



Universidad  
de La Laguna

**TRABAJO FIN DE GRADO**

***ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA  
DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS  
INVERSA***

**Titulación:** Grado en Ingeniería Química Industrial

**Alumno:** Adrián Miguel Martín Cabrera

**Tutor:** Rafael Villarroel López

SEPTIEMBRE 2017

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**TRABAJO FIN DE GRADO**

***ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA  
DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA***

**ÍNDICE GENERAL**

**Titulación:** Grado en Ingeniería Química Industrial

**Alumno:** Adrián Miguel Martín Cabrera

**Tutor:** Rafael Villarroel López

SEPTIEMBRE 2017

## MEMORIA

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>2</b>
<b>1. Antecedentes</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Peticionario</b> .....	<b>5</b>
<b>3. Objetivos</b> .....	<b>5</b>
<b>4. Introducción</b> .....	<b>5</b>
4.1. Ósmosis inversa.....	5
4.2. Tipos de membranas.....	6
4.3. La unidad de ósmosis inversa.....	8
4.3.1. Configuración de los módulos.....	8
4.3.2. Agrupación de las etapas.....	9
4.3.3. Agrupación de sistemas.....	11
4.4. Sistema híbrido.....	12
4.5. Tratamientos en la ósmosis inversa.....	12
<b>5. Recuperación de energía</b> .....	<b>14</b>
5.1. Recuperadores energéticos instalados.....	16
5.1.1. Turbina Francis.....	16
5.1.2. Turbina Pelton.....	17
5.1.3. Energy Recovery INC (ERI).....	18
5.1.4. Isobárico DWEER.....	21
5.1.5. iSave ERDs.....	24
5.1.6. RO-Kinetic.....	26
5.2. Recuperadores energéticos más recientes.....	28
5.2.1. Isobarix XPR.....	28
5.2.2. Salino pressure center de KSB.....	32
5.3. Comparación entre recuperadores de energía.....	37
5.4. Viabilidad técnica.....	42
5.4.1. Isobarix XPR.....	42
5.4.2. Salino Pressure Center.....	43
<b>6. Pretratamientos del agua de mar</b> .....	<b>43</b>
6.1. Pretratamientos instalados.....	45
6.1.1. Acidificación y dosificación de inhibidores de la incrustación.....	45

6.1.2.	Coagulación/Floculación .....	45
6.1.3.	Desinfección .....	45
6.1.4.	Flotación .....	46
6.1.5.	Filtración granular .....	46
6.1.6.	Filtración de malla automática .....	48
6.1.7.	Filtración por cartucho.....	49
6.1.8.	Ultrafiltración .....	50
6.2.	Comparación entre Ultrafiltración y Filtración granular .....	52
6.3.	Pretratamientos analizados.....	52
6.3.1.	Electrocoagulación .....	53
6.3.2.	Adsorción mediante carbón activado granular y Ultrafiltración .....	55
6.3.3.	Membranas mejoradas con nanotubos de carbono .....	57
6.4.	Comparación entre pretratamientos investigados.....	58
6.5.	Viabilidad técnica.....	60
6.5.1.	Electrocoagulación .....	60
6.5.2.	Adsorción mediante carbón activado granular y Ultrafiltración .....	61
6.5.3.	Membranas mejoradas con nanotubos de carbono .....	61
<b>7.</b>	<b>Post-tratamiento .....</b>	<b>62</b>
7.1.	Remineralización.....	64
7.2.	Eliminación del boro .....	66
7.2.1.	Dos etapas de ósmosis inversa.....	67
7.2.2.	Resinas selectivas del boro .....	68
7.2.3.	Comparación entre dos etapas de ósmosis inversa y resinas selectivas del boro .....	69
7.2.4.	Sistemas instalados .....	70
7.3.	Salmuera.....	72
<b>8.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>73</b>
<b>9.</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>74</b>
<b>10.</b>	<b>Bibliografía/ Webgrafía .....</b>	<b>75</b>

## ANEXOS

<b>ANEXO I. MEJORA DEL CONSUMO ENERGÉTICO CON ISOBARIX XPR.....</b>	<b>1</b>
1. Cálculo de potencia necesaria y consumo específico sin recuperador de energía .....	1
2. Cálculo de potencia necesaria y consumo específico con ERI .....	3
3. Cálculo de potencia necesaria y consumo específico con Isobarix XPR.....	7
4. Comparación entre sistema sin recuperación de energía y sistema con Isobarix XPR .....	10
5. Comparación de diagramas Sankey .....	11
<b>ANEXO II. COMPARACIÓN ENERGÉTICA ENTRE ISOBARIX XPR Y SALINO PRESSURE CENTER.....</b>	<b>14</b>
1. Cálculo consumo específico de Isobarix XPR .....	14
2. Calculo de consumo específico de Salino Pressure Center KSB .....	15
3. Comparación entre Isobarix XPR y Salino Pressure Center .....	17
<b>ANEXO III. DISEÑO DE UN PRETRATAMIENTO PARA UNA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA .....</b>	<b>18</b>
1. Pretratamiento físico .....	18
1.1. Filtros de mallas o pantallas filtrantes.....	18
1.2. Filtros de cartuchos o de seguridad .....	20
2. Pretratamiento químico .....	22
2.1. Coagulación .....	23
2.2. Acidificación.....	24
2.3. Desinfección.....	25
2.4. Reducción de óxidos .....	26
2.5. Adición de inhibidor de incrustaciones .....	27

## PLANOS

<b>1. Planos</b> .....	1
Plano 1. Diagrama de flujo de recuperación energética con Isobarix XPR.....	2
Plano 2. Diagrama de flujo de recuperación energética con Salino Pressure Center.....	3
Plano 3. Diagrama de flujo de pretratamiento con electrocoagulación.....	4
Plano 4. Diagrama de flujo de pretratamiento con adsorción con lecho GAC y UF.....	5
Plano 5. Diagrama de flujo de pretratamiento con membranas MWCNTs.....	6

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**TRABAJO FIN DE GRADO**

***ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA  
DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA***

**MEMORIA**

**Titulación:** Grado en Ingeniería Química Industrial

**Alumno:** Adrián Miguel Martín Cabrera

**Tutor:** Rafael Villarroel López

SEPTIEMBRE 2017

## ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Antecedentes .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Peticionario .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Objetivos .....</b>	<b>5</b>
<b>4. Introducción .....</b>	<b>5</b>
4.1. Ósmosis inversa .....	5
4.2. Tipos de membranas .....	6
4.3. La unidad de ósmosis inversa .....	8
4.3.1. Configuración de los módulos .....	8
4.3.2. Agrupación de las etapas.....	9
4.3.3. Agrupación de sistemas.....	11
4.4. Sistema híbrido.....	12
4.5. Tratamientos en la ósmosis inversa .....	12
<b>5. Recuperación de energía .....</b>	<b>14</b>
5.1. Recuperadores energéticos instalados.....	16
5.1.1. Turbina Francis.....	16
5.1.2. Turbina Pelton .....	17
5.1.3. Energy Recovery INC (ERI) .....	18
5.1.4. Isobárico DWEER.....	21
5.1.5. iSave ERDs.....	24
5.1.6. RO-Kinetic .....	26
5.2. Recuperadores energéticos más recientes .....	28
5.2.1. Isobarix XPR .....	28
5.2.2. Salino pressure center de KSB .....	32
5.3. Comparación entre recuperadores de energía .....	37
5.4. Viabilidad técnica.....	42
5.4.1. Isobarix XPR.....	42
5.4.2. Salino Pressure Center.....	43
<b>6. Pretratamientos del agua de mar .....</b>	<b>43</b>
6.1. Pretratamientos instalados .....	45
6.1.1. Acidificación y dosificación de inhibidores de la incrustación .....	45



6.1.2.	Coagulación/Floculación.....	45
6.1.3.	Desinfección.....	45
6.1.4.	Flotación.....	46
6.1.5.	Filtración granular .....	46
6.1.6.	Filtración de malla automática .....	48
6.1.7.	Filtración por cartucho .....	49
6.1.8.	Ultrafiltración .....	50
6.2.	Comparación entre Ultrafiltración y Filtración granular .....	52
6.3.	Pretratamientos analizados .....	52
6.3.1.	Electrocoagulación .....	53
6.3.2.	Adsorción mediante carbón activado granular y Ultrafiltración .....	55
6.3.3.	Membranas mejoradas con nanotubos de carbono .....	57
6.4.	Comparación entre pretratamientos investigados.....	58
6.5.	Viabilidad técnica .....	60
6.5.1.	Electrocoagulación .....	60
6.5.2.	Adsorción mediante carbón activado granular y Ultrafiltración .....	61
6.5.3.	Membranas mejoradas con nanotubos de carbono .....	61
<b>7.</b>	<b>Post-tratamiento.....</b>	<b>62</b>
7.1.	Remineralización.....	64
7.2.	Eliminación del boro .....	66
7.2.1.	Dos etapas de ósmosis inversa .....	67
7.2.2.	Resinas selectivas del boro.....	68
7.2.3.	Comparación entre dos etapas de ósmosis inversa y resinas selectivas del boro .....	69
7.2.4.	Sistemas instalados.....	70
7.3.	Salmuera.....	72
<b>8.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>73</b>
<b>9.</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>74</b>
<b>10.</b>	<b>Bibliografía/ Webgrafía.....</b>	<b>75</b>



## RESUMEN

La falta de recursos hídricos en Tenerife ha obligado a instalar unidades de desalación de agua de mar con el fin de satisfacer la demanda de la población, siendo las plantas de ósmosis inversa las que poseen una mayor presencia en la isla debido a sus numerosas ventajas, entre las que se encuentran: un menor consumo energético y un sistema menos complejo en comparación con los procesos térmicos.

Este Trabajo de Final de Grado consta, principalmente, de tres partes.

En la primera se estudian los sistemas de recuperación de energía instalados en las islas (Turbinas Francis y Pelton, ERI, DWEER, RO Kinetic e iSave) y los más novedosos (Isobarix XPR y Salino Pressure Center), realizándose una comparación entre los mismos y estudiando la viabilidad técnica en la aplicación del Isobarix XPR y Salino Pressure Center. Además, se compara el Energy Recovery Inc (ERI), sistema más presente en las instalaciones desaladoras por ósmosis inversa, y su homólogo Isobarix XPR, y se estudia el consumo energético de los sistemas más novedosos para unas condiciones determinadas.

En la segunda parte se estudian los diferentes procesos a los que se puede someter el agua de mar en el pretratamiento de las plantas de ósmosis inversa (acidificación, dosificación de inhibidores de la incrustación, coagulación/floculación, desinfección, flotación, filtración granular, de malla automática y de cartucho, y ultrafiltración) y se incluyen pretratamientos investigados en diferentes partes del mundo que pueden dar lugar a procesos viables técnicamente en el futuro (electrocoagulación, adsorción mediante carbono granular y posterior ultrafiltración, y membranas mejoradas con nanotubos de carbono), ya que estos han sido estudiados a pequeña escala. Además, se realiza una comparación entre los sistemas más novedosos y se estudia su viabilidad. Por último, se realizan los cálculos necesarios para un pretratamiento determinado formado por: filtros de malla y de cartucho, coagulación con cloruro férrico, acidificación con ácido sulfúrico, desinfección con hipoclorito de sodio, reducción de óxidos con bisulfito de sodio y adición de inhibidor de las incrustaciones.

En la última parte se estudia el post-tratamiento en el que se acondiciona el permeado que se obtiene de los bastidores de ósmosis inversa (remineralización, desinfección y eliminación del boro).

## SUMMARY

The lack of hydrological resources in Tenerife has forced to install sea water desalination plants in order to satisfy the population demand. The process commonly used in the island is Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) due to many advantages like: lower energy consumption and its simplicity in comparison with thermal processes.

This Final Project is, principally, made up of three parts.

Firstly, the energy recovery devices installed in Canary Islands (Francis and Pelton Turbines, Energy Recovery Inc, DWEER, RO Kinetic and iSave) and the new ones (Isobarix XPR and Salino Pressure Center) have been studied, making a comparison between them and studying the technical viability of the last ones. In addition, the energy consumptions of the Energy Recovery Inc (ERI) and the new devices have been estimated.

Secondly, the different processes which sea water are subjected as pretreatment to protect the reverse osmosis membranes have been analyzed (acidification, dosage of incrustation inhibitor, coagulation/flocculation, disinfection, flotation, granular, automatic and cartridge filtration, and ultrafiltration). There are also included pretreatments investigated around the world which can result in processes viable technically in the future (electrocoagulation, GAC filter followed by ultrafiltration, carbon nanotube enhanced membranes). Furthermore, a comparison between the new systems, its technical viability studio, and the necessary calculation for the design of a pretreatment, formed by: automatic and cartridge filters, acidification, coagulation/flocculation, disinfection, and dosage of incrustation inhibitor, have been made.

Finally, the post-treatment where the permeated is conditioned has been studied (disinfection, remineralization and boron elimination).

## 1. Antecedentes

El agua en Canarias es un recurso natural indispensable, tanto para el bienestar humano como para el desarrollo socioeconómico de las islas. Existen diversos factores que afectan en la distribución de este recurso, como la geografía, climatología, economía y política, pero la mayoría comparten un punto en común, la escasez de recursos hídricos naturales, sobre todo las islas orientales.

En general, la demanda de agua es superior a los recursos convencionales existentes (aguas subterráneas y superficiales) y esto ha obligado a la implementación de fuentes alternativas no convencionales (desalación de aguas de mar y reutilización de aguas residuales regeneradas) que cubren el déficit actualmente.

En Tenerife el sector de mayor demanda fue el agrícola (45%) seguido del urbano (40,1%), turístico (9,7%), recreativo (2,9%) e industrial (2,3%) (Plan Hidrológico de Tenerife, 2010). Cabe destacar que en las últimas décadas el sector agrícola ha ido reduciendo el consumo con respecto al total, generalmente compuesto por cultivos de vid, platanera, papa y tomate, siendo la platanera el de mayor huella hídrica (60% de la demanda agrícola).

El sector turístico supone una población estacional importante y cobra especial importancia ya que el uso medio de agua por habitante es superior al de la población urbana.

En las islas orientales, el clima seco y cálido, y en las islas occidentales, las especiales condiciones geológicas (elevadas pendientes, alta permeabilidad del suelo, etc) hacen que la disponibilidad de los recursos superficiales sea poco importante. Este es el motivo principal por el cual el recurso tradicional ha sido las aguas subterráneas. Sin embargo, en las últimas décadas se ha producido un importante descenso tanto en la calidad como en la cantidad de las mismas, principalmente provocado por la sobreexplotación de los acuíferos y la infiltración de vertidos. Además, algunos acuíferos presentan contaminación natural debida a las interacciones agua-roca y a la actividad volcánica residual que se observa en las importantes concentraciones de bicarbonatos, sodio y flúor. Otro de los principales problemas que se presenta es la intrusión marina en los acuíferos situados en el litoral.

A raíz de estos problemas, la calidad de una gran parte de las masas de aguas subterráneas de las islas es deficiente y no cumple con los requisitos legales para el abastecimiento a

poblaciones o la calidad necesaria para riego agrícola. Como consecuencia, en las islas donde el balance hídrico es positivo (La Palma, El Hierro y La Gomera) se limita la extracción de agua en los acuíferos contaminados. Por el contrario, en el resto de las islas, debido al déficit de recursos, se han instalado plantas desalinizadoras que permiten continuar con el uso de este recurso.

Por otro lado, la sobreexplotación de los acuíferos que se lleva realizando desde principios del siglo XIX, provocado primero por la intensificación de la agricultura, ya que al introducirse los cultivos de exportación (plataneras y tomates), se recurrió a nuevas obras e ingenios hidráulicos (pozos, galerías, presas, canales...), y posteriormente por el aumento de la población y el desarrollo turístico. Esto junto con la inexistencia de una legislación adecuada y la dificultad de un control eficaz de las captaciones, ha llevado a un descenso preocupante en los niveles freáticos de algunas islas. Este descenso se ha atenuado en los últimos años debido a la inclusión de recursos no convencionales, pero aun así, se requiere una mayor inversión tecnológica en desalinización y reutilización para disminuir así las extracciones y de esta forma alcanzar un estado de equilibrio en el balance hídrico subterráneo.

Dentro del ámbito de los recursos hídricos no convencionales, cabe destacar que Canarias ha sido una de las pioneras, a nivel europeo, en desalinización de agua de mar. Desde 1964, con la puesta en marcha de la primera desalinizadora en Lanzarote, este recurso hídrico se ha utilizado de manera masiva para el abastecimiento urbano y el riego de cultivos agrícolas. En la actualidad, el archipiélago ocupa un lugar importante en España, e incluso en Europa, en volumen anual desalinizado (Instituto Tecnológico de Canarias, 2011).

En lo relativo a la producción en las distintas islas, en las islas orientales la desalinización es el principal recurso hídrico y éste supone un elevado porcentaje respecto al total consumido. En números absolutos, la isla de Gran Canaria es la que produce un mayor volumen anual de agua desalinizada.

Respecto a las tecnologías de desalación, Canarias cuenta con tecnologías que van desde las denominadas térmicas hasta las de separación con membranas. Domina la capacidad instalada de ósmosis inversa ya que provoca menores consumos energéticos comparados con los procesos de destilación y tiene un diseño menos complejo.

## 2. Peticionario

El petionario del siguiente Trabajo de Fin de Grado (TFG) es la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología (Universidad de La Laguna), para la obtención del título de Grado en Ingeniería Química Industrial por parte de su autor Adrián Miguel Martín Cabrera.

## 3. Objetivos

El objetivo de este TFG consiste en la actualización, comparación y estudio de viabilidad en la aplicación de las técnicas más recientes en la recuperación energética durante la ósmosis inversa, así como en los procesos de pretratamiento del agua de mar y post-tratamiento de agua desalada.

## 4. Introducción

### 4.1. Ósmosis inversa

La ósmosis inversa se basa en el proceso de ósmosis, un fenómeno natural que se produce en las células de los seres vivos, por la cual dos soluciones de diferente concentración salina puestas en contacto mediante una membrana semipermeable tienden a igualar sus concentraciones.

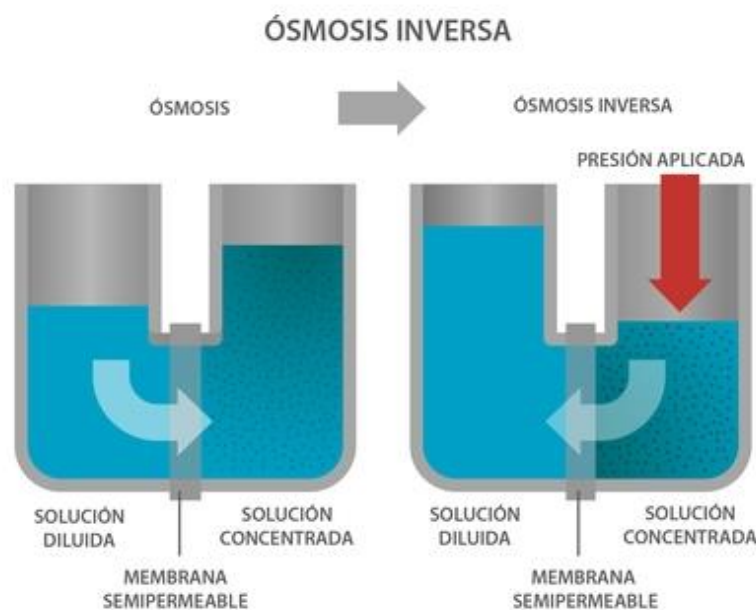
La fuerza que provoca ese movimiento se denomina presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales de ambas soluciones.

Cuando dos soluciones de diferente concentración o salinidad están colocadas en dos recipientes separados por una pared impermeable, cada una de ellas alcanza en el depósito correspondiente una altura que es función únicamente del volumen de la solución y del diámetro del depósito (Diseños y Soluciones Sostenibles DSS S.A.).

Si cambiamos la pared impermeable por una membrana semipermeable (permeable al agua, no a las sales) se produce un movimiento del agua a través de la membrana desde la solución más diluida a la más concentrada, que se detiene cuando se alcanza un desnivel entre ambos tubos,  $\Delta h$ . Este desnivel corresponde a la presión osmótica de la solución más concentrada, o mejor dicho, a la diferencia de presiones osmóticas entre ambas soluciones.

Este valor  $\Delta h$  es la presión diferencial que impulsa el agua a través de la membrana. Si se invierte el proceso aplicando una presión, suficiente para vencer la presión osmótica, en el tubo de la solución más concentrada, el movimiento se produce desde ésta a la solución más diluida.

Finalmente se alcanza una posición de equilibrio, en el que la altura que alcanza la solución es función de la presión aplicada, las características de la membrana y de las concentraciones de ambas soluciones.



**Imagen 1. Proceso de ósmosis inversa**

*FUENTE: hidrosalud.com*

En la práctica, sin embargo, no es necesario vencer la presión osmótica de la solución de alimentación, sino la diferencia de presión osmótica entre la alimentación y el producto.

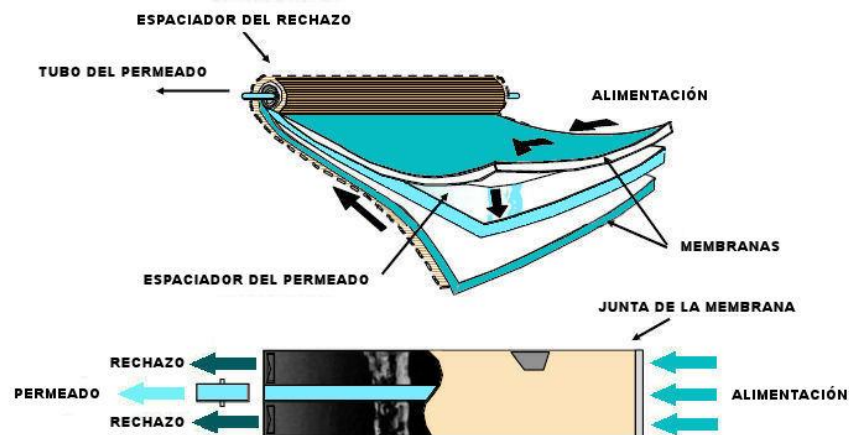
Cabe destacar que la ósmosis inversa se caracteriza por su flexibilidad de operación y su alto rendimiento de eliminación de sales (99%).

## 4.2. Tipos de membranas

Las membranas, el elemento más importante en una instalación de ósmosis inversa, se pueden clasificar atendiendo a numerosos criterios (Álvaro Muelas Expósito, 2011):



- **Según su forma:** pueden ser membranas planas, tubulares, de fibra hueca y de arrollamiento en espiral. En las desaladoras de las islas la más común es la de arrollamiento en espiral, éstas están formadas por varias láminas rectangulares enrolladas alrededor de un eje cilíndrico provisto de perforaciones que permiten recoger el agua producto. Para el enrollamiento de las láminas desaladoras se disponen alternadas con un separador impermeable y una malla, de forma que en una membrana arrollada en espiral existen tantas láminas como separadores y mallas.



