

## **1. Antecedentes**

El proyecto que se presenta a continuación, estará ubicado en la comarca de la Marina Baja en la zona norte de Alicante, correspondiente a la cuenca hidrográfica del río Júcar. Esta zona ha experimentado una creciente demanda de abastecimiento, principalmente en época estival y en las poblaciones costeras.

Las fuentes de suministro actuales presentan distintos orígenes: superficiales, subterráneos y, con carácter extraordinario, aportaciones externas. Pero la escasa pluviometría de la zona de estudio provoca una importante limitación en la generación de recursos naturales. Además, el aumento de la demanda urbana y la agricultura (base histórica de la economía de la zona) requieren grandes cantidades de agua, lo que ha provocado una sobreexplotación de los acuíferos. Todo esto conlleva a la necesidad de incrementar la disponibilidad de nuevos recursos hídricos.

La construcción de una planta desaladora conseguirá paliar la escasez de recursos hídricos que está experimentando la zona. La planta desaladora estaría ubicada en el paraje El Cantalar (municipio de Mutxamel), para aportar un volumen de agua tratada de 60.600 m<sup>3</sup>/d. Este volumen de agua podría servir para abastecer a una población de unas 400.000 personas, o contribuir a regar las más de 300.000 hectáreas de regadío de la cuenca hidrográfica del río Júcar, donde se sitúa el presente proyecto.

## **2. Objetivos**

Los objetivos del siguiente proyecto son los siguientes:

- Simular (con el programa IMS Design de la empresa Hydranautics), el número de etapas y/o pasos, así como, el número y tipo de membranas necesarias para obtener 60.600 m<sup>3</sup>/día de agua producto, con las características óptimas.
- Calcular los reactivos químicos anuales necesarios para el correcto funcionamiento de la planta.
- Calcular la energía demandada por todos los bombeos de la planta.
- Dimensionar los equipos necesarios para el pretratamiento físico, así como las torres de postratamiento.
- Dimensionar la torre de toma, el inmisario submarino de agua bruta y el emisario de salmuera para evacuar el agua de rechazo, así como, el resto de conducciones de la línea de tratamiento del agua.

### **2.1. Características del agua producto**

Los requerimientos deseados para el agua producto a la salida de la planta se resumen en la Tabla 1.

El diseño de la planta se hará en función de la cantidad de boro en el agua producto, no superando una concentración de 0,5 ppm y los 300 ppm de sólidos totales disueltos (TDS).

**Tabla 1:** Requerimientos del agua producto

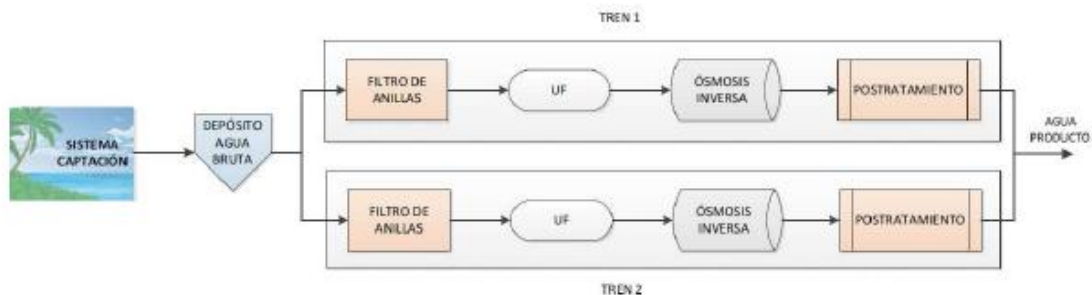
<b>Boro – B (ppm)</b>	0,5
<b>Cloruros – Cl (ppm)</b>	50
<b>Sólidos totales disueltos (ppm)</b>	300
<b>pH</b>	7,8 – 8,5
<b>Índice de Langelier</b>	0 ± 0,5
<b>Dureza - como CaCO<sub>3</sub> (ppm)</b>	80 – 120
<b>Turbidez - NTU</b>	0,5

### 3. Descripción General

El agua bruta es captada mediante una torre de toma abierta en el lecho marino y es conducida a una cámara de captación que se encuentra en la línea de costa mediante un emisario submarino, una vez aquí el agua se divide en dos trenes que trabajaran de manera paralela y simultánea, haciendo la planta más versátil frente a posibles incidentes.

Desde la cántara de captación, el agua será bombeada por 4 bombas sumergibles, 2 para cada conducción. Estas bombas de gran potencia serán las encargadas de impulsar el agua hasta la planta y una vez allí de impulsar el agua a través de los filtros de anillas y las membranas de ultrafiltración hasta llegar a un depósito intermedio previo a la ósmosis inversa. Ambas tecnologías conforman el pretratamiento físico del agua, su objetivo es eliminar sólidos en suspensión mejorando así la calidad del agua producto y garantizando la protección de las membranas de ósmosis inversa.

