

**INGENIERÍA BÁSICA DE PLANTA DESALADORA
DE AGUA DE MAR DE 40.000 M³/DÍA DE
CAPACIDAD**

ANEXO I

MEMORIA JUSTIFICATIVA DE CÁLCULOS

Índice

Índice	iii
Índice de Tablas	v
Índice de Figuras	vi
Notación	vii
1 Datos de partida	1
2 Balance de materia	3
3 Captación de agua de mar	5
3.1 <i>Inmisario submarino</i>	5
3.2 <i>Dimensionamiento cántara de captación</i>	5
3.3 <i>Dimensionamiento del pozo de bombeo</i>	6
4 Dosificación reactivos pretratamiento	7
4.1 <i>Desinfección</i>	7
4.2 <i>Acidificación</i>	7
4.3 <i>Coagulación</i>	8
4.4 <i>Decloración</i>	8
4.5 <i>Antiincrusante</i>	9
5 Filtros de arena-antracita	10
5.1 <i>Lavado de los filtros de arena-antracita</i>	10
6 Filtros de cartucho	12
7 Dimensionamiento unidad osmosis inversa	13
7.1 <i>Predimensionamiento de unidad de osmosis</i>	13
7.1.1 Consideraciones iniciales	13
7.1.2 Configuración del flujo y número de pasos	13
7.1.3 Selección del tipo de membrana	13
7.1.4 Seleccionar el flujo medio de membrana	15
7.1.5 Calcular el número de membranas y tubos de presión	16
7.1.6 Seleccionar el número de etapas	16
7.1.7 Seleccionar ordenamiento	17
7.1.8 Ajuste y equilibrio de sistema	17
7.2 <i>Ánálisis de configuraciones y evaluación</i>	21
8 Bombeo a alta presión y recuperación energética	30
9 Equipos de limpieza química y desplazamiento	32
9.1 <i>Depósito de limpieza química y desplazamiento</i>	32
9.2 <i>Bombas de limpieza química y desplazamiento</i>	33
9.3 <i>Filtros de cartucho</i>	33
10 Post-Tratamiento	34
10.1 <i>Dosificación de CO₂</i>	34

10.2	<i>Filtros de calcita</i>	35
10.3	<i>Cloración</i>	36
11	Depósito de agua potable	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterio de calidad del agua de consumo humano según la BWA.	1
Tabla 2. Calidad del agua de alimentación a planta.	2
Tabla 3. Tabla resumen de caudales en cántara de captación.	4
Tabla 4. Dimensiones cántara de captación.	5
Tabla 5. Dimensiones Pozo de Bombeo.	6
Tabla 6. Elección del tipo de membrana. Fabricante Dow Filmtec	14
Tabla 7. Membranas SW. Fabricante Dow Filmtec.	14
Tabla 8. Selección del Número de Etapas.	16
Tabla 9. Diseño 1: 7 membranas SW30ULE-440i por permeador.	22
Tabla 10. Diseño 2: 7 membranas SW30ULE-400i por permeador.	22
Tabla 11. Diseño 4: 7 membranas SW30HRLE-440i por permeador.	23
Tabla 12. Diseño 5: 2 membranas SW30HRLE-440i + 5 membranas SW30ULE-440i	24
Tabla 13. Diseño 6: 2 membranas SW30XLE-440i + 5 membranas SW30ULE-440i	25
Tabla 14. Diseño 7: 2 membranas SW30HRLE-440i + 2 membranas SW30XLE-440i + 3 membranas SW30ULE-440i	25
Tabla 15. Diseño 8: 1 membranas SW30HRLE-440i + 1 membranas SW30XLE-440i + 5 membranas SW30ULE-440i	26
Tabla 16. Características de diferentes diseños con membranas Filmtec.	27
Tabla 17. Calidad del permeado (expresado en ppm) para las diferentes configuraciones en un paso.	28
Tabla 18. Configuración final adoptada de las membranas de osmosis inversa.	29
Tabla 19. Dimensiones depósito de agua potable.	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Balance de materia zona de membranas.	3
Ilustración 2. Balance de materia en la cántara de captación	4
Ilustración 3. Guia de diseño de membranas Filmtec para diámetros de 8-inch.	15
Ilustración 4. Pestaña 1: Información del proyecto	17
Ilustración 5. Pestaña 2: Datos de agua de alimentación	18
Ilustración 6. Pestaña 3: Ajuste de la composición y pH del agua de alimentación	19
Ilustración 7. Pestaña 4: Configuración del sistema	19
Ilustración 8. Pestaña 5: Reporte de resultados	20
Ilustración 9. Resultados configuración final de predimensionamiento	21
Ilustración 10. Caudal de permeado por membrana para cada configuración.	26
Ilustración 11. Presión de alimentacion por membrana para cada configuración.	27
Ilustración 12. Gráficas comparativas de diferentes diseños Filmtec.	28
Ilustración 13. Efecto de la remineralización.	34

Notación

η	Conversión
X_E	Concentración de sales en el agua (ppm) - Emisario submarino
X_P	Concentración de sales en el agua (ppm) - Permeado
X_M	Concentración de sales en el agua (ppm) - Recirculación en la entrada
X_F	Concentración de sales en el agua (ppm) - Alimentación a planta
X_I	Concentración de sales en el agua (ppm) - Captación en pozo de bombeo
X_R	Concentración de sales en el agua (ppm) - Rechazo
Q_E	Caudal volumétrico de agua - Emisario submarino
Q_P	Caudal volumétrico de agua - Permeado
Q_M	Caudal volumétrico de agua - Recirculación en la entrada
Q_F	Caudal volumétrico de agua - Alimentación a planta
Q_I	Caudal volumétrico de agua - Captación en pozo de bombeo
Q_R	Caudal volumétrico de agua - Rechazo
D	Diámetro
Q_{\max}	Caudal máximo
Q_{medio}	Caudal medio
v_{\max}	Velocidad máxima
V_{\min}	Volumen mínimo
TDS	Sólidos totales disueltos
ppm	Partes por millón
ΔP	Pérdida de carga
LSI	Indice de saturación de Langelier
BWA	Barbados Water Authority

1 DATOS DE PARTIDA

La planta debe producir, al menos, 30.000 m³/día de agua potable a partir de agua de mar. El agua potable producida debe tener las siguientes características, para cumplir los criterios de agua de para consumo humano según la Barbados Water Authority.

Table 1 Treated Water Quality Guidelines and the Target Water Qualities			
Parameter	Unit	Target*	WHO Guidelines
Turbidity	NTU	< 0.1	0.1
Nitrate	mg/l (as N)	< 8	< 10
PH		6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
Treated Water Free Chlorine Residual (after 30 min. contact time at pH < 8.0)	mg/l	≥ 0.1	≥ 0.5
Total Dissolved Solids	mg/l	<500	500
Chlorides	mg/l	<250	250

* The WHO guidelines for nitrate concentration shall be achievable for up to 25-30 mg/l of NO₃ (as N) in the raw water.

Tabla 1. Criterio de calidad del agua de consumo humano según la BWA.

Además de estos criterios, se deberá cumplir también el RD 140/2003, del 17 de febrero, por el que se establecen los criterios de la calidad del agua de consumo humano, para aquellos elementos que no vengan especificados según la especificaciones de la Barbados Water Authority.

La composición agua de mar, que sirve de alimentación a la planta tiene la siguiente composición:

Parámetros	Valores	Unidad
Conductividad	53900	µS/cm
Turbidez	<1	NTU
TDS	36537	mg/L
Temperatura	27,1	ºC
pH	7,3	
CATIONES		
Amonio (NH4 ⁺)	0,03	mg/L
Potasio (K ⁺)	446,93	mg/L
Sodio (Na ⁺)	10312,48	mg/L
Magnesio (Mg ²⁺)	1511,60	mg/L
Calcio (Ca ²⁺)	616,68	mg/L
Estroncio (Sr ²⁺)	10,42	mg/L
Bario (Ba ²⁺)	0,00	mg/L
Boro (B ²⁺)	3,00	mg/L
ANIONES		
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	70,93	mg/L
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	2481,03	mg/L
Nitrato (NO ₃ ⁻)	2,61	mg/L
Bromo (Br ⁻)	70,50	mg/L
Cloro (Cl ⁻)	18171,62	mg/L
Flúor (F ⁻)	1,59	mg/L
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	2862,37	mg/L
Sílice (SiO ₂ ⁻)	31,98	mg/L

Tabla 2. Calidad del agua de alimentación a planta.

2 BALANCE DE MATERIA

Para la realización del balance de material global de la planta desalinizadora, se asume:

- $\eta = 45\%$ (Conversión típica en una planta de osmosis inversa de dos etapas)
- $X_P = 370 \text{ ppm}$
- $Q_P = 40.000 \text{ m}^3/\text{día}$
- $X_F = 36537 \text{ ppm}$

Se ha elegido realizar el diseño para una producción de $40.000 \text{ m}^3/\text{día}$, con el fin de sobredimensionar la instalación, ya que la planta debe producir, el menos, $30.000 \text{ m}^3/\text{día}$. Sabiendo que siempre puede surgir alguna parada inesperada por fallo en la planta o puede ser necesaria la limpieza de las membranas, queda justificado este dimensionamiento de modo que la planta pueda producir el caudal mínimo exigido mientras se reparan o limpian otros equipos al mismo tiempo.

Establecidos los datos de partida, se procede a realizar el balance de material global de la planta:

$$Q_F = \frac{Q_P}{\eta} = \frac{40.000}{0,45} = 88.889 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$Q_R = Q_F - Q_P = 88.889 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} - 40.000 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 48.889 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Sabiendo los caudales, solo falta calcular la concentración de salida del rechazo de la planta.

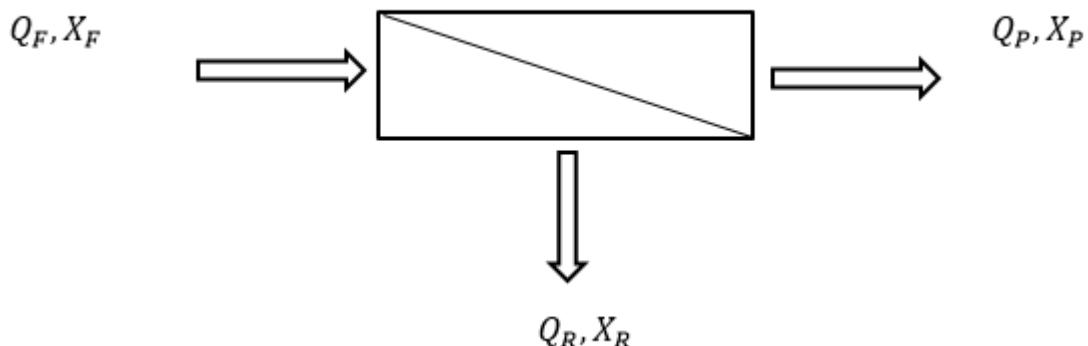


Ilustración 1. Balance de materia zona de membranas.

$$X_R = \frac{Q_F \cdot X_F - Q_P \cdot X_P}{Q_R} = 66.128 \text{ ppm}$$

Esta concentración del caudal rechazo del proceso osmosis inversa, se reduce a 55.000 ppm mezclándose con agua de mar que llega a la cántara de captación. El objetivo de esta reducción de concentración es la de emitir, mediante emisario submarino, una salmuera de menor concentración para que afecte lo menos posible a la biota marina, ya que Barbados posee casi 90 Km de arrecifes de coral en sus costas, que hay que conservar en perfectas condiciones.