**Imagen 2. Membrana en arrollamiento en espiral**

*FUENTE: AQUATRACTA SL*

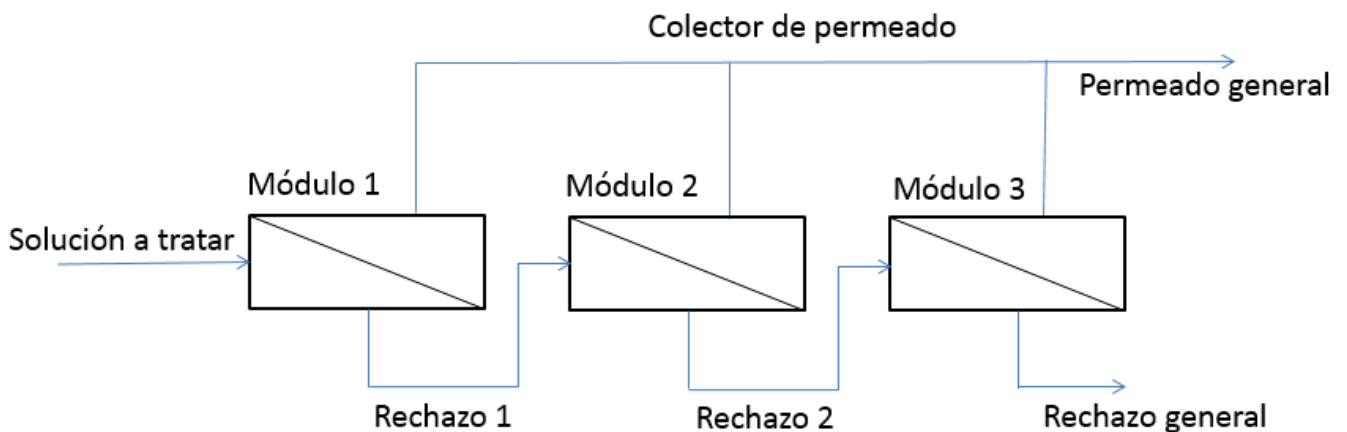
- **Según su composición:** pueden ser orgánicas (acetato de celulosa, triacetato de celulosa, poliamidas aromáticas, poliéter-urea, poliacrilonitrilo), con un menor precio y mejor procesabilidad, aunque con un periodo de operación corto y muy sensibles al pH, temperatura y multitud de sustancias químicas. O también pueden ser inorgánicas (formadas por cerámicas, vidrios fosfácenos o estructuras de carbono), estas presentan una mejor resistencia mecánica, térmica y química, son bioinertes aunque tienen una alta fragilidad y coste.
- **Según su presión de trabajo:** pueden ser membranas de muy baja presión (5-10 bares), membranas de baja presión (10-20 bares), membranas de media presión (20-40 bares) y membranas de alta presión (50-80 bares). Normalmente a mayor cantidad de sales presentes en el agua de alimentación mayor será la presión de trabajo de los módulos

### 4.3. La unidad de ósmosis inversa

#### 4.3.1. Configuración de los módulos

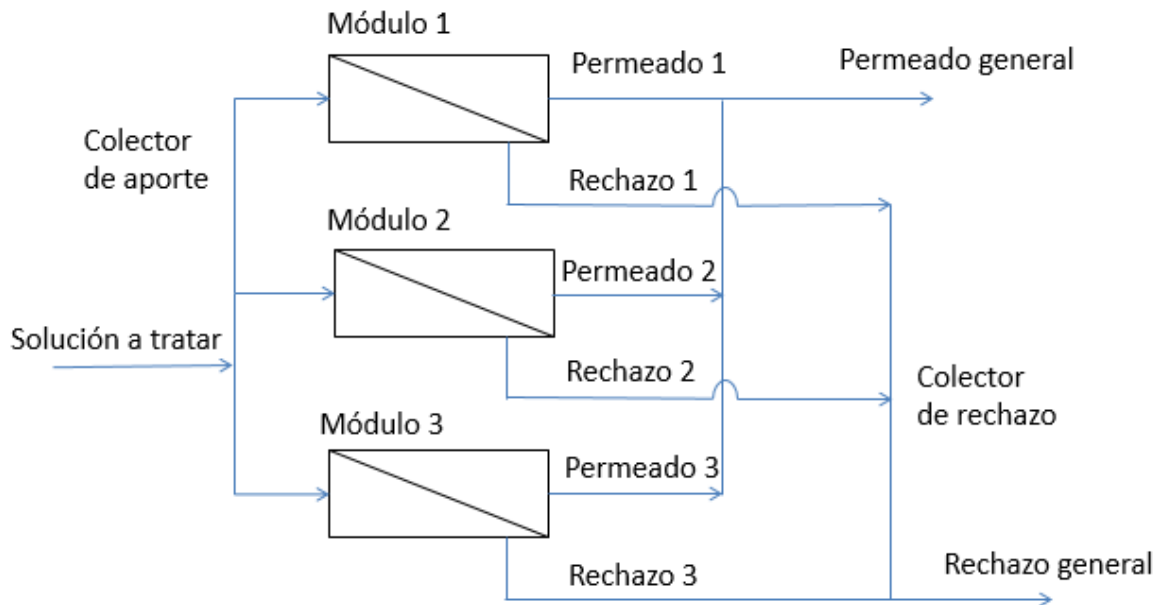
Para mejorar los rendimientos de una planta de ósmosis inversa, los módulos pueden agruparse de distintas formas (Álvaro Muelas Expósito, 2011):

- **Módulos en serie:** el permeado se recolecta en cada módulo y se conduce a un colector de permeado general. El rechazo del primer módulo se convierte en la alimentación del siguiente, y así sucesivamente hasta llegar al rechazo general.



**Imagen 3. Módulos en serie**

- **Módulos en paralelo:** en este caso, todos los módulos reciben la misma alimentación, que se reparte mediante un colector de aporte. El permeado de todos los módulos va al permeado general, mientras que el rechazo se canaliza mediante el rechazo general.

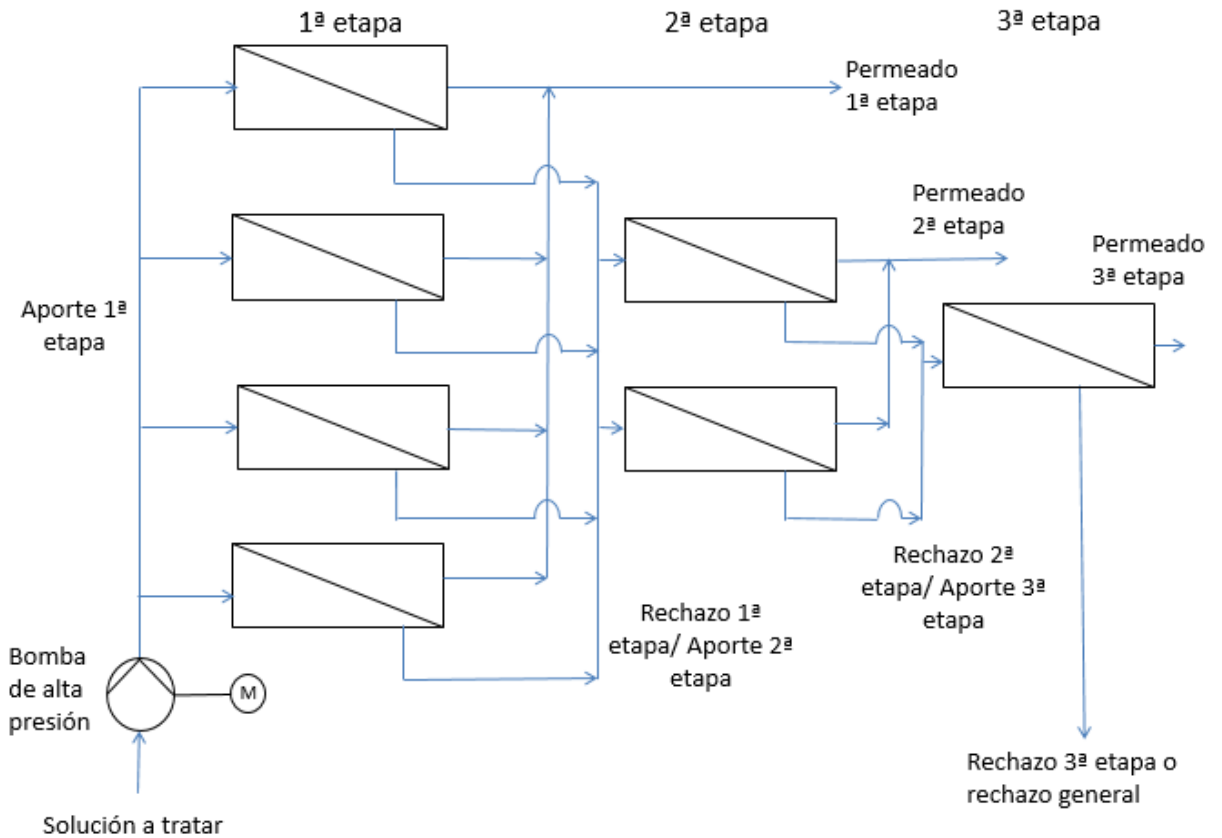


**Imagen 4. Módulos en paralelo**

### 4.3.2. Agrupación de las etapas

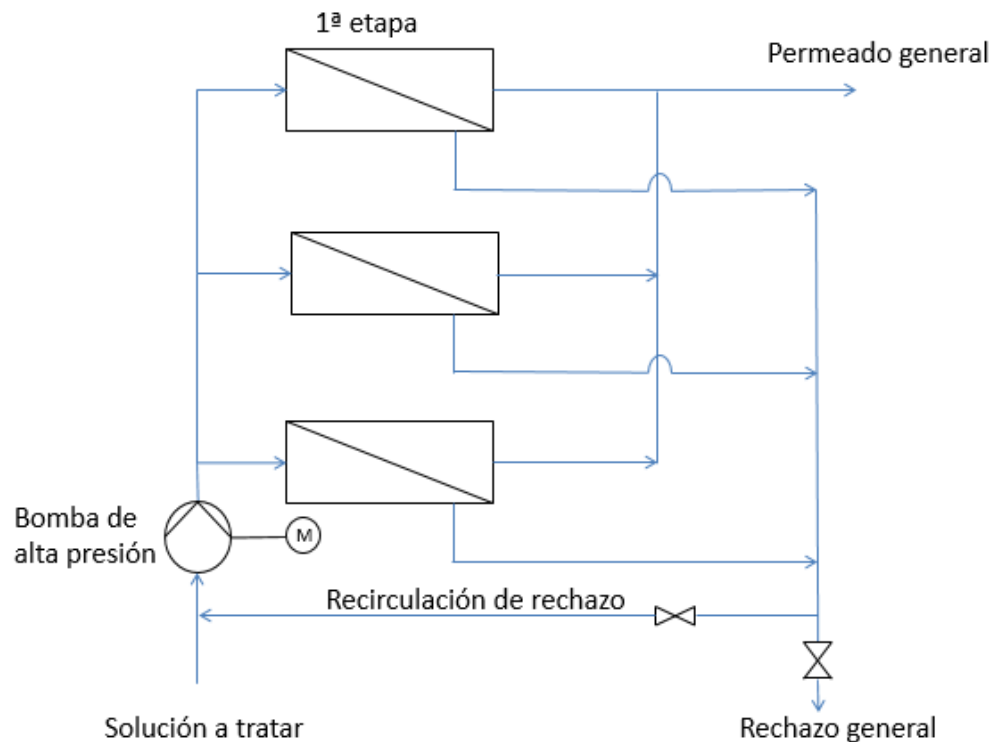
Se considera etapa al conjunto de módulos que trabajan en paralelo, a la misma presión y alimentados desde una misma línea. Las etapas, como los módulos, pueden combinarse de diversas formas (Álvaro Muelas Expósito, 2011):

- **Rechazo en serie:** El rechazo de una etapa es la alimentación de la etapa siguiente, mientras que los permeados que se generan se canalizan separadamente. De este modo se consigue un mayor porcentaje de recuperación, aunque el aumento de la recuperación entre etapa y etapa cada vez es menor.



**Imagen 5. Agrupación de etapas con rechazo en serie**

- Recirculación del rechazo:** en este tipo de agrupación de etapas, los rechazos de los módulos no son llevados a una segunda etapa en línea, sino que se colectan en una tubería única. De esa tubería, parte se recircula para que se una con la alimentación, mientras que la otra parte se desecha como rechazo general. Los permeados se separan de la forma habitual. Con este procedimiento pueden alcanzarse conversiones de hasta el 75%, es decir, concentraciones en el rechazo cuatro veces superiores a las de la alimentación.



**Imagen 6. Agrupación de etapas con recirculación del rechazo**

### 4.3.3. Agrupación de sistemas

Un sistema es un conjunto de etapas agrupadas de cualquier forma, pero con una única bomba de alta presión. Atendiendo a esta definición, las plantas de ósmosis inversa pueden organizarse de distintas formas según cómo agrupen sus sistemas (Álvaro Muelas Expósito, 2011):

- **Sistemas en serie:** los sistemas se denominan “pasos” y están conectados de forma análoga a las agrupaciones de etapas con rechazo en serie. Es muy extraño encontrar más de dos sistemas colocados en serie, debido al precio de las bombas de alta presión, que hacen que el aumento en el porcentaje de recuperación no sea rentable.
- **Sistemas en paralelo:** los sistemas se agrupan análogamente a la agrupación de módulos en paralelo, aunque como a la entrada de cada sistema se encuentra una bomba de alta presión, la alimentación puede no tener la misma presión en los dos sistemas.

#### 4.4. Sistema híbrido

Debido a que el ensuciamiento es proporcional al flujo, los primeros elementos serán los que más se ensucien. Una solución adoptada para que la suciedad se reparta por todas las membranas es colocar diferentes membranas dentro del tubo, de tal forma que las de menor conversión se colocan al principio y las de mayor al final (José Luis Pérez Talavera, 2017).

Si los primeros elementos son de menor producción, además de generar menor flujo, aumentará el caudal de salmuera que le llega a los demás elementos, aumentando por tanto su flujo.

Esto supone mejorar la hidráulica, reducir el ensuciamiento y por lo tanto, aumentar la vida del bastidor con un menor número de lavados.

#### 4.5. Tratamientos en la ósmosis inversa

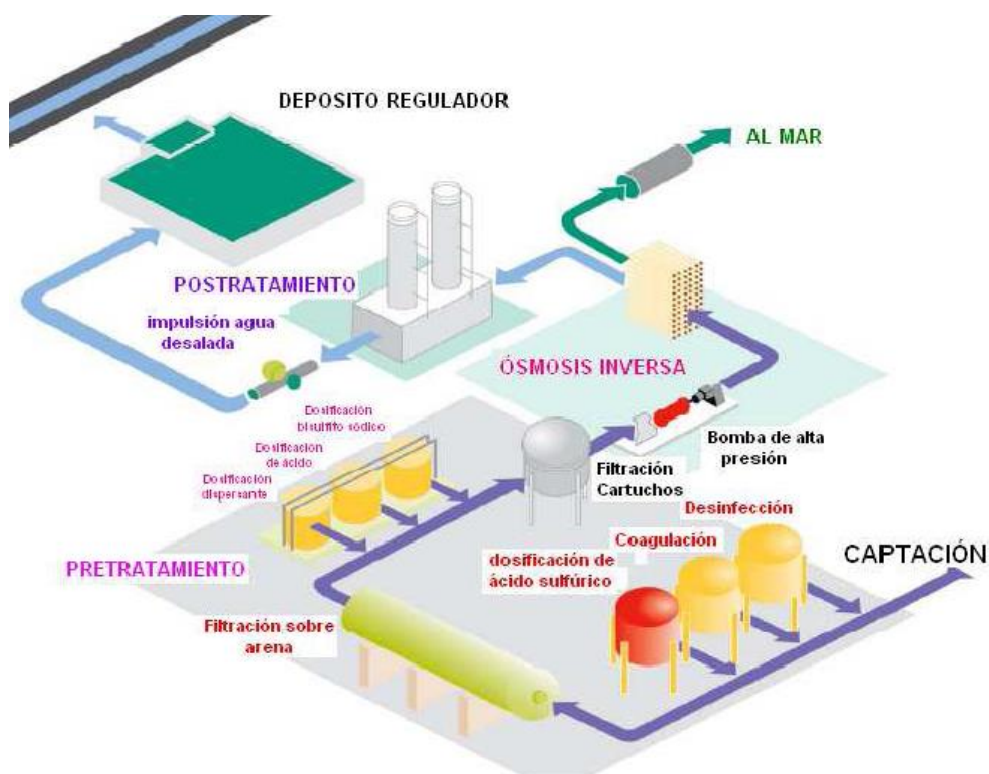
Para una correcta operación es necesario atender a diversos factores que condicionan el diseño del proceso, como el tipo de toma de agua de mar (pozo costero o toma abierta), la recuperación de energía y los procesos de acondicionamiento del agua de entrada al proceso (pretratamientos) y del agua producto (post-tratamientos).

Siempre que sea posible, se prefiere la obtención de agua de pozos costeros, puesto que se adoptará un pretratamiento clásico que incluye la adición de ácido, adición de coagulante/floculante, desinfección, filtración por arena y filtración de cartucho. En cambio, si se opta por la toma abierta, el pretratamiento convencional no elimina toda la materia en suspensión presente en el agua y al llegar a la membrana de ósmosis, produce un ensuciamiento importante sobre la misma. En estos casos es necesaria la implementación de procesos de micro o ultrafiltración con membranas, con la adición de coagulante y antiincrustante.

El agua producto, es decir, el agua desalinizada, se caracteriza por un desequilibrio iónico, bajo pH y alto contenido en  $\text{CO}_2$  disuelto, que da lugar a su elevada agresividad. Es necesario, por tanto, adecuar su calidad mediante tratamientos de afino. Entre los más utilizados aparecen dos procesos: la adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{CO}_2$  o la adición de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CO}_2$  (Instituto Tecnológico de Canarias, 2011).

Además, otro de los principales problemas de la desalinización de agua de mar es la presencia de boro en el agua producto. El boro suele aparecer en forma de ácido bórico, sin carga iónica, por lo que la tasa de eliminación por una membrana convencional de ósmosis no supera el 75-80%, obteniéndose una concentración dos veces superior a la permitida en la normativa sobre abastecimiento a poblaciones. Existen alternativas tecnológicas para solucionar este problema: la utilización de membranas de ósmosis de alto rechazo al boro, un proceso de ósmosis inversa de varios pasos o la aplicación de resinas iónicas selectivas al boro.

En la siguiente imagen se observa los diferentes procesos a los que debe someterse el agua desde su recogida.



**Imagen 7. Proceso general de tratamiento del agua de mar desde su captación**

*FUENTE: Apuntes de la asignatura "Química Industrial"*

Esta tecnología lleva más de 50 años instalada en Canarias y cuenta con más de 600.000 m<sup>3</sup>/día instalados, de ahí que sean incontables los esfuerzos para tratar de minimizar la dependencia de energía asociada a la desalación de aguas.

## 5. Recuperación de energía

En la actualidad, todo proceso de fabricación se contempla dentro de un entorno económico en el que la reducción de los costos de producción es un factor obligatorio. Además, la crisis energética mundial y la preocupación por el deterioro del medio ambiente han propiciado una mejora necesaria de los rendimientos en todos los procesos para disminuir sustancialmente el consumo energético, y por tanto, la huella de carbono (Manuel Fariña Iglesias, 1999).

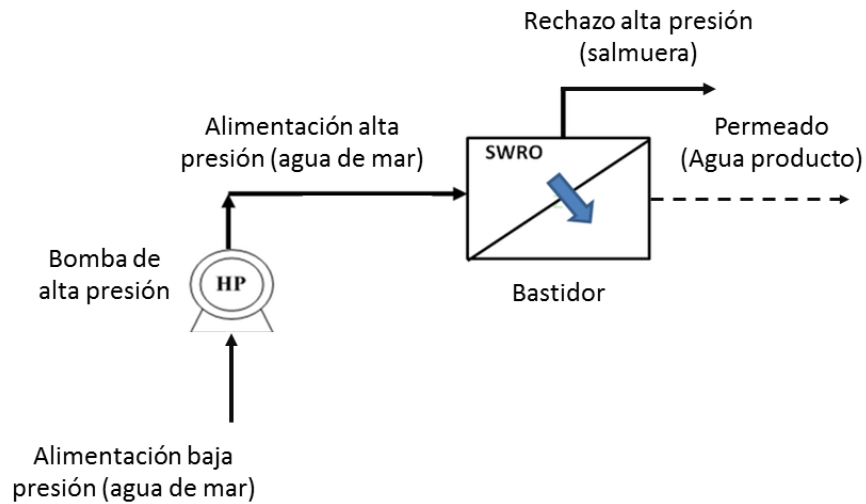
La ósmosis inversa, al ser un proceso en que una parte importante de los costos de funcionamiento corresponden a la energía eléctrica consumida en el bombeo a alta presión, se ha tenido que adaptar e incorporar una serie de mejoras para minimizar los consumos energéticos.

Los recuperadores se pueden clasificar en dos tipos:

- Turbinas: son aquellos recuperadores que transforman la energía hidráulica de la salmuera en energía hidromecánica y posteriormente en energía cinética, estos son utilizados en instalaciones de menor capacidad.
- Intercambiadores de presión o cámaras isobáricas: se incluyen aquellos que aprovechan la energía hidráulica de la salmuera para producir un desplazamiento positivo.

En una instalación sin recuperación energética el agua de alimentación tiene que pasar de 2 bar a 62 bar, aproximadamente, para estar en las condiciones óptimas para ser sometida a la ósmosis inversa en el bastidor. De esta manera, el rechazo, es decir, la salmuera, se devuelve al mar a una presión de 60 bar, ya que hay pérdidas de carga debidas a la membrana. Cabe destacar que es una pérdida de energía muy significativa que puede ser aprovechada mediante recuperadores energéticos. Se muestra a continuación el diagrama de flujo de un proceso de ósmosis inversa sin recuperación energética.



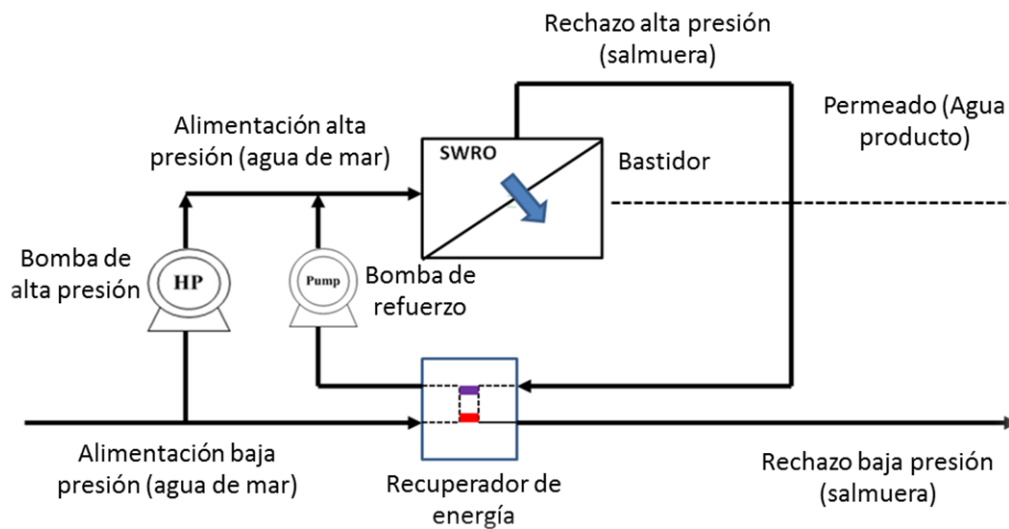


**Imagen 8. Ósmosis inversa sin recuperación energética**

Añadiendo un sistema de recuperación energética se aprovecha la alta presión de la salmuera, transfiriéndose a parte del agua de alimentación, minimizándose el consumo energético, que como ya se ha comentado, es el más importante para hacer rentable y sostenible, desde el punto de vista ambiental, el proceso de obtención de agua potable a partir de agua de mar.

Como no es posible alcanzar los 62 bar de presión, se necesita implementar una bomba Booster de refuerzo, que le aplicará la presión restante.

En la siguiente imagen se muestra el diagrama de flujo típico de un sistema de ósmosis inversa con recuperación energética.



**Imagen 9. Ósmosis inversa con recuperación energética**

## 5.1. Recuperadores energéticos instalados

A continuación, se citan los recuperadores energéticos más utilizados en las plantas de ósmosis inversa de las islas.

### 5.1.1. Turbina Francis

Fueron ideadas a mediados del siglo XIX para instalaciones hidroeléctricas en EEUU y pueden emplearse dentro de una amplia gama de caudales (entre 2 y 200 m<sup>3</sup>/s). No fue hasta comienzo de los años 90 cuando fueron utilizadas como sistemas de recuperación de energía en las plantas de OI de Canarias. Las mismas se montaron en el mismo eje que la bomba de alta presión, reduciendo así el consumo de la misma y logrando un rendimiento del orden del 77%. Muchas de estas turbinas ya han sido sustituidas por sistemas más novedosos y eficientes, aunque otras aún están funcionando (Schallenberg Rodríguez et al., 2014).

El agua al llegar a las palas fijas de la cámara espiral y las palas directrices del distribuidor provoca el giro del rodete, disminuyendo su presión y cediendo su energía cinética al llegar a los álabes. Finalmente, a la salida del rodete, el tubo de aspiración produce una depresión o en otras palabras, una succión.

Estas turbinas son de rendimiento óptimo, pero solamente entre unos determinados márgenes (para 60% y 100% del caudal máximo).

Está formada por: una cámara espiral, un difusor, un rodete, un tubo de aspiración, un eje, un equipo de sellado del eje, un cojinete guía de turbina y un cojinete de empuje.

En la siguiente imagen se puede observar el aspecto de una turbina Francis.