Al mismo tiempo, se lleva a cabo el pretratamiento químico en línea, mediante la dosificación de distintos compuestos, estos tienen como finalidad garantizar una mejor calidad en el agua de aporte, mejorar la explotación del sistema y proteger tanto las membranas de ultrafiltración como las de ósmosis inversa. De este modo se dosificará hipoclorito sódico en la torre de captación y antes del paso por los filtros de anillas, para desinfectar y reducir riesgos derivados de la presencia de microorganismo, cloruro férrico como coagulante y ácido sulfúrico para mejorar la actividad de los distintos reactivos. Por últimos se dosificará bisulfito sódico justo antes del paso del agua por las membranas de ósmosis para eliminar la presencia de cloro o de otros oxidantes que puedan dañar estas membranas.



**Figura 1:** Esquema general de la planta

Una vez finalizado el pretratamiento, mediante un bombeo de alta presión de hasta 62 Bar, se impulsará el agua a través de los bastidores de ósmosis inversa. El proceso de ósmosis inversa consta

de 1 línea por cada tren, para el primer paso, donde se instalara un sistema de recuperación de energía tipo ERI (Energy Recovery Inc.) y un segundo paso que consta también de 1 línea por tren, haciendo una producción de agua producto de 30.300 m<sup>3</sup>/h por cada línea y 60.600 m<sup>3</sup>/h para toda la planta. Ambos pasos están separados por un depósito intermedio.

El permeado o agua producto es finalmente tratada por un proceso de remineralización que consiste en corregir tanto el pH como el equilibrio cálcico-carbónico, dosificando CaCO<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub>, para así cumplir la normativa aplicable y garantizar su calidad para su uso tanto como agua potable y de riego.

El agua de rechazo o salmuera es conducida a través de un emisario submarino y devuelta al mar mediante un sistema de difusores para facilitar su dispersión por el medio marino.

#### **4. Captación**

La captación se realizara mediante una torre de toma abierta fabricada en hormigón, esta se situará a unos 600 metros de la costa y a una profundidad de unos 15 metros y estará ubicada sobre un fondo rocoso o de arenas gruesas para minimizar la entrada de sustancias sedimentables y la presencia de algas.

La torre se diseña de tal manera que las líneas de corriente del agua capada sean horizontales y la velocidad de aproximación del agua a las rejillas debe ser inferior a 0,15 km/h en flujo laminar, esto evitará el arrastre y la inmovilización de peces. Además, contará con un sistema de dosificación de hipoclorito en la torre de toma, así como un sistema de inyección de aire a presión para evitar a entrada de peces, algas y posibles incrustaciones. El agua bruta llegará a la costa mediante un emisario submarino de polietileno de alta densidad (PEAD), donde será captada por una cámara de captación desde donde será bombeada mediante unas bombas sumergibles hasta la planta. Una vez aquí el agua se dividirá en dos trenes.

#### **5. Pretratamiento físico**

##### **5.1. Filtros de anillas**

Los filtros de anillas no eliminan prácticamente turbidez y no realizan una filtración en profundidad, se instalan a modo de prefiltración protectora de las membranas de ultrafiltración, eliminando todas aquellas partículas sólidas en suspensión con diámetro superior a 100 µm.

Este sistema de filtrado, consta de un cilindro o cartucho en cuyo interior se incorporan unas anillas de material plástico colocadas en la misma orientación y compactadas, de manera que crean un entrelazado con una luz de paso determinada, por donde se fuerza a pasar el agua.

Para el lavado de los filtros se forma una contrapresión dentro de estos que provoca que el pistón suba y libere las anillas comprimidas, de forma simultánea, múltiples boquillas inyectan chorros tangenciales sobre las anillas liberadas, provocando que giren y se liberen los sólidos retenidos en las anillas. Las características de los filtros de anillas utilizados se muestran a continuación:

**Tabla 2:** Características de los filtros de anillas

Q entrada F. Anillas (m <sup>3</sup> /día)	75968,2
Q entrada F. Anillas (m <sup>3</sup> /hora)	3165,34
Modelo del filtro	Apolo Twin
Nº Filtros por bastidor	6
Flujo de diseño (m <sup>3</sup> /hora)	430
Nº Bastidores	7,36
Nº Bastidores adoptado	8 + 1
Nº Total de filtros	54
Área de filtrado (cm <sup>2</sup> /bastidor)	31440
Área de filtrado total (cm <sup>2</sup> )	188640
Perdidas de carga máxima (mca)	6

## 5.2. Ultrafiltración

La ultrafiltración, es el proceso principal del pretratamiento físico. Este es un proceso físico de separación de partículas mediante el paso de agua a través de una serie de membranas con un tamaño de poro comprendido entre 0,1 y 0,001  $\mu\text{m}$ , con la cual se consigue eliminar materia en suspensión, macromoléculas de gran tamaño, materia coloidal y microorganismos. Pero esta técnica tiene sus limitaciones, y no es capaz de eliminar iones o materia disuelta como si ocurre en el caso de la ósmosis inversa. Su principal misión, es la protección de las membranas de ósmosis para que funcionen de manera adecuada el mayor tiempo posible.