Para reducir la concentración, el caudal de agua captada tiene que ser mayor al caudal de agua tratada en la planta, para que parte de este se inyecte con el agua de rechazo que se envía al mar mediante emisario submarino. Se plantea la siguiente configuración:

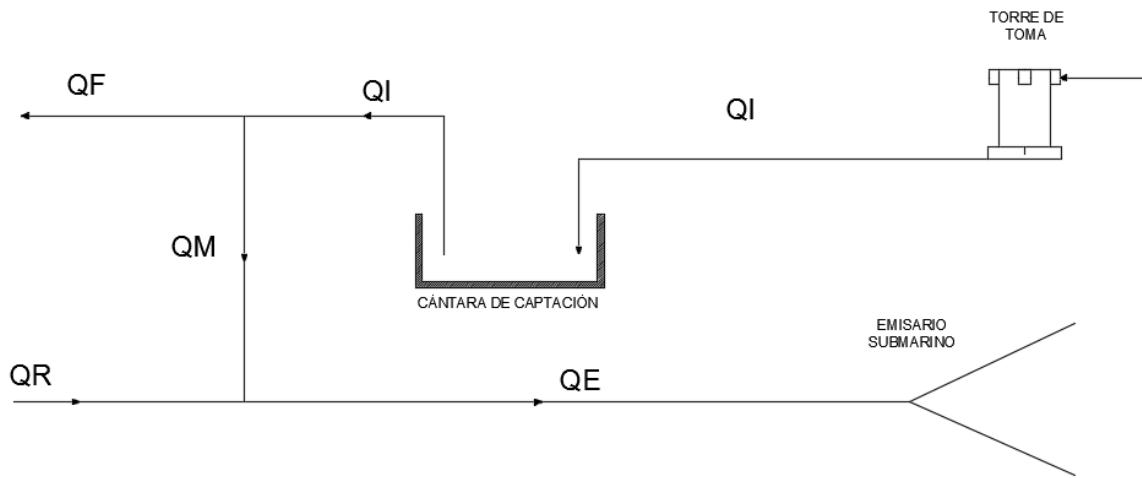


Ilustración 2. Balance de materia en la cántara de captación

A continuación se calcula Q_I , Q_M y Q_E para obtener una concentración de llegada al emisario submarino de $X_E = 55.000$ ppm. Asumiendo que:

- $X_I = X_M = X_F = 36537$ ppm

$$Q_E = Q_M + Q_R$$

$$Q_E \cdot X_E = Q_M \cdot X_M + Q_R \cdot X_R$$

Sustituyendo la (Ec. 4) en la (Ec. 5), se obtiene una ecuación con una incógnita, Q_M .

$$Q_M = Q_R \frac{(X_R - X_E)}{(X_E - X_M)} = 29.467 \frac{m^3}{día}$$

A continuación se muestra una tabla resumen de los caudales y concentraciones de entrada y salida de la planta en m^3/h .

Caudales (m^3/h)		Concentraciones (ppm)	
QF	3704	XF	36537
QP	1667	XP	370
QR	2037	XR	66128
QI	4931	XI	36537
QM	1228	XM	36537
QE	3265	XE	55000

Tabla 3. Tabla resumen de caudales en cántara de captación.

3 CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR

3.1 Inmisario submarino

Para transportar el agua captada en la torre de toma, es necesaria la instalación de un inmisario submarino, que no es más que un conducto por el que circulará el agua captada en la torre de toma hasta la cántara de captación, desde donde será bombeada hasta la planta.

Para diseñar este conducto es necesario tener en cuenta que la velocidad máxima del agua de paso por el inmisario debe ser 1,2 m/s. De modo que sabiendo que el caudal máximo de agua captada es 4931 m³/h, se calcula el diámetro que debe tener el inmisario.

$$\text{Área} = \frac{Q_{máx}}{V_{máx}} = \frac{\frac{4931\text{m}^3}{3600\text{s}}}{1,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,14\text{m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{\text{Área} \cdot 4}{\pi}} = 1,2\text{m}$$

De modo que el inmisario debe tener un diámetro interior de 1,2 m.

3.2 Dimensionamiento cántara de captación

La cántara de captación realiza la función de depósito pulmón entre la torre de toma y el pozo de bombeo, que se encuentra en la planta desalinizadora. Además, como se comentó anteriormente, sirve también para inyectar parte del caudal de agua captado desde la torre de toma al caudal de rechazo de la planta, para así disminuir la concentración de sales emitida por el emisario submarino.

Para dimensionar la cántara de captación se asume que debe garantizar como mínimo una (1) hora el abastecimiento de las bombas de captación. De modo que el volumen mínimo será:

$$V_{min} = Q_F \cdot 1h = 3704 \text{ m}^3$$

Se obtiene así que las dimensiones de la cántara de captación serán:

Parámetro	Dimensión	Unidad
Alto	6	m
Ancho	23	m
Largo	27	m
Volumen	3726	m ³

Tabla 4. Dimensiones cántara de captación.

3.3 Dimensionamiento del pozo de bombeo

El pozo de bombeo recibe el agua bruta desde la cántara de captación, haciendo de depósito pulmón entre la cántara de captación y los bastidores de osmosis, debido a la altura existente. De este modo el agua es bombeada desde el pozo de bombeo hasta el depósito de agua pretratada (justo antes de entrar en los bastidores de osmosis inversa) pasando por los filtros de arena-antracita y por los filtros de cartucho.

Para ello el pozo de bombeo se dimensiona de modo que pueda abastecer al menos 20 minutos a los bastidores de osmosis, del siguiente modo:

$$V_{min} = Q_F \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1}{3}h = 3704 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1}{3}h = 1235 m^3$$

Se obtiene así que las dimensiones del pozo de bombeo serán:

Parámetro	Dimensión	Unidad
Alto	6	m
Ancho	7	m
Largo	30	m
Volumen	1260	m^3

Tabla 5. Dimensiones Pozo de Bombeo.

Las características técnicas de las bombas y los depósitos se pueden encontrar en el Anexo IV: Hojas de datos de equipos.

4 DOSIFICACIÓN REACTIVOS PRETRATAMIENTO

4.1 Desinfección

El hipoclorito de sodio (NaClO) es el producto más empleado en desinfección. Los equipos necesarios para su aplicación deben constar al menos de un depósito para almacenamiento del producto, suficiente para cubrir al menos las necesidades de la instalación durante unos 15 días, y de las bombas dosificadoras correspondientes.

La dosificación se realizará en el pozo de bombeo, que se encuentra en el edificio de bombeo.

El caudal de agua total a clorar sería 3704 m³/h, si la planta estuviera produciendo a capacidad máxima.

- Dosis media: 2,5 ppm
- Características producto químico: NaClO al 13% de cloro activo (160 mg/l)

El caudal medio de producto a dosificar será:

$$Q_{medio} = \frac{3704 \cdot 2,5}{160} = 58 \text{ L/h}$$

Para la dicha dosificación se instalará, teniendo en cuenta que el caudal de cloración del agua permeada es de 51,7 L/h, como se muestra en el apartado 10.3.:

- Dos (2) bombas dosificadoras de NaClO en disposición (1+1R) con caudal unitario mayor de 110 L/h.
- Un depósito con un volumen útil de al menos 40 m³.

$$V_{Dep. NaClO} = (58 + 51,7) \frac{L}{h} \cdot 24 \frac{h}{día} \cdot 15 días = 39,49 \text{ m}^3$$

4.2 Acidificación

La adición de un ácido al agua bruta de alimentación se realiza para ajustar el pH del agua. El ácido más comúnmente utilizado es el Ácido Sulfúrico (H₂SO₄). La adición se realiza en el colector de alimentación a la instalación entre el pozo de bombeo y los filtros de arena antracita.

La instalación es similar a la indicada para la desinfección: bombas y sus dispositivos de seguridad y filtración, bomba de trasvase, depósito con capacidad para 15 días de funcionamiento y provisto de un deshumectador de gel de sílice.

- Caudal de agua a tratar: 3704 m³/h
- Dosis media: 20 ppm
- Características producto químico: H₂SO₄ comercial al 98% (1800 g/l).

El caudal medio de producto a dosificar será:

$$Q_{medio} = \frac{3704 \cdot 20}{1800} = 41 \text{ L/h}$$

Para la dicha dosificación se instalará:

- Dos (2) bombas dosificadoras de H_2SO_4 en disposición (1+1R) con caudal unitario mayor de 41 L/h.
- Un depósito con un volumen útil de al menos 15 m^3 .

$$V_{Dep. H_2SO_4} = 41 \frac{L}{h} \cdot 24 \frac{h}{día} \cdot 15 \text{ días} = 14,8 \text{ } m^3$$

4.3 Coagulación

Es la operación en que las partículas en suspensión aumentan su superficie de contacto debido a la adición de un coagulante. Debido a la floculación, las partículas se agrupan en partículas mayores (coagulación) y alcanzan la masa suficiente para sedimentar.

El coagulante más comúnmente utilizado es el Cloruro Férrico (Cl_3Fe). La adición se realiza antes de los filtros de arena.

- Caudal de agua a tratar: 3704 m^3/h
- Dosis media: 10 ppm
- Características producto químico: $FeCl_3$ comercial del 40% de riqueza (567 g/l).

El caudal medio de producto a dosificar será:

$$Q_{medio} = \frac{3704 \cdot 10}{567} = 65,3 \text{ } L/h$$

Para la dicha dosificación se instalará:

- Dos (2) bombas dosificadoras de Cl_3Fe en disposición (1+1R) con caudal unitario mayor de 66 L/h.
- Un depósito con un volumen útil de al menos 23,5 m^3 , suficiente para tener una autonomía de 15 días.

$$V_{Dep. ClFe_3} = 65,3 \frac{L}{h} \cdot 24 \frac{h}{día} \cdot 15 \text{ días} = 23,5 \text{ } m^3$$

4.4 Declaración

La función principal de la declaración es eliminar el cloro y las cloraminas, ya que son extremadamente agresivas para las membranas semipermeables.

El declarante más utilizado es el Bisulfito Sódico ($NaHSO_3$). La aplicación se realiza entre los filtros de arena y filtros de cartucho.

- Caudal de agua a tratar: 3704 m^3/h
- Dosis media: 8 ppm
- Características producto químico: $NaHSO_3$ al 40% de riqueza (250 g/l).

El caudal medio de producto a dosificar será:

$$Q_{medio} = \frac{3704 \cdot 8}{250} = 118,5 \text{ L/h}$$

Para la dicha dosificación se instalará:

- Dos (2) bombas dosificadoras de NaHSO_3 en disposición (1+1R) con caudal unitario mayor de 119 L/h.
- Dos (2) depósitos agitados con un volumen útil de al menos 10 m^3 cada uno, suficiente para tener una autonomía total de 7 días.

$$V_{Dep. \text{NaHSO}_3} = 118,5 \frac{\text{L}}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 7 \text{ días} = 20 \text{ m}^3$$

4.5 Antiincrusante

El antiincrustante más utilizado es el Hexametafosfato Sódico (HMP). La dosificación se realiza entre los filtros de arena y filtros de cartucho.

- Caudal de agua a tratar: $3704 \text{ m}^3/\text{h}$
- Dosis media: 1,5 ppm
- Consumo: 5556 g/h
- Características producto químico: HMP diluido al 5,5% de concentración.
- Densidad agua: 1010 g/L

El caudal medio de producto a dosificar será:

$$Q_{medio} = \frac{5556}{0,055 \cdot 1010} = 27,3 \text{ L/h}$$

Para la dicha dosificación se instalará:

- Dos (2) bombas dosificadoras de HMP en disposición (1+1R) con caudal unitario mayor de 28 L/h.
- Dos (2) depósitos agitados con un volumen útil de al menos $2,5 \text{ m}^3$ cada uno, suficiente para tener una autonomía total de 7 días.

$$V_{Dep. \text{NaHSO}_3} = 27,3 \frac{\text{L}}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 7 \text{ días} = 4,6 \text{ m}^3$$

Las características técnicas de las bombas dosificadoras y los depósitos se pueden encontrar en el Anexo IV: Hojas de datos de equipos.

5 FILTROS DE ARENA-ANTRACITA

La filtración de arena-antracita se encuentra dentro de los pretratamientos físicos a los que debe ser sometida el agua de mar antes de llegar a los bastidores de osmósisis inversa.

Los filtros de arena-antracita que se utilizan en las instalaciones desaladoras son generalmente a presión, y se colocan normalmente en paralelo con un filtro de reserva para realizar el lavado de forma individual, sin tener que detener la instalación.

Para grandes instalaciones se usan filtros horizontales, debido a la alta superficie requerida. El movimiento del agua es siempre en sentido vertical, penetrando por la parte superior y descendiendo a través de las capas filtrantes.

Se ha elegido utilizar los filtros de arena-antracita Seaclean de la firma Degremont, que tiene las siguientes características:

- Velocidad de filtración de diseño: 15 m/h
- Velocidad de filtración máxima: 20 m/h
- Pmáx.: 6 bar
- Área de filtración: 51 m²

El área de filtración necesaria será:

$$Área = \frac{3704 \frac{m^3}{h}}{15 \frac{m}{h}} = 247 m^2$$

De modo que el número de filtros necesarios para operación será:

$$Nº filtros = \frac{247}{51} \cong 5$$

Finalmente, se instalarán 6 (5+1R) filtros de esta marca. El resto de características técnicas de estos filtros se encuentran en el Anexo IV: Hojas de datos de equipos.

5.1 Lavado de los filtros de arena-antracita

El lavado de los filtros de arena-antracita debe realizarse cuando la pérdida de carga a través del filtro alcanza los 0,9 o 1 bar. Para no detener la producción se realiza alternativamente el lavado de los filtros, de modo que todos los filtros están en funcionamiento menos uno (1) que se encuentra parado para lavado y/o mantenimiento.

El lavado de los filtros se realiza en contracorriente (desde abajo hacia arriba) con aire y agua, arrastrando las partículas que ensucian el filtro.