**Imagen 10. Aspecto exterior de una turbina Francis**

*FUENTE: Global Hydro energy*

### **5.1.2. Turbina Pelton**

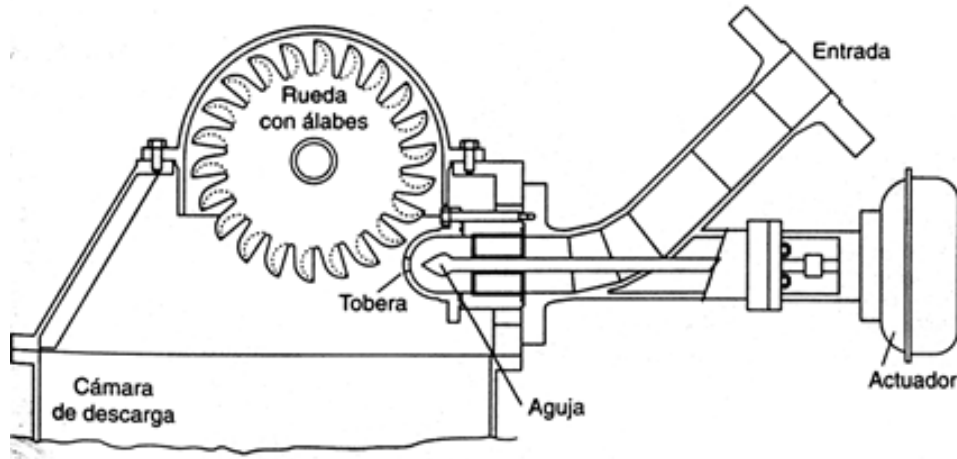
En esta máquina, que comienza a sustituir a las turbinas Francis a finales de los años 90, la presión que posee el rechazo de la ósmosis inversa se transforma en energía cinética. Para ello el rechazo se hace pasar a través de un inyector y expulsa un chorro líquido a alta velocidad, controlada ésta por la sección de la aguja contenida en la tobera, con lo que se consigue alcanzar un rendimiento del 88% aproximadamente, lo que permite un ahorro energético de hasta 0,2 kW-h/m<sup>3</sup>.

Para generar la energía mecánica de rotación el chorro líquido es dirigido tangencialmente sobre una rueda provista de álabes en forma de dos cucharas unidas por el borde. Finalmente, el chorro líquido, después de golpear la rueda y generar su movimiento, se recoge en un nivel más bajo que ésta, a la presión atmosférica.

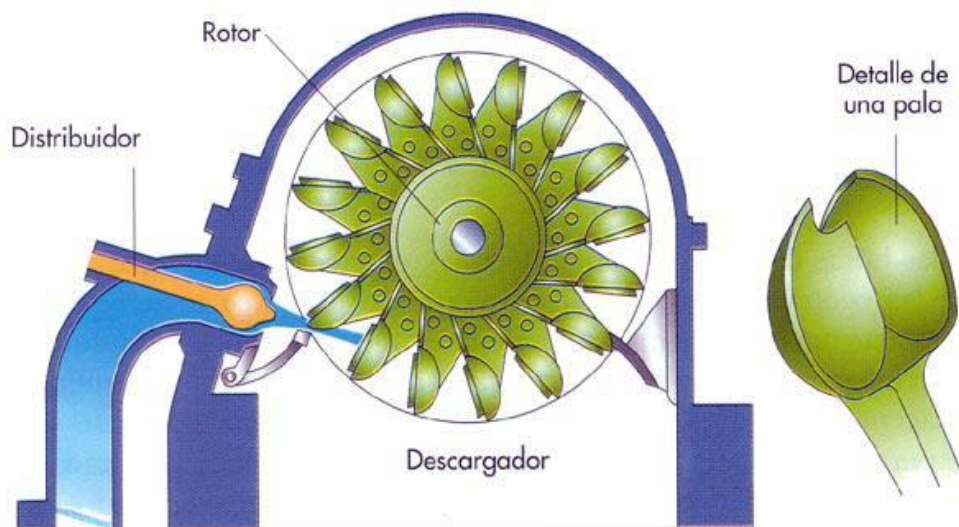
Estas turbinas se diseñan para trabajar a 1500, 1800, 3000 y 3600 rpm y se pueden montar acopladas a una bomba de desplazamiento positivo, a una bomba centrífuga multietápica o a un generador eléctrico (Manuel Fariña Iglesias, 1999).

En las turbinas Pelton hay que tener en cuenta que se trabaja con soluciones muy concentradas en sales, estando muchas veces sobresaturadas. Además, el rechazo de la

ósmosis inversa suele tener CO<sub>2</sub> en disolución debido a la corrección del pH realizada durante el pretratamiento. Este gas tiende a desprenderse de la salmuera cuando la presión de rechazo disminuye.



**Imagen 11. Partes de una turbina Pelton**



**Imagen 12. Detalle de la rueda de álabes y cucharas de una turbina Pelton**

*FUENTE: WKV Inc.*

### 5.1.3. Energy Recovery INC (ERI)

El sistema de recuperación de energía ERI o “Sistema Revólver”, se trata de un sistema de conversión hidráulica dinámica y consiste en una cámara de desplazamiento rotativo, que gira

sobre su eje constantemente, dentro de una carcasa, provisto de conductos en su interior que lo atraviesan.

Al igual que los dispositivos de desplazamiento positivo, su funcionamiento se basa en utilizar la presión de salida de salmuera para aumentar la presión del agua de alimentación. Ambos sistemas de desplazamiento constituyen las cámaras isobáricas (CIP)

El sistema posee cuatro conducciones, dos para el agua de alimentación y dos para el rechazo o salmuera, a través de las cuales se llenan y vacían las cámaras con agua de alimentación y/o salmuera (alternativamente), tanto en la fase de alta presión como en la de baja. La rotación del rotor es realizada por la misma agua, por lo que no se necesita ninguna válvula ni motor para que funcione. Tampoco dispone de pistones para favorecer la separación física de ambas corrientes, por lo que hay una ligera retromezcla de importancia muy limitada ya que nunca supera el 5 o 6%.

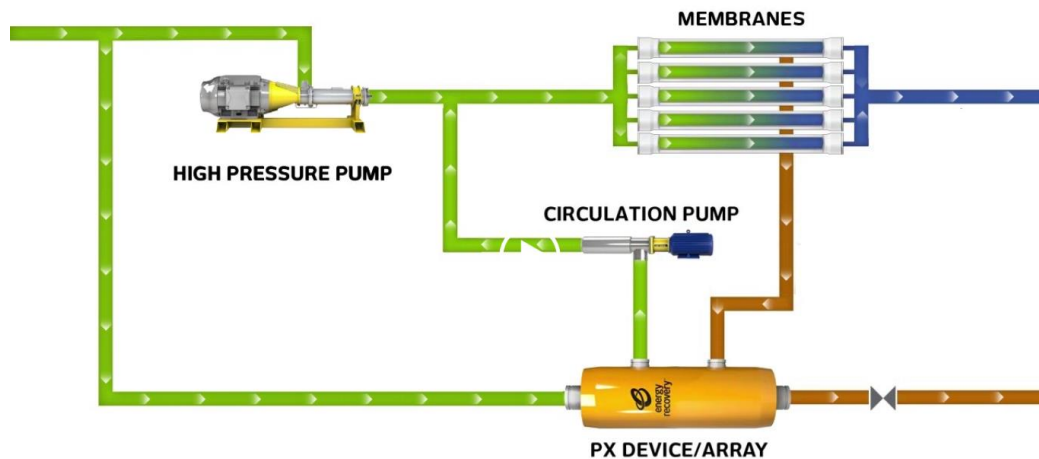
El ciclo de operación de este tipo de intercambiadores de presión es el siguiente:

1. El agua de alimentación a baja presión llena la cámara del rotor, desplazando la salmuera a baja presión.
2. La cámara del rotor sella y gira a la posición de entrada de salmuera a alta presión, produciéndose un intercambio de presión con el agua de alimentación a baja presión que contiene.
3. La salmuera a alta presión presuriza y desplaza el agua de alimentación, cediéndole de esta manera su energía.
4. La cámara del rotor sella y gira a la posición de entrada de agua de alimentación la salmuera a baja presión que contiene.



**Imagen 13. Aspecto de un recuperador ERI**

***FUENTE: ERI INC***



**Imagen 14. Proceso de ósmosis inversa con recuperador ERI**

**FUENTE: ERI INC**

Se trata de un equipo capaz de adaptarse a la capacidad de producción de diferentes plantas de ósmosis inversa, por lo que han sustituido en muchas plantas antiguas al sistema de recuperación de energía que tenían instalado con el objetivo de aumentar la eficiencia y reducir el consumo (retrofitting). En la siguiente tabla se muestran las diferentes posibilidades que ofrece la compañía, equipos que tienen una capacidad desde 4,54 m<sup>3</sup>/h hasta 68,1 m<sup>3</sup>/h. Esta última pertenece al recuperador PX-Q300, el cual posee una eficiencia de hasta el 98%. En esta serie, *PX Q series*, los equipos tienen una reducción de ruido, rondando los 81 decibelios. Además de contar con una disminución de la mezcla de fluidos, entre la salmuera y el agua de alimentación.

Cabe destacar que se pueden instalar en paralelo, aumentando así el caudal permitido en desalinizadoras más grandes.

Utilizando este sistema, la bomba de alta presión tendrá que bombear el mismo caudal de alimentación que de agua producto, con la consiguiente reducción de consumo energético.

PX Model	Minimum Guaranteed Efficiency*	Flow Range per Unit (brine flow)
PX-Q300	97.2%	45.4 - 68.1 m <sup>3</sup> /h
PX-Q260	96.8%	40.8 - 59 m <sup>3</sup> /h
PX-260	96.8%	40.8 - 59 m <sup>3</sup> /h
PX-220	96.8% (@45.4 m <sup>3</sup> /h)	31.7 - 49.9 m <sup>3</sup> /h
PX-180	96.7% (@36.3 m <sup>3</sup> /h)	22.7 - 40.8 m <sup>3</sup> /h
PX-140	94.8% (@22.7 m <sup>3</sup> /h)	20.4 - 31.7 m <sup>3</sup> /h
PX-90	96.0% (@15.8 m <sup>3</sup> /h)	13.6 - 20.4 m <sup>3</sup> /h
PX-70	95.3% (@11.3 m <sup>3</sup> /h)	9.08 - 15.8 m <sup>3</sup> /h
PX-45	94.0% (@7.9 m <sup>3</sup> /h)	6.81 - 10.2 m <sup>3</sup> /h
PX-30	93.4% (@5.6 m <sup>3</sup> /h)	4.54 - 6.81 m <sup>3</sup> /h

**Tabla 1. Modelos ERI PX con su respectiva eficiencia y rango de caudal permitido**

*FUENTE: ERI PX*

\*Las eficiencias mínimas garantizadas se basan en pruebas estándares de rendimiento de energía realizados por la compañía.

Según un estudio comparativo realizado por Sigrid Yurena Arenas Urrea, para los sistemas de recuperación de energía instalados en la planta de Fuerteventura, los ERIs, durante un periodo de funcionamiento de 6 años (2009-2015) son los que más disminuyen el consumo de energía (en un 40%), permitiendo obtener un ahorro económico importante frente a los otros recuperadores que tienen instalados y que han estado funcionando durante más de 20 años (1991-2015), como las turbinas Francis y Pelton.

#### **5.1.4. Isobárico DWEER**

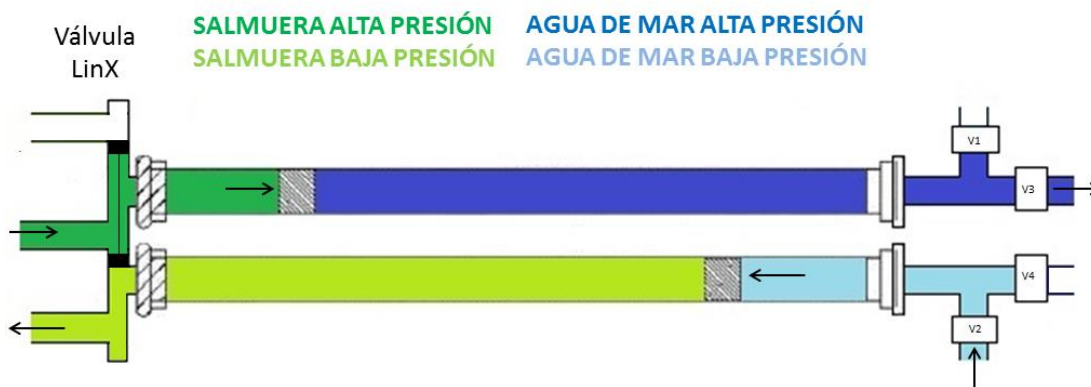
Se trata de un dispositivo isobárico con un funcionamiento muy sencillo. Una sola unidad consta de dos recipientes de presión, cuatro válvulas de retención, y una válvula de control LinX.

Su propósito es conservar la energía usando el caudal de salmuera de alta presión para presurizar un caudal igual de alimentación de agua de mar.

Permite obtener una buena eficiencia energética y es capaz de tratar altos caudales aunque necesita un mayor espacio y un sistema de control para regular, de forma alternativa y secuencial, la apertura y cierre de las válvulas, así como la velocidad y sentido de los pistones durante la operación del sistema.

La salmuera de alta presión de las membranas entra en la válvula LinX y es dirigida por su pistón a la cámara uno (superior en la imagen 15) que está lleno de agua de mar a baja presión. En la cámara, la presión de la salmuera se transfiere al agua de mar que sale a través de una válvula de retención, desde ahí el agua de mar se dirige a la línea de alimentación de alta presión a membranas, a través de una de bomba de recirculación.

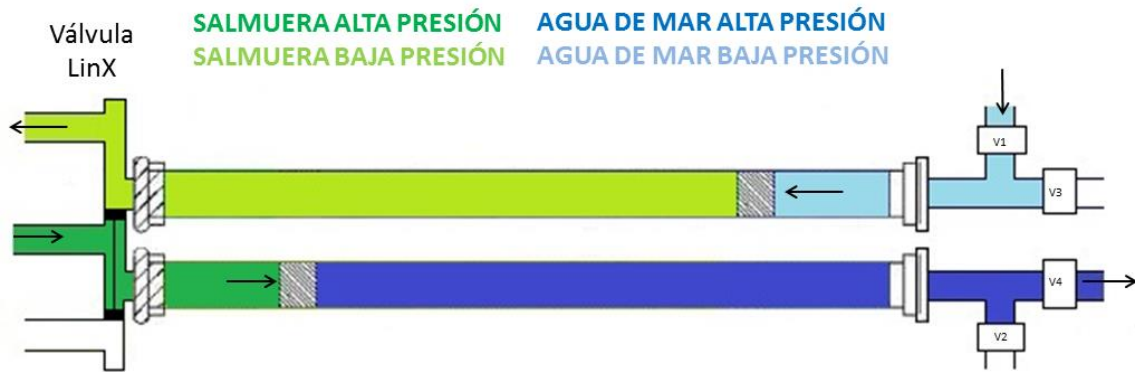
Simultáneamente, el agua de mar a baja presión se introduce en la cámara 2 (inferior en la imagen 15) que contiene salmuera a baja presión. A medida que el agua de mar llena el recipiente, la salmuera de baja presión se vacía a través de la válvula LinX.



**Imagen 15. Funcionamiento de Recuperador Isobárico de DEWEER. Paso 1.**

En este momento la válvula LinX actúa de nuevo y el proceso se repite pero en los recipientes opuestos. Ahora a medida que la salmuera de alta presión entra en la válvula LinX se dirige a la cámara 2 (inferior en la imagen 16) donde presuriza el agua de mar introducida durante el ciclo medio anterior. Al mismo tiempo en la cámara 1 (superior en la imagen 16), el agua de mar a baja presión desplaza la salmuera a baja presión para expulsarla, y el ciclo se repite.





**Imagen 16. Funcionamiento de Recuperador Isobárico de DEWEER. Paso 2.**

Un ciclo completo dura 12 segundos aproximadamente, de esta manera, se pueden tratar hasta 350 m<sup>3</sup>/h, por lo que las cámaras tienen una capacidad 1166,66 litros. Para conseguir mayores caudales se instalan múltiples unidades en paralelo, como el ERI, obteniéndose hasta un 98% de rendimiento mecánico.



**Imagen 17. Aspecto de un recuperador energético DWEER**

*FUENTE: FLOWSERVE*

Entre sus características principales, se encuentran la tolerancia a la suciedad del agua, evitando así tratamientos de filtración o de limpieza con aditivos, niveles de ruido relativamente bajos, menos de 83 decibelios, larga vida útil y bajos costes de mantenimiento.

#### 5.1.5. iSave ERDs

El recuperador energético iSave ERDs de Danfoss se trata de un sistema en el que se incluye un intercambiador de presión isobárico y una bomba de desplazamiento positivo. La bomba de alta presión se basa en el principio de las bombas de paletas por lo que permite un diseño muy ligero y compacto. Además, la lubricación de las partes móviles está asegurada por el propio fluido (agua de mar).

Existen dos equipos de diferente capacidad que utilizan el mismo sistema, el iSave 50 y el iSave 70. El primero soporta, según datos del fabricante, un caudal de entre 41 y 52 m<sup>3</sup>/h y el segundo un caudal de entre 50 y 70 m<sup>3</sup>/h. En cuanto a la eficiencia, se indica que, a 60 bar y máxima velocidad, el recuperador energético iSave 50 tiene una eficiencia del 93% y el iSave 70 del 92%.

Según el fabricante se trata de un equipo de larga vida útil con una constante alta eficiencia y con pocos requerimientos de mantenimiento durante el servicio.

En las bombas de paletas el caudal es proporcional al número de revoluciones (rpm), permitiendo el control de flujo. A diferencia de una bomba centrífuga, produce el mismo flujo a una velocidad dada independientemente de la presión de descarga.

El iSave está operado por un motor eléctrico que proporciona el control de velocidad tanto del intercambiador de presión como de la bomba de refuerzo de alta presión. Mediante el uso de un variador de frecuencia (VFD), el motor aplica un par constante desde baja velocidad hasta máxima velocidad. Aunque otros sistemas CIP pueden agrupar varios dispositivos en paralelo, al llevar cada uno su propia bomba de desplazamiento positivo, en este caso puede resultar menos económico por lo que se suele unificar el flujo de salida y se lleva a una única bomba booster de suministro de la pequeña sobrepresión necesaria para alcanzar la presión deseada.

Entre los beneficios se encuentran:

- Ahorros significativos de energía y bajo consumo específico (SEC).

- Instalación sencilla y económica, ya que incluye bomba e intercambiador de presión en una sola unidad.
- Diseño y monitorización sencilla del sistema sin necesidad de medidores de flujo de alta presión.
- Operación sencilla con diseño que evita la sobreexpansión.
- Resistencia a la corrosión, ya que todas las partes que estarán en contacto con el agua están fabricadas de materiales como Super Duplex, altamente resistentes a la corrosión.

Para alargar la vida útil del equipo y asegurar su funcionamiento, se requiere la instalación de un sistema filtrado del agua de alimentación de 3  $\mu\text{m}$  ya que evita que en el rotor se genere ensuciamiento o *biofouling*.

En cuanto al ruido, este variará en función de la velocidad, las conexiones, del variador de frecuencia y el montaje. En este caso, el ruido es inferior al de otros recuperadores energéticos, exceptuando el RO-Kinetic, cuyo nivel sonoro ronda los 10 dB.

Se trata de un dispositivo especialmente diseñado para mediana y pequeña escala, hoteles, plataformas petrolíferas, desaladoras municipales o privadas, etc.



**Imagen 18. Aspecto del recuperador energético iSave**

***FUENTE: Danfoss España***

### 5.1.6. RO-Kinetic

Este sistema de recuperación energética puede ser implantado tanto en plantas existentes, que quieran reducir su consumo energético, como en plantas de nueva construcción.

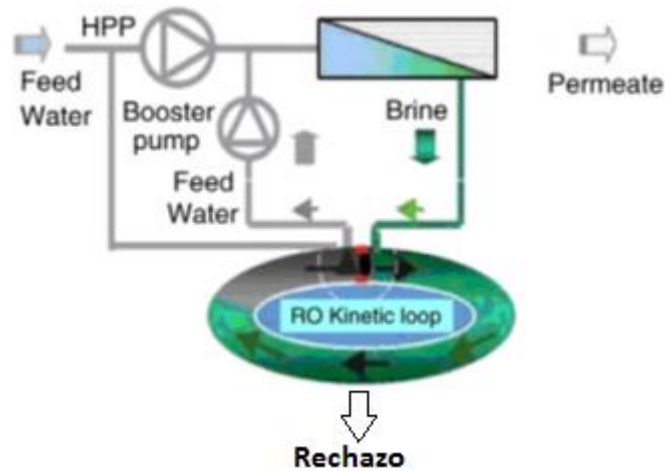
El principio en el que se fundamenta es la propiedad de los líquidos de ser incompresibles, lo que permite someter a una masa de agua a una cierta presión sin gasto de energía. Para llevar a cabo este principio se hace uso de cámaras isobáricas.

Se trata de presurizar con la bomba de alta presión el agua de captación acumulada en la cámara isobárica. Esto se consigue haciendo un circuito cerrado entre la salida de la membrana (salmuera) y la entrada al bastidor (agua de mar), donde se ha interceptado un depósito de agua (cámara isobárica) y una bomba booster.

La salida de salmuera y la entrada a las membranas están a la misma presión estática, que les comunica la bomba de alta presión. Se necesita que la salmuera se desplace hacia la cámara isobárica y desplace el agua de captación, inicialmente contenida en la cámara, hacia la entrada del bastidor.

Para lograrlo, es necesario crear un diferencial de presión dinámico para vencer las pérdidas de carga que tienen lugar en las membranas y en la cámara isobárica. La bomba booster será la encargada de crear este diferencial de presión, de modo que, las membranas se verán alimentadas por el agua procedente de la bomba de alta presión y de una cantidad de agua igual al rechazo, con únicamente el pequeño consumo de la bomba booster.

Como se ha comentado anteriormente, durante el proceso se producen caídas de presión en las membranas y en el Kinetic. En las membranas las pérdidas están entre 1 y 2 bar y en el Kinetic alrededor de 1 bar. Por lo tanto, la bomba booster deberá salvar un salto de presión de unos 3 bar aproximadamente.

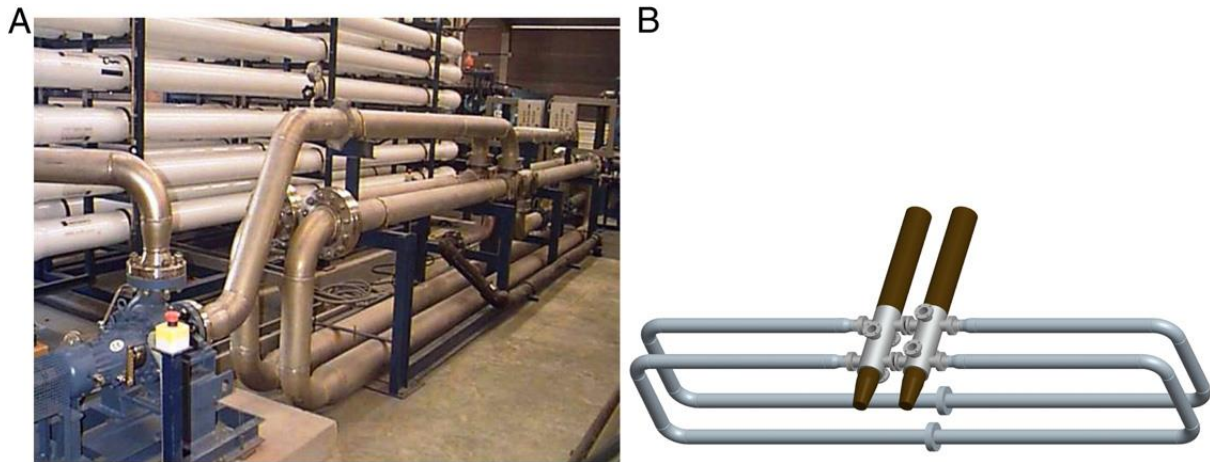


**Imagen 19. Proceso de ósmosis inversa con recuperador energético RO Kinetic**

**FUENTE: M. Barreto**

Este sistema está constituido por dos cuerpos de válvulas servocomandadas separadas entre sí por dos válvulas diferenciales. Los cuerpos de válvulas son los encargados de distribuir de forma secuencial las entradas y salidas, de agua de mar y de salmuera, en las cámaras. El diseño de estas válvulas evita que se produzcan turbulencias y excesivas pérdidas de carga.

