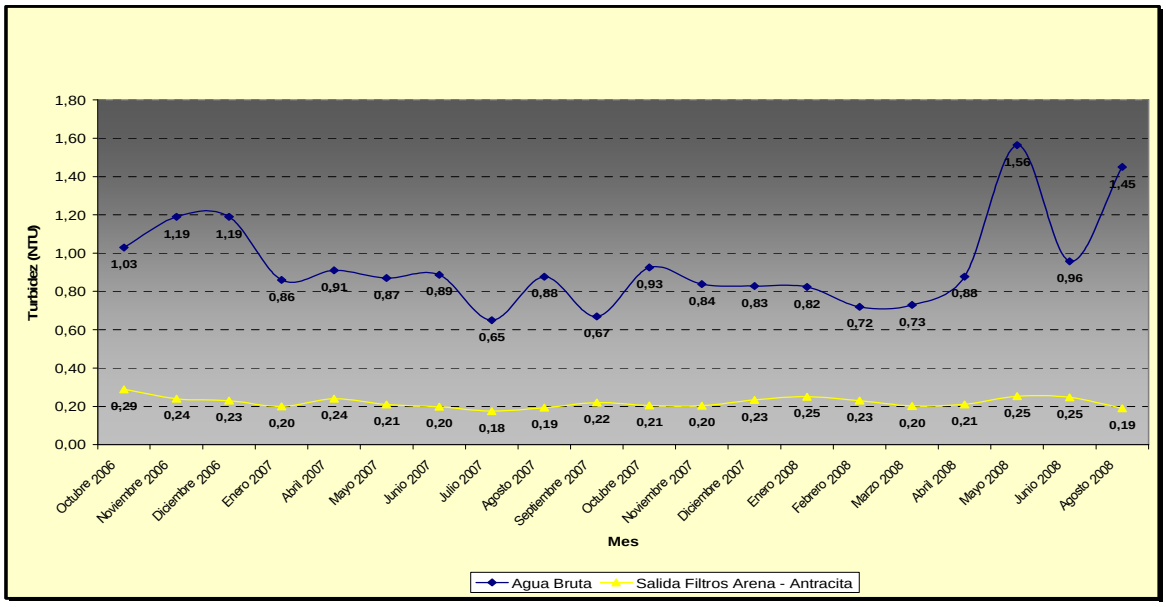

Figura 2. Comportamiento Filtros Arena – Antracita Planta Desaladora Antofagasta

Entre octubre y diciembre de 2006, estos nuevos filtros operaron en paralelo con los cinco filtros del Proyecto Base, con lecho arena-arena, por lo que se generó un mayor flujo de agua por estos últimos, que tenían una capa de arena más gruesa que la capa filtrante de los nuevos. Esto produjo velocidades de filtrado superior a lo especificado en el diseño, produciéndose arrastre de suciedad hasta los filtros de cartuchos.

Se planteó entonces, como solución definitiva, el reemplazo de los lechos de arena de los filtros del proyecto base, por lechos iguales a los de la 1ª Ampliación, lo que se realizó en el mes de enero de 2007.

Como solución temporal, mientras se reemplazaban paulatinamente los lechos de los cinco filtros iniciales, se restringieron las válvulas de salida, disminuyendo la velocidad de filtrad o hasta obtener una calidad de agua aceptable para los cartuchos.

En la Figura 3 siguiente, a modo de comparación, se grafican los valores medios mensuales desde junio de 2006 hasta agosto de 2008, período que incluye cuatro meses de operación de los filtros del Proyecto Base con los lechos originales (junio – septiembre de 2006).

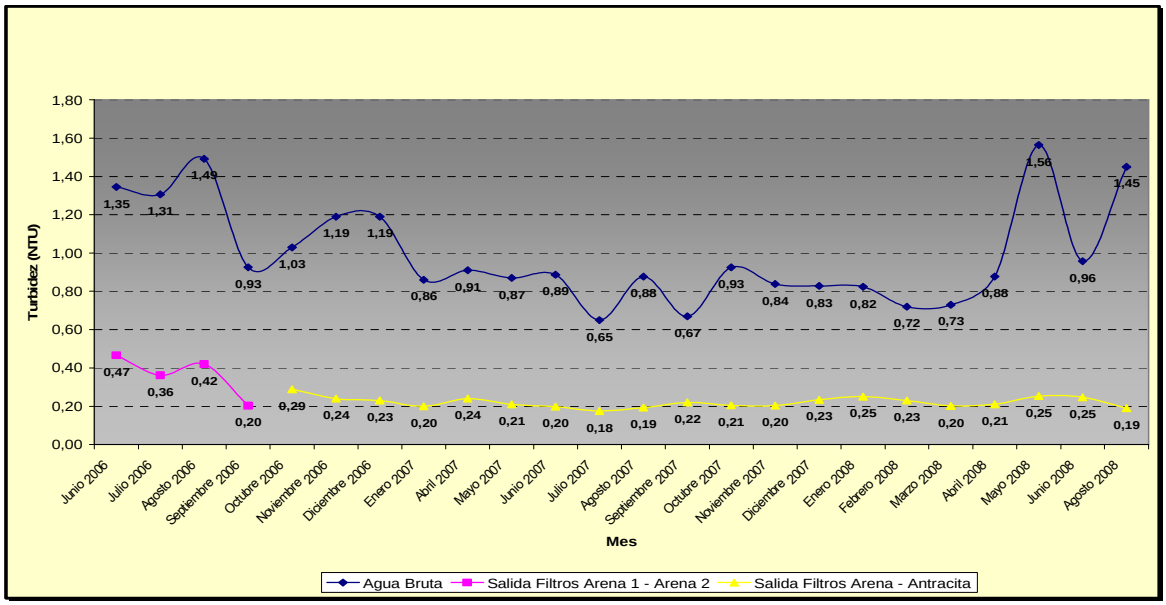

Figura 3. Comparación Lechos Filtrantes Arena-Arena y Arena-Antracita

Se puede observar que los valores promedios mensuales de turbidez a la salida de filtros para el diseño original arena – arena, se mueven en el rango de 0,36 - 0,47 NTU, siguiendo la tendencia de la turbidez del agua bruta de entrada.

En el caso de los nuevos lechos filtrantes, arena – antracita, los valores de turbidez a la salida de los filtros se mueven en el rango de 0,19 - 0,25 NTU, con independencia de la turbidez del agua bruta de alimentación a ellos.

De lo anterior se puede deducir que la instalación de los nuevos lechos bicapa en los filtros de arena ha supuesto asegurar una calidad constante en la entrega a los filtros de cartucho, con independencia de la variación que presenten los valores de turbidez en el agua de mar de alimentación a la instalación.

III. MEZCLA DE MEMBRANAS

3.1.- ANTECEDENTES

La Planta Desaladora de Antofagasta, primera planta de gran tamaño en América Latina destinada al consumo de agua potable de la población, cuenta con un diseño modular pensado para ir incrementando la capacidad de producción en el tiempo en la misma medida que el crecimiento de la población fuera demandando más agua potable.

La construcción del Proyecto Base, que incluía el 100% de las obras civiles y conducciones, y una fase de producción de 13.000 m^3/día, se realizó entre los años 2001 y 2003. En aquella época, entre las membranas de mejor rendimiento en cuanto a caudal y rechazo de sales disponibles en el mercado, estaba la SWC3 de Hydranautics, que fue la utilizada en esta primera fase.

La 1ª Ampliación de la planta, que contemplaba incrementar la producción en 13.000 m^3/día, llegando a 26.000 m^3/día de capacidad instalada, se inició a finales de 2005 y fue puesta en servicio en diciembre de 2006. Para esas fechas, Hydranautics había desarrollado un nuevo modelo de membrana, la SWC5, de mejor rendimiento que la SWC3, tanto en rechazo de sales como en presión requerida y caudales de producción.

La decisión tomada durante la materialización de esta 1ª Ampliación, fue utilizar esta mejor membrana, quedando una planta híbrida con modelos distintos de membranas en cada fase.

Las características particulares del agua de mar de Antofagasta, que finalmente llevaron al cambio de la arena en los filtros de profundidad, hicieron que entre abril de 2003, fecha en que la planta inició su operación, y finales del año 2006, la primera fase de 13.000 m^3/día fuera bajando su producción de agua a una tasa de disminución de flujo superior a la esperada según el diseño.

Frente a esta situación, se planteó la alternativa de realizar una mezcla de membranas entre las SWC3 del proyecto base y las SWC5 de la 1ª Ampliación, para lo cual se desarrollaron cálculos teóricos que mostraron importantes ventajas de una configuración de tubos de presión en este esquema, que es sobre lo que trata esta parte del informe.

3.2.- FLUJOS POR MEMBRANAS EN CONFIGURACIONES HOMOGENEAS

Es bastamente conocido que la distribución de los caudales de producción en el interior de los tubos de presión homogéneos (un solo tipo de membranas), es marcadamente decreciente. En un tubo de presión de 7 membranas, las 3 primeras producen más del 60% de caudal total cuando están nuevas.