Las velocidades de lavado recomendadas son:

- Velocidad de lavado con Aire: 50 m/h

- Velocidad de lavado con Agua: 10-18 m/h

El caudal de aire de lavado necesario para un filtro será:

$$Q_{aire} = 50 \frac{m}{h} \cdot 51m^2 = 2550 \frac{m^3}{h}$$

El caudal de agua de lavado será:

$$Q_{agua\ lavado} = 10 \frac{m}{h} \cdot 51m^2 = 510 \frac{m^3}{h}$$

El caudal de agua de aclarado será:

$$Q_{agua\ aclarado} = 18 \frac{m}{h} \cdot 51m^2 = 918 \frac{m^3}{h}$$

El lavado se prevé con agua rechazada de las membranas de osmosis. Para ello se instala una bomba exclusivamente para ese fin. Para el lavado con aire se instalará una soplante que aporte el caudal necesario.

Las hojas de datos de los equipos seleccionados se encuentran el Anexo IV: Hojas de datos de equipos.

6 FILTROS DE CARTUCHO

La filtración de cartuchos es otro de los pretratamientos físicos a los que se ve sometido al agua de alimentación antes de llegar a los bastidores de osmosis inversa.

Se utilizan en las instalaciones para poder garantizar un nivel de filtración mínimo de 5 micras, que es el requerido por los fabricantes de membranas.

Son depósitos metálicos con interior recubierto como los filtros de arena, y utilizan como medio filtrante unos cartuchos de polipropileno o plástico. Los filtros de cartucho se sustituyen cuando la pérdida de carga supera 1bar de presión.

Para esta filtración se han seleccionado filtros PUTSCH, de acero inoxidable 316L, que tienen las siguientes características:

- Dimensiones de cartuchos:
 - Diámetro: 2 inch
 - Lontitud: 1,5 m
- Filtros:
 - Capacidad de 12 cartuchos por filtro
 - Superficie filtrante: 2,84 m²
 - Caudal por filtro: 600 m³/h

Serán necesarios:

$$Nº\text{filtros cartucho} = \frac{3704}{600} = 6,17$$

Se instalarán 8 filtros (7+1R) filtros de cartucho de la marca PUTSCH.

El resto de características técnicas de estos filtros se encuentran en el Anexo IV: Hojas de datos de equipos.

7 DIMENSIONAMIENTO UNIDAD OSMOSIS INVERSA

Para el dimensionamiento de una instalación de osmosis inversa se han definido en apartados anteriores:

- Las características del agua bruta que se va a utilizar
- La calidad del agua que se requiere obtener

La clave del tratamiento lo constituye la membrana, por lo tanto el diseño básico consistirá en la selección de la membrana idónea para este caso, es decir la que genera menores costes y dificultades en la producción del agua final o permeado.

Sabiendo que el agua a desalar es agua de mar con toma abierta, existe riesgo de contaminación orgánica, por lo que se decide usar membranas de arrollamiento en espiral.

7.1 Predimensionamiento de unidad de osmosis

A continuación se realiza la preselección de las membranas para diseñar la unidad de osmosis inversa. Conviene indicar que este predimensionamiento se realiza de forma manual, siguiendo las recomendaciones del fabricante de membranas DOW FILMTEC, pero que posteriormente se comprobará con el programa ROSA si se cumplen los objetivos necesarios para obtener el permeado con la calidad requerida, o hay que ajustar la disposición de las membranas e incluso el tipo de membranas a emplear.

7.1.1 Consideraciones iniciales

Las condiciones de partida a tener en cuenta son:

- Alimentación con agua de mar superficial (Toma abierta) con SDI<5
- Flujo de permeado requerido: $40.000 \text{ m}^3/\text{día} = 1.666,67 \text{ m}^3/\text{h}$
- TDS: 36.547 mg/L
- Tubos de presión de 7 elementos
- Recuperación: 45%
- Bastidores de $5.000 \text{ m}^3/\text{día}$ (8 bastidores)

7.1.2 Configuración del flujo y número de pasos

La configuración estándar de flujo para el sistema de membranas es de **un solo paso**, donde la alimentación pasa una vez a través del sistema.

De todos modos, este es un predimensionamiento, de modo que si la calidad del agua permeada no cumple con el reglamento, se planteará un segundo paso por membranas del agua permeada más adelante.

7.1.3 Selección del tipo de membrana

Los elementos se seleccionan en función de la salinidad del agua de alimentación, la tendencia al ensuciamiento (Fouling) del agua de alimentación, el rechazo requerido y las necesidades energéticas.

Según la gama de membranas Dow, podemos encontrar la siguiente tabla ilustrativa:

Membrane Type	Feed TDS (ppm)	System Permeate Flow (gpm)	Permeate Quality (ppm)
TW	< 5000	4-inch: máx. 25	< 50
		8-inch: máx. 10	
XLE, LE	< 1000	4-inch: máx. 26	< 50
		8-inch: máx. 11	
BW, FR	< 5000	4-inch: máx. 27	< 50
		8-inch: máx. 12	
SW	3000-15000	4-inch: máx. 28	< 150
		8-inch: máx. 13	
SWHR, SW HRLE	10000-50000	4-inch: máx. 29	Varies (< 500)
		8-inch: máx. 14	
NF	< 1000	4-inch: máx. 30	< 150
		8-inch: máx. 15	

Tabla 6. Elección del tipo de membrana. Fabricante Dow Filmtec

Esta tabla muestra una serie de sugerencias para la selección de la membrana, ya que la elección final depende también de requisitos y de condiciones de funcionamiento específicos del sistema.

De esta tabla comprobamos que las membranas más adecuadas según la salinidad de la alimentación de la planta son las SW, de modo que se muestran a continuación todos los tipos de membranas SW en la siguiente tabla:

FILMTEC	Tipo de membrana	Flujo de Permeado gpd (m ³ /d)	Área ft ² (m ²)	Max. Presión (bar)	Rechazo de Sales (mínimo)	Flujo de permeado, m ³ /(m ² ·d)
Membranas con alto Rechazo de Sales	SW30HR-380	6,000 (23)	380 (35)	69	99,70 (99,60)	0,657
	SW30HRLE-400i	7,500 (28)	400 (37)	83 9	99,75	0,757
	SW30HRLE-400	7,500 (28)	400 (37)	83	99,75 (99,60)	0,757
	SW30HR-370/34i	6,300 (24)	370 (34)	83	99,75 (99,60)	0,706
	SW30XHR-440i	6,600 (25)	440 (41)	83	99,82 (99,70)	0,610
	SW30HRLE-440i	8,200 (31)	440 (41)	83	99,80 (99,65)	0,756
	SW30HRLE-370/34i	6,700 (25)	370 (34)	83	99,80 (99,65)	0,735
Membranas de baja energía y alto flujo	SW30XLE-400i	9,000 (34)	400 (37)	83	99,70 (99,60)	0,919
	SW30XLE-440i	9,900 (37,5)	440 (41)	83	99,75 (99,60)	0,915
Membranas de ultra baja energía y alto flujo	SW30ULE-400i	11,000 (41,6)	400 (37)	83	99,70 (99,60)	1,124
	SW30ULE-440i	12,000 (45,4)	440 (41)	83	99,70 (99,60)	1,107

Tabla 7. Membranas SW. Fabricante Dow Filmtec.

Según los intereses de bajo consumo y alto flujo se preselecciona la membrana de ultrabaja energía y alto flujo **FILMTEC- SW 30 ULE-440i**.

7.1.4 Seleccionar el flujo medio de membrana

Se selecciona el flujo de diseño en L/m²h, basandose en la guía de diseño de de elementos FILMTEC para elementos de 8-inch, como se observa en la siguiente ilustración.

Feed source	RO Permeate	Well Water	Surface Supply	Wastewater (Filtered Municipal Effluent)		Seawater	
				MF ¹	Conventional	Well or MF ¹	Open intake
Feed silt density index	SDI < 1	SDI < 3	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 5
Average system flux	gfd l/m ² h	21-25 36-43	16-20 27-34	13-17 22-29	12-16 20-27	10-14 17-24	8-12 14-20 13-20 11-17
Maximum element recovery %	30	19	17	15	14	12	15 13
Active Membrane Area				Maximum permeate flow rate, gpd (m³/d)			
320 ft ² elements	9,000 (34)	7,500 (28)	6,500 (25)	5,900 (22)	5,300 (20)	4,700 (18)	6,700 (25) 6,100 (23)
365 ft ² elements	10,000 (38)	8,300 (31)	7,200 (27)	6,500 (25)	5,900 (22)	5,200 (20)	
380 ft ² elements	10,600 (40)	8,600 (33)	7,500 (28)	6,800 (26)	5,900 (22)	5,200 (20)	7,900 (30) 7,200 (27)
390 ft ² elements	10,600 (40)	8,900 (34)	7,700 (29)	7,000 (26)	6,300 (24)	5,500 (21)	
400 ft ² elements	11,000 (42)	9,100 (34)	7,900 (30)	7,200 (27)	6,400 (24)	5,700 (22)	
440 ft ² elements	12,000 (45)	10,000 (38)	8,700 (33)	7,900 (30)	7,100 (27)	6,300 (24)	
Element type				Minimum concentrate flow rate², gpm (m³/h)			
BW elements (365 ft ²)	10 (2.3)	13 (3.0)	13 (3.0)	15 (3.4)	16 (3.6)	18 (4.1)	
BW elements (400 ft ² and 440 ft ²)	10 (2.3)	13 (3.0)	13 (3.0)	15 (3.4)	18 (4.1)	20 (4.6)	
NF elements	10 (2.3)	13 (3.0)	13 (3.0)	15 (3.4)	18 (4.1)	18 (4.1)	
Full-fit elements	25 (5.7)	25 (5.7)	25 (5.7)	25 (5.7)	25 (5.7)	25 (5.7)	
SW elements	10 (2.3)	13 (3.0)	13 (3.0)	15 (3.4)	16 (3.6)	18 (4.1)	13 (3.0) 15 (3.4)
Element type		Active area ft² (m²)		Maximum feed flow rate², gpm (m³/h)			
BW elements	365 (33.9)	65 (15)	65 (15)	63 (14)	58 (13)	52 (12)	52 (12)
BW or NF elements	400 (37.2)	75 (17)	75 (17)	73 (17)	67 (15)	61 (14)	61 (14)
BW elements	440 (40.9)	75 (17)	75 (17)	73 (17)	67 (15)	61 (14)	61 (14)
Full-fit elements	390 (36.2)	85 (19)	75 (17)	73 (17)	67 (15)	61 (14)	61 (14)
SW elements	320 (29.7)	65 (15)	65 (15)	63 (14)	58 (13)	52 (12)	52 (12) 63 (14) 56 (13)
SW elements	380 (35.3)	72 (16)	72 (16)	70 (16)	64 (15)	58 (13)	70 (16) 62 (14)

¹ MF: Microfiltration - continuous filtration process using a membrane with pore size of <0.5 micron.

² The maximum recommended pressure drop across a single element is 15 psid (1bar) or 50 psid (3.5 bar) across multiple elements in a pressure vessel, whichever value is more limiting. We recommend designing at maximum of 80% (12 psid) for any element in a system.

Note: The limiting values listed above have been incorporated into the ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) software. Designs of systems in excess of the guidelines results in a warning on the ROSA printout.

Ilustración 3. Guia de diseño de membranas Filmtec para diámetros de 8-inch.

El flujo recomendado para el tipo de agua escogido se encuentra entre 11 y 17 L/m²h, así que se opta por tomar **15 L/m²h**.

7.1.5 Calcular el número de membranas y tubos de presión

Como primera aproximación se puede tomar:

$$\frac{Nº \text{ membranas}}{\text{bastidor}} = \frac{\text{Caudal diseño } \left(\frac{L}{h} \right)}{\text{Área activa membrana } (m^2) \cdot \text{Caudal permeado específico } \left(\frac{L}{m^2 \cdot h} \right)}$$

$$\frac{Nº \text{ membranas}}{\text{bastidor}} = \frac{5.000 * 1000 / 24 \left(\frac{L}{h} \right)}{45,4 (m^2) \cdot 15 \left(\frac{L}{m^2 \cdot h} \right)} = 306$$

$$\frac{Nº \text{ tubos de presión}}{\text{bastidor}} = \frac{\frac{Nº \text{ membranas}}{\text{bastidor}}}{\frac{Nº \text{ membranas}}{\text{Tubo de presión}}} = \frac{306}{7} = 44$$

Finalmente:

Nº total Tubos de presión = 352

Nº total Membranas= 2464

7.1.6 Seleccionar el número de etapas

El número de etapas define el número de tubos de presión en serie que pasará la alimentación hasta que sale del sistema y se descarga como concentrado.

Para determinar el número de etapas se va a consultar la siguiente tabla, en la cual se sugieren un número de etapas en función del tipo de agua a tratar, la recuperación y el número de elementos por tubo de presión.