La principal característica es que las cámaras isobáricas tienen forma de anillo o bucle cerrado, de tal manera que el agua que entra y sale de éstas, que hay que presurizar y despresurizar, está siempre en continuo movimiento, evitando con las paradas el gasto innecesario de la energía cinética. Las válvulas inerciales constituyen la prolongación de estas cámaras isobáricas. El paso de una cámara a otra se realiza sin prácticamente cortes, debido a la velocidad de accionamiento de las válvulas, ejecutándose en un ciclo cinético continuo (M. Barreto, 2010).



**Imagen 20. A) Instalación con un sistema de recuperación energética RO Kinetic B) Aspecto de un recuperador energético RO Kinetic**

*FUENTE: M. Barreto*

Además, se trata de un sistema que nos permite reducir el consumo específico de energía en valores comprendidos entre 2 y 2,2 kWh/m<sup>3</sup>.

Su implantación es limitada a plantas de tamaño mediano y no está muy extendida a pesar de sus buenos resultados, quizá por no poseer aún la adecuada comercialización. La planta de mayor capacidad de producción hasta la fecha, 166,67 m<sup>3</sup>/h, es la del Confital, localizada en el Sur de Tenerife.

## 5.2. Recuperadores energéticos más recientes

Actualmente se siguen investigando diseños de recuperadores energéticos basados en cámaras isobáricas, como el ISOBARIX XPR y el Salino Pressure Center de KSB. Aun así, se necesitan dispositivos pensados para plantas de pequeña escala, la mejora de ciertos inconvenientes en los actuales sistemas y el diseño de nuevos dispositivos para que puedan ser puestos en servicio en régimen variable para plantas de mediana y gran producción.

### 5.2.1. Isobarix XPR

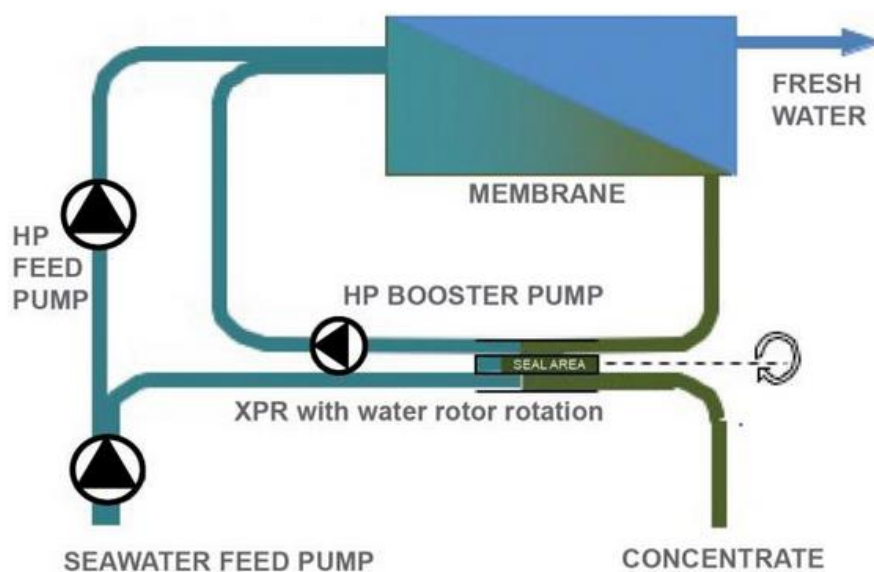
Isobarix XPR (“axle positioned rotor”) es un intercambiador de presión que consiste en un rotor con múltiples conductos coaxiales, donde una mitad es la parte de baja presión y la otra mitad la parte de alta presión. Entre ellas hay áreas de sellado, donde los conductos están aislados de cualquier comunicación con cualquier flujo, lo que produce un menor porcentaje de mezclas.

El equipo es muy similar al recuperador ERI. Como dato de interés, el director de la empresa, Leif J. Hauge, es el fundador de Energy Recovery Inc. Este asegura que su dispositivo permite caudales de 60 a 100% mayores, con un tamaño igual al de los ERI-PX.

Si el rotor no está girando, la salmuera a 870 psi (60 bar), pasará por el lado de alta presión de los conductos hacia la bomba Booster que le aumentará la presión hasta 930 psi (62 bar), y el agua de alimentación, aproximadamente a 15 psi (1 bar) irá por el lado de baja presión de los conductos y volverá al mar.

Para alimentar la membrana de ósmosis inversa de agua de mar a alta presión, la salmuera entra a alta presión desplazando el agua de alimentación y suministrándole una presión de hasta 855 psi (58,95 bar). A continuación, se hace pasar por una bomba Booster que le aporta la presión restante, hasta 900 psi (62 bar).

Finalmente, el agua de mar entra en los conductos y fluye en la dirección opuesta, forzando a la salmuera regresar al mar a presión atmosférica.




**Imagen 21. Proceso de ósmosis inversa con recuperación energética con el equipo ISOBARIX XPR**

*FUENTE: Isobarix Strategies INC*

Existen diferentes tamaños para diferentes capacidades, todos ellos se muestran en la siguiente tabla, correspondiente a la ficha técnica de Isobarix XPR, en la que se indica el

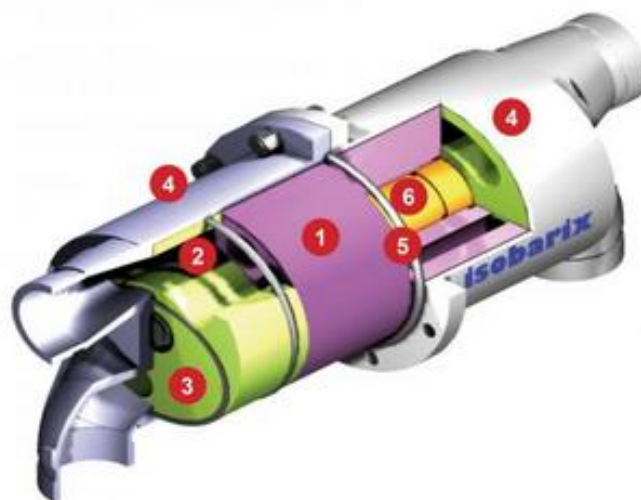
diámetro del rotor, el modelo, y flujo máximo permitido, así como una imagen con el tamaño relativo del equipo.

ROTOR DIAMETER	3"			4"			5"			6"			8"		
XPR-MODEL	309SS	309SM	309SL	409SS	409SM	409SL	509SS	509SM	509SL	609SS	609SM	609SL	809SS	809SM	809SL
MAX FLOW, GPM	30	38	45	65	80	95	120	150	175	190	240	280	400	500	600
MAX FLOW, M3/H	7	9	10	15	18	22	27	34	40	43	55	64	91	114	137
RELATIVE SIZE															

**Tabla 2. Modelos disponibles de Isobarix XPR**

*FUENTE: Isobarix Strategies INC*

En la siguiente imagen se observa el interior del dispositivo Isobarix XPR, con información detallada de las diferentes partes que lo componen.



**Imagen 22. Interior de un recuperador de energía Isobarix XPR**

*FUENTE: Isobarix Strategies INC*

1. Rotor de posición del eje.
2. Zonas de recogida y salida de salmuera y agua de alimentación.
3. Cavity de baja presión.
4. Recubrimiento de titanio G2 del montaje cerámico interior.
5. Sello externo del recipiente de presión.
6. Eje, fijado a los extremos.



Este tipo de recuperador ya ha sido instalado en algunas plantas de ósmosis inversa, como el que se muestra en la siguiente imagen.



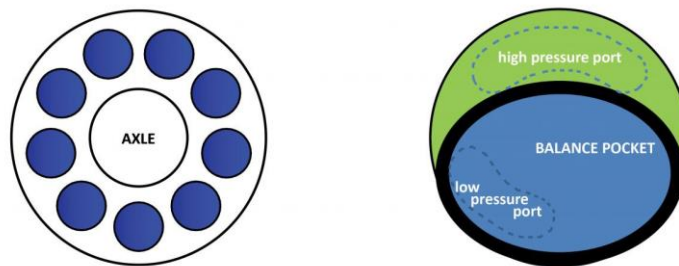
**Imagen 23. Recuperador energético Isobarix 509SL en Hotel Oasis Sense en Cancún, México.**

**Copyright 2009 ISOBARIC STRATEGIES INC..All rights reserved.**

***FUENTE: Isobarix Strategies INC***

Este equipo tiene la patente número 7.306.437 de los Estados Unidos en la que el eje se basa en el posicionamiento del rotor:

El tamaño de rotor es igual al diámetro interno de la cámara de presión, teniendo éste una única fila de largos conductos con baja resistencia al flujo. El número de estos conductos se puede reducir ya que no hay optimización en la geometría de los conductos alrededor del centro, donde se encuentra el eje. Este diseño produce la mitad de las pérdidas hidráulicas a doble flujo en comparación con otros diseños, ya que la cavidad a baja presión elimina las posibles deformaciones elásticas y deja un espacio libre muy estrecho que da como resultado fugas internas de menos del 0,5%.

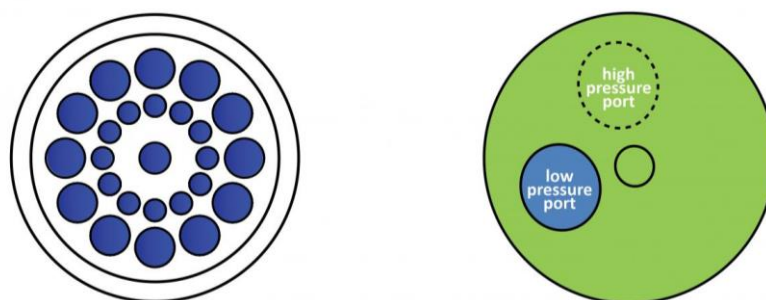


**Imagen 24. Detalle interior del equipo Isobarix XPR**

*FUENTE: Isobarix Strategies INC*

Además, posee la patente número 5.988.993 de Estados Unidos sobre la cubierta basada en el posicionamiento del rotor:

La cubierta externa reduce el tamaño del diámetro del rotor, teniendo éste el mismo tamaño que el diámetro interior de la cubierta. La sección transversal del flujo puede ser incrementada solamente alrededor del centro del rotor aumentando la geometría del conducto o añadiendo una segunda fila de conductos. El rotor tiene alta resistencia a flujos turbulentos debido al pequeño tamaño de los conductos. La falta de una cavidad de baja presión proporciona una gran deformación elástica del final de la cubierta. El espacio libre del eje debe ser ancho para evitar el bloqueo y las pérdidas internas de lubricante.



**Imagen 25. Detalle del interior del equipo Isobarix XPR con aumento de conductos**

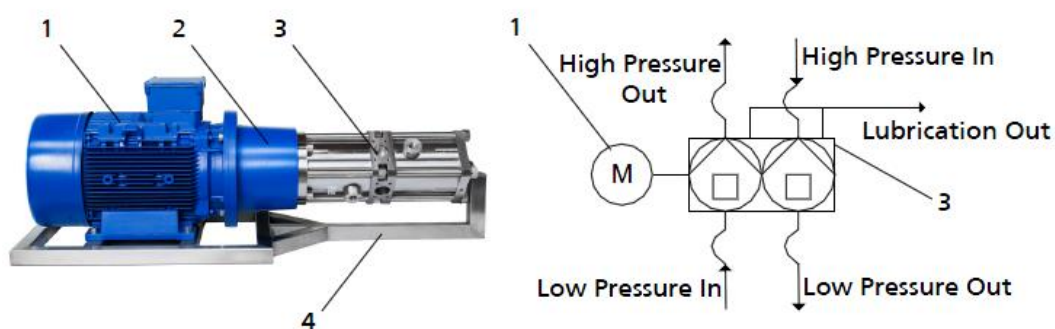
*FUENTE: Isobarix Strategies INC*

### 5.2.2. Salino pressure center de KSB

Se trata de un sistema compacto, tipo CIP, en el que cada unidad consta de una bomba de pistón axial y un motor de pistón axial en un mismo eje. El motor es impulsado por el flujo de salmuera y transfiere directamente su energía a través del eje.

Cada dispositivo nos permite crear alta presión en el agua de mar, compensar las pérdidas de presión producidas por el propio proceso de ósmosis y recuperar energía utilizando la salmuera. Además, no es necesaria la implementación de ninguna bomba de refuerzo como en los demás casos, ya que todo el sistema funciona con un solo motor eléctrico y un convertidor de frecuencia, es decir, como un 4 en 1: bomba de alta presión, accionamiento eléctrico, bomba de refuerzo y sistema de recuperación energética.

Según la compañía KSB, el Salino Pressure Center consigue un ahorro de energía de hasta un 70% en comparación con un sistema sin recuperación energética. Además de reducir considerablemente la huella de carbono, el espacio necesario de la instalación y eliminar la lubricación con aceite, ya que se realiza a base de agua.



**Imagen 26. Partes de un recuperador Salino Pressure Center**

*FUENTE: Ficha técnica de Salino Pressure Center*

1	Motor eléctrico	2	Cubierta
3	Recuperador energético	4	Estructura base

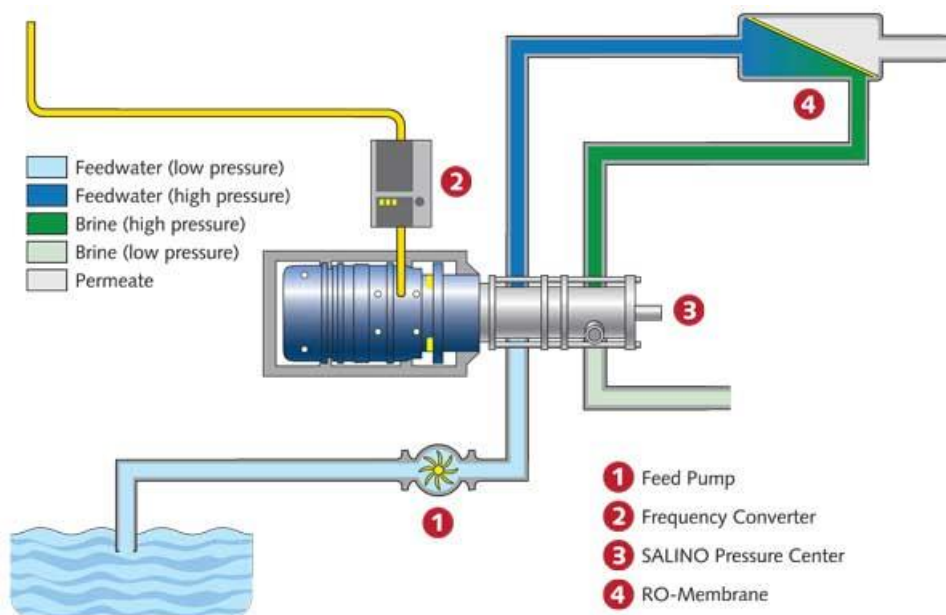
**Tabla 3. Partes del recuperador Salino Pressure Center**

El equipo posee un sistema de control integrado en cada módulo que puede responder a la fluctuación del contenido en sales del agua de mar a procesar. Por otro lado, es un dispositivo fácil de manejar, con bajos costes de inversión y de mantenimiento.

Technical data	
Feed water flow rate	23 m <sup>3</sup> /h
Drinking water yield	up to 250 m <sup>3</sup> /d
Operating pressure (higher operating pressure on request)	70 bar
Motor rating	29 kW
Temperature	up to +50 °C

**Tabla 4. Especificaciones del recuperador energético Salino Pressure Center**  
**FUENTE: KSB Aktiengesellschaft**

En la siguiente imagen se puede observar un proceso de ósmosis inversa con un sistema compacto Salino Pressure Center instalado.

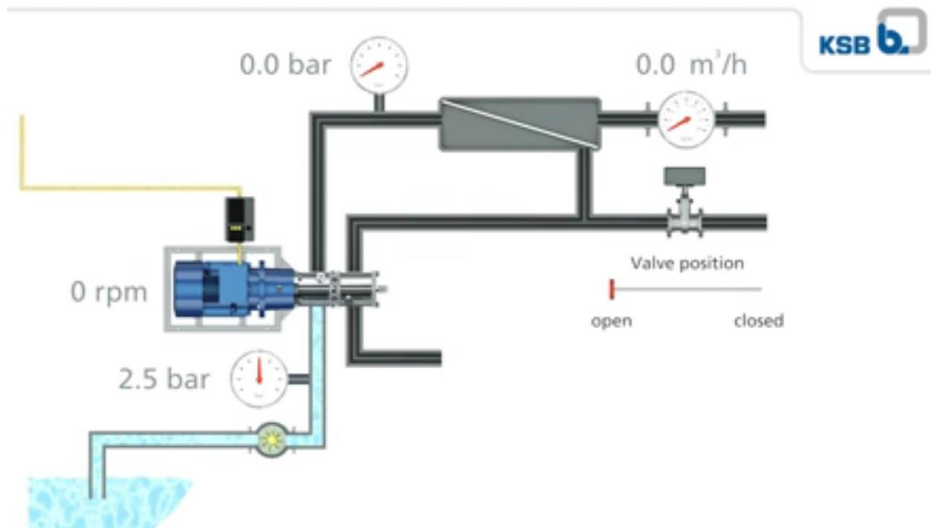


**Imagen 27. Proceso de ósmosis inversa con un recuperador compacto Salino Pressure Center**

**FUENTE: Water & Waterwaste International**

A continuación, se explica el proceso por etapas, desde su puesta en marcha hasta su establecimiento en régimen estacionario, haciendo uso de imágenes tomadas de un vídeo explicativo de la propia compañía *KSB Aktiengesellschaft*.

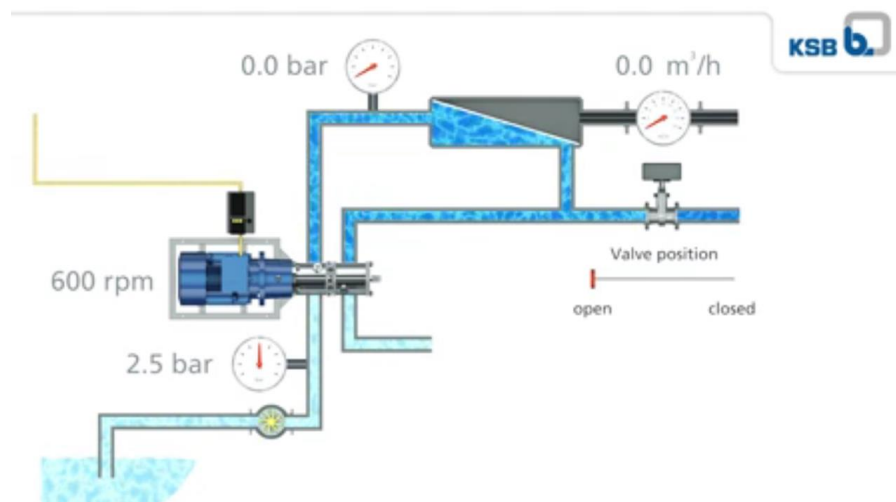
En primer lugar, el agua llega al equipo Salino Pressure Center con una presión de 2,5 bar (mínima como requerimiento técnico).



**Imagen 28. Paso 1. Entrada del agua de mar**

*FUENTE: KSB Aktiengesellschaft*

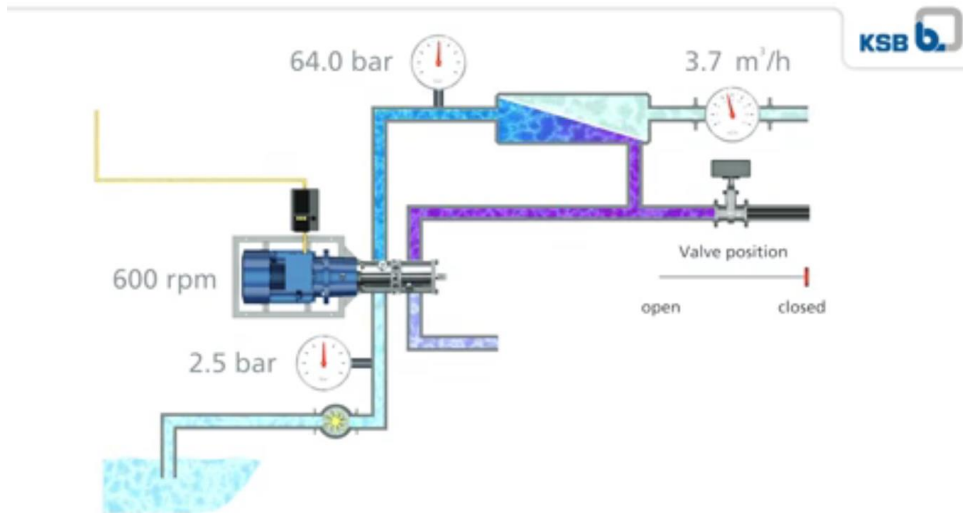
En este momento se activa el convertidor de frecuencia y el motor comienza a girar a 600 rpm. El agua de mar llegará al bastidor y al no tener la suficiente presión, esta saldrá de nuevo por el conducto de la salmuera, haciéndose llevar una parte por el recuperador energético y otra parte por la purga.



**Imagen 29. Paso 2. Activación del motor**

*FUENTE: KSB Aktiengesellschaft*

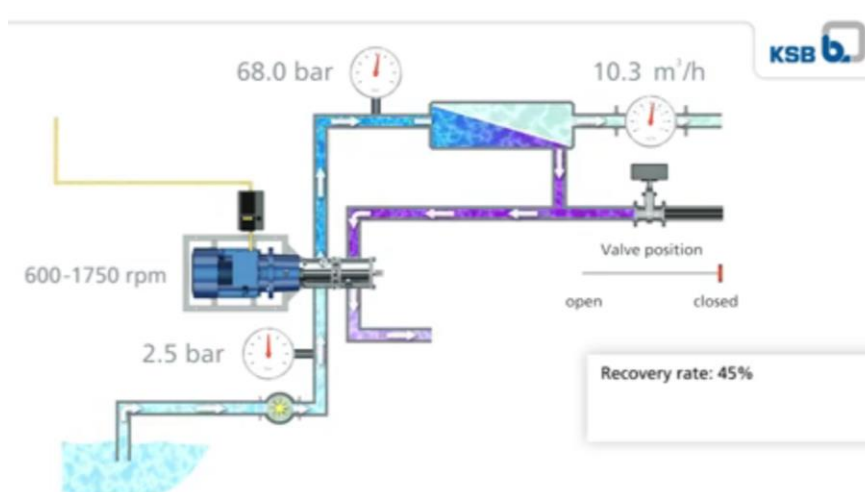
A continuación, se va cerrando gradualmente la válvula de purga de la salmuera, provocando un aumento en la presión del agua de alimentación. Esto hace que del bastidor comience a salir agua producto.



**Imagen 30. Paso 3. Cierre válvula de purga**

**FUENTE: KSB Aktiengesellschaft**

Por último, la velocidad del motor aumentará hasta la necesaria para alcanzar las condiciones deseadas. De este modo se consigue aprovechar la presión del caudal de salmuera, ayudando en el giro del eje del motor de pistones axiales, es decir transformando su energía en energía mecánica.



**Imagen 31. Paso 4. Aporte de energía necesaria para aumentar la velocidad del motor**

**FUENTE: KSB Aktiengesellschaft**

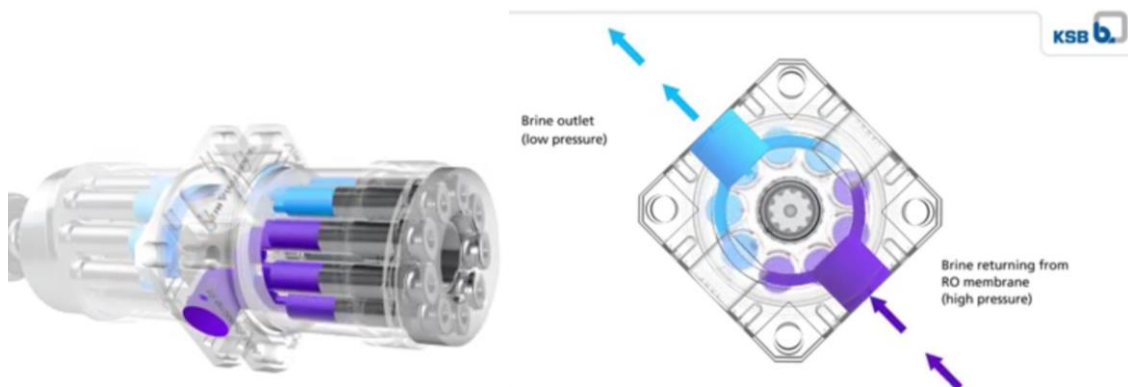
En las siguientes imágenes se ve el detalle de la parte del equipo en la que se aumenta la presión del agua de alimentación, siendo el fluido de color azul el agua de alimentación a baja presión y el violeta el agua de alimentación de alta presión que se envía al bastidor de ósmosis inversa.