Para las condiciones específicas del agua de mar de Antofagasta y su configuración de bastidores y presiones disponibles, se realizó una proyección teórica que dio como resultado los valores de caudal por membrana que se muestran en la Figura 4 siguiente, para los modelos SWC3 y SWC5, con las siguientes condiciones de operación asumidos para la instalación:

Salinidad Agua de Mar	:	34.580 ppm
Temperatura	:	14º C
Caudal de Permeado	:	270 m^3/hora
Factor de Conversión	:	48,3 %
Presión de Alimentación	:	68,8 bar
Contrapresión Permeado	:	7,9 bar (SWC3) – 14,9 bar (SWC5)

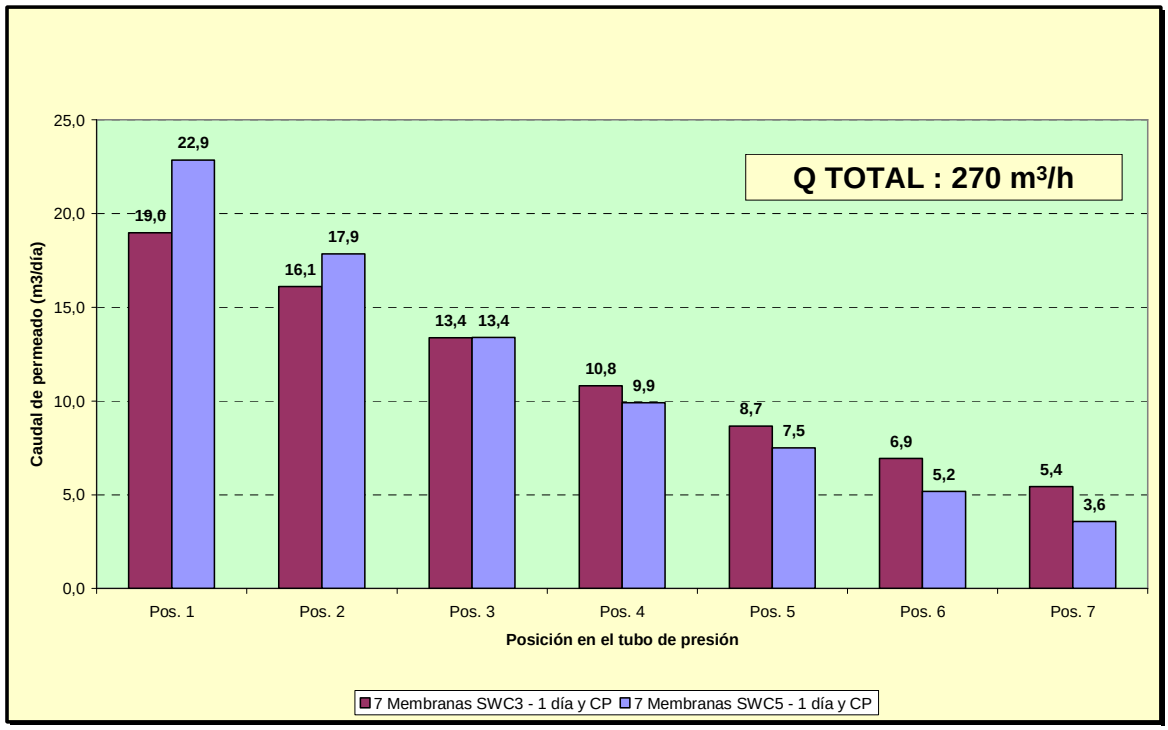

Figura 4. Caudales Teóricos por Posición de Membranas SWC3 y SWC5.

Esta fuerte diferencia de caudales entre las primeras membranas y las últimas, hace que los flujos unitarios también sean marcadamente desiguales.

Los fabricantes de membranas recomiendan que el flujo promedio no sobrepase determinados valores, lo que condiciona la producción del tubo de presión en su conjunto, quedando la primera membrana con gran producción y las siguientes subutilizadas.

A modo de ejemplo, para el caso de la Planta de Antofagasta, en que se instalaron membranas SWC3 (Bastidores 1 y 2) y SWC5 (Bastidores 3 y 4), el límite superior para los flujos medios se estableció en 13,8 y 12,8 litros/m^2-h respectivamente. En la Figura 5 siguiente se aprecia que las membranas de posición 1, en ambos casos, tienen flujos que alcanzan los 23,0 y 25,6 litros/m^2-h respectivamente, y que en las tres últimas posiciones, el flujo es inferior a 10,5 litros/m^2-h.

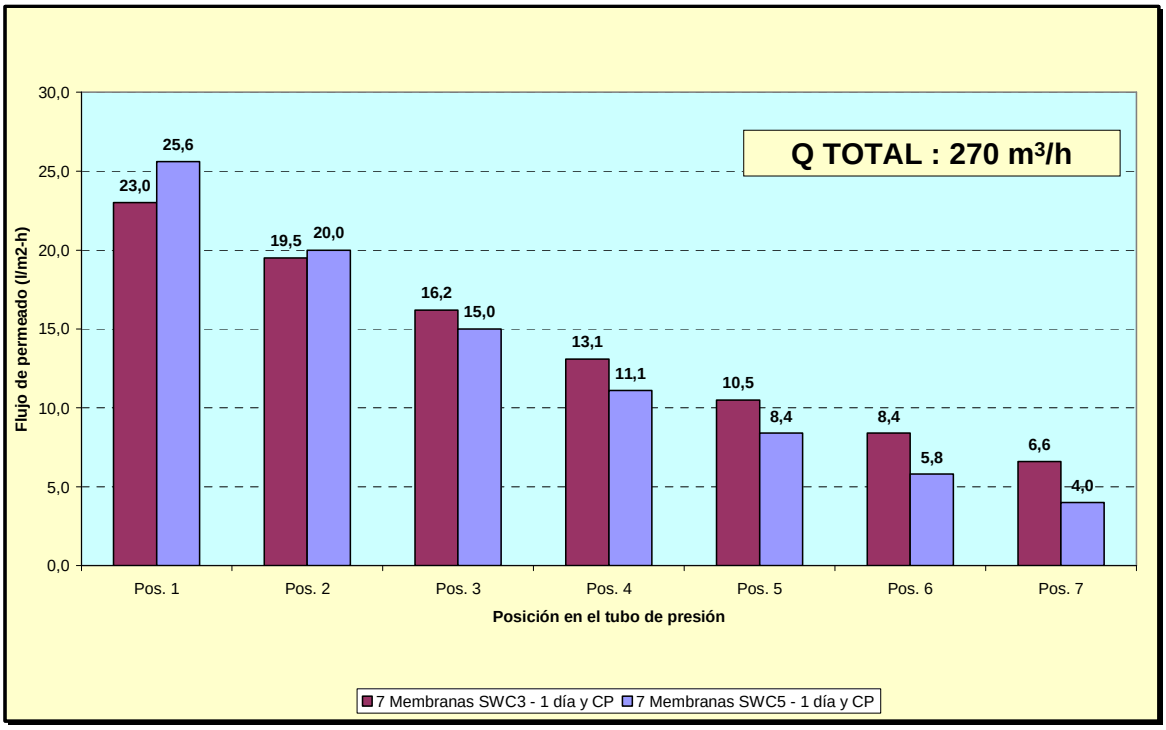

Figura 5. Flujos Teóricos por Posición de Membranas SWC3 y SWC5

Como se aprecia en la Figura 5, los flujos de las primeras membranas superan varias veces los flujos de las últimas.

En el caso de las SWC3, el flujo de la primera membrana es 3,5 veces el de la última, y para las SWC5, el flujo de la primera es 6,4 veces superior a la membrana de posición 7. Con la membrana de segunda posición, la situación no es muy diferente, pues los flujos de ella con respecto a la última llegan a ser 3 y 5 veces superiores.

3.3.- MEZCLA DE MEMBRANAS Y ENSUCIAMIENTO

El objetivo de realizar una ***mezcla de membranas***, entendiendo este concepto como utilizar membranas de distintas características dentro de un mismo tubo de presión, es aprovechar adecuadamente cada elemento instalado en el interior del tubo, reduciendo la diferencia de producción o flujo que se produce entre la membrana ubicada en posición 1 y las restantes membranas en las configuraciones homogéneas, especialmente con las membranas de las últimas tres posiciones.

Conceptualmente, no existe diferencia entre lo que ocurre en el interior de un tubo de presión configurado con una mezcla de membranas de distintas características, con lo que ocurre en una planta configurada en doble etapa con esos mismos elementos. Esto porque una membrana sometida a las mismas características específicas de presión de alimentación, salinidad del agua (presión osmótica), temperatura y presión del permeado (contrapresión), tendrá el mismo rendimiento, ya sea que se encuentre en una determinada posición en el interior de un tubo de presión, en una planta de doble etapa o en una planta de testeo.

A modo de comprobación, en las Tablas 2, 3 y 4 siguientes se muestra el comportamiento de membranas SWC5 nuevas instaladas en un arreglo de 81 tubos de presión de 7 elementos cada uno (81x7), y las mismas membranas SWC5 instaladas en una configuración de doble etapa, la primera etapa con un arreglo de 81x3 y la segunda etapa en un arreglo de 81x4.