Recuperación del sistema (%)	Número de elementos en serie	Número de etapas (6 elementos por tubo)	Número de etapas (7 elementos por tubo)	Número de etapas (8 elementos por tubo)
35-40	6	1	1	---
45	7-12	2	1	1
50	8-12	2	2	1
55-60	12-14	2	2	---

Tabla 8. Selección del Número de Etapas.

Se selecciona configuración en **una (1) etapa**, ya que la disposición elegida tiene un 45% de conversión y 7 elementos por tubo.

7.1.7 Seleccionar ordenamiento

En éste caso, como solo tenemos una etapa, todos los tubos de presión se dispondrán en paralelo. Si hubiera 2 o más etapas habría que reconfigurar. Lo típico para sistemas de dos etapas con alimentación de agua de mar es la configuración (3:2).

7.1.8 Ajuste y equilibrio de sistema

Para comprobar si esta configuración es viable para la función que debe cumplir y estudiar la operatividad de sistema se simula este mismo prediseño en el programa ROSA 9.1, facilitado por el fabricante de membranas Dow Filmtec.

Este programa consta de 6 ventanas:

- Información del proyecto
- Datos de agua de alimentación
- Ajuste de la composición y pH del agua de alimentación
- Configuración del sistema
- Reporte de resultados
- Balance de costes

A continuación se muestran todas las pestañas rellenas para la configuración que se ha elegido y posteriormente se analizan los resultados obtenidos.

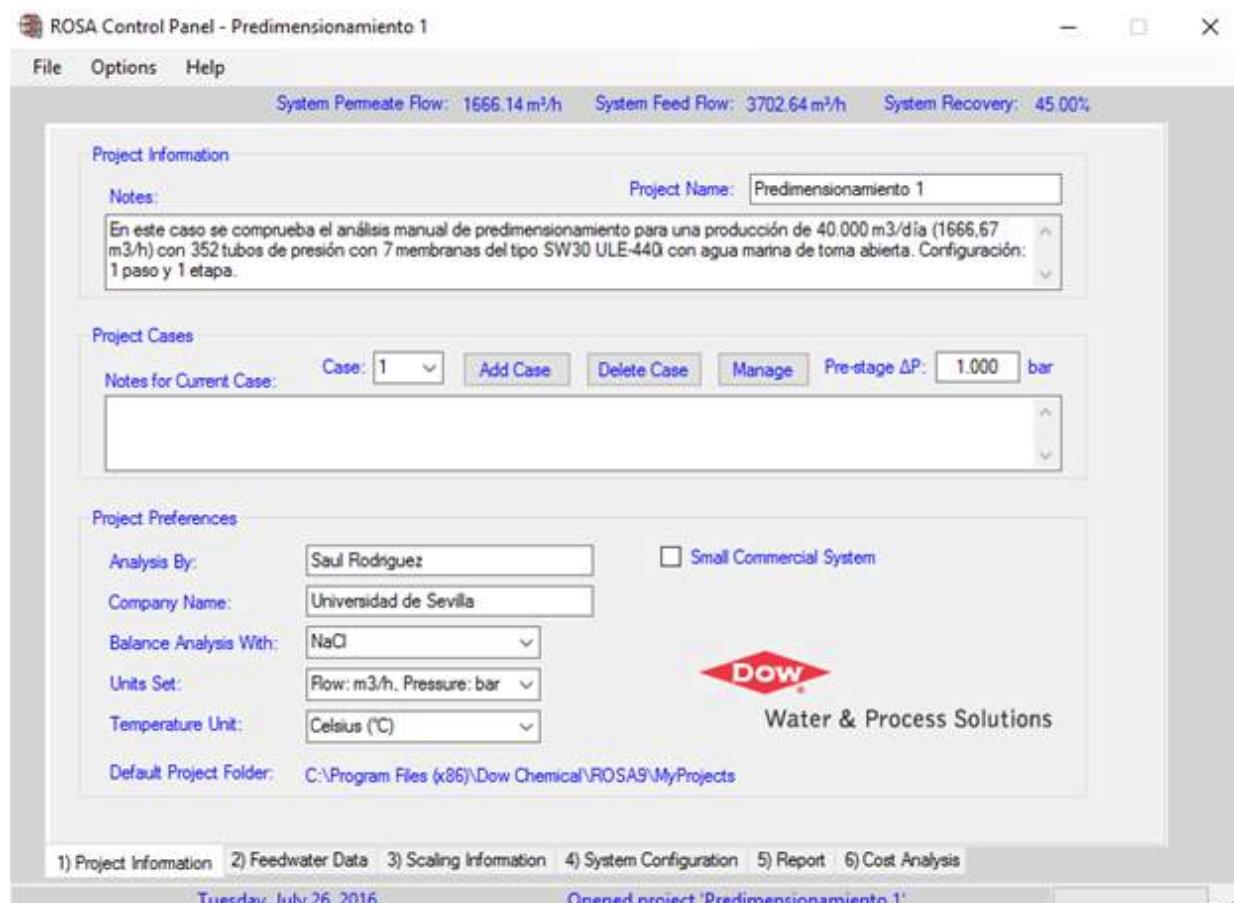


Ilustración 4. Pestaña 1: Información del proyecto

Hay que aclarar que en la Pestaña 1, se ha introducido el dato de que la caída de presión desde la impulsión de la bomba de alta presión hasta la alimentación de la membrana se produce una pérdida de carga de 1 bar (Pre-stage).



Ilustración 5. Pestaña 2: Datos de agua de alimentación

En la pestaña 2 se introducen los datos del análisis de agua de mar, tipo de agua, pH y temperatura.

En la pestaña 3, como se muestra a continuación, se ajusta la composición del agua pulsando en ion exchange softening. Esto quiere decir que se estima un pretratamiento típico al agua de alimentación para evitar incrustaciones y suciedad en las membranas.

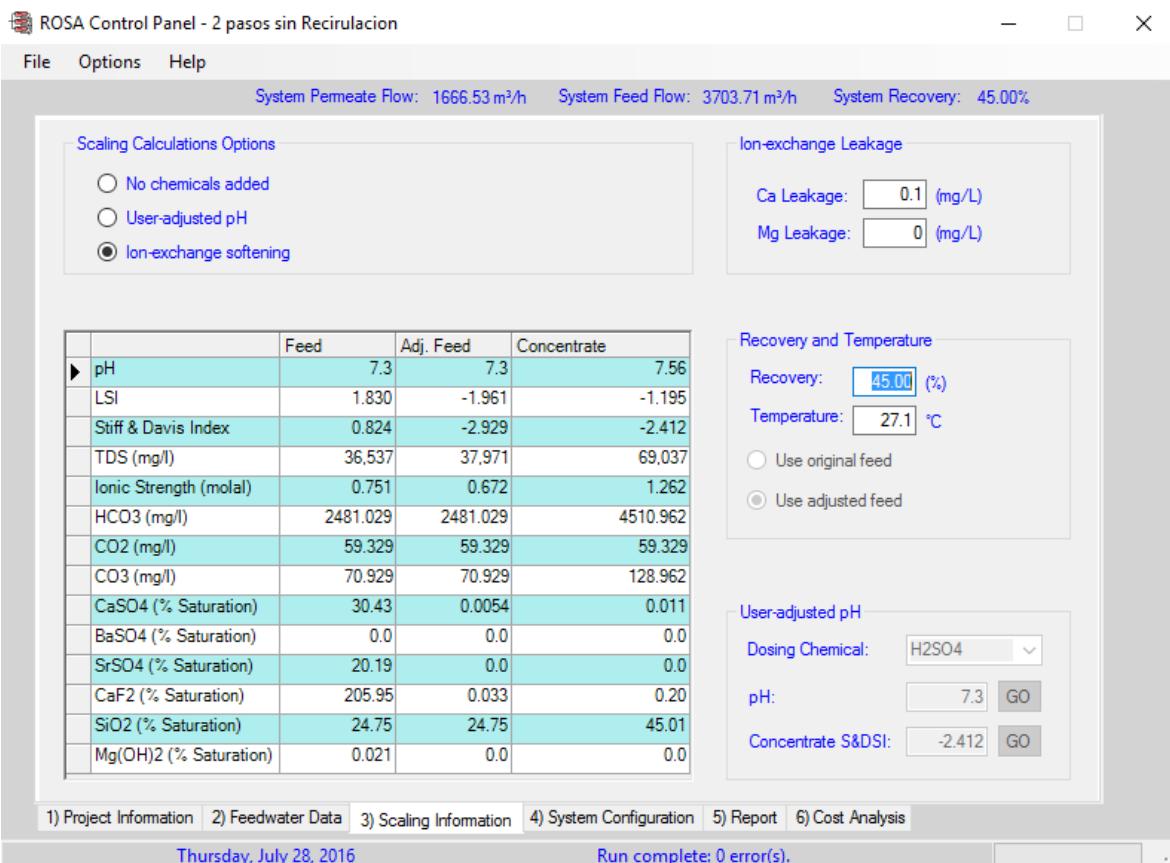


Ilustración 6. Pestaña 3: Ajuste de la composición y pH del agua de alimentación

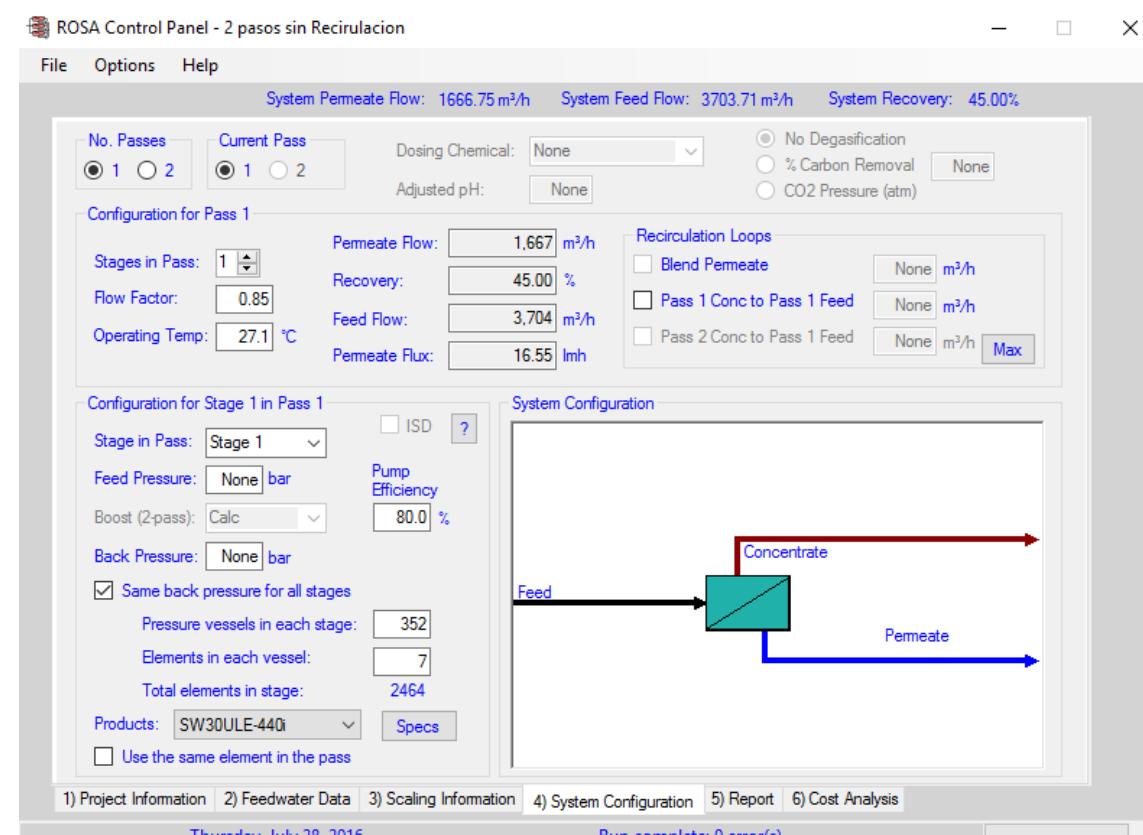


Ilustración 7. Pestaña 4: Configuración del sistema

En la pestaña 4, se ajusta la configuración del sistema, con los datos obtenidos anteriormente, planteando el sistema propuesto.

Hay que tener en cuenta que se estima un factor de ensuciamiento (FF) de 0.85.

Una vez introducidos todos los datos se pulsa en la pestaña 5, obteniendo los siguientes resultados.