**Tabla 3:** Características de los bastidores de ultrafiltración adoptados

Q entrada UF m <sup>3</sup> /día	75208,52
Q entrada UF m <sup>3</sup> /hora	3133,68
Q lavado UF m <sup>3</sup> /día	3760,42
Q entrada ósmosis m <sup>3</sup> /día	71448,10
Modelo Membrana	SFX - 2280
Presión Max. Alimentación (Bar)	3
Presión Max. Transmembrana (Bar)	2,1
Flujo a 25 °C (L/m <sup>2</sup> ·h)	40 - 120
Rango de temperatura °C	1 - 40
Rango de pH	2 - 11
Flujo de diseño (L/m <sup>2</sup> ·h)	110
Superficie de membrana m <sup>2</sup>	77
Nº de módulos por bastidor	22
Área de filtrado	28488
Nº Módulos	369,97
Nº Bastidores	16,81
Nº Bastidores adoptado	18 + 3

Un aspecto a tener en cuenta con los módulos de ultrafiltración son los continuos lavados que han de realizarse a fin de mantener su rendimiento y buen funcionamiento. Cada cierto tiempo se produce un ensuciamiento y el consiguiente atascamiento de las membranas debido a la acumulación de sólidos en su superficie, por tanto, han de llevarse a cabo una serie de lavados con agua y aire. Aunque estos lavados pueden no ser suficientes y tener que recurrir a lavados químicos periódicos denominadas CEB (del inglés "Chemically Enhanced Backwash") y CIP (del inglés "Cleaning In Place") para recuperar las condiciones iniciales de las membranas. Las características de los bastidores de ultrafiltración utilizados se muestran en la Tabla 3.

## 6. Pretratamiento químico

Una desaladora de agua de mar requiere de la captación de un gran caudal de agua que deberá ser tratada previamente para proteger la instalación, es especial las membranas de ósmosis. El objetivo de este pretratamiento consiste en adecuar las características del agua a las necesidades del proceso, para conseguir un funcionamiento óptimo de la planta.

Al tratarse de una simulación se han supuesto unas cantidades de reactivos aproximadas. Para definir las dosis reales recomendadas de los productos comerciales, se utilizan programas de cálculo que necesitan normalmente de un análisis del agua a tratar y las condiciones de operación de la instalación, como caudales, presión de trabajo, temperatura, pH y conversión.

Los productos que se usarán en la planta en los principales pretratamientos químicos son los siguientes:

- Desinfección ( $\text{NaClO}$ )
- Coagulación – floculación ( $\text{FeCl}_3$ )
- Reducción de oxidante ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )
- Regulación pH ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  –  $\text{NaOH}$ )
- Antiincrustantes (PermaTreat PC-191T)

### 6.1. Desinfección

El primer pretratamiento químico utilizado consiste en una dosificación de hipoclorito en el inmisario submarino. Esto tiene como finalidad eliminar o reducir los riesgos derivados de la presencia de micro-organismos que pueden generar ensuciamientos en las membranas y como consecuencia una pérdida de rendimiento de la instalación. También puede tener efecto en la eliminación de sustancias reductoras como hierro, manganeso y sulfuros, que pueden provocar ensuciamientos en las membranas. Para ello se ha previsto una dosis de choque de 5 ppm.

Ya en planta, se realizará una dosificación en continuo por cada tren en el agua de alimentación, para eliminar y reducir los riesgos derivados de la presencia de microorganismos que puedan ensuciar las membranas, con la consecuente pérdida de rendimiento de la instalación. En este caso al ser la dosificación en continuo es de 0,5 ppm.

**Tabla 4:** Datos de dosificación de NaClO en línea

	Cloración agua de mar	Desinfección en línea
Reactivo	NaClO	NaClO
Modo de aplicación	Choques	Continuo
Caudal a tratar ( $m^3/día$ )	150417,06	75208,53
Caudal a tratar ( $m^3/hora$ )	6267,38	3133,69
Periodo de funcionamiento (horas)	6	24
Dosificación (ppm)	5	0,5
Densidad del producto (kg/L)	1,24	1,24
Riqueza (%)	13	13
Cantidad de producto (kg/h)	241,05	12,05
Dosificación de producto (L/h)	<b>194,40</b>	<b>9,72</b>
Consumo (L/día)	1166,39	233,28
Necesidad anual de reactivo (kg)	<b>527906,03</b>	<b>105581,21</b>

## 6.2. Coagulación – Floculación

El objetivo de la coagulación es la desestabilización eléctrica de los coloides mediante la adición de cargas positivas a los coloides, que los desestabilizan eléctricamente y se crean unas fuerzas de atracción mayores a las de repulsión, de forma que se reagrupan y se genera una aglomeración de partículas de más fácil separación.

El coagulante a utilizar en la planta será el Cloruro Férrico ( $FeCl_3$ ), con el objetivo de anular cargas y favorecer la aglomeración de partículas para una mayor facilidad de eliminación en los filtros de anillas y ultrafiltración, se dosificará 4 ppm en continuo.