COMPARACIÓN SWC5 EN ARREGLO 81x7 Y ARREGLO 81x3 + 81x4					
Caudal Bomba	559,0	m^3/hr	Edad de las Membranas:	1,0	días
Presión Alimentación	68,8	bar	Caudal de Permeado:	270,00	m^3/hr
Temp. del Agua	14,0	ºC(57 ºF)	Caudal agua cruda:	559,0	m^3/hr
pH Agua Alimentación	6,3		Contrapresión Permeado	14,9	bar
Dosis Químico, ppm	0,0	H_2SO_4	Recuperación:	48,3	%
TDS	34.580,1	ppm	Disminución flux %/año:	7,0	%
Flux Promedio	12,8	lt/m^2 h	Presión Osmótica	24,4	bar
			Tipo de Toma:	Toma Abierta	

Tabla 2. Condiciones de Operación

Etapa	Elemento Nº	P. Alim. Bar	Pérdida Bar	Q Perm. m^3/hr	FLUX Perm. l/m^2h	Sal. Perm. SDT (ppm)	Concentrado Presión Osm.	Indice Lang.
1-1	1	68,8	0,2	1,0	**25,6**	66,5	28,3	-0,7
1-1	2	68,6	0,2	0,7	**20,0**	80,0	32,3	-0,5
1-1	3	68,4	0,1	0,6	**15,0**	95,9	36,2	-0,4
1-1	4	68,3	0,1	0,4	**11,1**	114,0	39,7	-0,3
1-1	5	68,1	0,1	0,3	**8,4**	133,1	42,8	-0,2
1-1	6	68,0	0,1	0,2	**5,7**	155,0	45,3	-0,1
1-1	7	67,9	0,1	0,1	**4,0**	178,4	47,1	-0,1

Tabla 3. Comportamiento Membranas SWC5 – Tubo con 7 membranas

Etapa	Elemento	P. Alim.	Pérdida	Q Perm.	FLUX Perm.	Sal. Perm.	Concentrado	Indice Lang.
	Nº	Bar	Bar	m^3/hr	l/m^2h	SDT (ppm)	Presión Osm.	
1-1	1	68,8	0,2	1,0	**25,7**	66,1	28,3	-0,7
1-1	2	68,6	0,2	0,7	**20,1**	79,6	32,4	-0,5
1-1	3	68,5	0,1	0,6	**15,1**	95,5	36,2	-0,4
1-2	1	68,1	0,1	0,4	**11,0**	113,7	39,8	-0,3
1-2	2	68,0	0,1	0,3	**8,4**	132,8	42,9	-0,2
1-2	3	67,9	0,1	0,2	**5,7**	154,7	45,3	-0,1
1-2	4	67,8	0,1	0,1	**4,0**	178,5	47,1	-0,1

Tabla 4. Comportamiento Membranas SWC5 - Doble Etapa

Los programas de diseño de bastidores de membranas existentes en el mercado, como el RODesign de Hydranautics y el ROSA de Dow, entre otros, permiten determinar directamente el comportamiento y producción de un tubo de presión con mezcla de membranas de distinto rendimiento, simulando en dicho tubo una doble etapa, como en el ejemplo presentado anteriormente.

La limitación de estos modelos es que solo permiten utilizar en la mezcla de membranas elementos de la misma edad o desgaste. Para elementos de edad o desgaste diferente, como sería el caso de una planta existente con membranas antiguas en que se quiera introducir mediante mezcla modelos nuevos de mayor rendimiento, se requiere realizar el proceso iterativo manualmente, simulando también una doble etapa.

Las configuraciones interiores de mezcla para tubos de presión estándar de 7 elementos, pueden ser de dos o más modelos de membranas de diferente rendimiento, con combinaciones 2-5; 3-4; 4-3; 1-1-5; 1-2-4 u otro, dependiendo de las características de permeabilidad de cada modelo.

En las figuras siguientes (Figuras 6, 7 y 8) se compara el comportamiento de una mezcla de membranas respecto de tubos homogéneos, y como se comporta la mezcla con el desgaste de las membranas por el paso de los años. Se ha utilizado para ello membranas SWC3 y SWC5 de Hydranautics, en combinación 3-4.

COMPARACIÓN SWC3 CON MEZCLA SWC3-SWC5 EN ARREGLO 3-4					
Caudal Bomba	559,0	m^3/hr	Edad de las Membranas:	Variable	
Presión Alimentación	68,8	bar	Caudal de Permeado:	270,00	m^3/hr
Temp. del Agua	14,0	°C(57°F)	Caudal agua cruda:	559,0	m^3/hr
pH Agua Alimentación	6,3		Contrapresión Permeado	14,9	bar
Dosis Químico, ppm	0,0	H_2SO_4	Recuperación:	48,3	%
TDS	34.580,1	ppm	Disminución flux %/año:	7,0	%
Flux Promedio	Variable	lt/m^2 h	Presión Osmótica	24,4	bar
			Tipo de Toma:	Toma Abierta	