Detalles del Sistema

Caudal de Alimentación a la 1 ^a Etapa	3703.71 m ³ /h	Caudal de Permeado Paso 1	1666.75 m ³ /h	Presión Osmótica:
Caudal de Agua Bruta al Sistema	3703.71 m ³ /h	Conversión Paso 1	45.00 %	Alimentación 27.57 bar
Presión de Alimentación	57.01 bar	Temperatura de Alimentación	27.1 C	Concentrado 51.52 bar
Factor de flujo	0.85	STD Alimentación	37970.51 mg/l	Media 39.55 bar
Dosificación Química	Ninguno	Número de Elementos	2464	NDP media 16.07 bar
Área Activa Total	100718.46 M ²	Flujo específico medio Paso 1	16.55 lmh	Potencia 7333.35 kW
Clasificación del Agua:Seawater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Energía Específica 4.40 kWh/m ³

Etapa	Elemento	Nº Cajas de presión	Nº Elementos	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	Presión de Alimentación (bar)	Caudal de Recirculación (m ³ /h)	Caudal de concentrado (m ³ /h)	Presión del concentrado (bar)	Caudal de Permeado (m ³ /h)	Flujo específico medio (lmh)	Presión de Permeado (bar)	Presión de Booster (bar)	Presión Permeado (mg/l)	STD
1	SW30ULE-440i	352	7	3703.71	56.01	0.00	2036.96	54.36	1666.75	16.55	0.00	0.00	429.17	

Advertencias de Diseño

ADVERTENCIA: la conversión máxima por elemento ha sido excedida. Por favor cambie el diseño de su sistema para reducir las conversiones de los elementos. (Producto:SW30ULE-440i, Límite:13.00%)
ADVERTENCIA: El caudal máximo por elemento ha sido excedido. Por favor cambie el diseño de su sistema para reducir los caudales de permeado de los elementos. (Producto:SW30ULE-440i, Límite:1.32m³/h)

Advertencias de Solubilidad

-Ninguno-

Detalles Etapa

Etapa 1	Elemento	Conversión	Caudal de Permeado (m ³ /h)	STD Permeado (mg/l)	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	STD Alimentación (mg/l)	Presión de Alimentación (bar)
1	0.13	1.39	171.65	10.52	37970.51	56.01	
2	0.12	1.07	243.49	9.14	43699.54	55.71	
3	0.10	0.80	352.33	8.06	49482.97	55.45	
4	0.08	0.58	516.95	7.26	54892.41	55.23	
5	0.06	0.41	761.39	6.68	59580.36	55.04	
6	0.05	0.29	1113.40	6.28	63394.20	54.87	
7	0.03	0.20	1591.95	5.99	66363.75	54.71	

Ilustración 8. Pestaña 5: Reporte de resultados

En la ilustración 6 se puede observar que se producen 2 advertencias de diseño, esto significa que el diseño planteado tiene irregularidades, de modo que habrá que configurar el sistema para resolverlo.

Las advertencias son:

- La conversión máxima por elemento ha sido excedida, siendo el límite 13%
- El caudal máximo por elemento ha sido excedido

Como se puede ver en la ilustración 6 ambas advertencias se han producido por el elemento 1, que es el único que no cumple ambos requisitos.

Otra observación que se puede hacer de este diseño es que para membranas consecutivas el caudal de permeado disminuye significativamente, al igual que la conversión por cada membrana y la presión de alimentación para cada membrana. Esto se debe a que a medida que aumenta el número de membranas, la salinidad de la alimentación se ve incrementada y la presión disminuye debido a las pérdidas de carga.

Lo ideal sería que el caudal por membrana y las presiones de alimentación fuesen los más parecidos posibles, balanceando el sistema. Esto podría hacerse diseñando el sistema de modo que las primeras membranas de un tubo de presión se instalen membranas de menor permeabilidad de agua e instalando membranas de permeabilidad mayor al final del tubo, como se estudiará en los próximos apartados.

Para solucionar las advertencias de diseño se realizan los siguientes cambios, al sistema anteriormente planteado:

- Número de tubos de presión: 370

- Conversión: 43.5 %

De este modo, incrementando el número de tubos de presión, se consigue reducir el caudal de agua de la primera membrana hasta niveles aceptables, aunque se produce cierto incremento de la conversión, por lo que se obliga a disminuir la conversión del sistema, para evitar que sigan saliendo advertencias de diseño.

A continuación se muestran los resultados de estos cambios.

Detalles del Sistema

Caudal de Alimentación a la 1 ^a Etapa	3831.79 m ³ /h	Caudal de Permeado Paso 1	1666.52 m ³ /h	Presión Osmótica:
Caudal de Agua Bruta al Sistema	3831.79 m ³ /h	Conversión Paso 1	43.49 %	Alimentación 27.57 bar
Presión de Alimentación	55.28 bar	Temperatura de Alimentación	27.1 C	Concentrado 50.03 bar
Factor de flujo	0.85	STD Alimentación	37970.51 mg/l	Media 38.80 bar
Dosificación Química	Ninguno	Número de Elementos	2590	NDP media 15.10 bar
Área Activa Total	105868.84 M ²	Flujo específico medio Paso 1	15.74 lmh	Potencia 7356.60 kW
Clasificación del Agua:Seawater with Conventional pretreatment, SDI < 5				Energía Específica 4.41 kWh/m ³

Etapa	Elemento	Nº Cajas de presión	Nº Elementos	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	Presión de Alimentación (bar)	Caudal de Recirculación (m ³ /h)	Caudal de concentrado (m ³ /h)	Presión del concentrado (bar)	Caudal de Permeado (m ³ /h)	Flujo específico medio (lmh)	Presión de Permeado (bar)	Presión de Booster (bar)	Presión Permeado (mg/l)	STD
1	SW30ULE-440i	370	7	3831.79	54.28	0.00	2165.27	52.83	1666.52	15.74	0.00	0.00	440.91	

Advertencias de Diseño

-Ninguno-

Advertencias de Solubilidad

-Ninguno-

Detalles Etapa

Etapa 1	Elemento	Conversión	Caudal de Permeado (m ³ /h)	STD Permeado (mg/l)	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	STD Alimentación (mg/l)	Presión de Alimentación (bar)
1	0.13	1.31	178.76	10.36	37970.51	54.28	
2	0.11	1.02	252.66	9.04	43459.75	53.98	
3	0.09	0.76	363.86	8.02	48932.73	53.73	
4	0.08	0.55	530.15	7.26	53999.49	53.51	
5	0.06	0.39	774.69	6.72	58366.36	53.32	
6	0.04	0.28	1123.33	6.33	61913.44	53.15	
7	0.03	0.20	1592.44	6.05	64680.39	52.98	

Ilustración 9. Resultados configuración final de predimensionamiento

7.2 Análisis de configuraciones y evaluación

Para el estudio se han realizado 8 diseños distintos, con configuraciones de membranas diferentes, dentro de los cuales, podemos distinguir:

- 4 diseños con membranas iguales.
- 4 sistemas híbridos, los cuales se caracterizan por introducir membranas diferentes en un mismo permeador.

Para el análisis se ha fijado las condiciones de partida del predimensionamiento, de modo que la recuperación es del 45%, el caudal de permeado es de 1666,67 m³/h y el factor de ensuciamiento es 0,85.

Los diseños estudiados son:

- **Diseño 1:** 7 membranas SW30ULE-440i
- **Diseño 2:** 7 membranas SW30ULE-400i
- **Diseño 3:** 7 membranas SW30XLE-440i
- **Diseño 4:** 7 membranas SW30HRLE-440i
- **Diseño 5:** 2 membranas SW30HRLE-440i + 5 membranas SW30ULE-440i

- **Diseño 6:** 2 membranas SW30XLE-440i + 5 membranas SW30ULE-440i
- **Diseño 7:** 2 membranas SW30HRLE-440i + 2 membranas SW30XLE-440i + 3 membranas SW30ULE-440i
- **Diseño 8:** 1 membranas SW30HRLE-440i + 1 membranas SW30XLE-440i + 5 membranas SW30ULE-440i

Las características de las membranas empleadas se pueden ver en el Anexo IV.

A continuación se muestran los resultados de los análisis realizados para los 4 primeros casos, para después compararlos entre sí.

Etapa	Elemento	Nº tubos de presión	Nº elementos por tubo	Caudal de alimentación	Presión de alimentación	Caudal de recirculación	Caudal de concentrado	Presión del concentrado	Caudal del permeado	Flujo específico medio	STD Permeado
---	---	---	---	m ³ /h	bar	m ³ /h	m ³ /h	bar	m ³ /h	Lmh	mg/L
1	SW30ULE-440i	352	7	3703,38	56,01	0	2036,78	54,56	1666,6	16,55	429,21

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado (m ³ /h)	STD Permeado (mg/L)	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	STD Alimentación (mg/L)	Presión de Alimentación (bar)
1	0,13	1,39	17,66	10,52	37970,51	56,01
2	0,12	1,07	243,50	9,14	43669,80	55,70
3	0,10	0,80	352,36	8,06	49483,43	55,45
4	0,08	0,58	517,02	7,26	54892,97	55,23
5	0,06	0,41	761,49	6,68	59580,85	55,04
6	0,05	0,29	1113,57	6,28	63394,54	54,87
7	0,03	0,20	1592,20	5,99	66363,90	54,71
TOTAL STD PERMEADO:		429,21	ppm			

Tabla 9. Diseño 1: 7 membranas SW30ULE-440i por permeador.

Etapa	Elemento	Nº tubos de presión	Nº elementos por tubo	Caudal de alimentación	Presión de alimentación	Caudal de recirculación	Caudal de concentrado	Presión del concentrado	Caudal del permeado	Flujo específico medio	STD Permeado
---	---	---	---	m ³ /h	bar	m ³ /h	m ³ /h	bar	m ³ /h	Lmh	mg/L
1	SW30ULE-400i	352	7	3703,38	57,13	0,00	2036,81	55,50	1666,57	18,20	391,44

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado (m ³ /h)	STD Permeado (mg/L)	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	STD Alimentación (mg/L)	Presión de Alimentación (bar)
1	0,13	1,33	162,35	10,52	37970,51	57,13
2	0,11	1,05	255,75	9,19	43451,96	56,79
3	0,10	0,80	319,20	8,13	49039,87	56,50
4	0,08	0,60	454,65	7,33	54365,27	56,26
5	0,06	0,43	664,87	6,73	59145,24	56,04
6	0,05	0,30	958,88	6,31	63087,72	55,85
7	0,04	0,22	1362,93	6,00	66227,53	55,67
TOTAL STD PERMEADO:		391,44	ppm			

Tabla 10. Diseño 2: 7 membranas SW30ULE-400i por permeador.

Etapa	Elemento	Nº tubos de presión	Nº elementos por tubo	Caudal de alimentación	Presión de alimentación	Caudal de recirculación	Caudal de concentrado	Presión del concentrado	Caudal del permeado	Flujo específico medio	STD Permeado
---	---	---	---	m ³ /h	bar	m ³ /h	m ³ /h	bar	m ³ /h	Lmh	mg/L
1	SW30XLE-440i	352	7	3703,09	58,37	0,00	2036,84	56,89	1666,54	16,55	238,32

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado (m ³ /h)	STD Permeado (mg/L)	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	STD Alimentación (mg/L)	Presión de Alimentación (bar)
1	0,12	1,28	101,85	10,52	37970,51	58,37
2	0,11	1,03	138,37	9,25	43190,24	58,06
3	0,10	0,81	191,78	8,21	48593,58	57,80
4	0,08	0,61	270,78	7,41	53859,00	57,58
5	0,07	0,45	385,69	6,80	58659,36	57,38
6	0,05	0,32	552,10	6,35	62772,82	57,21
7	0,04	0,24	776,86	6,02	66121,33	57,04
TOTAL STD PERMEADO:		238,32	ppm			

Tabla 6. Diseño 3: 7 membranas SW30XLE-440i por permeador.

Etapa	Elemento	Nº tubos de presión	Nº elementos por tubo	Caudal de alimentación	Presión de alimentación	Caudal de recirculación	Caudal de concentrado	Presión del concentrado	Caudal del permeado	Flujo específico medio	STD Permeado
---	---	---	---	m ³ /h	bar	m ³ /h	m ³ /h	bar	m ³ /h	Lmh	mg/L
1	SW30HRL E-440i	352	7	3703,38	61,04	0,00	2037,14	59,53	1666,24	16,54	199,70

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado (m ³ /h)	STD Permeado (mg/L)	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	STD Alimentación (mg/L)	Presión de Alimentación (bar)
1	0,11	1,17	91,61	10,52	37970,51	61,04
2	0,11	0,99	119,73	9,35	42725,70	60,73
3	0,10	0,80	159,46	8,36	47746,23	60,46
4	0,08	0,64	216,13	7,56	52805,09	60,23
5	0,07	0,49	297,10	6,92	57633,12	60,03
6	0,06	0,37	411,85	6,43	61990,68	59,85
7	0,05	0,27	572,11	6,06	65729,99	59,69
TOTAL STD PERMEADO:		199,70	ppm			

Tabla 11. Diseño 4: 7 membranas SW30HRLE-440i por permeador.