**Tabla 5:** Datos de dosificación de  $FeCl_3$  en línea

	Coagulación - Floculación
Reactivo	$FeCl_3$
Modo de aplicación	Continuo
Caudal a tratar ( $m^3/día$ )	75208,53
Caudal a tratar ( $m^3/hora$ )	3133,69
Periodo de funcionamiento (horas)	24
Dosificación (ppm)	4
Densidad del producto (kg/L)	1,41
Riqueza (%)	40
Cantidad de producto (kg/h)	31,34
Dosificación de producto (L/h)	<b>22,22</b>
Consumo (L/día)	533,39
Necesidad anual de reactivo (kg)	<b>274511,13</b>

### 6.3. Reducción de oxidantes

El agua producto tras el primer pretratamiento químico (la cloración del agua con hipoclorito sódico), todavía contiene cloro residual que debe ser eliminado antes de su paso por las membranas de ósmosis, ya que, dicho oxidante degradaría irreversiblemente las membranas.

Para llevar a cabo la dechloración y poder preservar la integridad de las membranas se utilizará un producto químico reductor, que en este caso es el Metabisulfito sódico ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ). El bisulfito sódico es un agente capaz de reducir el ácido hipocloroso residual a iones cloruro, produciéndose a la vez la oxidación de bisulfito a bisulfato. Se realizara una dosificación de choque de 10 ppm.

*Tabla 6: Datos de dosificación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  en línea*

	<b>Reducción</b>
<b>Reactivo</b>	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$
<b>Modo de aplicación</b>	Choques
<b>Caudal a tratar (<math>\text{m}^3/\text{día}</math>)</b>	71448,10
<b>Caudal a tratar (<math>\text{m}^3/\text{hora}</math>)</b>	2977,00
<b>Periodo de funcionamiento (horas)</b>	6
<b>Dosificación (ppm)</b>	10
<b>Densidad del producto (kg/L)</b>	1,48
<b>Riqueza (%)</b>	99
<b>Cantidad de producto (kg/h)</b>	30,07
<b>Dosificación de producto (L/h)</b>	<b>20,32</b>
<b>Consumo (L/día)</b>	121,91
<b>Necesidad anual de reactivo (kg)</b>	<b>65854,94</b>

### 6.4. Regulación de pH

#### 6.4.1. Ácido sulfúrico

En las instalaciones de ósmosis inversa, la adición de ácido sulfúrico para regular el pH tiene varios objetivos; evitar la precipitación del carbonato cálcico ( $\text{Ca}_2\text{CO}_3$ ) en las membranas, ya que la solubilidad de esta sal disminuye al aumentar el pH y mejorar la actividad de reactivos de coagulación y desinfección. Aunque el agua de mar suele mantener un pH bastante regular, la adición de ácido sulfúrico se dimensiona por motivos de seguridad y ante una posible variación de pH, por si se produjese un cambio brusco e inesperado que obligase a regularlo de manera excepcional. Se realizará una dosificación de choque de 20 ppm.

#### 6.4.2. Hidróxido sódico

En instalaciones con un segundo paso de ósmosis será necesario una corrección de pH a la entrada de éste. Para ello dosificaremos hidróxido sódico, la función de este compuesto es incrementar el pH

del agua de entrada al segundo paso de ósmosis para facilitar la disociación del boro aumentando así su rechazo en las membranas de ósmosis inversa. Se realizara una dosificación de choque de 7 ppm.

**Tabla 7:** Datos de dosificación de NaOH y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en línea

	Ajuste de pH	Ajuste de pH (2º Paso de Ósmosis)
<b>Reactivo</b>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaOH
<b>Modo de aplicación</b>	Choque	Continuo
<b>Caudal a tratar (m<sup>3</sup>/día)</b>	75208,53	32151,65
<b>Caudal a tratar (m<sup>3</sup>/hora)</b>	3133,69	1339,65
<b>Periodo de funcionamiento (horas)</b>	6	24
<b>Dosificación (ppm)</b>	20	7
<b>Densidad del producto (kg/L)</b>	1,84	2,13
<b>Riqueza (%)</b>	98,5	100
<b>Cantidad de producto (kg/h)</b>	63,63	9,38
<b>Dosificación de producto (L/h)</b>	<b>34,58</b>	<b>4,40</b>
<b>Consumo (L/día)</b>	207,48	105,66
<b>Necesidad anual de reactivo (kg)</b>	<b>139345,75</b>	<b>82147,45</b>

## 6.5. Antiincrustante

En los sistemas de ósmosis existen riesgos de precipitación de sales que pueden reducir el rendimiento de la instalación.