Tabla 5. Condiciones de Operación

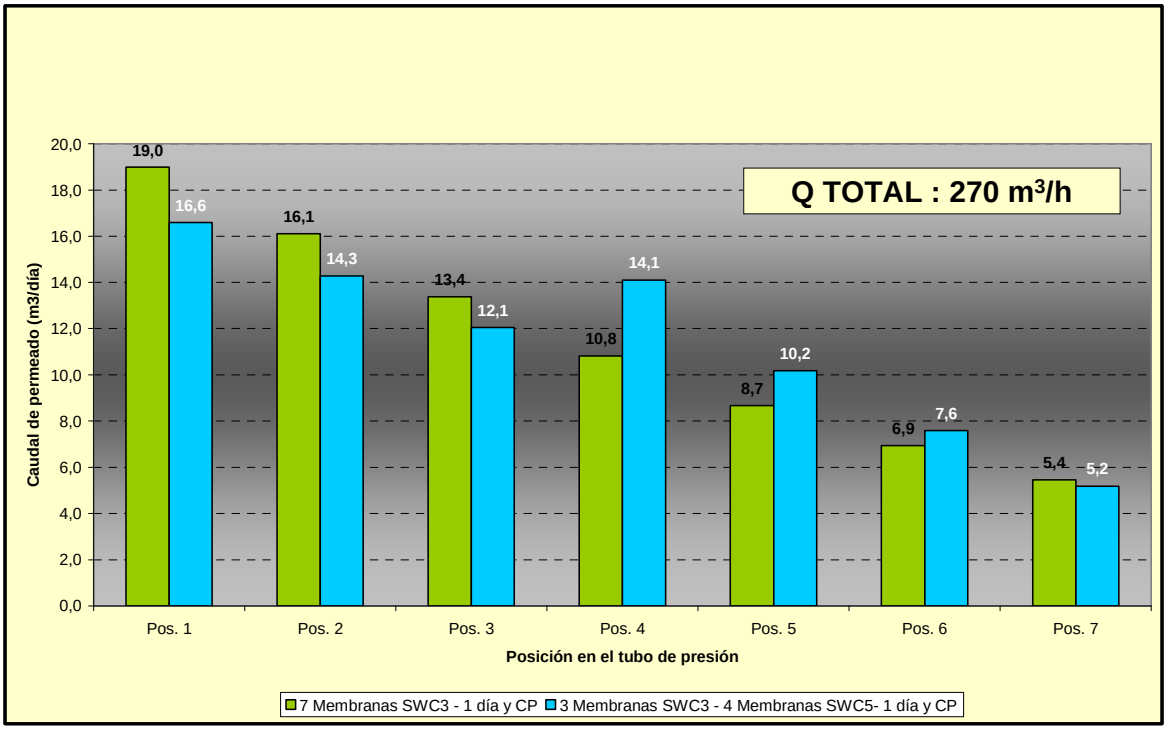

Figura 6. Comparación SWC3 – Mezcla SWC3-SWC5 - 1 Día

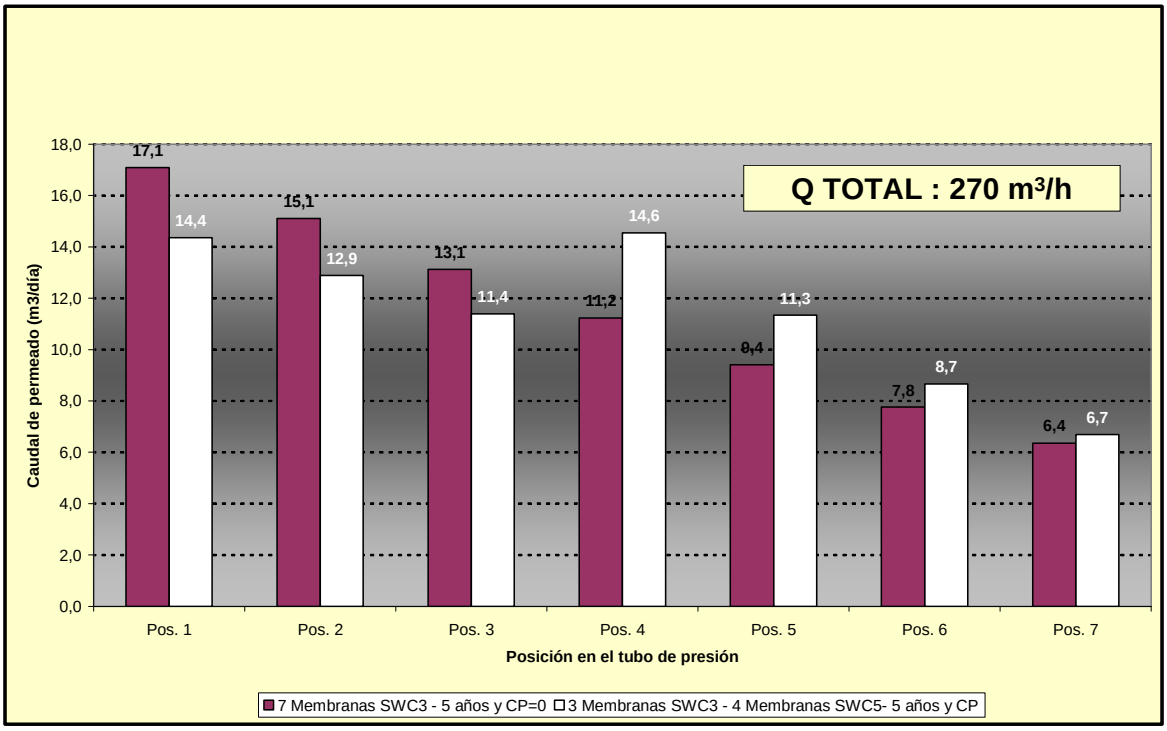

Figura 7. Comparación SWC3 – Mezcla SWC3-SWC5 - 5 Años

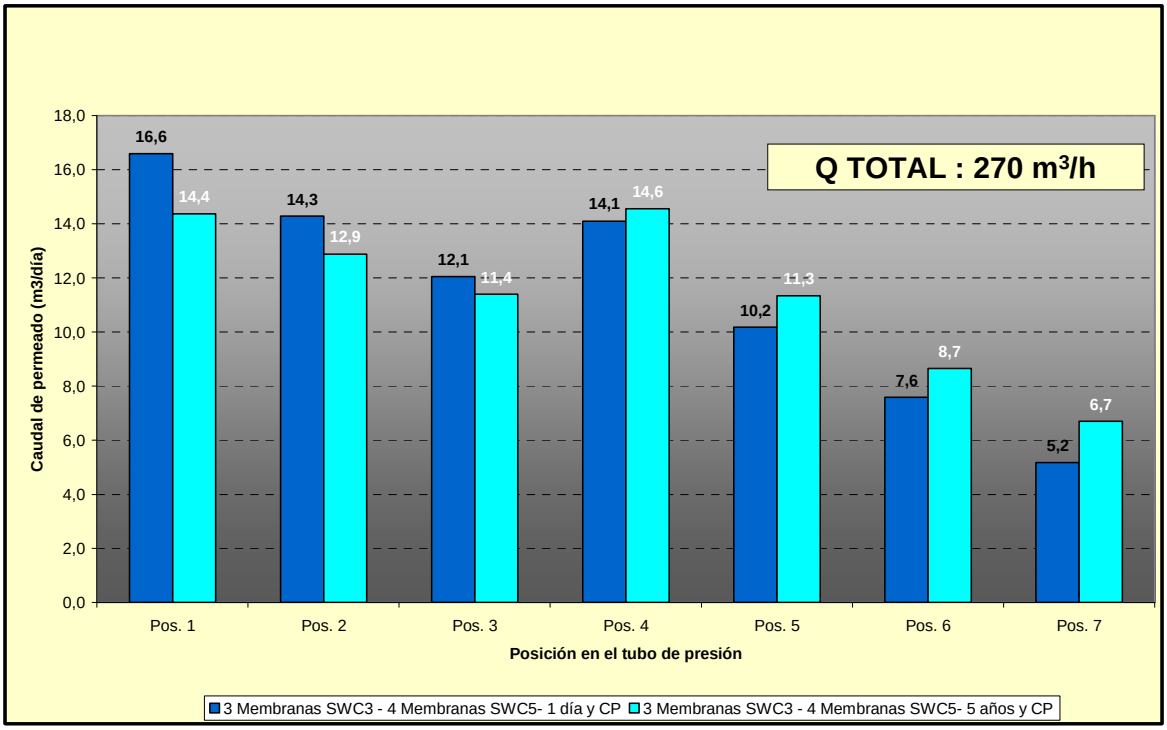

Figura 8. Comparación Mezcla SWC3-SWC5 a 1 Día y 5 Años

Otro concepto interesante de analizar, y que tiene relación directa con la mezcla de membranas, es el ensuciamiento de estas a través del tiempo.

Decimos que resulta interesante porque, como se explicó, la producción o flujo de agua por cada membrana es variable según la posición en que se encuentre dentro del tubo de presión, siendo la producción de las primeras significativamente superior a la de las últimas, y por lo mismo, el ensuciamiento de las primeras es también significativamente mayor.

Vale decir que después de un tiempo de operación, las primeras membranas, por su mayor ensuciamiento, tienen un rendimiento distinto de las últimas, y por lo mismo, estamos en presencia de una mezcla de membranas, puesto que la hemos definido como membranas de distintas características en el interior de un mismo tubo de presión.

Efectivamente el comportamiento de membranas con distintos grados de ensuciamiento en el interior de un tubo de presión responde en forma similar al comportamiento de la mezcla de membranas de distintos modelos o rendimientos.

Al inicio de la operación, las primeras membranas producen a su máxima capacidad y las siguientes quedan subutilizadas. A medida que las primeras membranas se ensucian (más rápidamente que las siguientes por los mayores flujos iniciales), van bajando su producción, y por lo tanto, el agua que llega a las siguientes membranas tiene cada vez menos salinidad, lo que permite que estas aumenten su producción, acelerando a la vez su ensuciamiento, y repitiendo este proceso con las membranas siguientes. Los mayores flujos de las membranas de posiciones posteriores compensan en parte los menores

flujos de las primeras, hasta que el ensuciamiento es generalizado y la disminución de producción se acelera. Con los lavados, las membranas recuperan sus características y el ciclo comienza nuevamente.

En el gráfico siguiente, se muestra el comportamiento de membranas SWC5 en un arreglo de 81 tubos con 7 membranas, con un índice de ensuciamiento alto para una mejor apreciación de las variaciones de caudal en el tiempo. Las características de operación se indican en la Tabla 6 siguiente

COMPORTAMIENTO MEMBRANAS POR ENSUCIAMIENTO					
Caudal Bomba	559,0	m^3/hr	Edad de las Membranas:	Variable	
Presión Alimentación	68,7	bar	Caudal de Permeado:	270,00	m^3/hr
Temp. del Agua	14,0	ºC(57 ºF)	Caudal agua cruda:	559,0	m^3/hr
pH Agua Alimentación	6,3		Contrapresión Permeado	0 – 14,8	bar
Dosis Químico, ppm	0,0	H_2SO_4	Recuperación:	48,3	%
TDS	34.580,1	ppm	Disminución flux %/año:	15	%
Flux Promedio	12,8	lt/m^2 h	Presión Osmótica	24,4	bar
			Tipo de Toma:	Toma Abierta	

Tabla 6. Condiciones de Operación

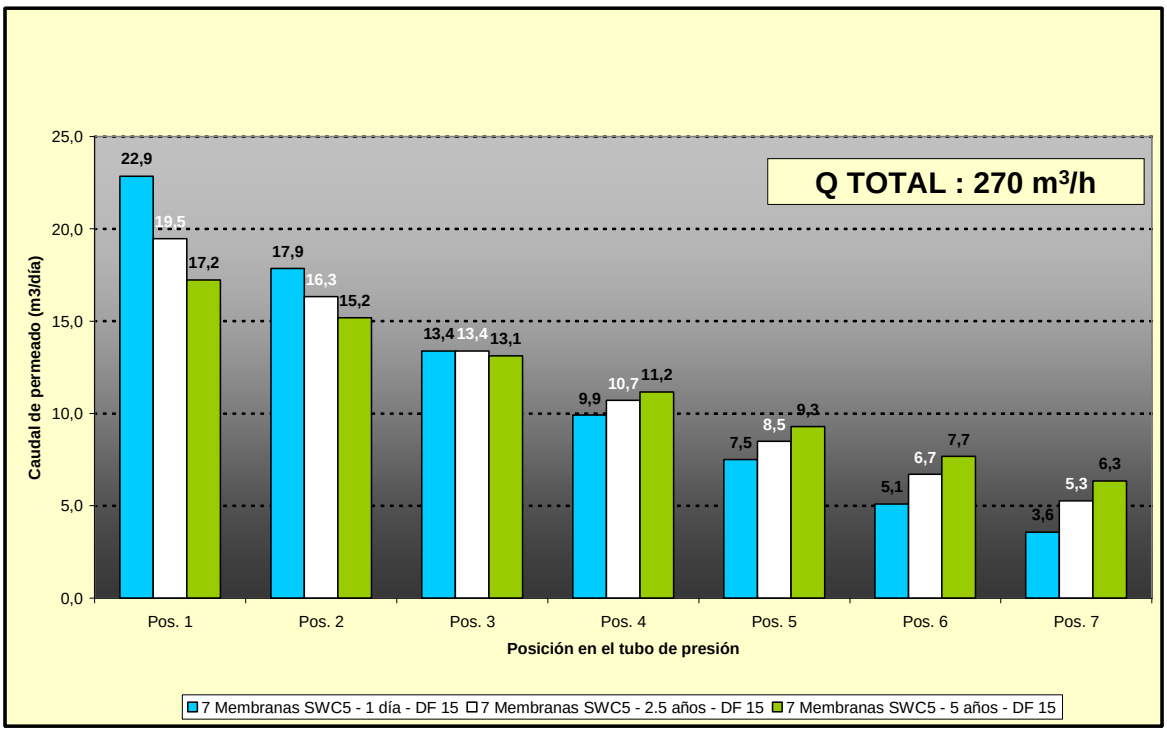

Figura 9. Variación de Caudales en Membranas SWC5 por Ensuciamiento y Posición

3.4.- MEZCLA DE MEMBRANAS Y DISEÑO TRADICIONAL

En un diseño tradicional, de membranas homogéneas en el interior de los tubos de presión, la producción está limitada por los flujos que alcanza la membrana de posición 1, que es la más expuesta. Para modelos de alto rendimiento, el flujo de este primer elemento normalmente es del orden de 2 veces el flujo promedio del tubo.