En base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que las membranas ULE (Diseños 1 y 2) requieren menor presión de alimentación para conseguir producir una cantidad de agua permeada determinada a costa de mantener un alto flujo sobre la primera membrana del permeador y con ello una peor calidad del agua producto.

Los diseños 1 y 2, sobrepasan los valores de caudal máximo para el primer elemento del permeador, siendo el flujo máximo para el diseño 1 de 1,32 m³/h y el máximo para el diseño 2 de 1,20 m³/h. De modo que en estas configuraciones, las membranas tienen un serio problema de diseño y, si se instalaran, podrían producirse importantes efectos de polarización que resultarían en un rápido ensuciamiento de las membranas.

Para corregir estos problemas de diseño habría que aumentar el número de membranas o incluso disminuir la conversión global de las planta, tal y como se observó en el caso de Predimensionamiento. Sin embargo, para el diseño 2 el número de membranas aumentaría mucho más que para el diseño 1, ya que las membranas tienen menor área activa.

Por otro lado, los diseños 3 y 4, con membranas XLE y HRLE tienen mayores presiones (3-4 bar) de alimentación que las ULE, ya que son membranas de menor permeabilidad, pero también producen un permeado de mayor calidad, siendo la cantidad de TDS obtenida en el permeado prácticamente la mitad que en el caso de membranas ULE.

Estos diseños cumplen con los criterios de caudal máximo por membrana y conversión por membranas, por lo que no se producirían los problemas de diseño que ocasionaban las membranas ULE para la misma configuración.

A continuación se muestran los resultados de los diseños híbridos. Estos diseños, como ya se ha comentado anteriormente, se estudian para mejorar el balance de permeado usando membranas de menor permeabilidad a la entrada del tubo de presión y membranas de mayor permeabilidad a la salida del tubo de presión, consiguiendo de este modo un modo de funcionamiento más seguro para las membranas, disminuyendo los efectos de polarización y con ello el ensuciamiento.

Etapa	Elemento	Nº tubos de presión	Nº elementos por tubo	Caudal de alimentación	Presión de alimentación	Caudal de recirculación	Caudal de concentrado	Presión del concentrado	Caudal del permeado	Flujo específico medio	STD Permeado
---	---	---	---	m ³ /h	bar	m ³ /h	m ³ /h	bar	m ³ /h	Lmh	mg/L
1	SW30HRLE-440i	352	2	3703,38	58,04	0,00	2994,10	57,46	709,28	24,65	109,69
2	SW30ULE-440i	352	5	2994,10	56,46	0,00	2036,97	55,53	957,13	13,30	561,75

Elemento	Conversion	Caudal de Permeado (m ³ /h)	STD Permeado (mg/L)	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	STD Alimentación (mg/L)	Presión de Alimentación (bar)
1	0,10	1,09	96,68	10,52	37970,51	58,04
2	0,10	0,92	125,16	9,43	42362,97	57,73
1	0,11	0,95	289,17	8,51	46929,01	56,46
2	0,09	0,69	425,02	7,55	52815,94	56,22
3	0,07	0,49	631,49	6,86	58115,51	56,02
4	0,05	0,34	937,55	6,37	62538,32	55,85
5	0,04	0,24	1371,51	6,02	66022,41	55,68
TOTAL STD PERMEADO:		369,89	ppm			

Tabla 12. Diseño 5: 2 membranas SW30HRLE-440i + 5 membranas SW30ULE-440i

Etapa	Elemento	Nº tubos de presión	Nº elementos por tubo	Caudal de alimentación	Presión de alimentación	Caudal de recirculación	Caudal de concentrado	Presión del concentrado	Caudal del permeado	Flujo específico medio	STD Permeado
---	---	---	---	m ³ /h	bar	m ³ /h	m ³ /h	bar	m ³ /h	Lmh	mg/L
1	SW30XLE-440i	352	2	3703,38	57,44	0,00	2906,91	56,87	796,47	27,68	119,75
2	SW30ULE-440i	352	5	2906,91	55,87	0,00	2037,14	54,96	869,77	12,09	619,69

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado (m ³ /h)	STD Permeado (mg/L)	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	STD Alimentación (mg/L)	Presión de Alimentación (bar)
1	0,12	1,25	103,36	10,52	37970,51	57,44
2	0,11	1,01	140,00	9,27	73072,23	57,13
1	0,11	0,87	312,04	8,26	48328,59	55,87
2	0,09	0,63	471,89	7,39	53980,00	55,65
3	0,07	0,44	699,53	6,76	58959,75	55,45
4	0,05	0,31	1032,04	6,31	63046,31	55,28
5	0,04	0,22	1495,47	6,00	66236,45	55,12
TOTAL STD PERMEADO:		379,7	ppm			

Tabla 13. Diseño 6: 2 membranas SW30XLE-440i + 5 membranas SW30ULE-440i

Etapa	Elemento	Nº tubos de presión	Nº elementos por tubo	Caudal de alimentación	Presión de alimentación	Caudal de recirculación	Caudal de concentrado	Presión del concentrado	Caudal del permeado	Flujo específico medio	STD Permeado
---	---	---	---	m ³ /h	bar	m ³ /h	m ³ /h	bar	m ³ /h	Lmh	mg/L
1	SW30HRL E-440i	352	2	3703,38	59,40	0,00	2969,35	58,81	734,03	25,51	107,06
2	SW30XLE-440i	352	2	2969,35	57,81	0,00	2435,93	57,38	533,42	18,54	207,89
3	SW 30ULE-440i	352	3	2435,93	56,38	0,00	2036,92	55,89	399,01	9,24	845,06

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado (m ³ /h)	STD Permeado (mg/L)	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	STD Alimentación (mg/L)	Presión de Alimentación (bar)
1	0,11	1,13	94,14	10,52	37970,51	59,40
2	0,10	0,95	122,43	9,39	42536,91	59,08
1	0,10	0,86	176,80	8,44	47319,30	57,81
2	0,09	0,65	248,78	7,57	52668,68	57,58
1	0,08	0,52	595,35	6,92	57619,35	56,38
2	0,06	0,36	886,35	6,40	62245,99	56,20
3	0,04	0,25	1301,55	6,04	65915,59	56,04
TOTAL STD PERMEADO:		315,78	ppm			

Tabla 14. Diseño 7: 2 membranas SW30HRLE-440i + 2 membranas SW30XLE-440i + 3 membranas SW30ULE-440i

Etapa	Elemento	Nº tubos de presión	Nº elementos por tubo	Caudal de alimentación	Presión de alimentación	Caudal de recirculación	Caudal de concentrado	Presión del concentrado	Caudal del permeado	Flujo específico medio	STD Permeado
---	---	---	---	m ³ /h	bar	m ³ /h	m ³ /h	bar	m ³ /h	Lmh	mg/L
1	SW30HRL E-440i	352	1	3703,38	58,70	0,00	3311,48	58,38	391,90	27,24	95,39
2	SW30XLE-440i	352	1	3311,48	57,38	0,00	2942,73	57,12	368,75	25,63	134,15
3	SW 30ULE-440i	352	5	2942,73	56,12	0,00	2037,01	55,20	905,72	12,59	594,43

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado (m ³ /h)	STD Permeado (mg/L)	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	STD Alimentación (mg/L)	Presión de Alimentación (bar)
1	0,11	1,11	95,39	10,52	37970,51	58,70
1	0,11	1,05	134,15	9,41	42449,47	57,38
1	0,11	0,90	307,65	8,36	47744,02	56,12
2	0,09	0,66	451,80	7,46	53484,65	55,89
3	0,07	0,46	669,08	6,80	58590,92	55,69
4	0,05	0,32	988,48	6,34	62819,59	55,52
5	0,04	0,23	1435,14	6,01	66138,43	55,35
TOTAL STD PERMEADO:		375,47	ppm			

Tabla 15. Diseño 8: 1 membranas SW30HRLE-440i + 1 membranas SW30XLE-440i + 5 membranas SW30ULE-440i

En los diseños con configuración híbrida, en ninguno de los casos estudiados se sobrepasa el caudal de permeado máximo en la primera membrana. También se observa que para todos los casos la concentración del permeado se encuentra por debajo de los 400ppm, de modo que, en principio, el agua podría emplearse como agua potable, aunque aún queda revisar si cumple todas las especificaciones que requiere el agua potable, lo cual se mostrará más adelante.

La presión de alimentación en éstos últimos diseños se encuentra entre los 56,87-58,38 bar, de modo que es inferior a la presión de alimentación del diseño 4 (59,53 bar) y similar al diseño 3 (56,89).

Las siguientes ilustraciones muestran la evolución del caudal de permeado y la presión de alimentación para cada diseño en cada una de las membranas. Para una disposición dada, cuanto mayor es el caudal de permeado mayor es la exposición de la membrana al ensuciamiento. Esta es la razón por la que no se emplean bastidores con todas las membranas tipo ULE, ya que implica valores de permeado muy alto en las primeras membranas. Razón por la que los diseños 1 y 2 no serían adecuados, como ya se comentó anteriormente al comentar los resultados de los respectivos análisis.

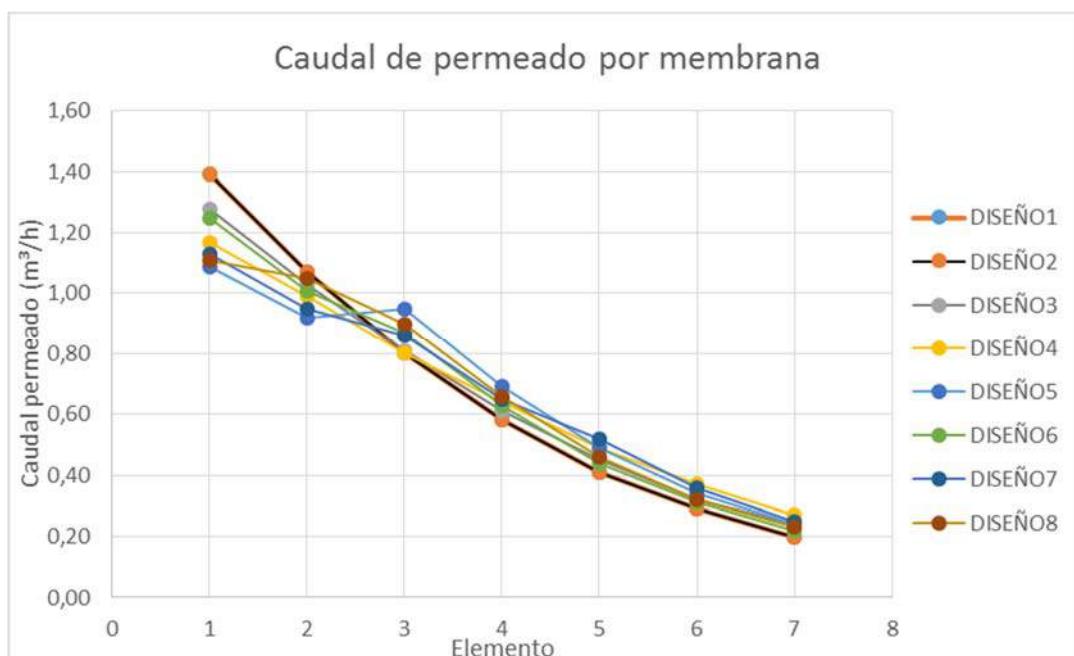


Ilustración 10. Caudal de permeado por membrana para cada configuración.

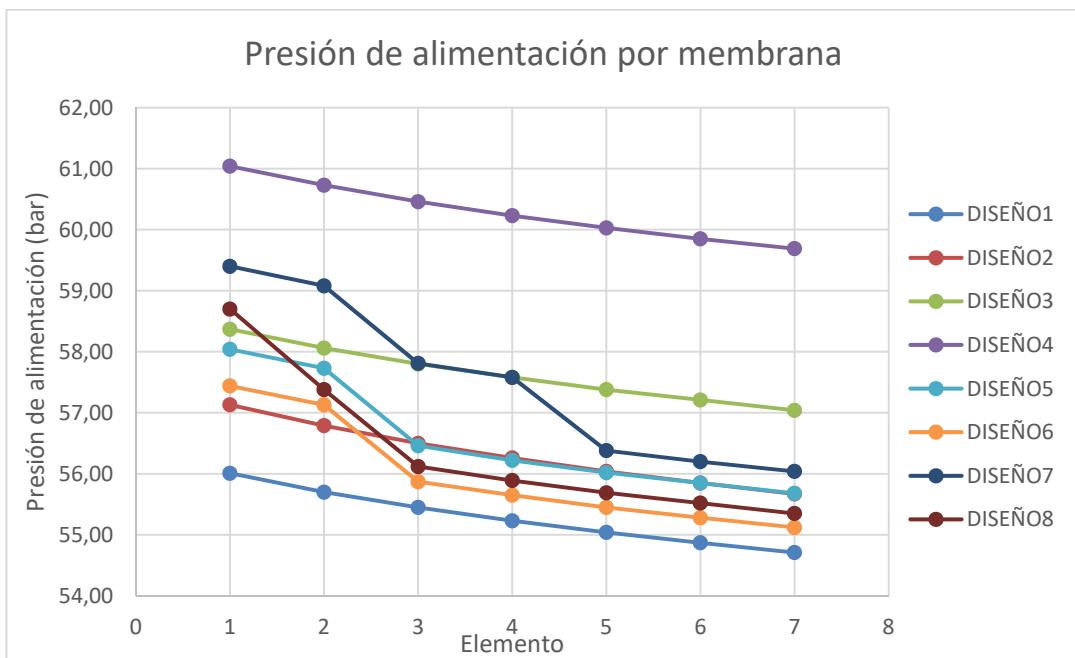


Ilustración 11. Presión de alimentación por membrana para cada configuración.