**Imagen 32. Detalle de la zona por la que circula el agua de alimentación**

*FUENTE: KSB Aktiengesellschaft*

Ahora se aprecia el detalle de la zona por la que circula la salmuera, siendo el fluido azul la salmuera a baja presión y el violeta la salmuera a alta presión.



**Imagen 33. Detalle de la zona de la salmuera**

*FUENTE: KSB Aktiengesellschaft*

### 5.3. Comparación entre recuperadores de energía

A continuación, se puede observar una tabla comparativa con los sistemas de recuperación de energía más utilizados en las islas Canarias. En ella se analiza el mantenimiento rutinario, las desventajas y ventajas de cada equipo, en función de preguntas realizadas a operarios de plantas de Ósmosis Inversa (estudio realizado por Baltasar Peñate Suárez, Dr. Ingeniero Industrial, Jefe del Departamento de Agua del Instituto Tecnológico de Canarias).

Equipo	Mantenimiento rutinario	Desventajas	Ventajas
Turbinas Francis	Cambio de aceite, cambio de retenes, cambio de junta tórica, sellos, engrasado motor.	Ya es una tecnología obsoleta. No alcanza valores de consumo específicos deseables. Rendimientos relativamente bajos.	Simplicidad de tuberías. Se adapta bien a la variación de condiciones. Nos permite ajustar la producción, modificando los caudales de inyección de la turbina y ajustando la válvula de descarga de la bomba.
Turbinas Pelton	Cambio de aceite, cambio de retenes, cambio de junta tórica, sellos.	Ha sido desplazada casi en su totalidad por las cámaras isobáricas. Rendimientos relativamente bajos.	Simplicidad de tuberías. Se adapta a la variación de condiciones. Tiene un consumo específico menor que las turbinas Francis.
ERI-PX / ERI-PQ	Ver que no hay obstrucción en los ERIs, asegurar flujo de lubricación, biofouling.	No tolera objetos extraños. Alta emisión de ruido (>92 dB). Problemas teóricos de mezcla y atoramiento, aunque en la práctica ningún operador de planta se quejó de esto. En tomas abiertas puede generar problemas.	Robusto, fácil mantenimiento y poco gasto de mantenimiento. Ligero, lo que facilita su montaje/desmontaje y mantenimiento. Es modular y ocupa poco espacio. Capacidad máxima: 68 m <sup>3</sup> /h.



Equipo	Mantenimiento rutinario	Desventajas	Ventajas
Deweer	En muelles de válvulas de retención, juntas de los pistones y válvulas LinX, picaduras por corrosión.	Problemas de soldaduras mal acabadas. Fallos en bomba de aceite y en válvula solenoide del sistema hidráulico. Se ha procedido a cambiar sistema de regulación hidráulico por uno eléctrico. Ocupa mucho espacio. El equipo debe estar controlado por sistema de control y todos los equipos deben estar funcionando de forma secuencial.	Flexibilidad operacional, capaz de tolerar fluctuaciones de caudal y presión sin degradación del rendimiento o daño del equipo. Los materiales son en súper-dúplex. Hace poco ruido respecto a otros equipos (<80 dB). Capacidad mínima de salmuera 200 m <sup>3</sup> /día y máxima 500 m <sup>3</sup> /día.
iSave ERDs	Reponer aceite, cambio de retenes, sello, juntas tóricas, revisar que no hay obstrucción en el rotor, asegurar flujo de lubricación.	Está muy condicionado por el tamaño de la planta. El dispositivo con mayor capacidad de salmuera es el iSave 70 con 52 m <sup>3</sup> /h. Requiere exigencia en el pretratamiento.  Ruido a tener en cuenta >80 dB.	El único control que necesita es un variador de frecuencia. Es muy compacto sin necesidad de muchas conexiones. Ocupa poco espacio. Ideal para pequeña y mediana escala.

Equipo	Mantenimiento rutinario	Desventajas	Ventajas
RO-Kinetic	Cambio de los retenes, sellos de gomas, reparación de válvulas servocomandadas e inerciales.	Complejo de desarmar por la válvula reductora. Tendencia al fallo por el carácter artesanal de la fabricación. Ha requerido cambios de acero del 904 L al Dúplex por corrosión intersticial, cambio de los retenes de las mancuernas por pérdida de agua. Ocupa mucho espacio. Capacidad máxima de 166,67 m <sup>3</sup> /h.	Evita el innecesario consumo de energía cinética que aparece en las paradas de operación. Permite regular los tiempos de cambio de cámara mediante la gestión del variador de accionamiento de las levas del sistema.

**Tabla 5. Datos cualitativos obtenidos de la recaudación de información durante las entrevistas a operarios y jefes de plantas.**

**FUENTE: Baltasar Peñate Suárez**

A partir de información recopilada por este mismo estudio, se deduce que, en general, todas las instalaciones de mediana y gran capacidad con recuperadores de energía, ya sea basados en cámaras isobáricas o desplazamiento positivo, presentan unos consumos de energía en el bastidor normalizados por debajo o muy cerca de los 3,0 kWh/m<sup>3</sup>.

Entre los operarios el sistema ERI-PX es el más deseado debido a sus numerosas ventajas frente a los demás en plantas de mediana y gran capacidad con toma por pozo costero. En los casos en los que la recogida de agua de mar se realiza por toma abierta, el ERI-PX presenta peores comportamientos por fenómenos detectados de biofouling (acumulación de microorganismos, plantas o algas en superficies húmedas). Esto provoca un incremento en el

coste de pretratamientos por lo que se prefieren instalar otros sistemas más tolerantes a este fenómeno, como el DWEER Calder.

En desaladoras de pequeña y mediana capacidad (inferior a 3000 m<sup>3</sup>/día), el sistema iSave es el equipo más prometedor, presentando consumos específicos en el proceso de desalación medidos que rondan los 2,10 kWh/m<sup>3</sup>.

En cuanto a los nuevos equipos, a continuación, se muestra una tabla comparativa con las ventajas y desventajas de los dos equipos estudiados.

Equipo	Desventajas	Ventajas
Isobarix XPR	No apto para tomas abiertas, no tolera objetos extraños y ruidoso.	Reducción de la lubricación y de las mezclas entre permeado y salmuera, eficiencia general del 1 al 2% mayor que su homólogo ERI.
Salino Pressure Center de KSB	Baja capacidad de producción, sólo apta para desaladoras de pequeña y mediana producción, aunque está presente en el mercado necesita consolidarse.	La compañía asegura un ahorro de hasta el 50% en los costes de energía, una reducción de los requisitos de mantenimiento, instalación sencilla, ahorro de espacio, no hay contacto entre salmuera y alimentación por lo que se evitan problemas de mezcla.

**Tabla 6. Comparación entre los recuperadores energéticos Isobarix XPR y el Salino Pressure Center de KSB**

En comparación con los sistemas de recuperación de energía convencionales como las turbinas Pelton o las cámaras isobáricas, KSB cree que su diseño puede producir un ahorro de hasta el 50% en los costes de energía en plantas de osmosis inversa con una capacidad de

hasta 480 m<sup>3</sup>/día. Asimismo, ofrece una reducción en los requisitos de mantenimiento, su instalación es sencilla y genera un ahorro de espacio, lo que hace que la unidad sea perfecta para desaladoras de pequeña y mediana producción. Durante pruebas, la unidad desalinizó un metro cúbico de agua de mar, con 35000 ppm en sales, a una potencia de aproximadamente 2kW/h. Isobarix explica que su recuperador Isobarix XPR, tiene una eficiencia general de entre un 1 y 2% mayor que el resto de recuperadores presentes en el mercado, utilizando la mitad de lubricación y reduciendo las mezclas entre la salmuera y el agua de mar a tratar.

## 5.4. Viabilidad técnica

### 5.4.1. Isobarix XPR

Una planta de ósmosis inversa con recuperación energética mediante el sistema Isobarix XPR es viable técnicamente además de energéticamente, tal y como se demuestra en el cálculo del consumo específico (Anexo II).

Para que una instalación de ósmosis inversa de este tipo sea segura, viable técnicamente y controlable se necesitará:

- Bastidor de ósmosis inversa.
- Recuperador energético Isobarix XPR.
- Bomba de alta presión.
- Bomba booster.
- Diferentes válvulas.
- Sistema de control.

Todo esto se puede ver con más detalle en el Plano 1, en el que se encuentra el diagrama de flujo del proceso, en el que no se tiene en cuenta ni el pretratamiento ni el post-tratamiento.

El agua de mar, previo paso por el pretratamiento, se lleva, una parte por la bomba de alta presión y la otra parte, un caudal igual al de la salmuera, por el recuperador energético Isobarix XPR. Al salir del equipo la presión es aumentada, haciendo uso de una bomba Booster. La salmuera, después de ceder su energía se lleva hacia el mar, y el agua de alimentación, ya en óptimas condiciones, entra en el bastidor de ósmosis inversa, junto con los productos de limpieza química de las membranas, del que salen por un lado el permeado (agua producto) y por otro, la salmuera (rechazo).

Para controlar el proceso, se añaden diferentes medidores de presión, de flujo y de temperatura (PI, FI y TI), además de válvulas de compuerta, anti-retorno y motorizada. Que garantizan a su vez la seguridad y la reducción de las posibles averías.

#### **5.4.2. Salino Pressure Center**

Una planta de ósmosis inversa con recuperación energética mediante el sistema compacto Salino Pressure Center es viable técnicamente además de energéticamente, tal y como se demuestra en el cálculo del consumo específico (Anexo II).

Para que una instalación de ósmosis inversa de este tipo sea segura, viable técnicamente y controlable se necesitará, además del recuperador Salino Pressure Center, el bastidor de ósmosis inversa, diferentes válvulas y un sistema de control. Todo esto se puede ver con más detalle en el Plano 2, en el que se encuentra el diagrama de flujo del proceso.

El agua de alimentación procedente del pretratamiento, pasa por una bomba que le aumenta la presión hasta 2,5 bar (requerimiento del recuperador energético). A continuación, existe un bypass, utilizado como medida de seguridad en el caso de sobrepresiones, este llevaría el agua de mar pretratada a 2,5 bar desde la entrada al recuperador hasta la salida. En el interior del recuperador compacto, parte de la energía la cede la salmuera y el resto lo aporta el motor eléctrico, saliendo el agua a la presión indicada para que se produzca la ósmosis inversa en el bastidor. De éste sale el permeado (agua producto) y el rechazo (salmuera), llevándose esta última hacia el Salino Pressure Center. Por último, parte de la salmuera, antes de ser desechada, se utiliza para la lubricación del equipo. Cabe destacar que la limpieza química para las membranas se introduce en el agua de mar antes de entrar al bastidor.

Al igual que en el sistema Isobarix XPR, para controlar el proceso, se añaden diferentes medidores de presión, de flujo de temperatura (PI, FI y TI), además de válvulas de compuerta, anti-retorno, de aguja, de seguridad y motorizada. Que garantizan a su vez la seguridad y la reducción de las posibles averías.

## **6. Pretratamientos del agua de mar**

Como se ha explicado anteriormente el pretratamiento a realizar al agua de mar dependerá del tipo de toma que se realice. Si el agua se obtiene mediante un pozo costero,

generalmente, se necesitará acidificar, añadir inhibidores de la incrustación, coagulante/floculante, desinfectar, y realizar filtración por arena y filtración de seguridad (de cartucho) previa a los bastidores de ósmosis inversa. En el caso de recibirla por toma abierta, además se deberán realizar procesos de micro o ultrafiltración con membranas.

El pretratamiento tiene como objetivo adecuar las características físico-químicas y biológicas del agua captada a las necesidades del proceso de desalación, para evitar de ese modo, la corrosión, la formación de incrustaciones y, en definitiva, el deterioro prematuro de los equipos.

Para los procesos de ósmosis inversa los objetivos del pretratamiento son los siguientes:

- Eliminar los sólidos en suspensión.
- Evitar la precipitación de óxidos metálicos.
- Evitar la precipitación de sales minerales.
- Reducir el contenido de materia orgánica del agua.
- Eliminar o reducir la actividad biológica del agua de entrada.

Una de las medidas más importantes para conocer el grado de atascamiento que puede producir un agua de mar es el SDI-SDI<sub>15</sub>, Silt Density Index, Índice de fouling o Índice de atascamiento, siendo una medida indirecta de la materia particulada o coloidal en el agua capaz de colmatar o atascar las membranas. Se obtiene de forma empírica mediante la fórmula:

$$SDI_{15} = \frac{\left[1 - \frac{t_1}{t_2}\right] \cdot 100}{15}$$

Siendo  $t_1$  y  $t_2$  los tiempos de filtración inicial ( $t_1$ ) y después de 15 minutos ( $t_2$ ), al hacer pasar 500 ml de agua a través de un filtro de 0,45  $\mu\text{m}$  a 2,1 bares de presión.

Este parámetro indica el potencial de atascamiento de un agua debido a partículas coloidales mayores de 0,45  $\mu\text{m}$  y que se correlaciona con el ensuciamiento de las membranas empleadas en la desalación, teniendo en cuenta que por cada unidad de incremento del SDI, se corresponde a un incremento geométrico de la masa de materias depositadas capaces de ensuciar las membranas, siendo 5 el valor máximo del SDI<sub>15</sub> generalmente admitido por los fabricantes de las membranas.

## **6.1. Pretratamientos instalados**

### **6.1.1. Acidificación y dosificación de inhibidores de la incrustación**

Para evitar la precipitación del carbonato cálcico el agua de alimentación se puede acidificar, ya que al disminuir el pH aumenta la solubilidad de esta sal. Por otro lado, se pueden dosificar antiincrustantes, siendo útiles tanto para los carbonatos como para prevenir la incrustación de sulfato cálcico, sulfato de bario, sulfato de estroncio y sílice, además de evitar la formación y acumulación de óxidos metálicos en la superficie de la membrana (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

Se deberá tener en cuenta el índice de Langelier (LSI), siendo mayor de 0,5 el agua es incrustante y menor de -0,5 corrosiva. Su procedimiento de cálculo se especifica en el Anexo III.

### **6.1.2. Coagulación/Floculación**

La coagulación-floculación es un proceso que sirve, junto con la decantación y la filtración, para eliminar las sustancias coloidales, tanto orgánicas como inorgánicas, que podrían atascar las membranas. Se añade al agua una sal metálica que actuará como coagulante (sales de aluminio o de hierro) que neutralizan la carga eléctrica asociada a las partículas coloidales (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

Después de esto y cuando el agua presente una concentración de materia floculada superior a 30-50 mg/l el agua se debe decantar, aunque esta etapa se puede omitir y filtrar directamente si el contenido en materia floculada es inferior a 20-30 mg/l.

Existen muchos tipos de decantadores, desde los más avanzados con sistema de recirculación de fangos y lamelas (placas), hasta otros que emplean la adición de hidróxido cálcico o hidróxido sódico para regular el pH y/o incrementar la carga a eliminar.

### **6.1.3. Desinfección**

La desinfección del agua se lleva a cabo para reducir al máximo el posible atascamiento de las membranas provocado por crecimientos microbiológicos. Este proceso se puede llevar a cabo por dosificación por dosificación de un oxidante-desinfectante químico (cloro o sus derivados normalmente) o mediante procedimientos físicos como la radiación ultravioleta, alternativas para evitar añadir oxidantes al agua (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

Cuando se emplean desinfectantes en el agua en sistemas de membranas sensibles a los oxidantes, se debe añadir un agente reductor a la misma, como el bisulfito sódico, para evitar que el agente oxidante alcance las membranas.

#### **6.1.4. Flotación**

Se trata de eliminar los sólidos capaces de flotar mediante la inyección de microburbujas de aire.

La instalación de plantas desaladoras en lugares como puertos, zonas industriales y áreas de “mareas rojas” (excesiva proliferación de microalgas en ríos, lagos y mares) ha provocado que se tengan que incorporar tratamientos para eliminar los sólidos de baja densidad como aceites, grasas y algas (Jose Luis Pérez Talavera, 2017).



**Imagen 34. Instalación de flotación en una desaladora**

*FUENTE: José Luis Pérez Talavera, Avances en la investigación e ingeniería de las técnicas e instalaciones de desalación de agua de mar en las Islas Canarias*

#### **6.1.5. Filtración granular**

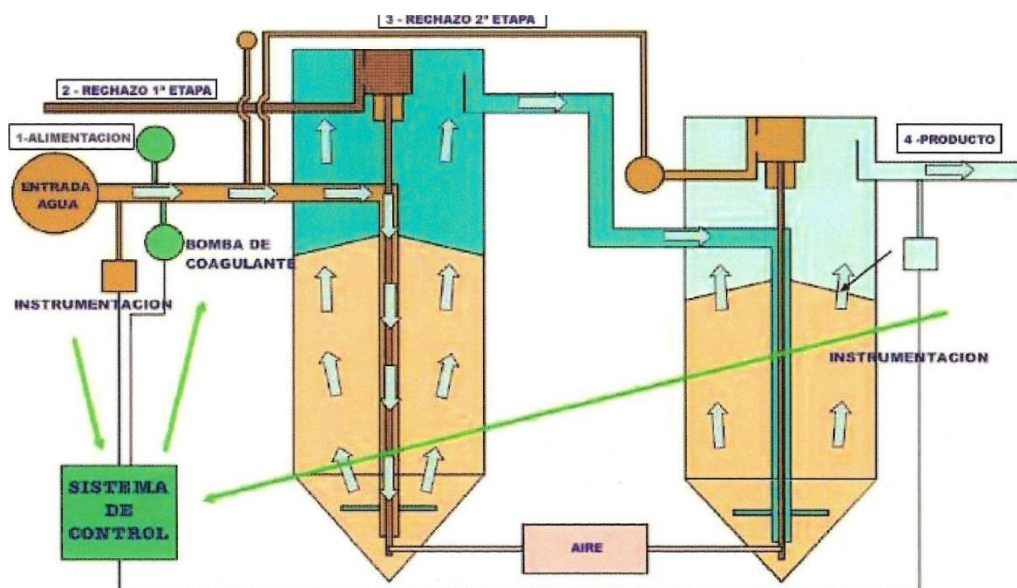
La elección del filtro dependerá del recuento de partículas y su distribución porcentual en el agua de alimentación. Esta etapa es obligatoria en la mayoría de los casos a no ser que el agua captada tenga un índice de ensuciamiento  $SDI_{15}$  inferior a 3 y se mantenga constante a lo largo del año y durante la vida de la planta.



Los filtros deberán estar dotados de un sistema de reparto de flujo que garantice un régimen de circulación lo más laminar posible, así como con un sistema de aire a baja presión a contracorriente que facilite el lavado del material filtrante.

Si la toma se realiza de forma abierta, la filtración deberá ser realizada en dos etapas, la primera de desbaste, formada por carbón y arena, y la segunda de afino, formada por arena y granate.

Uno de los filtros granulares de flujo ascendente utilizados es el sistema de filtración Dual Sand, cuyo esquema de funcionamiento se puede observar a continuación.



**Imagen 35. Funcionamiento de los filtros Dual Sand**

El agua de alimentación se introduce en el filtro a través de la tubería de entrada, entonces, se canaliza a través del tubo de alimentación y pasa al elemento interno donde es introducida en el lecho de arena.

El distribuidor radial se utiliza para repartir homogéneamente el agua de entrada en la arena. A partir de este momento el agua comienza a ascender a través del lecho arenoso, efectuándose de esta forma el proceso de filtrado.

El agua filtrada pasa por encima del vertedero, en la parte alta de la unidad, y sale como agua producto del proceso.

La arena sucia se encuentra en la parte baja de la unidad, siendo la suciedad eliminada constantemente mediante una bomba y elevada al compartimiento central de rechazo en la parte alta de la unidad. La bomba inyecta aire en la parte baja causando la elevación por arrastre de la arena. Este sistema de elevación por insuflación de aire permite no sólo la elevación de la arena, sino también un eficaz lavado al favorecer la separación de los sólidos de la arena, con un esponjamiento del lecho filtrante.

Desde el compartimiento central la arena limpia cae hacia la parte alta del lecho arenoso a través del lavador de arena.

Al mismo tiempo, una parte del agua limpia se encuentra ascendiendo por el interior del lavador y este flujo contrario permite separar la suciedad adherida a la arena. Como resultado la arena caerá limpia sobre la parte alta del lecho.

El agua de lavado arrastrará la suciedad a través del lavador de arena hasta el compartimiento central o cazoleta de rechazo. La cantidad de agua de rechazo es controlada por la rejilla de rechazo en el compartimiento central, relativa al nivel del agua en el tanque de filtrado.

Con la finalidad de optimizar el rendimiento del sistema, esta agua de rechazo producida puede ser recirculada enviándose nuevamente a cabecera de planta.

La incorporación de un segundo filtro permite que el agua producto del primero se convierta en el agua de entrada de este segundo filtro, y de igual forma, el rechazo producido en este segundo filtro es recirculado hacia el canal de entrada del primer filtro con lo que se consigue optimizar el rendimiento del sistema a la vez que mejorar claramente la calidad del agua producto así obtenida.

#### **6.1.6. Filtración de malla automática**

Eliminan sólidos de un tamaño relativamente grande mediante una pantalla filtrante, siendo sustitutos de los filtros granulares.

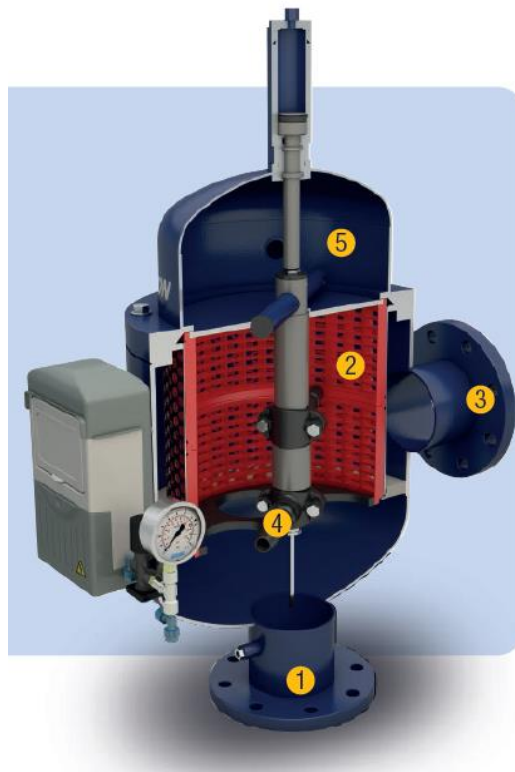
Entre sus ventajas se encuentran su autolimpieza, cuando se detecta una caída de presión preestablecida se activa el mecanismo de limpieza.

El agua ingresa en el sistema (1) y fluye al interior del elemento filtrante. A continuación, el agua pasa a través de la malla (2), de manera que las partículas quedan retenidas en la cara

interna del elemento filtrante y el agua filtrada continúa su trayecto hasta el colector de salida (3).

Cuando se produce un incremento del diferencial de presión se provoca el inicio del ciclo de limpieza. Se abre la válvula hidráulica situada a la salida de drenaje, lo que crea una succión en el extremo de las boquillas interiores del filtro (4). Estas, sujetas a un movimiento helicoidal a lo largo de la malla, aspiran las partículas filtradas. La suciedad se expulsa por el drenaje (5) (azud.com).

El tiempo de duración de este proceso está preestablecido por el controlador. Cuando se cumple, la válvula de lavado se cierra y finaliza el proceso de limpieza, con un gasto mínimo de agua.



**Imagen 36. Interior de filtro de malla autolimpiante**

*FUENTE: Azud S.A.*

### **6.1.7. Filtración por cartucho**

La filtración por cartucho es el mínimo pretratamiento necesario para una planta de ósmosis inversa. El poro nominal de los cartuchos normalmente está comprendido entre 1 y 5

$\mu\text{m}$  nominales (20  $\mu\text{m}$  absolutos) para asegurar la protección de las membranas ante la posibilidad de que el agua arrastre macropartículas en suspensión.

Se tratan de filtros de seguridad y siempre se deben instalar inmediatamente anteriores a las membranas.