**Tabla 8:** Datos de dosificación de Antiincrustante en línea

	Previo 1º Paso de Ósmosis	Previo 2º Paso de Ósmosis
<b>Reactivo</b>	Antiincrustante	Antiincrustante
<b>Modo de aplicación</b>	Continuo	Continuo
<b>Caudal a tratar (m<sup>3</sup>/día)</b>	71448,10	32151,64
<b>Caudal a tratar (m<sup>3</sup>/hora)</b>	2977,00	1339,65
<b>Periodo de funcionamiento (horas)</b>	24	24
<b>Dosificación (ppm)</b>	1	1
<b>Densidad del producto (kg/L)</b>	1,36	1,36
<b>Riqueza (%)</b>	100	100
<b>Cantidad de producto (kg/h)</b>	2,98	1,34
<b>Dosificación de producto (L/h)</b>	<b>2,19</b>	<b>0,99</b>
<b>Consumo (L/día)</b>	52,54	23,64
<b>Necesidad anual de reactivo (kg)</b>	<b>26078,56</b>	<b>11735,35</b>

Los antiincrustantes, son muy efectivos previniendo el ensuciamiento de las membranas debido a la formación de incrustación de cristales de sales, usado en pequeñas dosis detiene el proceso de precipitación al inhibir el crecimiento de estos cristales. Su principal función es la de mejorar la



solubilidad de algunas sales y prevenir su precipitación. Se dosificará en continuo de 1 ppm antes de cada paso de ósmosis, para evitar que el producto no disuelto correctamente pueda dañar las membranas de ósmosis.

## 7. Ósmosis inversa

La ósmosis inversa consiste en impulsar una corriente de agua de mar bruta (aporte) por medio de una bomba de alta presión a través de una membrana semipermeable de tal forma que como resultado se obtenga un flujo de agua prácticamente libre de sales (permeado) y otro con una concentración salina muy superior a la inicial (rechazo). Dependiendo del tipo de agua de alimentación y la calidad buscada en el agua producto, será necesario adecuar el proceso de ósmosis inversa con diferente número de pasos y/o etapas.

- **Aporte:** es la solución que llega a las membranas de ósmosis inversa. El aporte está en contacto con el lado de alta presión de la membrana.
- **Permeado:** es la solución desalada se obtiene al otro lado de la membrana (el lado de baja presión) después de atravesarla.
- **Rechazo:** es la solución que no atraviesa la membrana y tiene una concentración en sales superior al aporte y al permeado.



*Figura 2: Esquema de ósmosis de dos pasos y una etapa*

### 7.1. Consideraciones de diseño

Para el diseño del sistema de ósmosis se ha tenido en cuenta diferentes parámetros, uno de los principales objetivos será la eliminación de Boro, no superando en las peores condiciones de trabajo los 0,5 ppm de Boro en disolución en el agua producto. Como consecuencia de este condicionante se ha optado por un sistema con doble paso de ósmosis inversa que facilita la eliminación de sales, entre ellas el Boro. Y con una doble etapa en el segundo paso que mejora la conversión global del proceso.

### 7.2. Simulación del sistema de ósmosis

Para realizar el diseño del sistema de ósmosis inversa se ha usado el software de simulación de procesos "Integrated Membrane Solutions Design" o IMS Design, proporcionado por la empresa suministradora de membranas de ósmosis "Hydranautics Corp.". Mediante esta simulación se ha escogido el número de pasos, el número de etapas y el tipo y número de membranas que mejor se

ajustan a los requerimientos deseados del agua producto, además de definir los parámetros específicos del agua para que el proceso se lleve a cabo de manera eficiente.

El sistema bastidor – membrana elegido y que cumple todos los criterios expuestos previamente y se ajusta mejor a las necesidades de la planta tiene las siguientes características:

**Tabla 9: Resumen de los bastidores de ósmosis**

CARACTERISTICAS		1º PASO DE OI	2º PASO DE OI
Conversión aproximada (%)		45	90
Nº etapas		1	2
Nº líneas		3	3
Flujo específico L/m <sup>2</sup> h)		8,9	24,5
Caudales (m <sup>3</sup> /día)	Aporte	74814,8	33666,67
	Permeado	33666,67	30300
	Rechazo	41148,12	3366,67
Modelo de membrana		SWC4B MAX	ESPAB MAX
Nº membranas por tubo		7	7
Nº tubos por tren		552	120   60
Nº membranas en total		3864	1260

La simulación se ha realizado atendiendo a la vida efectiva de las membranas, considerando como tal los años que pueden mantenerse en operación las membranas sin tener que someterlas a ningún proceso de recuperación. Se ha optado por simular membranas desde 0 hasta 3,5 años, verificando que el comportamiento es correcto y cumple plenamente con los requerimientos exigidos.