Para la selección del mejor diseño, se va a seguir el siguiente criterio:

- No excede el caudal máximo permitido por membrana.
- Mayores conversiones por membrana.
- Menor presión de entrada.
- Caudal de permeado por membrana más cercano entre elemento 1 y elemento 7.

Dicho esto, la configuración que mejor cumple con esta disposición es el Diseño 5 (2 membranas SW30HRLE-440i + 5 membranas SW30ULE-440i)

La siguiente tabla muestra otras características principales de cada diseño.

Diseño	Presión de alimentación (bar)	Flujo específico medio (l/mh)	Potencia (kW)	Energía Específica (kWh/m ³)	TDS concentrado	TDS Permeado
					(ppm)	(ppm)
1	57,01	16,55	7332,55	4,40	68688,77	429,21
2	58,13	18,20	7476,01	4,49	68719,67	391,44
3	59,37	16,55	7636,21	4,58	68844,96	238,32
4	62,04	16,54	7978,96	4,79	68876,56	199,70
5	59,04	18,13	7593,46	4,56	68737,80	369,28
6	58,44	19,54	7516,66	4,51	68728,49	380,66
7	60,40	14,56	7767,72	4,66	68781,43	315,96
8	59,70	16,36	7677,85	4,61	68733,00	375,15

Tabla 16. Características de diferentes diseños con membranas Filmtec.

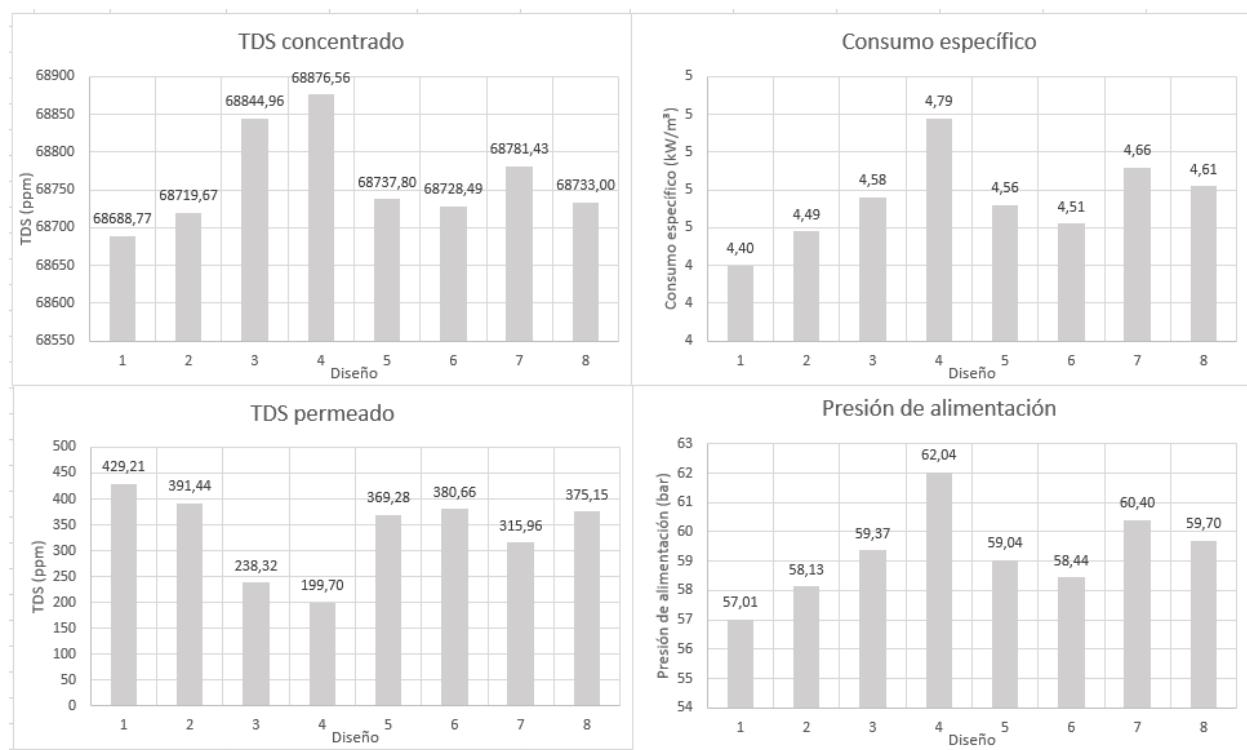


Ilustración 12. Gráficas comparativas de diferentes diseños Filmtec.

Como se observa en las gráficas, la calidad del permeado es directamente proporcional a la presión de alimentación y al consumo específico, e inversamente proporcional a la concentración del concentrado.

A continuación se muestra un análisis de la composición del agua permeada para los diferentes diseños, en la que se compara la calidad del agua con la exigida según la Barbados Water Authority y cumpliendo el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad de agua de consumo humano.

Ión	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4	Diseño 5	Diseño 6	Diseño 7	Diseño 8	Normativa
Amonio (NH4 ⁺)	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
Potasio (K ⁺)	6,34	5,77	3,51	2,94	5,46	5,63	4,67	5,55	---
Sodio (Na ⁺)	155,14	141,4	85,72	71,78	133,4	137,53	114,04	135,56	200
Magnesio (Mg ²⁺)	0	0	0	0	0	0	0	0	---
Calcio (Ca ²⁺)	0	0	0	0	0	0	0	0	---
Estroncio (Sr ²⁺)	0	0	0	0	0	0	0	0	---
Bario (Ba ²⁺)	0	0	0	0	0	0	0	0	---
Carbonato (CO3 ²⁻)	0	0	0	0	0	0	0	0	---
Bicarbonato (HCO3 ⁻)	34,6	31,62	19,25	16,18	29,74	30,63	25,42	30,2	---
Nitrato (NO3 ⁻)	0,31	0,28	0,18	0,15	0,27	0,28	0,23	0,27	8
Cloro (Cl ⁻)	220,21	200,65	121,68	101,9	189,39	195,27	161,95	192,43	250
Flúor (F ⁻)	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	1,5
Sulfato (SO4 ²⁻)	6,11	5,57	3,35	2,81	5,23	5,39	4,46	5,31	250
Sílice (SiO2 ⁻)	0,62	0,57	0,35	0,29	0,54	0,55	0,46	0,55	---
Boro (B ³⁺)	1,02	0,97	0,75	0,64	0,92	0,94	0,82	0,93	1
CO2	69	69,1	69,42	69,52	69,14	69,12	69,29	69,11	---
STD	429,21	391,44	238,32	199,70	369,28	380,66	315,96	375,15	500
pH	5,82	5,78	5,58	5,51	5,76	5,77	5,69	5,76	6,5-8,5

Tabla 17. Calidad del permeado (expresado en ppm) para las diferentes configuraciones en un paso.

Evaluación de la configuración:

- Los diseños 1 y 2 no son aptos para obtener la calidad de agua deseada con el agua de alimentación que llega a planta. Esto es debido a que son membranas de alta permeabilidad y tienen tendencia a ensuciarse fácilmente con un agua de alimentación demasiado salina.
- Los diseños 3 y 4 son las mejores configuraciones desde el punto de vista cualitativo, ya que son configuraciones estándar ampliamente utilizadas.
- Desde el punto de vista energético, las mejores configuraciones son la 1 y 2, pero como se ha comentado anteriormente no son válidas para este proyecto. Le siguen las configuraciones 6 y 5, respectivamente.
- La configuración que tiene un mejor balance de flujo es la número 5, ya que la diferencia entre el caudal permeado por la primera membrana y por la última es la menor, como se observa gráficamente en la Ilustración 8.
- Se selecciona la configuración 5 ya que es la más completa, teniendo en cuenta todos los aspectos (calidad del permeado, presión de alimentación, balance de flujo,...).
- En cuanto a los criterios del RD 140/2003, del 17 de febrero, por el que se establecen los criterios de la calidad del agua de consumo humano:
 - Ninguna de las configuraciones estudiadas cumple con los valores de pH requerido. Este valor se ajustaría en el post-tratamiento, dosificando los aditivos que mejor convengan.
 - Solo la configuración 1 no cumple el requisito de obtener un permeado con una concentración de menos de 1ppm de Boro, como establece el RD 140/2003, de modo que si se hubiera elegido este diseño, habría que diseñar un sistema de 2 pasos, para reducir la concentración de boro del permeado, pero como se dijo anteriormente, este diseño fue descartado.

Definitivamente la configuración seleccionada produce un permeado que, tras el post-tratamiento para ajustar el pH, cumple los requisitos impuestos por la Barbados wáter authority y el RD 140/2003, por el que se establecen los criterios de calidad del agua de consumo humano.

A continuación se muestra un resumen de la configuración adoptada.

RESUMEN DE DISEÑO DE LA PLANTA		
Periodo de Funcionamiento	24	h/día
Caudal Permeado Total	1666,67	m ³ /h
Conversión Total	45	%
Caudal Agua Bruta Total	3703,38	m ³ /h
Caudal Rechazo Total	2036,71	m ³ /h
Tipo y modelo de membrana 1	SW30HRLE-440i	
Tipo y modelo de membrana 2	SW30ULE-440i	
Nº total de Membranas	2464	ud
Nº Membranas tipo 1	704	ud
Nº Membranas tipo 2	1760	ud
Configuración Tubo Presión		
SW30HRLE-440i	2	ud
SW30ULE-440i	5	ud
Nº Pasos	1	ud
Nº Etapas	1	ud
Caudal de permeado por bastidor	208,33	m ³ /h
Nº bastidores	8	ud
Nº tubos de presión por bastidos	308	ud
TDS Permeado	369,28	ppm
TDS Rechazo	68737,8	ppm
Potencia de Bombeo	7593,46	kW
Presión entrada	59,04	bar
Consumo específico	4,56	kWh/m3

Tabla 18. Configuración final adoptada de las membranas de osmosis inversa.

8 BOMBEO A ALTA PRESIÓN Y RECUPERACIÓN ENERGÉTICA

Para la configuración de membranas adoptada en las simulaciones realizadas se ha obtenido que la presión a la que se impulsa el agua de alimentación en la bomba es de 59,04bar. Siendo la pérdida de carga hasta la que la alimentación llega a la primera membrana de 1 bar, la alimentación llega a 58,04bar de presión.

A continuación se calculará la potencia necesaria para impulsar la alimentación a alta presión y la potencia recuperada, de modo que se dimensionará la potencia necesaria para el motor de las bombas de impulsión.

La potencia necesaria para las bombas de alta presión tendrá en cuenta los siguientes factores:

- Caudal total: 3704 m³/h
- Densidad del agua: 1020 kg/m³
- Presión máxima de impulsión: 60 bar
- Eficiencia de la bomba: 88,3 %
- Eficiencia del motor: 90 %

La potencia necesaria será:

$$Potencia\ total = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot h}{\eta_{bomba} \cdot \eta_{motor}} = \frac{1020 \cdot 9,81 \cdot 1,029 \cdot 588,23}{0,883 \cdot 0,9 \cdot 1000} = 7618,4\ kW$$

$$Potencia\ motor = Potencia\ total / N^{\circ} Motores = 7618,4 / 4 = 1904,6\ kW$$

Para calcular la potencia recuperada por la turbina Pelton habrá que tener en cuenta los siguientes factores:

- Caudal de rechazo: 2036,4 m³/h = 0,565 m³/s
- Densidad rechazo: 1040 kg/ m³
- Presión de salmuera a la salida del bastidor: 55,53 bar
- ΔP: 55,53-1= 54,53 bar =575,84 m.c.a.
- Eficiencia de la turbina: 85 %
- Eficiencia del motor: 90%

La potencia recuperada será:

$$Potencia\ recuperada = \frac{1037 \cdot 9,8 \cdot 0,565 \cdot 575,84 \cdot 0,85 \cdot 0,9}{1000} = 2445,2\ kW$$

La potencia necesaria a aportar finalmente para aumentar la presión será de:

$$Potencia necesaria = Pot. Total - Pot. recuperada = 7618,4 \text{ kW} - 2445,2 \text{ kW} = 5173,2 \text{ kW}$$

El resto de especificaciones técnicas de los equipos se encuentran en el Anexo IV: Hojas de datos de equipos.