A la salida de los mismos las aguas deben presentar una turbidez inferior a 1 NTU y los valores de  $\text{SDI}_{15}$  deben ser adecuados para las membranas utilizadas (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

### 6.1.8. Ultrafiltración

La ultrafiltración es un proceso de membrana situado entre la microfiltración y la nanofiltración, con un tamaño de poro comprendido entre 0,1 y 0,001  $\mu\text{m}$ , aunque normalmente para expresar el tamaño de exclusión se refiere al corte molecular (peso molecular de macromoléculas tales como dextrano y proteínas globulares), expresado en Daltons.

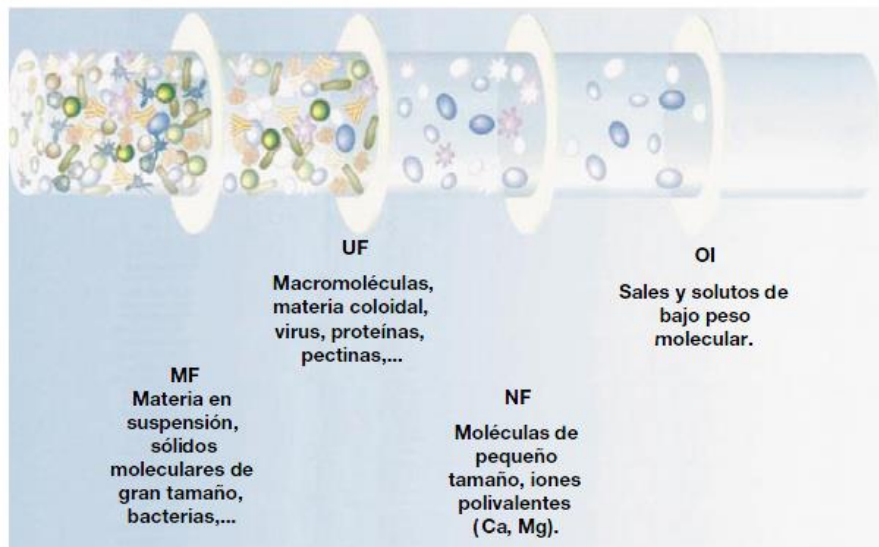


**Imagen 37. Ultrafiltración con membrana en espiral**

***FUENTE: AQUAESPaña***

Aunque los cortes moleculares de las membranas de ultrafiltración están comprendidos entre los 5.000 y los 500.000 Daltons, suelen usarse en pretratamientos valores de corte moleculares comprendidos entre los 100.000 y los 150.000 Daltons, equivalentes a un tamaño de poro aproximado de 0,025, lo que permite eliminar macromoléculas, materia en suspensión, bacterias, proteínas, virus y sílice coloidal (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

## SEPARACIÓN POR MEMBRANAS



**Imagen 38. Capacidad de eliminación de las diferentes membranas**

**FUENTE: Dow Chemical**

La mayoría de las membranas son de naturaleza orgánica, fabricadas en materiales poliméricos como polisulfona, fluoruro de polivilideno, poliamida, acetato de celulosa... y cuyas configuraciones suelen ser en fibra capilar de distintos diámetros, en forma de membranas planas en estructura compacta o casete, y también de arrollamiento en espiral. Por otro lado, también existen membranas inorgánicas, de tipo cerámico multicanal a base de óxido de zirconio, aunque son empleadas más bien en tratamientos de aguas industriales.

Las membranas de ultrafiltración se utilizan en sistemas tanto de flujo cruzado como de flujo directo.

Las instalaciones de ultrafiltración, están compuestas, por:

- Prefiltro de protección, para eliminar partículas de gran tamaño que puedan obstruir las fibras capilares de las membranas, con mallas autolimpiables con tamaño de luz comprendido entre 80 y 150  $\mu\text{m}$ .
- Bombeo de aportación a membranas del agua de entrada, con variador de frecuencia.
- Sistema de retrolavado secuencial, según la pérdida de carga, con aire y/o agua, con o sin producto químico, incluyendo compresor de aire y bombeo de agua tratada.

## **6.2. Comparación entre Ultrafiltración y Filtración granular**

En los últimos años se han ido eliminando los filtros de arena y se han ido sustituyendo por la ultrafiltración, aunque la efectividad de esta última en la práctica no ha sido la mejor.

Según la experiencia del Profesor Doctor José Luis Pérez Talavera después de haber usado ambos sistemas en plantas de ósmosis inversa, considera que las plantas con sistemas de ultrafiltración sufren diferentes problemas de ensuciamiento, tanto en los filtros de cartuchos como en las membranas de ósmosis inversa, a las cuales se supone que debería proteger.

Uno de los factores que nos indica la efectividad de la filtración en el pretratamiento es la vida de los filtros de cartucho. Con los filtros granulares ésta es de alrededor de 6 meses, mientras que con la ultrafiltración oscila entre 1 o 2 meses solamente. Obviamente, esto supone un costo añadido por la frecuente reposición de los cartuchos del filtro (José Luis Pérez Talavera, 2017).

Otro de los factores es el SDI<sub>15</sub> del agua filtrada, donde los fabricantes solo garantizan valores 2,5-2 después de la ultrafiltración, en comparación con los logrados por los filtros granulares, menores a 2.

Otro indicador y el más importante es el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa. En plantas con filtros granulares las membranas se lavan normalmente una vez al año, mientras que con ultrafiltración es necesario lavarlas cada mes o dos meses debido al alto ensuciamiento biológico que sufren.

Otros aspectos a considerar son las necesidades de la ultrafiltración: filtro previo de 100-300 µm, varios productos químicos diarios para los contralavados y el alto precio de la reposición de membranas.

## **6.3. Pretratamientos analizados**

A continuación, se estudiarán diferentes métodos novedosos en los que se ha investigado en diferentes lugares del mundo, cuyo fin consiste en mejorar las características del agua de mar que se someterá al proceso de ósmosis inversa. Aunque se trata de sistemas analizados a pequeña escala, pueden dar paso a nuevos procesos industriales en el futuro.

### 6.3.1. Electrocoagulación

La electrocoagulación (EC) se evaluó como pretratamiento para la desalinización de agua de mar mediante ósmosis inversa en un estudio realizado por diferentes laboratorios de Francia y Marruecos (Hakizimana et al.).

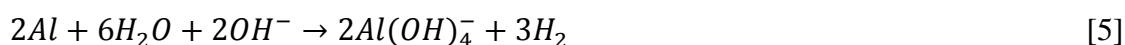
La EC es un proceso electroquímico en el cual los cationes metálicos son generados in situ por la electrodisolución del ánodo bajo la acción de corriente eléctrica aplicada entre los electrodos. Estos cationes metálicos son propensos a la hidrólisis, llevando de esta manera a hidróxidos metálicos. Dependiendo del pH del medio acuoso estos se comportan como coagulante y/o adsorbente y/o captador electrostático de sustancias contaminantes para su extracción. La reacción de oxidación se produce en el ánodo y la de reducción en el cátodo. Éstas se resumen a continuación:

- En el ánodo:  $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$
- En el cátodo:  $2H_2O \rightarrow H_2 + 2OH^{-}$

Junto a la mencionada reacción, pueden ocurrir reacciones secundarias en el ánodo en el caso de que el potencial en él sea alto. Estas pueden ser: oxidación de iones de  $Cl^{-}$  presentes en el agua hasta cloro que es transformado en  $ClOH/ClO^{-}$  a través de oxidación por el agua. Al contrario que la oxidación de agua en  $O_2$ , que baja la eficiencia de Faraday de Al liberado, la oxidación de  $Cl^{-}$  en  $Cl_2$  y  $ClOH$  (oxidantes más fuertes) puede ser beneficiosa para el tratamiento del agua. Es importante anotar que un alto potencial en el ánodo podría llevar también a la oxidación directa de componentes orgánicos.



También pueden ocurrir reacciones secundarias en los electrodos debido al ataque químico de aluminio puro bajo condiciones ácidas o alcalinas, tal y como se describe a continuación.



Este proceso fue utilizado como alternativa para reemplazar los pretratamientos convencionales usados para mitigar el (bio)fouling en las membranas, como la coagulación química, la cloración y los inhibidores de incrustaciones. Para ello se utilizó una celda discontinua usando electrodos de aluminio conducidos en modo galvanostático. Como medida de efectividad del proceso en la eliminación de materia orgánica se midió la absorbancia y el carbono orgánico disuelto. Asimismo, se enumeraron bacterias heterótrofas para evaluar la habilidad de desinfección de la EC y además se midió dureza total. Por otro lado, se estudió la influencia de varios parámetros, como la velocidad de mezclado, la densidad de flujo eléctrico, el pH inicial y la distancia entre los electrodos.

Después de este experimento se llegaron a las siguientes conclusiones:

- La investigación de la eliminación de la materia orgánica del agua de mar mostró que la eficacia de eliminación mejora con corrientes de densidad altas y bajo pH. La electrocoagulación fue capaz de conseguir un 57,5% de eliminación de DOC y un 81% de eliminación de absorbancia para una densidad eléctrica de  $5,6 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  en las condiciones óptimas de operación.
- La eficacia de eliminación de la dureza total del agua de mar por EC para evitar el problema de incrustaciones en las membranas de ósmosis inversa no fue la esperada, ya que solo se redujo un 10%. A pesar de que las incrustaciones en el cátodo fueron siempre bajas, permanecen siendo una limitación a la electrocoagulación, aunque puede ser fácilmente detectada por un incremento de la potencia de la celda y de la potencia consumida. Para evitar este problema, la literatura recomienda el uso de cátodos de acero inoxidable, aunque en la práctica esto implica una limitación en el aumento del pH.
- La EC consiguió una alta eficiencia de desinfección ya que se eliminaron casi por completo las células microbianas. Esto confirma que la EC sería un proceso de desinfección adecuado previo a la desalinización y una buena alternativa a la cloración, ya que éste último presenta muchos inconvenientes, como ineffectividad para prevenir el biofouling y su reactividad con componentes orgánicos que pueden llevar a la formación de componentes orgánicos cancerígenos. Además, la cloración del agua de mar puede provocar la fragmentación de sustancias húmicas en pequeños fragmentos orgánicos fácilmente asimilables por microorganismos, y por lo tanto, causantes de biofouling.



En resumen, esta investigación sirvió para incrementar el interés por la electrocoagulación, siendo un pretratamiento previo a la ósmosis inversa efectivo ya que se obtuvieron resultados interesantes en la reducción de DOC y en la eliminación de microorganismos. Por lo tanto, se demuestra que la EC es una alternativa efectiva para sustituir al mismo tiempo la coagulación química y la cloración, pues es capaz de evitar simultáneamente el ensuciamiento orgánico y la bioincrustación en las membranas.

### **6.3.2. Adsorción mediante carbón activado granular y Ultrafiltración**

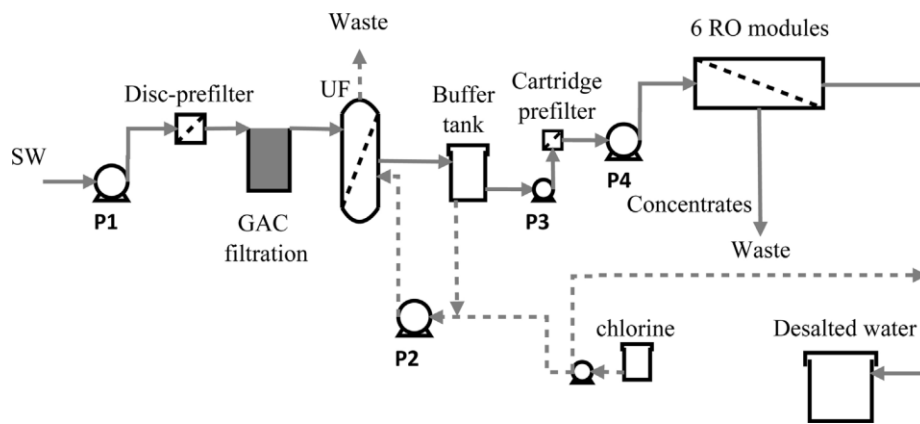
La Universidad de Toulouse, Francia, realizó un estudio en el que se utilizó como pretratamiento para una pequeña planta de ósmosis inversa (5 m<sup>3</sup>/día) adsorción mediante carbón activado granular y ultrafiltración (Monnot Mathias, et al.).

En primer lugar, el agua de mar se hizo pasar por un prefiltro de disco de 200 µm para prevenir el rápido atascamiento del filtro por carbono granular activado (GAC) por partículas marinas. A continuación, el agua entraba en el lecho GAC presurizado, midiéndose la pérdida de carga producida en el lecho mediante manómetros colocados en la entrada y en la salida del mismo.

Posteriormente, el agua fue sometida a ultrafiltración y a la salida se almacenó en un tanque cerrado para albergar el agua filtrada.

Finalmente, el agua de mar entraba a los módulos de ósmosis inversa impulsada desde el tanque de almacenamiento del permeado de ultrafiltración mediante una bomba de refuerzo y una bomba de alta presión, pasando previamente por un filtro de cartuchos de 5-µm. Los 6 módulos de ósmosis inversa 2540 estaban dispuestos en dos depósitos de presión en serie, conteniendo 3 módulos cada uno. Finalmente, el agua desalada fue almacenada en un tanque de 3 m<sup>3</sup> dónde se realizaba la cloración.

En el diagrama de flujo siguiente se puede observar el proceso descrito.



**Imagen 39. Diagrama de flujo de proceso de desalación de agua de mar por ósmosis inversa haciendo uso de filtración GAC y ultrafiltración.**

*FUENTE: (Monnot Mathias, et al.)*

Este proceso fue utilizado para abastecer las necesidades de un pueblo de 250 habitantes, considerando las necesidades mínimas de agua potable establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 20 litros por persona y día.

La pequeña planta fue capaz de operar durante 50 días con unos índices de recuperación de entre el 50 y el 70%, dependiendo de la salinidad del agua de entrada y su temperatura.

Durante el período de operación no se apreció (bio)fouling en las membranas de ósmosis inversa, lo que indica una alta eficiencia del pretratamiento estudiado. Tal y como se esperaba, el lecho GAC consiguió eliminar la mayoría de DOC, incluyendo incluso las fracciones de bajo peso molecular, y la ultrafiltración se encargó de reducir el resto. Cabe destacar que el lecho GAC protegió a la UF de un rápido atascamiento y que fueron usados muy pocos productos químicos durante el periodo completo de operación.

Cuando la cabeza del lecho GAC estaba saturada se realizaban lavados manuales a contracorriente con un flujo de agua limpia de 2 a 5 veces mayor que el de la filtración, este se ensuciaba debido principalmente a las partículas menores a 200  $\mu\text{m}$  que pasaban por el prefiltrado, filtro que también tuvo que ser lavado en diferentes ocasiones.

Cabe destacar, como ya se ha comentado, el poco uso de productos químicos en esta planta piloto ya que el lecho GAC se activó físicamente con un tratamiento térmico y los 100 kg de GAC no se reemplazaron en ningún momento, aunque estuviese saturado. Sólo fueron utilizados químicos para la desinfección del lavado a contracorriente, del permeado de la UF y del agua desalada. Además, no fueron necesarias limpiezas ni de las membranas de UF ni de

las membranas de ósmosis inversa durante el periodo de operación, aunque como inconvenientes se encuentran que, el carbón activo tiene un valor en el mercado muy elevado, y se utilizó una gran cantidad de agua limpia a contracorriente para las operaciones de limpieza del prefiltro y del lecho GAC.

En el estudio se indica que se podrían realizar diferentes mejoras para reducir el mantenimiento necesitado, el consumo de agua limpia y los lavados del lecho GAC, siendo unos de los cambios propuestos sustituir el prefiltro de 200  $\mu\text{m}$  por uno de 100  $\mu\text{m}$ .

### **6.3.3. Membranas mejoradas con nanotubos de carbono**

El uso de membranas mejoradas con nanotubos de carbono como pretratamiento para la desalación de agua de mar por ósmosis inversa, fue estudiado por diferentes investigadores procedentes de la Universidad de Sidney, Universidad de Tecnología de Sidney, la Universidad de Ciencia y Tecnología del Rey Abdullah (Arabia Saudí) y la Universidad de Nueva Gales del Sur (Australia) (Lee Jieun, et al.).

El agua utilizada para este experimento fue tomada de Chowder Bay (Sydney) y previamente fue sometida a una filtración centrífuga (140  $\mu\text{m}$ ) para eliminar las grandes partículas.

Las membranas mejoradas con nanotubos de carbono (MWCNT) hidroxiladas fueron suministradas por BuckyUSA y los nanotubos de carbono (CNTs) tenían las siguientes características: diámetro de 5-15 nm, longitud de 1-5  $\mu\text{m}$  y un 98% de pureza en peso.

Se evaluaron las prestaciones de dos membranas diferentes en el sistema de membrana con adsorción (adición de PAC, carbón activo en polvo): PES, (una membrana de ultrafiltración preparada en laboratorio) y de la membrana MWCNT.

Para el sistema de membrana con adsorción de PAC, se añadieron 0,5 y 1,5 g/l de PAC al agua de mar en el sistema de adsorción y a continuación esta fue sometida a filtración por membrana. También se llevó a cabo la filtración de membrana sin pretratamiento de adsorción (PAC=0 g/l) para evaluar el funcionamiento del propio sistema de filtración por membrana. En total se filtró 1 litro de agua de mar y se monitorizó la permeabilidad durante este tiempo.

Con la membrana MWCNT la permeabilidad del agua ultra pura fue significativamente mayor que con la membrana PES-UF. En cambio, en el caso de la filtración de agua de mar, la permeabilidad medida se redujo bastante con las membranas MWCNT, siendo el flujo de permeado inicial 4 veces inferior que en el anterior caso. Sin embargo, no hubo cambios importantes utilizando la membrana PES-UF.

Para medir la reducción de materia orgánica, se disolvió ácido húmico (HA) en agua ultra pura y fue testado con las dos membranas, siendo la tasa de eliminación en la membrana MWCNT mayor.

El PAC demostró una alta eficacia de eliminación de los compuestos orgánicos hidrofílicos, aunque la reducción de los compuestos neutros de bajo peso molecular fue mínima. Por ejemplo, utilizando una dosis de PAC de 1,5 g/l se eliminó alrededor del 50% del DOC, debido principalmente por la eliminación de biopolímeros (87%) y de sustancias húmicas (48%). En cambio, con la dosis de PAC de 0,5 g/l la reducción de DOC fue solo de 37%.

En resumen, este estudio demostró que las membranas MWCNT pueden ser una opción de pretratamiento para la desalación de agua de mar mediante membranas de ósmosis inversa. Las mismas tuvieron un mejor flujo de permeado con el acople de la adsorción de PAC que en el caso de las membranas PES-UF. Esto se debe al incremento de la porosidad, la hidrofiliidad y su estructura, con tamaño de poro estrecho en la parte superior y microporos en la subcapa. Incluso cuando el PAC se redujo de 1,5 g/l a 0,5 g/l no hubo grandes cambios ni en el flujo de permeado ni en la eficacia de eliminación, lo que puede contribuir a reducir sustancialmente el volumen de lodo generado por el pretratamiento de la ósmosis inversa ya que se podría reducir el uso de químicos.

#### **6.4. Comparación entre pretratamientos investigados**

Las características de las aguas de mar utilizadas para cada uno de los pretratamientos descritos anteriormente no son las mismas ya que la electrocoagulación se estudió con agua del Océano Atlántico, la adsorción mediante carbono activo granular y posterior ultrafiltración, con agua del Mar Mediterráneo y las membranas mejoradas con nanotubos de carbono con agua procedente del Mar de Tanzania. Por lo tanto, la comparación de la efectividad de los mismos no se puede realizar. En su lugar, se expondrán los diferentes logros conseguidos por cada uno de los procesos.

- La electrocoagulación, utilizando la densidad de corriente eléctrica más alta del estudio ( $22,4 \text{ mA/cm}^2$ ), consiguió que el DOC pasara de  $1,34 \text{ mg/l}$  a  $0,39 \text{ mg/l}$  en 40 minutos, lo que corresponde a una eficacia de eliminación del 79,8%. Además, con un pH inicial del agua de 4, la absorbancia  $\text{UV}_{294\text{nm}}$  se redujo de  $1,95 \text{ m}^{-1}$  a  $0,02 \text{ m}^{-1}$ , lo que se resume en un 89% de eliminación. Por otro lado, al cabo de 10 minutos y con densidades de corriente eléctrica de  $11,2$  y  $22,4 \text{ mA/cm}^2$  se eliminaron por completo las bacterias heterótrofas. Haciendo uso de  $5,6 \text{ mA/cm}^2$  esto se consiguió a los 20 minutos. Este proceso además se utilizó para comprobar su efectividad reduciendo la dureza aunque esta solo fue del 8 al 13%.
- El lecho GAC consiguió eliminaciones del 90% al 60% de DOC en los primeros 5 días de operación. El resto de días, debido principalmente a la saturación del mismo, la eliminación se encontraba entre el 20 y 50%. Se consiguieron eliminar todas las fracciones de DOC, excepto la cTEP que incrementó un 20%. Luego haciendo pasar el agua por la UF se redujo la turbidez, se eliminaron por completo las bacterias que no eliminó el lecho GAC, así como la fracción cTEP.
- Las MWCNTs lograron la eficacia de eliminación más alta de DOC con la adición de  $1,5 \text{ g/l}$  de carbón activo (PAC), siendo esta del 66% (92% de biopolímeros, 61% de sustancias húmicas, 78% de *building blocks*, 34% de partículas neutras de baja masa molecular, 91% de ácidos de baja masa molecular y 62% de DOC hidrofílico).

Cabe destacar que el único método utilizado como pretratamiento a escala planta piloto fue el de adsorción con el lecho GAC y posterior UF, logrando abastecer a una población con  $5 \text{ m}^3$  diarios de agua potable. Las membranas MWCNTs y la electrocoagulación se utilizaron en laboratorio para comprobar su efectividad, las primeras filtrando 1 litro de agua de mar y el segundo usando un vaso de vidrio de laboratorio.

Se tratan los tres de pretratamientos muy novedosos y prometedores, aunque la adsorción mediante el lecho GAC y posterior UF, al haber conseguido filtrar un mayor volumen de agua salada, es el que mayor fiabilidad presenta. Aun así, se podrían realizar algunas mejoras como utilizar un pre-filtrado de  $100 \mu\text{m}$  en lugar de uno de  $200\mu\text{m}$ , automatizar los lavados y sustituir el lecho GAC, ya que el carbón activo tiene un precio muy elevado en el mercado. De esta manera se reduciría el rápido ensuciamiento del lecho GAC y así se evitarían los asiduos lavados a contracorriente del lecho con agua limpia.

## 6.5. Viabilidad técnica

### 6.5.1. Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso que solo se ha probado a escala de laboratorio, por lo que si se quisiera implantar a una escala mayor, en primer lugar, se deberían probar los resultados en una escala planta piloto, estableciendo la configuración del equipo para que sea capaz de adaptarse a la escala industrial (colocación de electrodos, una o varias etapas, limpieza...).

Para que este proceso pueda ser incluido en el pretratamiento de una planta de ósmosis inversa y el agua de entrada a los bastidores cumpla los requisitos mínimos para la protección de las membranas, evitando el biofouling y las incrustaciones, el pretratamiento deberá seguir los siguientes tratamientos:

1. Prefiltrado de 100  $\mu\text{m}$ : se evita la inclusión de las partículas de mayor tamaño presentes en el agua de mar obtenida mediante pozo costero.
2. Acidificación: se consigue el pH 4 inicial con el que se consiguieron los mejores resultados en el estudio de la electrocoagulación, añadiendo ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).
3. Electrocoagulación: si se cumplen los resultados del estudio realizado, se eliminaría la mayoría de la materia orgánica y los microorganismos presentes en el agua de mar.
4. Adición de inhibidor de incrustaciones: se evitan las incrustaciones de carbonato cálcico, sulfato cálcico, sulfato de bario, sulfato de estroncio y sílice.
5. Filtración por cartuchos: se realiza inmediatamente anterior a los bastidores de ósmosis inversa como medida de seguridad, ya que es una filtración más fina y elimina principalmente las pequeñas partículas coloidales.

En el plano 3 se puede observar el diagrama de flujo del pretratamiento, donde se tiene en cuenta lo explicado anteriormente, y en el que se incluyen además las bombas, válvulas, medidores de presión, caudal y temperatura necesarios para que el proceso sea viable técnicamente.