Otro parámetro a tener en cuenta en la simulación, es la temperatura del agua de alimentación, por ser un factor influyente en el rendimiento de la osmosis. Se ha simulado temperaturas desde los 14 °C hasta los 26 °C, que será la temperatura del agua en la zona en las diferentes épocas del año. En la siguiente tabla se resumen los parámetros obtenidos para todas las simulaciones:

**Tabla 10: Simulaciones del programa IMS Design**

Temperatura (°C)	Edad Membranas	TDS (ppm)	P <sub>BAP</sub> (bar)	Boro (ppm)	P <sub>BAP 2 PASO</sub> (bar)	Cloro (ppm)
14	0	3,57	56,6	0,102	10,8	2,000
	3,5	6,32	60,3	0,169	13,5	3,563
18	0	4,99	55,6	0,151	9,8	2,803
	3,5	8,88	58,6	0,248	12,2	5,013
22	0	7,00	55,2	0,220	9,0	3,938
	3,5	12,63	57,6	0,356	11,1	7,148
26	0	9,82	55,2	0,313	8,3	5,533
	3,5	17,96	57,2	0,497	10,3	10,185

## 8. Recuperador de energía (ERI)

Uno de los principales problemas de la desalación ha sido tradicionalmente, el gran consumo de energía necesario para llevar a cabo el proceso de ósmosis. Por este motivo el desarrollo de sistemas

de recuperación de energía ha sido uno de los factores claves en la evolución de esta tecnología, empleados para reducir el consumo eléctrico de las bombas de alta presión.

Para ello utilizaremos un sistema de recuperación de energía (ERI), que aprovecha la gran presión del agua de rechazo generada en la ósmosis para devolverla, en gran parte, al agua de entrada y así disminuir la cantidad de energía necesaria para alcanzar las grandes presiones de entrada a la ósmosis.

Cada uno de estos sistemas está compuesto por un cilindro cerámico rotatorio que gira a 1.200 rpm, y que contiene las cámaras isobáricas en las que la salmuera, por desplazamiento positivo, impulsa al agua marina filtrada hacia la entrada de la ósmosis inversa, previo paso por la bomba Booster que compensa las pérdidas de carga que se producen en el circuito. El diseño del sistema de recuperación de energía parte de los siguientes parámetros:

**Tabla 11:** Datos de diseño de ERI

<b>Caudal agua permeado (m<sup>3</sup>/día)</b>	<b>33666,67</b>
<b>Caudal agua permeado (m<sup>3</sup>/hora)</b>	<b>1402,78</b>
<b>Nº Líneas</b>	<b>1</b>
<b>Recuperación (%)</b>	<b>45</b>
<b>Presión máxima alimentación (Bar)</b>	<b>60,3</b>
<b>Presión máxima rechazo (Bar)</b>	<b>59,5</b>
<b>Salinidad agua alimentación (ppm)</b>	<b>39800</b>

Para los siguientes parámetros el fabricante nos recomienda la instalación de 26 cilindros intercambiadores de presión modelo PX-Q 300 para cada tren de ósmosis, un total de 52 elementos en toda la planta.

## 9. Remineralización

Debido a la gran capacidad de eliminación de sales de las membranas de ósmosis, el agua producida no tiene apenas sales disueltas. En estas condiciones, el agua no es apta para los usos requeridos, como el consumo humano o el regadío, ya que presenta una baja dureza y alcalinidad por lo que resulta muy agresiva. Por este motivo, el agua producto debe ser remineralizada para alcanzar un equilibrio calcio-carbónico con un proceso de postratamiento. Para la remineralización del agua producto se ha decidido utilizar lechos de calcita con dosificación de CO<sub>2</sub>.

**Tabla 12:** Parámetros del lecho de calcita

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Caudal alimentación (m<sup>3</sup>/día)</b>	<b>60600</b>
<b>Caudal alimentación (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>2525</b>
<b>Dureza de agua deseada (°F)</b>	<b>8</b>
<b>Relación CaCO<sub>3</sub>/°F (ppm)</b>	<b>8</b>
<b>Dosis de CaCO<sub>3</sub> (ppm)</b>	<b>64</b>
<b>Dosis de CO<sub>2</sub> (ppm)</b>	<b>28,16</b>

Una vez tenido en cuenta todos los condicionantes anteriores y teniendo en cuenta las limitaciones constructivas de estos equipos, los parámetros para calcular el diseño de la celda y el lecho de calcita se realizan según los parámetros de la Tabla 13:

**Tabla 13:** Parámetros del lecho de calcita

Parámetros	Valor
Caudal a tratar (m <sup>3</sup> /h)	2525
Anchura del lecho (m)	3
Longitud del lecho (m)	7
Área de la celda (m <sup>2</sup> )	21
Velocidad ascensional (m/h)	10
Tiempo de contacto (min)	12
Tiempo de contacto (h)	0,2

Por lo tanto se instalarán un total de 12 filtros de calcita que tratarán un caudal unitario de 140,3 m<sup>3</sup>/h. El lecho filtrante tendrá una base de 7 x 2 metros y una altura de 2 metros, de manera que el tiempo de residencia sea de aproximadamente 12 minutos para garantizar las condiciones de pH y dureza mínimas exigidas.

## 10. Vertido

En una planta desaladora existen dos tipos de vertidos bien diferenciados de características muy diferentes. El primer tipo agrupa a los subproductos de las limpiezas tanto en los filtros de anillas, la ultrafiltración y la limpieza de las membranas de ósmosis. Y el otro tipo de vertido que tenemos en la planta, es el procedente del primer paso de ósmosis inversa, denominado salmuera o agua de rechazo, con una concentración en sales muy elevada.