Dependiendo de la calidad del agua bruta de ingreso a proceso, el diseño interior homogéneo puede plantearse con flujos ***conservadores***, ***agresivos*** o ***muy agresivos***, lo que determina el caudal máximo de producción en función del número de tubos de presión considerados en los bastidores de membranas, o al revés, para un caudal específico determina el número de membranas o tubos requeridos. Las características de producción del modelo de membrana seleccionado determinan las presiones requeridas para el agua de alimentación y las contrapresiones del permeado a través del tiempo.

Para la mezcla de membranas ocurre algo similar, pero debe cuidarse en este caso los flujos con que operará cada primer elemento del arreglo interior utilizado. Los flujos promedios en tubos con mezcla resultan superiores.

Con el objetivo de comparar el comportamiento de un arreglo interior homogéneo de membranas de alta permeabilidad con uno de mezcla de membranas, en las tablas y figuras siguientes se presenta un diseño tradicional con membranas SWC5 y uno con mezcla de membranas SWC3-SWC5 en un arreglo interior 2-5, para una edad de membrana de 5 años en cada caso.

Los flujos de diseño para las membranas más expuestas se han definido a partir de un valor medio de 14 lt/m^2-hr, teniendo como base los valores entregados por el fabricante, que para un diseño conservador es de 12 lt/m^2-hr promedio y para un diseño agresivo es de 15 lt/m^2-hr promedio.

Con este valor medio, calificable como ***semi-agresivo***, se obtienen los valores máximos para las membranas más expuestas, y que llegan a 20,9 lt/m^2-hr para el modelo SWC3 y 23,5 lt/m^2-hr para el modelo SWC5.

CONDICIONES DE OPERACIÓN SWC5 Y MEZCLA SWC3-SWC5					
Caudal Bomba	679 - 816	m^3/hr	Edad de las Membranas:	5	Años
Presión Alimentación	Variable	bar	Caudal de Permeado:	328 - 394	m^3/hr
Temp. del Agua	14,0	ºC(57 ºF)	Caudal agua cruda:	679 - 816	m^3/hr
pH Agua Alimentación	6,3		Contrapresión Permeado	0	bar
Dosis Químico, ppm	0,0	H_2SO_4	Recuperación:	48,3	%
TDS	34.580,1	ppm	Disminución flux %/año:	7	%
Flux Promedio	Variable	lt/m^2 h	Presión Osmótica	24,4	bar
			Tipo de Toma:	Toma Abierta	

Tabla 7. Condiciones de Operación

Etapa	Q Perm.	Alim. / T	Conc. / T	Flux	P. Conc.	Contrap.	Elem.	Elem.	Arreglo
	m^3/hr	m^3/hr	m^3/hr	l/m^2-hr	bar	bar	Modelo	Nº	
1-1	**328,0**	7,5	3,9	14,0	59,3	0.0	SWC5	630	90x7

Etapa	Elemento	P. Alim.	Pérdida	Q Perm.	FLUX Perm.	Sal. Perm.	Concentrado	Indice Lang.
	Nº	Bar	Bar	m^3/hr	l/m^2h	SDT (ppm)	Presión Osm.	
1-1	1	**60,3**	0,2	0,9	**23,5**	105,0	27,6	-0,7
1-1	2	60,1	0,2	0,7	19,8	121,7	31,0	-0,6
1-1	3	59,9	0,2	0,6	16,4	140,1	34,5	-0,5
1-1	4	59,7	0,1	0,5	13,2	161,3	38,0	-0,3
1-1	5	59,6	0,1	0,4	10,5	184,8	41,3	-0,2
1-1	6	59,5	0,1	0,3	8,3	210,4	44,3	-0,1
1-1	7	59,4	0,1	0,2	6,6	237,5	47,1	-0,1

Tabla 8. Diseño con 7 SWC5 para Q = 328 m^3/hora – 5 Años

Etapa	Q Perm.	Alim. / T	Conc. / T	Flux	P. Conc.	Contrap.	Elem.	Elem.	Arreglo
	m^3/hr	m^3/hr	m^3/hr	l/m^2-hr	bar	bar	Modelo	Nº	
1-1	121,0	9,1	7,7	19,5	67,2	0.0	SWC3	180	90x2
1-2	273,1	7,7	4,7	16,3	66,1	0.0	SWC5	450	90x5
Total	**394,1**								

Etapa	Elemento	P. Alim.	Pérdida	Q Perm.	FLUX Perm.	Sal. Perm.	Concentrado	Indice Lang.
	Nº	Bar	Bar	m^3/hr	l/m^2h	SDT (ppm)	Presión Osm.	
1-1	1	**67,7**	0,3	0,7	**20,3**	147,6	26,4	-0,8
1-1	2	67,4	0,3	0,6	18,6	161,1	28,6	-0,7
1-2	1	67,0	0,2	0,9	**23,5**	146,4	32,3	-0,5
1-2	2	66,7	0,2	0,7	19,5	151,1	36,1	-0,4
1-2	3	66,5	0,2	0,6	15,9	163,4	39,9	-0,3
1-2	4	66,3	0,2	0,5	12,6	180,3	43,6	-0,2
1-2	5	66,2	0,1	0,4	10,1	200,0	47,0	-0,1

Tabla 9. Diseño con Mezcla SWC3–SWC5 para Q = 394 m^3/hora – 5 Años

Como se aprecia en las tablas anteriores, para un bastidor de 90 tubos de presión, el diseño a flujo máximo con membranas SWC5 requiere menos presión de alimentación que la mezcla 2_SWC3 – 5_SWC5, en aproximadamente un 10% para este caso.

Por su parte la configuración en mezcla para flujo máximo, con los mismos 90 tubos de presión, permite un caudal de producción un 20% superior a la configuración homogénea de 7 SWC5.