### **6.5.2. Adsorción mediante carbón activado granular y Ultrafiltración**

Este pretratamiento es el más prometedor ya que ha logrado abastecer de agua potable a una pequeña población, aunque como se comentó anteriormente, en el proceso podrían implantarse algunas mejoras, por lo que se tendrán en cuenta en este apartado.

Para que la adsorción mediante lecho de carbón activado granular y posterior ultrafiltración sea utilizado como pretratamiento para una planta de ósmosis inversa de agua de mar se deberán incluir además los siguientes procesos:

1. Prefiltrado de 100  $\mu\text{m}$ : se evita el rápido ensuciamiento del lecho GAC eliminando las partículas de mayor tamaño presentes en el agua de mar obtenida mediante pozo costero.
2. Adsorción mediante lecho de carbón activado granular: se reduce la materia orgánica presente en el agua de mar.
3. Ultrafiltración: se elimina la materia orgánica no eliminada por el lecho GAC, reduce la turbidez y elimina bacterias.
4. Desinfección: se añade hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) para evitar la proliferación de los microorganismos presentes en el agua de mar.
5. Filtración por cartuchos: se realiza inmediatamente anterior a los bastidores de ósmosis como medida de seguridad, pues es una filtración más fina y elimina principalmente las pequeñas partículas coloidales.
6. Adición de inhibidor de incrustaciones: se evitan las incrustaciones de carbonato cálcico, sulfato cálcico, sulfato de bario, sulfato de estroncio y sílice.
7. Oxidación: se añade un reductor de óxidos, bisulfito de sodio ( $\text{NaHSO}_3$ ) para neutralizar el cloro libre resultante de la desinfección y proteger de esta manera las membranas.

En el plano 4 se puede observar el diagrama de flujo del pretratamiento utilizando el lecho GAC y UF. En él se tiene en cuenta lo explicado anteriormente, y además se incluyen las bombas, válvulas, medidores de presión, caudal y temperatura necesarios para que el proceso sea viable técnicamente.

### **6.5.3. Membranas mejoradas con nanotubos de carbono**

Las membranas mejoradas con nanotubos de carbono se probaron filtrando 1 litro de agua de mar, por lo que, al igual que la electrocoagulación, se debe estudiar previamente a escala planta piloto si se quiere implantar como parte del pretratamiento de una planta desaladora de agua de mar mediante ósmosis inversa.

Para que este pretratamiento sea efectivo, como en los casos anteriores, además se deben incorporar los siguientes procesos:

1. Prefiltrado de 100  $\mu\text{m}$ : elimina las partículas de mayor tamaño presentes en el agua de mar obtenida mediante pozo costero.
2. Mezclado con carbón activo en polvo: adición y mezcla de PAC al agua de mar. En el estudio realizado se demostró la mejoría en los resultados al añadir PAC.
3. Filtración por membranas mejoradas con nanotubos de carbono: si se cumplen los resultados del estudio, eliminarían la mayoría de la materia orgánica.
4. Desinfección: se añade hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) para evitar la proliferación de los microorganismos presentes en el agua de mar.
5. Acidificación: se añade ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).
6. Filtración por cartuchos: se realiza inmediatamente anterior a los bastidores de ósmosis como medida de seguridad, ya que es una filtración más fina y elimina principalmente las pequeñas partículas coloidales.
7. Adición de inhibidor de incrustaciones: se evitan las incrustaciones de carbonato cálcico, sulfato cálcico, sulfato de bario, sulfato de estroncio y sílice.
8. Oxidación: se añade un reductor de óxidos, bisulfito de sodio ( $\text{NaHSO}_3$ ), para neutralizar el cloro libre que resulta de la desinfección y así proteger las membranas.

En el plano 5 se puede observar el diagrama de flujo del pretratamiento utilizando la filtración con membranas mejoradas con nanotubos de carbono. En él se tiene en cuenta lo explicado anteriormente, y además se incluyen las bombas, válvulas, medidores de presión, caudal y temperatura necesarios para que el proceso sea viable técnicamente.

## 7. Post-tratamiento

El agua producto de una desaladora por ósmosis inversa puede ser utilizada principalmente para procesos industriales, como agua de regadío o para conectarla a la red de suministro de agua y así suplir la demanda de la zona.



En el caso de que se utilice como suministro de agua a la población, según el Real Decreto 140/2003, “*el agua de consumo humano deberá ser salubre y limpia. No debe contener ningún tipo de microorganismo, parásito o sustancia, en cantidad o concentración que pueda suponer un riesgo para la salud humana*”.

Es por esto que, como ya se comentó anteriormente, el permeado obtenido de la ósmosis inversa debe ser sometido a un acondicionamiento para poder ser suministrado a la red de agua correspondiente debido a su baja alcalinidad, dureza y carácter agresivo. A continuación, se expone una tabla con las propiedades físico químicas típicas del permeado de ósmosis inversa.

STD (mg/L)	≈280 (≈72% ClNa)
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	2-4
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	<2,5
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	<4
CO <sub>2</sub> (mg/L)	0,8-16
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	60-200
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	2-5,7
Turbidez (NTU)	≈0,2
pH	5,3-6,7
LSI	<-4

**Tabla 7. Características físico-químicas del permeado de ósmosis inversa**

**FUENTE:** *Guía para la remineralización de las aguas desaladas, Manuel Hernández Suárez*

Algunas aguas pueden salirse de este rango debido a tratamientos específicos. Concretamente, los casos de pHs altos suelen estar relacionados con la necesidad de aumentar el rechazo de boro en las membranas.

En primer lugar, se debe remineralizar ya que el agua que sale de los bastidores es un agua desmineralizada debido a la efectividad de las membranas.

Además, en muchos de los casos, se clora como medida de desinfección.

Y, por último, si procede, se elimina el boro presente que no se elimina en los bastidores.

## 7.1. Remineralización

La remineralización química del agua tiene como objetivo producir un agua con un índice de Langelier muy próximo a cero y que permanezca estable en contacto con la atmósfera. Además, se trata de conseguir esto con un consumo mínimo de CO<sub>2</sub> con el fin de minimizar los costes de explotación.

Se considera que para que un agua desalada esté bien remineralizada, en un rango de temperaturas entre 14° y 25°C, deberá tener las características que se presentan en la siguiente tabla.

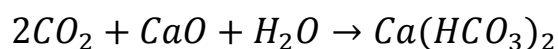
Parámetro	Rango
pH	8,2 ± 0,1
Alk, mg CaCO <sub>3</sub> /L	56 ± 3
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/L	68 ± 3
Ca <sup>2+</sup> , mg/L	21 ± 2
CO <sub>2</sub> , mg/L	0,7 ± 0,1
LSI (SM2330)	± 0,15

**Tabla 8. Características recomendadas para las aguas desaladas con un nivel adecuado de remineralización**

**FUENTE:** *Guía para la remineralización de las aguas desaladas, Manuel Hernández Suárez*

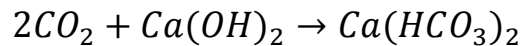
La misma puede realizarse por medio de varios procedimientos (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009):

- Dosificación de CO<sub>2</sub> y cal viva: se incrementa el contenido en bicarbonatos y en calcio, lo que provoca un aumento de la dureza y de la alcalinidad del producto final. Las dosis dependerán del resultado final que se quiera lograr. Siendo la reacción que tiene lugar la siguiente:



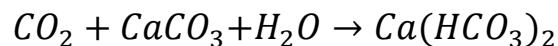
- Dosificación de CO<sub>2</sub> e hidróxido cálcico: tiene el mismo resultado que el proceso anterior, aunque se utiliza un reactivo menos problemático ya que no desprende tanto

calor al disolverse. El hidróxido cálcico se trata de un sólido que se debe disolver antes de dosificar. Por este motivo, se genera una solución llamada “lechada de cal” en un silo con  $\text{Ca(OH)}_2$  y agua producto al 10-15%. En grandes instalaciones esta solución se hace pasar por unos saturadores para diluirla en mayor volumen con el fin de obtener una solución normalmente al 5-7% de agua saturada de cal, siendo así más fácil la dosificación. Esta agua saturada se mezcla con el agua a remineralizar en una cámara a la que se añade  $\text{CO}_2$  para facilitar la siguiente reacción:



El proceso se controla mediante un analizador en continuo de pH colocado al final de la cámara de reacción.

- Dosificación de  $\text{CO}_2$  y lechos de carbonato cálcico (calcita): estas instalaciones están incrementándose en los últimos años. Los lechos pueden ser de flujo descendente, a modo de filtros abiertos convencionales o de flujo ascendente y altura constante, que minimizan el problema de la carga periódica que debe hacerse en los lechos abiertos. La reacción que se produce es la siguiente:

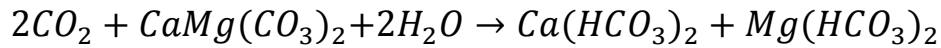


La calcita es carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) que puede obtenerse de elevada pureza y libre de trazas de otras rocas carbonatadas. Su composición media en CaO es del 55%.

La ventaja de usar calcita frente a  $\text{Ca(OH)}_2$ , es que con la calcita se obtiene más cantidad de bicarbonatos con el mismo consumo de  $\text{CO}_2$ , además, con el paso del agua por los lechos de calcita, hace que alcance el equilibrio (pH de saturación) automáticamente, disolviendo para ello la cantidad exacta que necesita de carbonato de calcio, sin necesidad de equipos de control y dosificación.

- Dosificación de  $\text{CO}_2$  y torres de dolomitas: la dolomita es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio [ $\text{CaMg(CO}_3)_2$ ], con una proporción aproximada de CaO del 30,5% y del 21% de MgO. Igual que en el caso de la calcita se obtiene más cantidad de bicarbonatos, con el mismo consumo de  $\text{CO}_2$ . Además en este caso se obtiene un ión adicional de magnesio, lo que representa una ventaja económica ya que se logra una mayor dureza y una mayor alcalinidad con la misma cantidad de anhídrido carbónico. También en este caso el paso del agua por las torres de dolomitas hace que alcance el equilibrio (pH de saturación) sin necesidad de equipos de control, aunque el tiempo de contacto es mayor que en otros lechos.

La reacción que tiene lugar es la siguiente:



- Dosificación de cloruro magnésico y bicarbonato sódico: se introducen iones de bicarbonato y de magnesio dando dureza y alcalinidad, pero añade más iones cloruro y sodio, los más abundantes en el agua producto. Se trata de un sistema costoso económicamente por los reactivos que utiliza.

## 7.2. Eliminación del boro

Los métodos más empleados y estudiados para eliminar el boro son incluir una segunda etapa de ósmosis inversa y el intercambio iónico.

El rechazo al boro por parte de las membranas de ósmosis inversa se produce en unos porcentajes bajos, según las condiciones de trabajo y el tipo de membranas empleado en el proceso. Estos porcentajes de rechazo son notablemente inferiores a los de otras especies disueltas en el agua.

El boro se encuentra presente en el agua de mar, mayoritariamente, en forma de ácido bórico. El motivo por el que es rechazado en tan baja proporción por las membranas es que al tener hidrógenos ácidos y no tener carga, es capaz de formar enlaces con los grupos activos de las membranas mediante puentes de hidrógeno. De la misma forma, tanto el ácido bórico como el agua y el CO<sub>2</sub> son capaces de atravesar las membranas.

El rechazo no depende solamente de las condiciones de trabajo sino que se ve condicionado por el tipo de membrana empleada. A grandes rasgos, se pueden establecer notables diferencias entre las membranas empleadas en agua de mar y las empleadas para desalar agua salobre.

Las membranas de agua de mar son capaces de eliminar el ácido bórico en un porcentaje superior que las membranas de agua salobre. La elevada concentración de sales del agua de mar y su pH favorecen un mayor rechazo de boro por parte de las membranas.

En los últimos años se han desarrollado membranas capaces de rechazar incluso el 99,8% de las sales totales disueltas, aunque el rechazo del boro en este tipo de membranas no supera el 91-93% y resulta muy difícil reducir la concentración de boro hasta los valores establecidos por la Organización Mundial de la Salud.

Las membranas desarrolladas en los últimos años, con el fin de reducir el problema del boro, se han centrado en dos cuestiones:

- Reducir la afinidad entre el boro y la membrana, reforzando al mismo tiempo la afinidad entre el agua y la membrana.
- Compactar la estructura molecular de la capa de membrana, reduciendo el tamaño de poro, para adecuar el tamaño de exclusión al de la molécula de ácido bórico.

El boro presente en forma de ion borato (procedente de la disociación del ácido bórico) es eliminado por la membrana de ósmosis inversa al no disponer de hidrógenos ácidos y tener carga. El boro, en forma de ion borato, no es capaz de formar enlaces con los grupos activos de las membranas mediante puentes de hidrógeno.

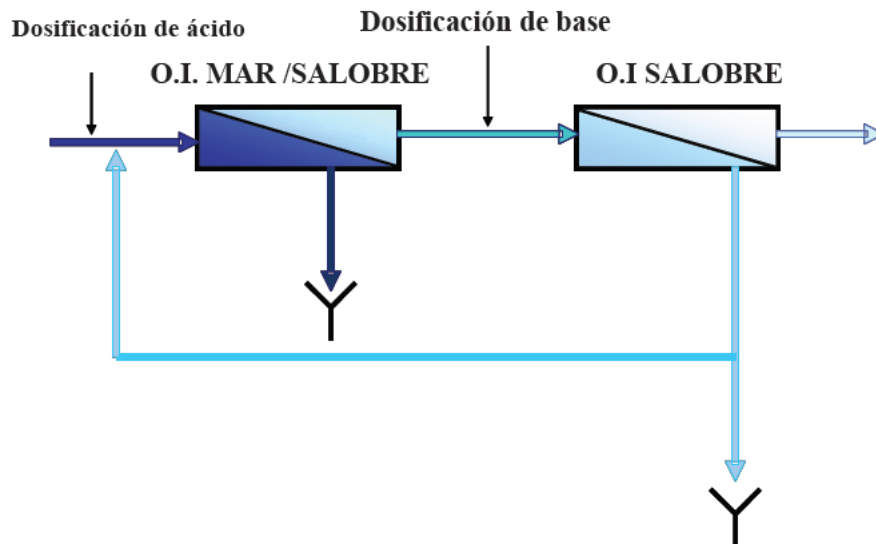
La disociación del ácido bórico en ion borato se consigue aumentando el pH de la disolución. Esto se logra añadiendo una base al agua y, por tanto, favoreciendo que el equilibrio entre el ácido y el borato se encuentre desplazado hacia la formación del ion borato. Una vez formados los boratos, el agua puede ser tratada mediante ósmosis inversa, consiguiéndose un rechazo muy elevado del boro.

### **7.2.1. Dos etapas de ósmosis inversa**

Como las plantas de ósmosis inversa requieren trabajar a un pH ácido para evitar el ensuciamiento de las membranas y la eliminación del boro requiere pH básicos, una de las opciones planteadas en la actualidad para solucionar este problema es la de incluir dos etapas en el proceso de ósmosis inversa:

1. En una primera etapa se trata el agua de mar previa acidificación, eliminando el mayor porcentaje de sales y bicarbonatos, pero un porcentaje bajo de boro.
2. En una segunda etapa se trata el permeado de la primera etapa, aumentando el pH previamente y eliminando el boro en forma de borato.

Siendo el esquema del proceso el que se muestra en la siguiente imagen:



**Imagen 40. Diagrama de flujo del proceso en 2 etapas para eliminar boro**

Los parámetros que influyen en el proceso de tratamiento de agua por ósmosis inversa y específicamente en la eliminación de boro por parte de las membranas son:

- Características de la alimentación: pH, temperatura y sólidos totales disueltos.
- Características de las membranas: composición química y eficiencia de las mismas.
- Diseño del sistema y operación del proceso: presión de trabajo, densidad de flujo del permeado, factor de polarización, proceso de limpieza.

### 7.2.2. Resinas selectivas del boro

En la actualidad, existen en el mercado diversas resinas empleadas para la eliminación, de forma selectiva, de boro en aguas. Aún correspondiendo a diferentes empresas, todas ellas están compuestas por el mismo grupo activo. Son resinas poliestirénicas entrecruzadas macroporosas, siendo el grupo activo el n-metil-D-glucamina (NMG) (Reducción de boro en aguas procedentes de la desalación, 2009).

La capacidad de operación útil depende de la concentración de boro en la alimentación, el flujo, la eficacia de la regeneración y los límites de boro en la salida.

El NMG de la resina captura el boro mediante un enlace covalente y forma un complejo de coordinación interna. En el amplio rango de pH, el ácido bórico se añade al par cis-diol del grupo funcional formando un éster complejo relativamente estable, cis-diol borato.

En cuanto a la regeneración, se han realizado diversos estudios con el fin de optimizar la eficacia de la regeneración de este tipo de resinas. En un principio la regeneración se llevaba a cabo en una sola etapa, empleando un ácido, pero posteriormente se ha comprobado la eficacia de llevar a cabo un doble tratamiento, primero ácido y posteriormente básico.

### 7.2.3. Comparación entre dos etapas de ósmosis inversa y resinas selectivas del boro

En la siguiente tabla se pueden observar las ventajas y limitaciones de ambos sistemas.

Sistemas	Ventajas	Limitaciones
Dos etapas de ósmosis inversa	-Producto con menor salinidad (STD)	-Mayor concentración de salida, necesita mayor tratamiento del permeado -Influenciado por la temperatura del agua -Pérdidas de recuperación de la primera etapa -Operación más complicada: multietapas, dosis ácidas/básicas/antiincrustantes y control hidráulico más complejo -Ajuste de pH y coste de antiincrustante -Coste energético elevado
Resinas selectivas al boro	-Concentración de boro a la salida muy baja que permite mezclas con el permeado de la primera etapa -Mayor recuperación de permeado de la primera etapa -Menor corriente de residuos	-Manejo de dos tecnologías diferentes en la instalación -Frecuencia de regeneración alta -Costes de los químicos de regeneración

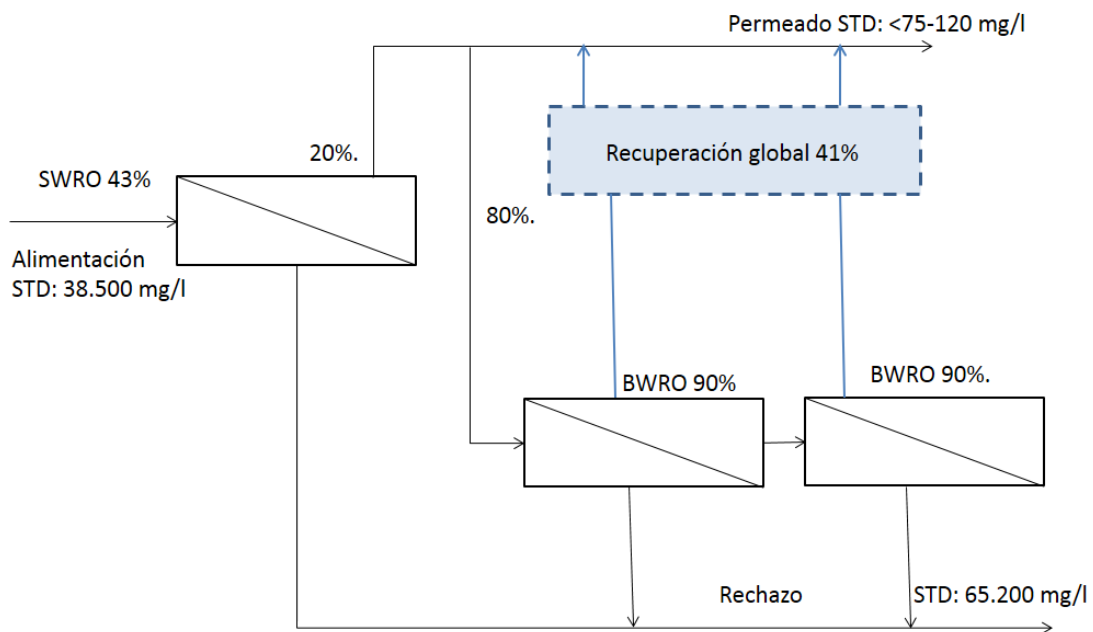
	-Independiente de la temperatura del agua -No libera tanta basicidad, menor alcalinización -Menor consumo de energía -Funciona como filtro de seguridad	
--	--	--

**Tabla 9. Comparación entre dos etapas de ósmosis inversa y resinas selectivas al boro**

**7.2.4. Sistemas instalados**

A continuación se analizan diferentes sistemas de eliminación de boro mediante varios pasos de ósmosis inversa instalados en diferentes plantas alrededor del mundo y un posible diseño utilizando además, resinas selectivas al boro.

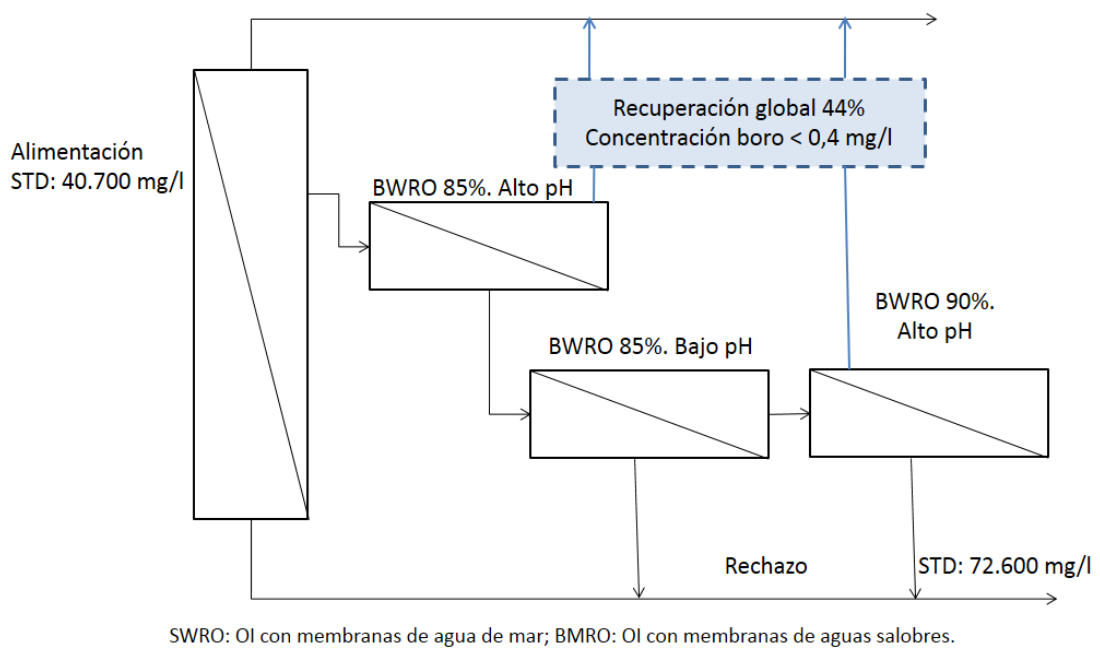
- Planta de ósmosis inversa de Fujairah (Arabia Saudí): en ella se somete al permeado de ósmosis inversa a dos pasos en serie con membranas de aguas salobres, consiguiendo eliminar en el primer bastidor (ósmosis inversa de agua de mar) el 43% de boro del agua de alimentación y en los dos siguientes bastidores (ósmosis inversa de aguas salobres) el 90% en cada uno.



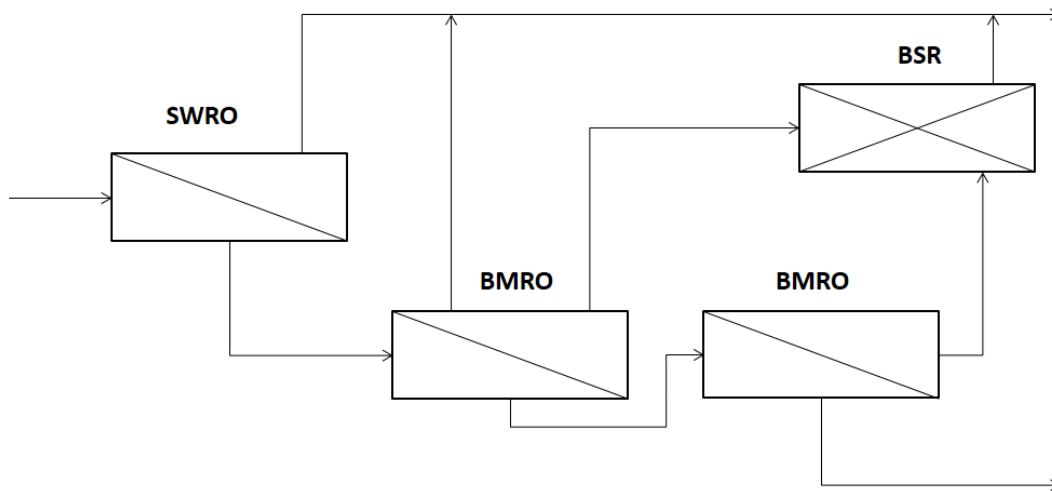
SWRO: OI con membranas de agua de mar; BWRO: OI con membranas de aguas salobres.