Para la conducción de la salmuera, se construirá, desde la planta desaladora hasta la costa, una tubería de 1,0 metros de diámetro de hormigón. Una vez en la línea de costa, la descarga de salmuera se realizará mediante un emisario submarino de 1,0 metros de diámetro y unos 1500 metros fabricado en polietileno de alta densidad (PEAD), ya que es más resistente a la corrosión. La conducción se ha diseñado para que la velocidad de la salmuera sea de aproximadamente 1,2 m/s y en régimen laminar. Para ello se supone que el desnivel es de 20 metros con la línea de costa y siempre favorable para la conducción.

Los difusores se dispondrán a una profundidad de unos 20 metros bajo el nivel del mar para conseguir una presión de 1-2 bares necesaria para una correcta dilución de la salmuera. De esta forma, la salmuera discurrirá por gravedad hasta las boquillas de los difusores con la suficiente presión y sin ningún aporte energético.

## 11. Bombeos y conducciones

Para las conducciones, tanto desde la cantara de captación hasta la planta, como dentro de la planta, usaremos conducciones de PRFV (poliéster reforzado con vidrio). Este material, además de su

ligereza y su alta resistencia mecánica presenta un buen comportamiento frente a la corrosión y al desgaste. Sin embargo, para el inmisario de agua de mar, el emisario de salmuera y las conducciones de los sistemas de limpieza CIP y CEB, serán de PEAD (polietileno de alta densidad) debido a su mayor exposición a la corrosión.

### **11.1. Bombeo a depósito de agua bruta**

Las bombas de captación estarán ubicadas en la cantara de captación, sumergidas en la cámara de bombeo. Estas bombas, serán las encargadas de impulsar el agua desde la cantara de captación hasta el tanque de regulación situado antes de la ósmosis. En el trayecto las bombas deberán impulsar el agua a través de los filtros de anillas y los bastidores de ultrafiltración.

### **11.2. Bombeo de baja presión**

Las bombas de baja presión, serán las encargadas de transportar el agua desde el depósito de regulación, hasta las bombas de alta presión (BAP) del proceso de ósmosis o al sistema intercambiador de presión (SIP), según corresponda. Los caudales de circulación para cada línea vienen marcados por el programa de simulación de la empresa Energy Recovery del recuperador de energía

### **11.3. Bombeo de alta presión**

Las bombas de alta presión son las encargadas de impulsar la solución a tratar hacia las membranas de ósmosis a la presión requerida para obtener agua producto. En este bombeo es donde se consume la mayor parte de la energía que requiere una desaladora por ósmosis inversa. Además, se dotará a estas bombas con variadores de frecuencia, que permitan ajustar su caudal y presión a las demandas del proceso, en función de la temperatura de operación y del grado de ensuciamiento de las membranas.

### **11.4. Bomba Booster**

En nuestro sistema, parte de caudal de alimentación al primer paso de ósmosis se deriva aun sistema de recuperación de energía, mientras que la alimentación restante es impulsada por las bombas de alta presión. Durante este proceso, la salmuera sufre una pérdida de carga tanto en las membranas como debidas a la conducción que es preciso compensar. La bomba Booster es la encargada de compensar esta perdidas y adecuar la presión del agua a la presión de entrada al proceso de ósmosis. De este modo y gracias al sistema de recuperación de energía combinado con la bomba Booster, se consigue que el caudal a impulsar por las bombas de alta presión se reduzca casi a la mitad, disminuyendo considerablemente el consumo energético de la planta.

### **11.5. Resumen de bombeos**

En la Tabla 14, se resume la potencia absorbida por cada bomba en kWh, así como el consumo diario del conjunto de las bombas suponiendo un funcionamiento de 24 horas al día.

**Tabla 14:** Resumen de los bombeos de la planta de OI

Lugar de Aplicación	Nº Líneas	Nº Bombas por línea	Bombas en uso en total	Potencia absorbida (kW) por bomba	Potencia absorbida total (kW)	Consumo diario (kWh)
Cántara de captación	2	2	4	314,83	1259,32	30.223,68
Bomba de baja presión (BAP)	2	3	6	54,93	329,58	7.909,92
Bomba de baja presión (SIP)	2	3	6	66,45	398,7	9.568,8
Bomba de alta presión (1º PASO)	2	1	2	2842,7	5685,4	13.6449,6
Bomba recirculación (Booster)	2	1	2	98,3	196,6	4.718,4
Bomba de alta presión (2º PASO)	2	1	2	693,93	1387,86	33.308,64
<b>Total potencia consumida</b>						<b>222.179,04</b>
<b>Gasto de potencia por m<sup>3</sup> (kWh/m<sup>3</sup>)</b>						<b>3,66</b>

## 12. Estudio de explotación

Los costes de explotación de la planta estarían divididos en 3 apartados y quedan resumidos en la Tabla 15:

- **Gastos de amortización:** La amortización de la inversión se realizará de forma lineal con un periodo de amortización de 20 años (típico en instalaciones de este tipo).
- **Costes fijos:** Los costes fijos son aquellos que permanecen constantes a lo largo del tiempo sin importar la cantidad de m<sup>3</sup> de agua tratados.
- **Costes variables:** Los costes variables son aquellos que dependen del caudal de agua tratado, por lo tanto de los m<sup>3</sup> de agua producto producidos.