9 EQUIPOS DE LIMPIEZA QUÍMICA Y DESPLAZAMIENTO

Como se comentó anteriormente, en operación normal las membranas semipermeables de osmosis inversa se ensucian debido a incrustaciones, partículas colidales, materia biológica, etc.

Los elementos deben ser limpiados cuando se cumplan uno o más de los siguientes parámetros mencionados:

- El flujo de permeado normal caiga un 10%
- El paso de sal normal aumente entre un 5 - 10%
- La caída de presión normal aumente un 10 - 15%

Si pasa demasiado tiempo sin limpiar en las condiciones anteriormente expuestas, tras la limpieza la membrana no recuperará el rendimiento necesario. Además el tiempo entre limpiezas será cada vez más pequeño.

Para realizar la limpieza química según el fabricante Filmtec son necesarios los siguientes equipos:

- Depósito de limpieza química: Depósito donde se preparan las soluciones químicas necesarias para la limpieza.
- Bombas de lavado: Bombas impulsar los fluidos de lavado químico y el agua de desplazamiento.
- Filtros de cartucho: Para realizar una filtración de seguridad de los fluidos a introducir en los bastidores de osmosis.

9.1 Depósito de limpieza química y desplazamiento

Para la limpieza de las membranas se usará limpieza ácida o alcalina según convenga, aunque lo normal es que se realicen ambas. Para la limpieza ácida se usará una solución de HCl, mientras que para la limpieza alcalina se dosifica una solución de NaOH. La solución se prepara en un tanque de mezcla con agua permeada que viene del tanque de desplazamiento, el cual se alimenta del tanque de agua permeada.

El tanque de mezcla debe estar construido de plástico de polipropileno reforzado con fibra de vidrio (PRFV). El tanque debe estar provisto de una cubierta extraible y un indicador de temperatura. El procedimiento de limpieza es más eficaz cuando se realiza a una temperatura cálida, y se recomienda que la solución se mantenga de acuerdo con las directrices de pH y temperatura listados en la Tabla 6 del Anexo V. No se recomienda utilizar una temperatura de limpieza por debajo de 20 ° C, debido a una cinética química muy lenta a bajas temperaturas. Una regla empírica en el dimensionamiento de un tanque de limpieza es utilizar aproximadamente el volumen de los recipientes a presión vacíos y luego añadir el volumen de la alimentación y retorno de tuberías.

En este caso el dimensionamiento volumen del depósito para la limpieza de un rack se calculará del siguiente modo:

- Volumen en tubos:

$$V_{tubos} = N^o \text{ tubos} \cdot Volumen \text{ tubo} = 352 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L = 44 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,2032^2}{4} \cdot 7,4 = 10,55m^3$$

- Volumen en tuberías (asumiendo 70m de tubo de diámetro sch80):

$$V_{tuberias} = Longitud \text{ tubos} \cdot Volumen \text{ tubo} = 62,5 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,1016^2}{4} = 0,51m^3$$

El volumen total del depósito de limpieza química será de 12 m³.

En caso de parada o fallo de la planta, el depósito de desplazamiento, deberá llenar las membranas de osmosis de agua permeada, realizando un desplazamiento del agua contenida en su interior con el objetivo de homogeneizar las concentraciones, preservando las membranas de corrosión y precipitaciones indeseadas. Dicho depósito deberá tener el volumen suficiente para llenar todos los racks de membranas, de modo que tendrá un volumen de 90 m³.

9.2 Bombas de limpieza química y desplazamiento

La bomba de limpieza debe ser dimensionada para los flujos y presiones dadas en la Tabla 7 del Anexo V, teniendo en cuenta la pérdida de presión en la tubería y a través del filtro de cartucho. La bomba debe estar construida de acero inoxidable 316 o poliésteres.

Las válvulas, medidores de flujo y manómetros deben ser instalados para controlar adecuadamente el flujo. En cualquier caso, la velocidad de flujo debe ser de 3 m/s o menor.

Dimensionando las bombas según la Tabla 7 del Anexo V, es necesario instalar 2 bombas (1+1R) de 10 m³/h. Con una presión de impulsión de entre 1,5 y 4 bar.

9.3 Filtros de cartucho

Se instalarán 2 filtros de cartucho (1+1R) con caudal unitario de 10 m³/h.

El resto de especificaciones técnicas de los equipos se encuentran en el Anexo IV: Hojas de datos de equipos.

10 POST-TRATAMIENTO

El post-tratamiento tiene como objetivo la remineralización del agua desalada. Para ello es necesario aumentar la dureza cárquica y la alcalinidad del agua desalada hasta valores que permitan alcanzar un LSI próximo a cero ($-0,5 < \text{LSI} < +0,5$). En algunos casos también se busca que el agua sea estable en contacto con la atmósfera.

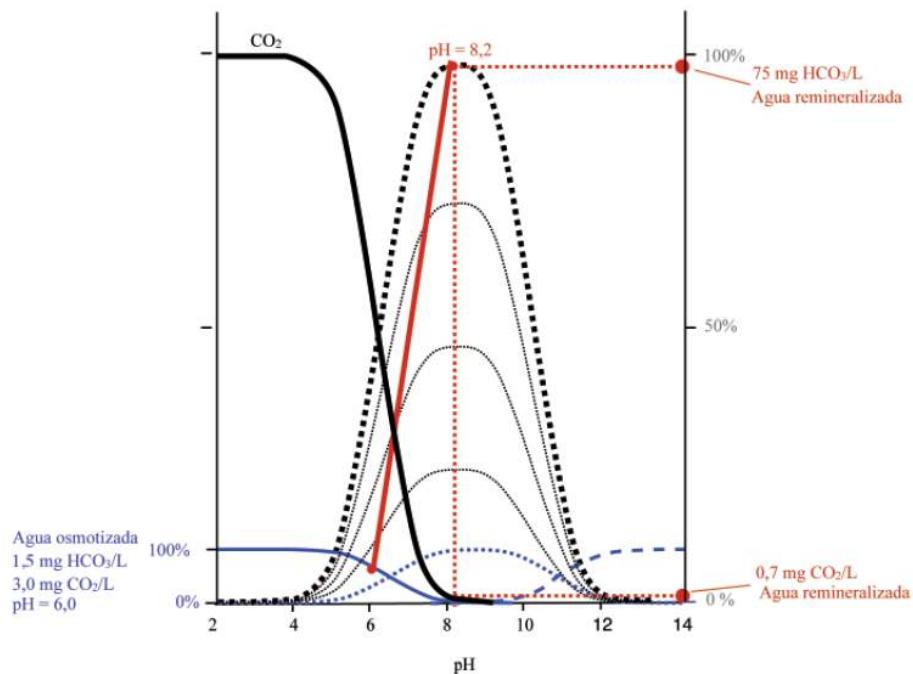


Ilustración 13. Efecto de la remineralización.

Las diferentes técnicas disponibles para la remineralización son:

1. Adición de Carbonato cálcico y dióxido de carbono.
2. Adición de Hidróxido cálcico y dióxido de carbono.
3. Adición de Dolomita y Dióxido de carbono.
4. Adición de Carbonato cálcico y Ácido sulfúrico
5. Adición de Cloruro cálcico y Bicarbonato sódico.

Las más utilizadas en la práctica son las técnicas 1 y 2. Para la planta que se está diseñando se ha elegido la técnica 1, de modo que se procede a dimensionar los equipos necesarios.

10.1 Dosificación de CO₂

Para realizar la remineralización en primer lugar se realiza la dosificación del CO₂. Para ello el agua permeada deberá atravesar los disolvedores de CO₂ de baja presión.

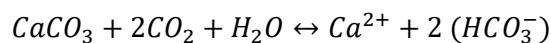
Los dosificadores de CO₂ están compuestos de los siguientes elementos:

- Un depósito disolvedor, en el cual el CO₂ se dosifica a contracorriente. La velocidad del agua en el disolvedor debe mantenerse en $0,07 \pm 0,02$ m/s para evitar así el arrastre de burbujas. La presión diferencial del agua y la del gas debe ser del orden de 0,25bar. Debe disponer de un número suficiente de difusores de CO₂ de baja presión para garantizar una dosificación correcta aún a dosis elevadas. Dispondrá de dispositivos interiores que faciliten la mezcla de las burbujas de CO₂.
- Difusores de CO₂, con tamaño de poros que permiten la dosificación con una pérdida de carga mínima.
- Visor de burbujas: Está situado a lo largo de la pared del tanque como una franja semitransparente que permite visualizar el CO₂ no disuelto.

La dosificación necesaria de CO₂ dependerá del consumo de calcita, de modo que se calcula en el siguiente subapartado.

10.2 Filtros de calcita

La reacción que se lleva a cabo en éste proceso es la siguiente:



El material filtrante es calcita granulada con pureza del 99% y tamaño de partículas entre 1 y 4 mm.

Planteando aumentar el pH desde 5,5, se prevee una dosis media de 50ppm=50 g/m³. De modo que la cantidad de Calcita consumida será:

$$Consumo\ Calcita = 0,050 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot 1666,67 \left(\frac{m^3}{h} \right) = 83,33 \frac{kg}{h}$$

Aplicando estequiométría se calcula la necesidad de consumo de CO₂, descrito anteriormente:

$$Consumo\ CO_2 = 83,33 \frac{kg}{h} \cdot 0,44 = 36,66 \frac{kg}{h}$$

Para determinar el número de lechos necesarios y las dimensiones de los mismos se considera que:

- Caudal a tratar: 1666,67 m³/h
- Velocidad ascensional: 8-15 m/h (15 m/h la más desfavorable)
- Superficie unitaria de cada lecho: (2,5 x 8) m²
- Tiempo necesario de contacto: 8-12 min (12 min la más desfavorable)

La situación más desfavorable que deben soportar los lechos es remineralizar todo el caudal, a una velocidad de 15 m/h, en 12 minutos. Luego, si se considera que cada módulo dispone de una superficie de 20 m² de superficie, se debe disponer de:

$$\text{Superficie necesaria} = \frac{1666,7 \frac{m^3}{h}}{15 \frac{m}{h}} = 111,1 m^2$$

$$\text{Número de lechos} = \frac{111,1 m^2}{20 m^2} = 5,55 \approx 6$$

$$\text{Altura de lecho} = \frac{15 \frac{m}{h}}{60} \cdot 12 \text{min} = 3 \text{m}$$

Se dispondrán 7 lechos de calcita (6+1R) de (2,5m x 8m) de base, y una altura de 3 metros, con un caudal unitario por lecho de 277,78 m³/h, a una velocidad máxima de 15 m/h, suponiendo un tiempo de residencia de 12 minutos. Con este dimensionamiento se garantiza un pH y una dureza mínimas, que cumplan las exigencias especificadas en la legislación vigente.

10.3 Cloración

El agua permeada requiere la adición de cloro con el fin de eliminar elementos patógenos y perjudiciales para la salud. Para ello se dosifica hipoclorito sódico (NaClO), de forma que:

- Siendo la dosis media recomendada de cloro activo: 5ppm
- Caudal de agua de mar a tratar: 1666,7 m³/h
- Consumo de producto puro: 8333,5 g/h
- Riqueza del producto: 13%
- Densidad del producto: 1,240 g/L
- Consumo del producto comercial: $\frac{5 \cdot 1666,7}{0,13} = 64.103,8 \text{ g/h}$
- Consumo en volumen: 51,7 L/h

De este modo se consigue que el agua permeada cumpla con las calidades requeridas como agua apta para consumo humano.

El resto de especificaciones técnicas de los equipos se encuentran en el Anexo IV: Hojas de datos de equipos.

11 DEPÓSITO DE AGUA POTABLE

El agua producto de la planta deberá ser almacenada en depósitos de agua producto siendo desde este último punto, desde donde se abastece directamente a la red de agua potable de la isla de Barbados.

Estos depósitos deben almacenar agua suficiente para abastecer a la población durante al menos 1 día, a pleno rendimiento. De modo que el volumen necesario se calcula a continuación del siguiente modo:

$$V = 30.000 \frac{m^3}{día} \cdot 1 día = 30.000 m^3$$

Para ello se diseñan dos depósitos cilíndricos cerrados de hormigón con las siguientes dimensiones:

Parámetro	Dimensión	Unidad
Alto	30	m
Diámetro	26	m
Volumen	15.000	m ³

Tabla 19. Dimensiones depósito de agua potable.

El resto de especificaciones técnicas de los depósitos se encuentran en el Anexo IV: Hojas de datos de equipos.