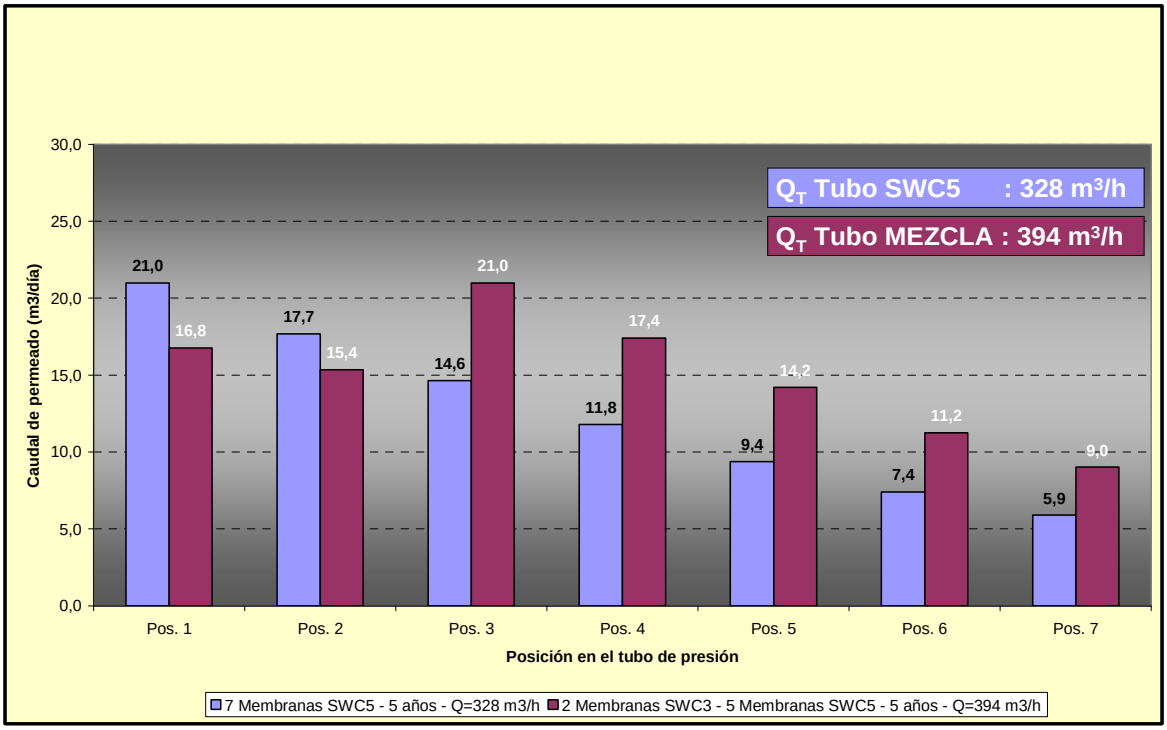

Figura 10. Comparación Caudales 7 SWC5 – Mezcla SWC3-SWC5 - 5 Años

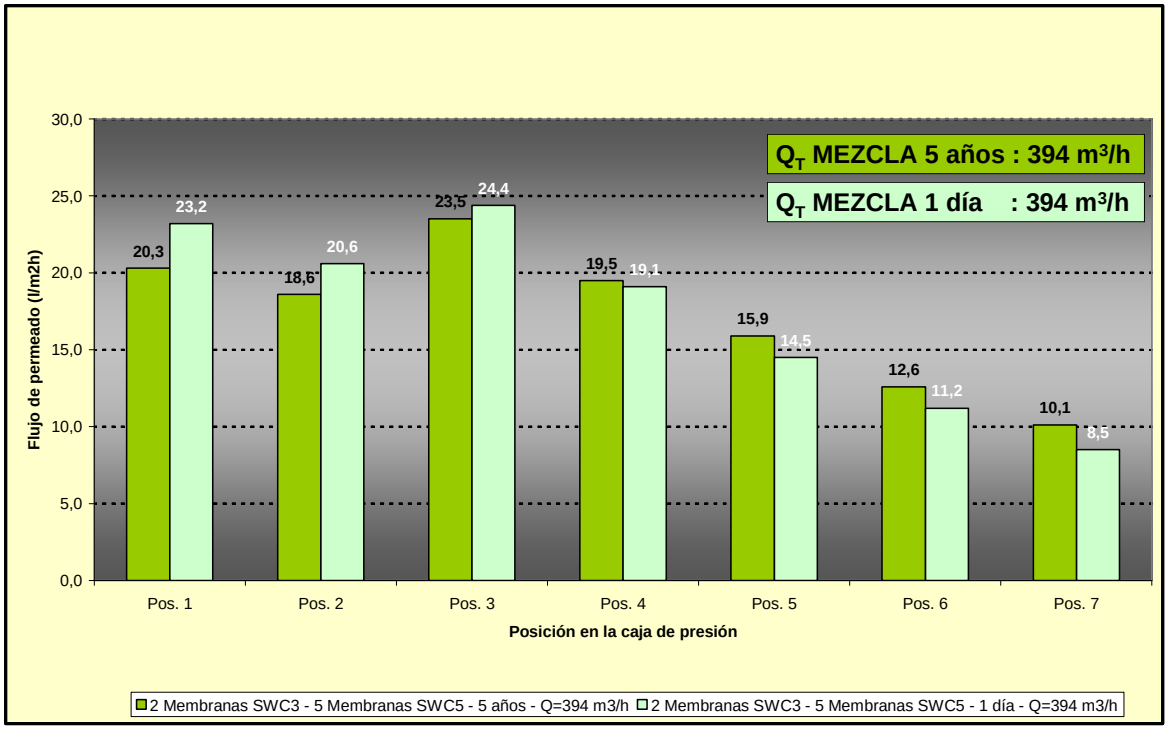

Figura 11. Variación Flujos en Mezcla SWC3-SWC5 a 1 Día y 5 Años

Si con la mezcla de membranas a flujo máximo solo se quisiera producir el mismo caudal que la configuración homogénea de 7 SWC5, esto es 328 m^3/hora, se requeriría instalar solamente 75 tubos de presión.

En consecuencia, la conveniencia de una u otra opción en este caso dependerá de la comparación a valor presente entre los mayores costes de energía y los menores costes de inversión por concepto de reducción del número de membranas y tubos de presión, de estructuras de bastidores, de tuberías y piezas de aceros especiales, etc.

Si lo que se busca con la mezcla es la conservación de las membranas operando con flujos más bajos, con la configuración de 90 tubos por bastidor se requeriría una presión de alimentación de 63,0 bar para lograr los 328 m^3/hora al año 5 de operación, como se muestra en la tabla siguiente.

Etapa	Q Perm.	Alim. / T	Conc. / T	Flux	P. Conc.	Contrap.	Elem.	Elem.	Arreglo
	m^3/hr	m^3/hr	m^3/hr	l/m^2-hr	bar	bar	Modelo	Nº	
1-1	105,7	7,5	6,4	17,1	62,5	0.0	SWC3	180	90x2
1-2	222,4	6,4	3,9	13,3	61,6	0.0	SWC5	450	90x5
Total	**328,1**								

Etapa	Elemento	P. Alim.	Pérdida	Q Perm.	FLUX Perm.	Sal. Perm.	Concentrado	Indice Lang.
	Nº	Bar	Bar	m^3/hr	l/m^2h	SDT (ppm)	Presión Osm.	
1-1	1	**63,0**	0,2	0,6	**17,8**	169,3	26,6	-0,8
1-1	2	62,7	0,2	0,6	16,1	186,1	28,8	-0,7
1-2	1	62,3	0,2	0,7	**19,9**	171,4	32,6	-0,5
1-2	2	62,1	0,2	0,6	16,1	179,1	36,5	-0,4
1-2	3	62,0	0,1	0,5	12,7	195,5	40,2	-0,3
1-2	4	61,8	0,1	0,4	9,9	217,2	43,7	-0,2
1-2	5	61,7	0,1	0,3	7,8	241,8	47,0	-0,1

Tabla 10. Diseño con Mezcla SWC3–SWC5 para Q = 328 m^3/hora – 5 Años

Considerando que para la configuración homogénea, de 7 membranas SWC5 por tubo, para producir 328 m^3/hora se requieren 60,3 bar al año 5, la diferencia en energía respecto de la configuración con mezcla para el mismo caudal llega a un 4,5%.

Analizando la operación de estas configuraciones en el día 1, en ambos casos se requiere tener contrapresión en el permeado para no sobrepasar los 328 m^3/hora. En el caso de las 7 membranas SWC5, la contrapresión necesaria es de 5,4 bar, y en el caso de la mezcla es de 6,2 bar.

Pero existe una importante diferencia entre ambos diseños. En la configuración homogénea, en el día 1 para el caudal de 328 m^3/hora se sobrepasa el flujo máximo de 23,5 lt/m^2-hr definido en este caso para las membranas SWC5, llegando a 27,0 lt/m^2-hr.

Si se quisiera respetar este flujo máximo, definido como ***semi agresivo***, la producción no debería sobrepasar, en los primeros días, los 261 m^3/hora. La contrapresión requerida para no sobrepasar esta producción sería de 7,9 bar.

En el caso de la mezcla de membranas SWC3-SWC5, los flujos de todas las membranas en el día 1 están bajo los máximos definidos para 328 m^3/hora, pudiendo incluso conseguirse una producción de 336 m^3/hora sin sobrepasarlos.

En las tablas siguientes se muestran los flujos para cada configuración, en el día 1 de operación, para un caudal de 328 m^3/hora, con contrapresión.

Etapa	Q Perm.	Alim. / T	Conc. / T	Flux	P. Conc.	Contrap.	Elem.	Elem.	Arreglo
	m^3/hr	m^3/hr	m^3/hr	l/m^2-hr	bar	bar	Modelo	Nº	
1-1	**328,0**	7,5	3,9	14,0	59,2	5,4	SWC5	630	90x7

Etapa	Elemento	P. Alim.	Pérdida	Q Perm.	FLUX Perm.	Sal. Perm.	Concentrado	Indice Lang.
	Nº	Bar	Bar	m^3/hr	l/m^2h	SDT (ppm)	Presión Osm.	
1-1	1	**60,3**	0,2	1,0	**27,0**	62,6	28,1	-0,7
1-1	2	60,1	0,2	0,8	21,4	74,7	32,0	-0,5
1-1	3	59,9	0,2	0,6	16,4	88,9	35,8	-0,4
1-1	4	59,7	0,1	0,5	12,3	105,1	39,3	-0,3
1-1	5	59,6	0,1	0,4	9,4	122,2	42,5	-0,2
1-1	6	59,4	0,1	0,2	6,6	141,8	45,0	-0,1
1-1	7	59,3	0,1	0,2	4,9	162,3	47,1	-0,1

Tabla 11. Flujos para Q = 328 m^3/hora - 7 SWC5 – 1 Día

Etapa	Q Perm.	Alim. / T	Conc. / T	Flux	P. Conc.	Contrap.	Elem.	Elem.	Arreglo
	m^3/hr	m^3/hr	m^3/hr	l/m^2-hr	bar	bar	Modelo	Nº	
1-1	120,5	7,5	6,2	19,5	62,6	6,2	SWC3	180	90x2
1-2	207,5	6,2	3,9	12,4	61,7	6,2	SWC5	450	90x5
Total	**328,0**								

Etapa	Elemento	P. Alim.	Pérdida	Q Perm.	FLUX Perm.	Sal. Perm.	Concentrado	Indice Lang.
	Nº	Bar	Bar	m^3/hr	l/m^2h	SDT (ppm)	Presión Osm.	
1-1	1	**63,0**	0,2	0,7	**20,7**	99,1	26,9	-0,8
1-1	2	62,8	0,2	0,6	18,0	111,7	29,6	-0,6
1-2	1	62,4	0,2	0,8	**20,6**	107,1	33,8	-0,5
1-2	2	62,2	0,1	0,6	15,5	115,3	37,8	-0,3
1-2	3	62,1	0,1	0,4	11,5	128,9	41,4	-0,2
1-2	4	61,9	0,1	0,3	8,7	144,8	44,7	-0,1
1-2	5	61,8	0,1	0,2	6,0	164,0	47,2	-0,1