Teniendo en cuenta que los costes anuales totales ascienden a 11.219.040,36 euros, una producción diaria de 60.600 m<sup>3</sup>/día, suponiendo un año de 365 días y un consumo específico de 3,66 kWh/m<sup>3</sup>, procederemos a calcular el precio de cada m<sup>3</sup> de agua producido.

**Tabla 15:** Resumen de los costes de explotación

CONCEPTO	COSTES (€/año)
Personal	581.729,70
Mantenimiento	123.964,95
Termino de potencia	347.268,30
Administración	30.966,60
Varios	150.409,20
<b>TOTAL COSTES FIJOS</b>	<b>1.234.240,20</b>
Productos químicos	750.585,47
Energía	6.747.133,09
Reposición membranas	117.201,6
Mantenimiento y conservación	118.680
<b>TOTAL COSTES VARIABLES</b>	<b>7.733.600,16</b>
<b>AMORTIZACION ANUAL</b>	<b>2.242.200</b>
<b>TOTAL EXPLOTACIÓN ANUAL</b>	<b>11.210.040,36</b>

$$\text{Produccion anual de agua} = 60.600 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 365 \text{ dias} = 22.119.000 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\text{Coste del m}^3 \text{ de agua} = \frac{11.210.040,36 \text{ €/año}}{22.119.000 \text{ m}^3/\text{año}} = 0,466 \text{ €/m}^3$$

### 13. Conclusiones

- Mediante la construcción de esta planta desaladora que hemos simulado, se mejoraría la disponibilidad y el aseguramiento de recursos hídricos antes no aprovechables como el agua de mar. Sobre todo en zonas con pocos recursos hídricos como es la zona de estudio y toda la zona mediterránea.
- La disposición de nuevos recursos hídricos en la zona, se permite la expansión y el desarrollo del turismo, así como optar por la agricultura de regadío tan extendida en la zona.
- Mediante la simulación realizada se han calculado los consumos mínimos tanto de energía, como de productos químicos y agua bruta de alimentación para la situación más desfavorable, teniendo en cuenta el caudal y la calidad del agua producto deseada.
- Aun así, los cálculos realizados ponen de manifiesto el elevado consumo de energía eléctrica que requieren este tipo de instalaciones, debido sobre todo a los bombeos. En especial las bombas de alta presión de los sistemas de ósmosis, que encarecen significativamente el coste del m<sup>3</sup> de agua producido.
- Pero teniendo en cuenta la mejora en los pretratamientos y en la calidad y durabilidad de las membranas, se gana eficiencia en el proceso permitiendo reducir la potencia de los bombeos que impulsan el agua hasta ellas. Convirtiendo esta tecnología en una alternativa frente a otros

sistemas de planificación hídrica como pueden ser, la construcción de grandes embalses o transvase de ríos.

- Por ello se ha optado por un pretratamiento de agua mediante filtros de anillas y ultrafiltración, ya que con estos sistemas se consigue una reducción en la utilización de productos químicos, dejando el agua en las condiciones óptimas para ser tratada por las membranas de ósmosis.
- La planta se ha simulado en dos trenes principales que trabajan de manera paralela y simultánea, haciendo la planta más versátil y económica ya que garantiza el funcionamiento de al menos una parte de la planta ante cualquier problema o avería.
- La elección de las membranas de ósmosis se lleva a cabo mediante el software de simulación IMS Design de la empresa Hydranautics, con ellas se busca alcanzar los requerimientos del agua producto, sobre todo siendo más restrictivo con el boro debido a su toxicidad y buscando minimizar la energía consumida por las bombas de alta presión.
- Para la optimización del proceso de ósmosis inversa se ha diseñado el proceso en dos pasos, el primero de una etapa y el segundo que cuenta con dos etapas. Con los dos pasos se consigue aumentar la calidad del agua producto, mientras que la doble etapa en el segundo paso consigue una adecuada conversión global del proceso.
- La construcción de esta planta desaladora es necesaria, ya que existe un gran déficit hídrico en la zona de estudio y los acuíferos sufren una sobreexplotación debido a la escasa pluviometría y a la creciente demanda de agua por parte de la población, sobretodo en época estival. El agua producida puede ser utilizada tanto para el abastecimiento de las poblaciones y del turismo de la zona, así como para la agricultura de regadío.
- En el caso de no llevar a cabo el proyecto, la zona seguiría sufriendo déficit hídrico, lo que seguramente conllevaría grandes consecuencias negativas tanto socioeconómicas como medioambientales en la zona de estudio.