Tabla 12. Flujos para Q = 328 m^3/hora - Mezcla SWC5-SWC3 – 1 Día

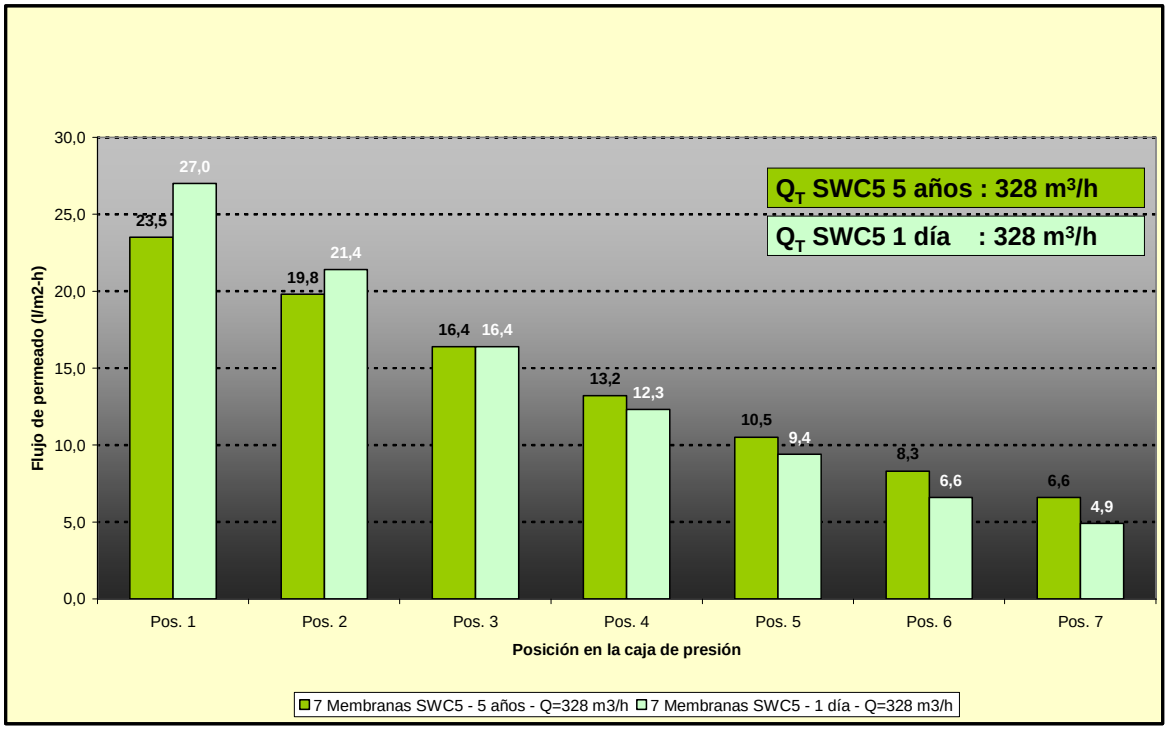

Figura 12. Variación de Flujos para Q = 328 m^3/hora para 7 SWC5 – 5 Años y 1 Día

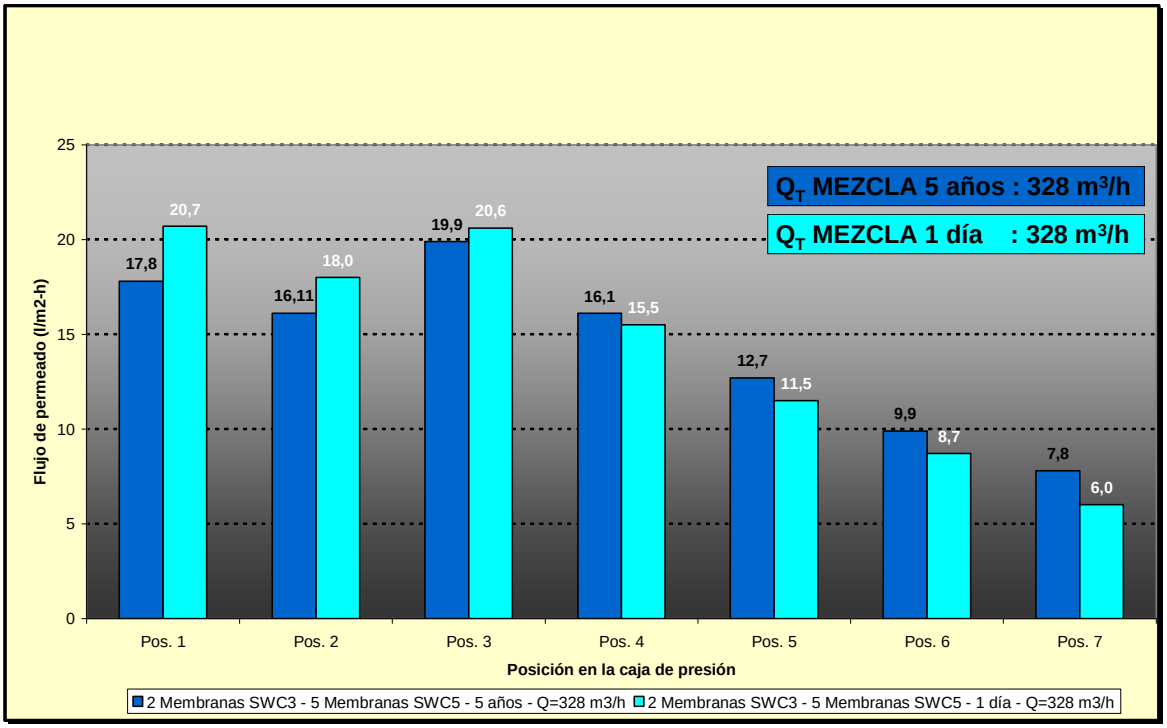

Figura 13. Variación de Flujos para Q = 328 m^3/hora para Mezcla SWC3-SWC5 – 5 Años y 1 Día

3.4.- MEZCLA DE MEMBRANAS EN PLANTA DESALADORA DE ANTOFAGASTA

En el diseño original de la planta de Antofagasta, cada bastidor incluía 81 tubos de presión, de 7 membranas SWC3 cada uno, para una producción de 6.500 m^3/día (270 m^3/hora), divididos en 3 sub-bastidores de 90 m^3/hora cada uno. Todos los bastidores están conectados a un colector común de alimentación y a otro de rechazo.

Cada sub-bastidor tenía 3 tubos de presión adicionales, para permitir el aumento de producción a futuro instalando en ellos las membranas. De igual forma, para permitir los lavados sin bajar la producción, la planta cuenta con un sub-bastidor de reserva.

La planta inició su producción el 01 de abril del año 2003, con un período de marcha blanca de 30 días. Desde el 01 de mayo de ese año, se presta el servicio de producción de agua potable al cliente, el que en la actualidad llega a 26.000 m^3/día.

A los 4 meses de operación, en régimen absolutamente normal, la planta estaba produciendo 271 m^3/hora por bastidor, con una contrapresión en el permeado de 5,4 bar. Las condiciones de operación de los bastidores de la planta a esa fecha (30 de julio de 2003), eran las que se señalan a continuación:

Salinidad Agua de Mar	*:*	*34.580 ppm*
Temperatura	*:*	*14,3ºC*
Caudal de Permeado	*:*	*271,1 m^3/hora*
Factor de Conversión	*:*	*47,8%*
Caudal de Bombeo	*:*	*567,2 m^3/hora*
Presión Descarga Bomba	*:*	*68,0 bar*
Presión de Alimentación	*:*	*67,5 bar*
Presión de Rechazo	*:*	*66,3 bar*
Contrapresión Permeado	*:*	*5,7 bar*
Edad de Membranas	*:*	*120 días*

Utilizando estos datos en el programa de diseño RODesign de Hydranautics, se obtiene que para producir este caudal, la presión de alimentación necesaria es de 66,6 bar, esto es 0,9 br menos que en el caso real, como se muestra en la tabla siguiente.

Etapa	Q Perm. m^3/hr	Alim. / T m^3/hr	Conc. / T m^3/hr	Flux l/m^2-hr	P. Conc. bar	Contrap. bar	Elem. Modelo	Elem. Nº	Arreglo
1-1	**271,1**	7,0	3,7	13,9	65,6	5,7	**SWC3**	567	**81x7**

Etapa	Elemento Nº	P. Alim. Bar	Pérdida Bar	Q Perm. m^3/hr	FLUX Perm. l/m^2h	Sal. Perm. SDT (ppm)	Concentrado Presión Osm.	Indice Lang.
1-1	1	**66,6**	0,2	0,8	22,8	96,7	27,5	-0,7
1-1	2	66,4	0,2	0,7	19,4	111,3	30,8	-0,6
1-1	3	66,2	0,2	0,6	16,2	127,5	34,2	-0,5
1-1	4	66,1	0,1	0,5	13,2	146,0	37,6	-0,3
1-1	5	65,9	0,1	0,4	10,6	166,9	40,8	-0,2
1-1	6	65,8	0,1	0,3	8,5	189,3	43,9	-0,2
1-1	7	65,7	0,1	0,2	6,8	213,2	46,7	-0,1

Tabla 13. Resultados Teóricos para Membranas SWC3 Instaladas – 120 Días

En la bahía de Antofagasta el agua de mar ha sufrido algunos cambios en sus características desde la fecha de realización de los diseños en el año 2000, entre otros la aparición de gran cantidad de medusas en los períodos de verano a contar del año 2003 (situación que también está afectando a otras zonas del mundo) y el aumento de la turbidez en esos mismos períodos.

Por esta situación, se realizaron recuentos de partículas a la salida de filtros de arena, los que señalaban que el 90% de ellas tenían tamaño menor a 5 micras y el 76% menor a 3 micras. Los filtros de cartucho originales tenían un corte de 5 micras.

A causa de esto, después de 3,7 años de operación, esto es en noviembre del año 2006, los bastidores de membranas habían bajado su producción en un 13,6%, lo que denotaba un ensuciamiento equivalente a una disminución de flujo del 14,9% anual.

En esa misma fecha se estaba poniendo en marcha la 1ª Ampliación de la planta, de la misma capacidad del Proyecto Base, pero con membranas SWC5 de Hydranautics, de mayor rendimiento que las SWC3 ya instaladas, tanto en flujo como en superficie de membrana y presión de alimentación.

Los trenes de alta presión se mantuvieron con las mismas características originales.

En consecuencia, los bastidores del Proyecto Base estaban produciendo por debajo del caudal de diseño y la 1ª Ampliación estaba restringida con altas contrapresiones para no sobrepasar los flujos máximos permisibles en la membrana de primera posición.

Por estas razones se planteó la alternativa de hacer una mezcla de membranas entre las SWC3 del Proyecto Base y las SWC5 de la 1ª Ampliación, quedando una parte de los sub-bastidores en combinación 3-4 (80%) y otra en combinación 4-3 (20%).

A los nueve meses de operación con mezcla, esto es en septiembre del año 2007, con la mezcla de membranas de distintas edades (4,5 años para SWC3 y 0,8 años para SWC5), los bastidores estaban produciendo normalmente el caudal de diseño original, con las condiciones operativas que se señalan a continuación:

Salinidad Agua de Mar	*:*	*34.580 ppm*
Temperatura	*:*	*14,2ºC*
Caudal de Permeado	*:*	*271,8 m^3/hora*
Factor de Conversión	*:*	*47,7%*
Caudal de Bombeo	*:*	*569,8 m^3/hora*
Presión Descarga Bomba	*:*	*68,0 bar*
Presión de Alimentación	*:*	*67,5 bar*
Presión de Rechazo	*:*	*66,2 bar*
Contrapresión Permeado	*:*	*1,4 bar*
Edad de Membranas	*:*	*4,5 Años SWC3 – 0,8 Años SWC5*

Con estas condiciones operativas y la disminución de flujo real de las membranas por el uso (DF 14,9%), la producción medida en terreno de 271,8 m^3/hora se logra con una edad promedio de mezcla de 4 años. Los resultados de flujos por membranas y caudales por modelo de membranas se muestran en la tabla y siguientes.

Etapa	Q Perm.	Alim. / T	Conc. / T	Flux	P. Conc.	Contrap.	Elem.	Elem.	Arreglo
	m3/hr	m3/hr	m3/hr	l/m2-hr	bar	bar	Modelo	Nº	
1-1	**125,2**	6,3	4,9	13,5	67,0	1,4	**SWC3**	270	**90x3**
1-2	**146,6**	4,9	3,3	11,0	66,3	1,4	**SWC5**	360	**90x4**
Total	**271,8**								

Etapa	Elemento	P. Alim.	Pérdida	Q Perm.	FLUX Perm.	Sal. Perm.	Concentrado	Indice Lang.
	Nº	Bar	Bar	m3/hr	l/m2h	SDT (ppm)	Presión Osm.	
1-1	1	67,5	0,2	0,5	14,7	192,1	26,5	-0,8
1-1	2	67,3	0,2	0,5	13,4	210,3	28,8	-0,7
1-1	3	67,1	0,1	0,4	12,1	230,2	31,2	-0,6
1-2	1	66,8	0,1	0,6	14,9	221,6	35,2	-0,4
1-2	2	66,6	0,1	0,4	12,0	231,4	39,1	-0,3
1-2	3	66,5	0,1	0,4	9,5	250,4	42,9	-0,2
1-2	4	66,4	0,1	0,3	7,5	274,7	46,5	-0,1

Tabla 14. Resultados Teóricos Mezcla en Planta Desaladora Antofagasta

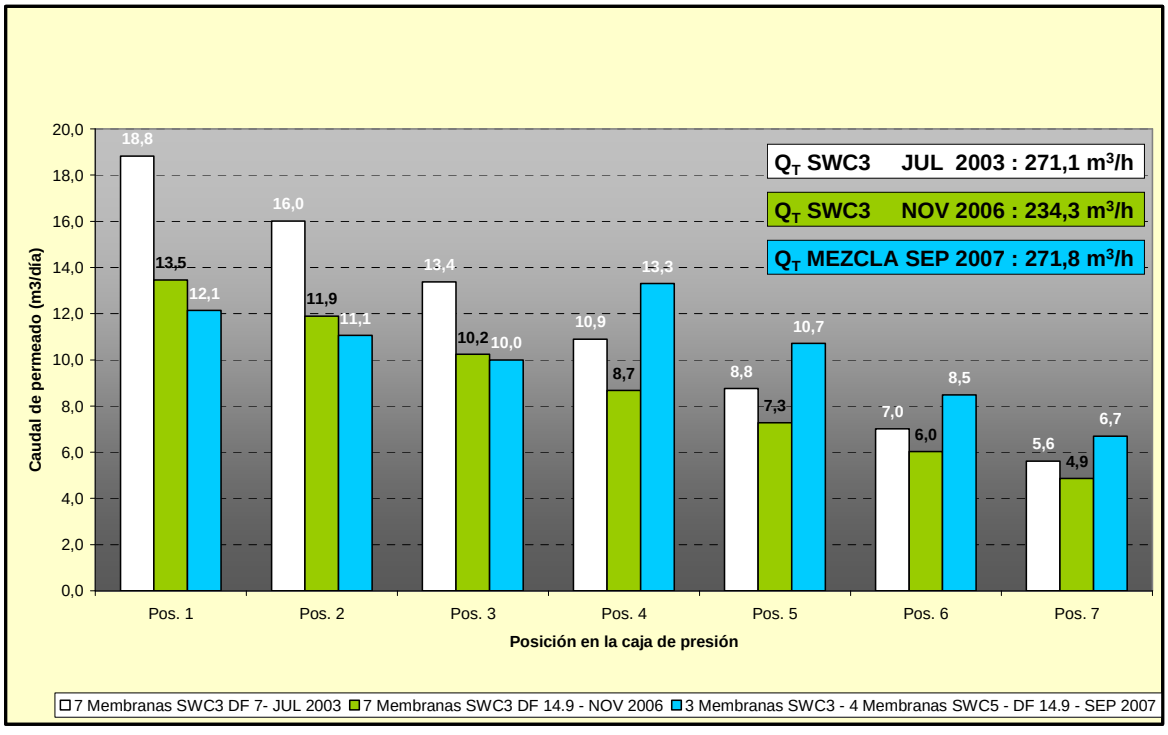

Figura 14. Caudales por Membranas en Planta Antofagasta – 2003 a 2007

IV. CONCLUSIONES

Del presente informe, que tuvo su origen en dos experiencias prácticas en la Planta Desaladora de Antofagasta, el cambio de lechos filtrantes y la mezcla de membranas, podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Respecto de los lechos filtrantes, la combinación arena-antracita, de tallas efectivas 0,45 y 0,90 mm respectivamente, dan una adecuada seguridad en cuanto a mantener dentro de un rango establecido la calidad del agua de salida de los filtros, con independencia de la turbidez del agua de alimentación. Esta seguridad, sumado al ahorro en el cambio de filtros de cartuchos, compensa con creces el incremento de energía que se produce, por el aumento de la pérdida de carga, respecto de filtros con arena de mayor talla efectiva.

- En cuanto a la mezcla de membranas, los análisis teóricos demuestran que puede ser una alternativa interesante para el diseño de nuevas instalaciones, así como para el mejoramiento o recuperación de instalaciones que han tenido descenso en su producción.

- La mezcla de membranas permite la posibilidad de producir más agua con menos infraestructura (tubos de presión y membranas), por el aprovechamiento de la potencialidad de las membranas de posiciones interiores, que en los diseños homogéneos quedan subutilizadas.

- Las membranas de última generación que hoy están disponibles en el mercado, de alto rendimiento en caudales y bajo requerimiento de energía, en un arreglo homogéneo solo pueden ser aprovechadas en plenitud en las primeras posiciones del tubo de presión. En un tubo de 7 membranas, la primera produce 1,7 veces más que la tercera, 2,3 veces más que la cuarta, 3,1 veces más que la quinta y llega hasta 6,4 veces respecto de la última.

- En un tubo con mezcla de membranas se da una relación más eficiente de caudales, en que las primeras 4 o 5 (dependiendo del arreglo interior), tienen producciones dentro del mismo orden, con diferencias menores a 1,5 veces entre ellas, y entre la primera y la última la diferencia de producción se reduce a 3 veces.

- Adicionalmente, la mezcla de membranas con el tiempo va teniendo producciones aún más similares, pues el desgaste de las primeras permite lograr mayores producciones en las siguientes, de más alto rendimiento.