- Planta de ósmosis inversa de Ashkelon (Israel): en este caso el agua de alimentación (agua de mar), después de ser sometida a la ósmosis inversa, se alcaliniza y lleva a un bastidor con membranas para aguas salobres. En él se consigue eliminar un 85% de boro con membranas para aguas salobres. A continuación, el rechazo se somete, en dos pasos, a ósmosis inversa con membranas para agua salobre. El primero con el pH del agua ácido y en el segundo con el pH básico, consiguiéndose eliminar en cada uno el 85% del boro.



- Posible diseño de un proceso de ósmosis inversa y resinas selectivas al boro: en este caso se realizan tres etapas de ósmosis inversa en serie y se utilizan, además, unas resinas selectivas al boro. Una parte del permeado de la segunda etapa se lleva al permeado de la primera etapa y otra parte se lleva a las resinas. El permeado de la última etapa de ósmosis, también se trata en las resinas selectivas al boro.



**SWRO:** Ósmosis inversa con membranas de agua de mar.  
**BMRO:** Ósmosis inversa con membranas de aguas salobres.  
**BSR:** Resinas de intercambio iónico

### 7.3. Salmuera

La salmuera, el rechazo de la ósmosis inversa, es un agua de mar con una salinidad mucho mayor por lo que debe ser correctamente gestionada ya que puede causar un elevado impacto ambiental.

Existen diferentes alternativas para causar el menor impacto posible en la zona donde se desecha la salmuera. Una de ellas es mezclarla con el efluente de plantas de aguas depuradas.

Un estudio realizado por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF) evaluó el efecto de los efluentes procedentes de la escorrentía superficial, del tratamiento de aguas residuales y de la desalación, sobre la calidad de las aguas costeras y concluyeron que:

- Se consigue una reducción significativa de la concentración de sales y de microorganismos en el efluente.
- La mezcla de efluentes contribuye a mejorar la calidad de las aguas recreativas y costeras.
- Es aplicable en otro tipo de emplazamientos en los que las condiciones de vertidos sean similares.

Este estudio, a través de diferentes análisis y simulaciones, sirvió para demostrar la efectividad del método y la facilidad de aplicación en zonas como el sur de Tenerife, donde ya se está realizando.

## 8. Conclusiones

Después de realizar este trabajo se puede concluir que, en primer lugar, aunque existe una gran variedad de sistemas de recuperación de energía se necesita seguir investigando en equipos para reducir al mínimo el consumo energético de la desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa.

El recuperador ERI es el dispositivo con mayor presencia en las instalaciones debido a su elevado rendimiento y capacidad de adaptación a diferentes tamaños de planta ya que ofrece una amplia gama de modelos y estos pueden ser agrupados en paralelo. Sin embargo, su homólogo, el Isobarix XPR, incluye mejoras que lo hacen más eficaz, ofreciendo equipos que soportan un mayor caudal y, como se pudo comprobar en el diagrama Sankey elaborado, su consumo energético y, por tanto económico, es menor. Por otro lado, el equipo compacto y revolucionario, Salino Pressure Center, da paso a investigaciones que mejoren el mismo ya que, aunque ofrece muy buenos resultados, su capacidad está limitada a plantas de pequeña escala.

En cuanto al pretratamiento a realizar para proteger las membranas, se ha comprobado que han surgido multitud de investigaciones en las que se proponen alternativas novedosas o mejoras a los sistemas instalados actualmente. Entre ellas, la electrocoagulación, la combinación de adsorción con lecho GAC y las membranas mejoradas con nanotubos de carbono. Estos son estudios realizados a pequeña escala con el fin de demostrar las posibilidades de los mismos y poder hacerse hueco como pretratamiento en la desalación por ósmosis inversa. Aunque los instalados actualmente funcionan correctamente, el objetivo es reducir lo máximo posible el consumo de productos químicos.

Por último, con el estudio del acondicionamiento del permeado resultante de los bastidores de ósmosis inversa se ha concluido que pese a los problemas surgidos por la escasa reducción del boro durante el proceso han surgido diferentes alternativas que han conseguido resolver el problema y alcanzar un grado de eliminación del mismo bastante aceptable. Asimismo, se puede llegar a la conclusión de que el mejor proceso de remineralización consiste en la adición de  $\text{CO}_2$  y posterior paso por torres de dolomita es el mejor de los procesos ya que se produce un mayor número de bicarbonatos con el mismo consumo de  $\text{CO}_2$  que en los otros casos, además de aportar un ion de magnesio que provoca un aumento del pH y de la dureza.

## 9. Conclusions

Firstly, new equipment to reduce the energetic consumption in SWRO must be investigated even though a wide range of recovery systems exists. The ERI system is presented in many of the desalination plants due to its high efficiency and possibility of adaptation to different plants capacity with its variety of models, which can install in parallel to supply the necessities of the process. However, the Isobarix XPR include improvements in the design making it more efficient and offering devices which support bigger flows. Also, its energetic consumption is better as it was demonstrated with the Sankey diagram. On the other hand, the compact and revolutionary device Salino Pressure Center gives ways to investigate and improve the idea, since even though it offers satisfactory results, its capacity is only available for small plants.

Secondly, a lot of proposing novel ideas and improvements in the processes which are installed have emerged for the purpose of protecting the reverse osmosis membranes, such as, electrocoagulation, adsorption with GAC and later UF, and membrane enhanced with carbon nanotubes. These are research analyze it in small scale in order to demonstrate their possibilities. Even though the ones which are installed working properly, the aim is to reduce the amount of chemicals consumption.

Finally, though the problems emerged due to the limited removed of the boron in the SWRO, the studio of the permeate conditioning have demonstrated that there are different processes as alternative to solve the problem and achieve a good elimination efficiency. Likewise, the better remineralization process consists in the addition of CO<sub>2</sub> and later dolomite towers due to the production of more bicarbonates with the same consumption of CO<sub>2</sub> than the others and it gives also a magnesium ion which produce a pH and hardness increase.

## 10. Bibliografía/ Webgrafía

Instituto Tecnológico de Canarias. Evaluación de tecnologías potenciales de reducción de la contaminación de las aguas de Canarias (2011).

Cabildo de Tenerife. Plan Hidrológico de Tenerife (2010).

Medina San Juan, José Antonio (2000): Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis Inversa. Ediciones Mundi-Prensa.

Fariña Iglesias, Manuel (1999): Ósmosis Inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones. Mc Graw Hill.

Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos del País Vasco (2008): Desalación, en busca de la excelencia energética.

Peñate Suárez, Baltasar (2016): La importancia de los sistemas de recuperación de energía en la desalación de aguas en Canarias. iagua.com

World Pumps, (Diciembre de 2012): Salino pressure center for RO seawater desalination.

B. Peñate, J.A. de la Fuente, M. Barreto (Marzo de 2010), Operation of the RO Kinetic energy recovery system: Description and real experiences

Talavera, José Luis, (Febrero de 2017), Avances en la investigación e ingeniería de las técnicas e instalaciones de desalación de agua de mar en las Islas Canarias, Introducción al diseño de grandes plantas desaladoras de agua de mar

Hernández-Suárez, Manuel (Agosto de 2010), Guía para la remineralización de las aguas desaladas

Chillón Arias, María Fernanda (Junio 2009), Reducción de boro en aguas procedentes de la desalación

Ministerio de Sanidad y política social (2009), Guía de desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano

J.N. Hakizimana, B. Gouricha, Ch. Vial, P. Drogui, A. Oumani, J. Naja, L. Hilali (Enero 2016), Assessment of hardness, microorganism and organic matter removal from seawater by electrocoagulation as a pretreatment of desalination by reverse osmosis. Elsevier.

Mathias Monnot, Dr., Hòa Thi Khánh Nguyễn, Mrs., Stéphanie Laborie, Dr., Corinne Cabassud, Pr. (Septiembre 2016), Seawater reverse osmosis desalination plant at community-scale: Role of an innovative pretreatment on process performances and intensification. Elsevier.

Jieun Lee, Sanghyun Jeong, Gayathri Naidu, Yun Ye, Vicki Chen, Zongwen Liu, Saravanamuthu Vigneswaran (Abril 2016), Performance evaluation of carbon nanotube enhanced membranes for SWRO pretreatment application. Elsevier.

Julieta Schallenberg-Rodríguez, José Miguel Veza, Ana Blanco-Marigorta, 2014, Energy efficiency and desalination in the Canary Islands, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40,741–748.

[www.energyrecovery.com/water/px-pressure-exchanger/](http://www.energyrecovery.com/water/px-pressure-exchanger/)

[www.flowserve.com](http://www.flowserve.com)

[www.energyrecovery.com/water/px-pressure-exchanger/](http://www.energyrecovery.com/water/px-pressure-exchanger/)

[www.ksb.com/ksb-en](http://www.ksb.com/ksb-en)

[www.isobarix.com](http://www.isobarix.com)

[www.azud.com](http://www.azud.com)

[www.harmsco.com](http://www.harmsco.com)

[sumiowater.com](http://sumiowater.com)

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**TRABAJO FIN DE GRADO**

***ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA  
DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA***

**ANEXOS**

**Titulación:** Grado en Ingeniería Química Industrial

**Alumno:** Adrián Miguel Martín Cabrera

**Tutor:** Rafael Villarroel López

SEPTIEMBRE 2017

## ANEXOS

<b>ANEXO I. MEJORA DEL CONSUMO ENERGÉTICO CON ISOBARIX XPR.....</b>	<b>1</b>
1. Cálculo de potencia necesaria y consumo específico sin recuperador de energía.....	1
2. Cálculo de potencia necesaria y consumo específico con ERI.....	3
3. Cálculo de potencia necesaria y consumo específico con Isobarix XPR.....	7
4. Comparación entre sistema sin recuperación de energía y sistema con Isobarix XPR .....	10
5. Comparación de diagramas Sankey.....	11
<b>ANEXO II. COMPARACIÓN ENERGÉTICA ENTRE ISOBARIX XPR Y SALINO PRESSURE CENTER.....</b>	<b>14</b>
1. Cálculo consumo específico de Isobarix XPR.....	14
2. Calculo de consumo específico de Salino Pressure Center KSB.....	15
3. Comparación entre Isobarix XPR y Salino Pressure Center.....	17
<b>ANEXO III. DISEÑO DE UN PRETRATAMIENTO PARA UNA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA .....</b>	<b>18</b>
1. Pretratamiento físico.....	18
1.1. Filtros de mallas o pantallas filtrantes .....	18
1.2. Filtros de cartuchos o de seguridad .....	20
2. Pretratamiento químico.....	22
2.1. Coagulación.....	23
2.2. Acidificación .....	24
2.3. Desinfección .....	25
2.4. Reducción de óxidos.....	26
2.5. Adición de inhibidor de incrustaciones .....	27



## ANEXO I. MEJORA DEL CONSUMO ENERGÉTICO CON ISOBARIX XPR

### 1. Cálculo de potencia necesaria y consumo específico sin recuperador de energía

En primer lugar, se realizará el cálculo de la potencia necesaria de la bomba de alta presión para aumentar la presión del agua de mar hasta la necesaria para que se produzca la ósmosis inversa y a continuación se calculará el consumo específico del proceso.

Para ello se tendrán en cuenta las siguientes características de la planta desalinizadora, tomando como caudal de salmuera  $130 \text{ m}^3/\text{h}$  ya que el caudal máximo permitido por el equipo Isobarix XPR de mayor capacidad, en concreto, el Isobarix XPR 809SL, es  $138 \text{ m}^3/\text{h}$  y nuestro objetivo es comparar la potencia necesaria en el proceso y el consumo específico al implementar este dispositivo.

- Caudal de salmuera:  $Q_S = 130 \text{ m}^3/\text{h}$
- Caudal de alimentación:  $Q_A = 236,4 \text{ m}^3/\text{h}$
- Caudal de producto:  $Q_P = 106,4 \text{ m}^3/\text{h}$
- Tasa de conversión de la membrana:  $t = 45\%$
- Temperatura del agua de alimentación:  $T = 20^\circ\text{C}$
- Densidad media del agua de mar:  $\rho_{AM} = 1025 \text{ kg/m}^3$
- Densidad media de la salmuera:  $\rho_{Sal} = 1030 \text{ kg/m}^3$
- Densidad media del permeado:  $\rho_{perm} = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Presión inicial de la alimentación:  $p_i = 1 \text{ bar}$
- Presión del agua de mar antes del bastidor:  $p_{AM} = 65 \text{ bar}$
- Presión de la salmuera:  $p_{Sal} = 63 \text{ bar}$
- Gravedad =  $9,81 \text{ m/s}^2$
- Rendimiento de bomba de alta presión:  $\eta_{BAP} = 0,70$
- Rendimiento del motor de la bomba de alta presión:  $\eta_{motor} = 0,9$
- Número de etapas y pasos:  $n = 1$

-Potencia de bomba de alta presión:

$$P_{BAP} = Q_A \cdot \rho_{AM} \cdot (p_{AM} - p_i) \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_{BAP}}$$

$$P_{BAP} = 236,4 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot 1025 \frac{kg}{m^3} \cdot (65 - 1) bar \cdot \frac{10,2 mca}{1 bar} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1 kW}{1000 W}$$

$$\mathbf{P_{BAP} = 615,77 kW}$$

-Potencia de pérdidas en bomba de alta presión:

$$P_{pBAP} = P_{BAP} \cdot (1 - \eta_{BAP})$$

$$P_{pBAP} = 615,77 kW \cdot (1 - 0,7)$$

$$\mathbf{P_{pBAP} = 184,73 kW}$$

-Potencia del motor de la bomba de alta presión:

$$P_{motor} = Q_A \cdot \rho_{AM} \cdot (p_{AM} - p_i) \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_{BAP}} \cdot \frac{1}{\eta_{motor}}$$

$$P_{motor} = 236,4 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot 1025 \frac{kg}{m^3} \cdot (65 - 1) bar \cdot \frac{10,2 mca}{1 bar} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{1 kW}{1000 W}$$

$$\mathbf{P_{motor} = 684,19 kW}$$

-Potencia pérdidas en el motor de la bomba de alta presión:

$$P_{pmotor} = P_{motor} \cdot (1 - \eta_{motor})$$

$$P_{pmotor} = 684,19 kW \cdot (1 - 0,9)$$

$$\mathbf{P_{pmotor} = 68,42 kW}$$

-Potencia necesaria para ósmosis inversa:

$$\mathbf{P_{motor} = P_{OI}}$$

-Consumo específico:

$$\text{Consumo específico} = \frac{P_{OI}}{Q_P}$$

$$\text{Consumo específico} = \frac{684,19 kW}{106,4 \frac{m^3}{h}}$$

$$\mathbf{\text{Consumo específico} = 6,43 kWh/m^3}$$

## 2. Cálculo de potencia necesaria y consumo específico con ERI

En este caso se usarán las mismas condiciones anteriores, pero se añaden los rendimientos de la bomba booster o de refuerzo y su motor. Se usará dos dispositivos ERI-PX 300 ( $Q_{\text{máx}}=68,1 \text{ m}^3/\text{h}$ ), para poder suministrar  $130 \text{ m}^3/\text{h}$  de salmuera.

- Caudal de salmuera:  $Q_S=130 \text{ m}^3/\text{h}$
- Caudal de alimentación:  $Q_A=236,4 \text{ m}^3/\text{h}$
- Caudal de producto:  $Q_P=106,4 \text{ m}^3/\text{h}$
- Tasa de conversión de la membrana:  $t=45\%$
- Temperatura del agua de alimentación:  $T=20^\circ\text{C}$
- Densidad media del agua de mar:  $\rho_{AM}=1025 \text{ kg/m}^3$
- Densidad media de la salmuera:  $\rho_{Sal}=1030 \text{ kg/m}^3$
- Densidad media del permeado:  $\rho_{perm}=1000 \text{ kg/m}^3$
- Presión inicial de la alimentación:  $p_i=1 \text{ bar}$
- Presión del agua de mar antes del bastidor:  $p_{AM}=65 \text{ bar}$
- Presión de la salmuera:  $p_{Sal}=63 \text{ bar}$
- Presión osmótica:  $\pi=28 \text{ bar}$
- Gravedad=  $9,8 \text{ m/s}^2$
- Rendimiento de bomba de alta presión:  $\eta_{BAP}=0,70$
- Rendimiento del motor de la bomba de alta presión:  $\eta_{motor}=0,9$
- Rendimiento de la bomba booster:  $\eta_{booster}=0,75$
- Rendimiento del motor de la bomba booster:  $\eta_{mbooster}=0,9$
- Número de etapas y pasos:  $n=1$

-Potencia de alimentación:

$$P_{alim} = Q_A \cdot \rho_{AM} \cdot p_{AM} \cdot g$$

$$P_{alim} = 236,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 65 \text{ bar} \cdot \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}}$$

$$P_{alim} = 437,77 \text{ kW}$$

-Potencia de desalación:

$$P_{des} = Q_P \cdot \rho_P \cdot \pi \cdot g$$

$$P_{des} = 106,4 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot 1025 \frac{kg}{m^3} \cdot 28 bar \cdot \frac{10,2 mca}{1 bar} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1 kW}{1000 W}$$

$$\mathbf{P_{des} = 84,88 kW}$$

-Potencia de la salmuera:

$$P_{sal} = Q_{sal} \cdot \rho_{sal} \cdot p_{sal} \cdot g$$

$$P_{sal} = 130 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot 1030 \frac{kg}{m^3} \cdot 63 bar \cdot \frac{10,2 mca}{1 bar} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1 kW}{1000 W}$$

$$\mathbf{P_{sal} = 234,47 kW}$$

-Potencia de pérdida de carga en las membranas:

$$P_{mem} = Q_{sal} \cdot (\rho_{alim} \cdot p_{am} \cdot g - \rho_{sal} \cdot p_{sal} \cdot g)$$

$$P_{mem} = 130 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot (1025 \frac{kg}{m^3} \cdot 65 bar \cdot \frac{10,2 mca}{1 bar} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1 kW}{1000 W} - 1030 \frac{kg}{m^3} \cdot 63 bar \cdot \frac{10,2 mca}{1 bar} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1 kW}{1000 W})$$

$$\mathbf{P_{mem} = 6,27 kW}$$

-Potencia de pérdidas hidráulicas:

$$P_{ph} = P_{Alim} - P_{mem} - P_{sal} - P_{des}$$

$$P_{ph} = (437,77 - 6,27 - 234,47 - 84,88) kW$$

$$\mathbf{P_{ph} = 112,15 kW}$$

-Potencia de bomba de alta presión:

$$P_{BAP} = Q_P \cdot \rho_{AM} \cdot (p_{AM} - p_i) \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_{BAP}}$$

$$P_{BAP} = 106,6 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot 1025 \frac{kg}{m^3} \cdot (65 - 1) bar \cdot \frac{10,2 mca}{1 bar} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1 kW}{1000 W}$$

$$P_{BAP} = 277,67 \text{ kW}$$

-Potencia de pérdidas en bomba de alta presión:

$$P_{pBAP} = P_{BAP} \cdot (1 - \eta_{BAP})$$

$$P_{pBAP} = 277,67 \text{ kW} \cdot (1 - 0,7)$$

$$P_{pBAP} = 83,3 \text{ kW}$$

-Potencia del motor de la bomba de alta presión:

$$P_{motor} = Q_P \cdot \rho_{AM} \cdot (p_{AM} - p_i) \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_{BAP}} \cdot \frac{1}{\eta_{motor}}$$

$$P_{motor} = 106,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (65 - 1) \text{ bar} \cdot \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}}$$

$$P_{motor} = 308,52 \text{ kW}$$

-Potencia pérdidas en el motor de la bomba de alta presión:

$$P_{pmotor} = P_{motor} \cdot (1 - \eta_{motor})$$

$$P_{pmotor} = 308,52 \text{ kW} \cdot (1 - 0,9)$$

$$P_{pmotor} = 30,85 \text{ kW}$$

-Potencia de bomba booster:

El fabricante especifica que el rendimiento mínimo garantizado del equipo es de 97,2%, por lo tanto, la presión del permeado que salga del recuperador de energía ERI será:

$$R = \frac{p_{perm}}{p_{Sal}} \cdot 100$$

Por lo tanto, la presión del permeado al salir del recuperador será:

$$P_{perm} = \frac{R \cdot p_{Sal}}{100}$$

$$p_{perm} = \frac{97,2 \cdot 63}{100} \text{ bar} = 61,23 \text{ bar}$$

$$P_{Booster} = Q_s \cdot \rho_{AM} \cdot (p_{AM} - p_{perm}) \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_{booster}}$$

$$P_{Booster} = 130 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot 1025 \frac{kg}{m^3} \cdot (65 - 61,23) bar \cdot \frac{10,2 mca}{1 bar} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{0,75} \cdot \frac{1 kW}{1000 W}$$

$$\mathbf{P_{Booster} = 18,62 kW}$$

-Potencia de pérdidas en bomba booster:

$$P_{pbooster} = P_{booster} \cdot (1 - \eta_{booster})$$

$$P_{pbooster} = 18,62 kW \cdot (1 - 0,75)$$

$$\mathbf{P_{pbooster} = 4,65 kW}$$

-Potencia del motor de la bomba booster:

$$P_{mbooster} = Q_S \cdot \rho_{AM} \cdot (p_{AM} - p_{Sal}) \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_{booster}} \cdot \frac{1}{\eta_{mbooster}}$$

$$P_{mbooster} = 130 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot 1025 \frac{kg}{m^3} \cdot (65 - 61,23) bar \cdot \frac{10,2 mca}{1 bar} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{0,75} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{1 kW}{1000 W}$$

$$\mathbf{P_{mbooster} = 20,68 kW}$$

-Potencia pérdidas en el motor de la bomba booster:

$$P_{pmbooster} = P_{mbooster} \cdot (1 - \eta_{mbooster})$$

$$P_{pmbooster} = 20,68 kW \cdot (1 - 0,9)$$

$$\mathbf{P_{pmbooster} = 2,07 kW}$$

-Potencia necesaria para ósmosis inversa:

$$P_{motor} + P_{mbooster} = P_{OI}$$

$$P_{OI} = 308,52 + 20,68$$

$$\mathbf{P_{OI} = 329,2 kW}$$

-Consumo específico:

$$\text{Consumo específico} = \frac{P_{OI}}{Q_P}$$

$$\text{Consumo específico} = \frac{329,2 \text{ kW}}{106,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}$$

$$\text{Consumo específico} = 3,09 \text{ kWh/m}^3$$

### 3. Cálculo de potencia necesaria y consumo específico con Isobarix XPR

En este caso se usarán las mismas condiciones anteriores, pero se añaden los rendimientos de la bomba booster o de refuerzo y su motor.

- Caudal de salmuera:  $Q_S = 130 \text{ m}^3/\text{h}$
- Caudal de alimentación:  $Q_A = 236,4 \text{ m}^3/\text{h}$
- Caudal de producto:  $Q_P = 106,4 \text{ m}^3/\text{h}$
- Tasa de conversión de la membrana:  $t = 45\%$
- Temperatura del agua de alimentación:  $T = 20^\circ\text{C}$
- Densidad media del agua de mar:  $\rho_{AM} = 1025 \text{ kg/m}^3$
- Densidad media de la salmuera:  $\rho_{Sal} = 1030 \text{ kg/m}^3$
- Densidad media del permeado:  $\rho_{perm} = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Presión inicial de la alimentación:  $p_i = 1 \text{ bar}$
- Presión del agua de mar antes del bastidor:  $p_{AM} = 65 \text{ bar}$
- Presión de la salmuera:  $p_{Sal} = 63 \text{ bar}$
- Gravedad =  $9,8 \text{ m/s}^2$
- Rendimiento de bomba de alta presión:  $\eta_{BAP} = 0,70$
- Rendimiento del motor de la bomba de alta presión:  $\eta_{motor} = 0,9$
- Rendimiento de la bomba booster:  $\eta_{booster} = 0,75$
- Rendimiento del motor de la bomba booster:  $\eta_{mbooster} = 0,9$
- Número de etapas y pasos:  $n = 1$

-Potencia de bomba de alta presión:

$$P_{BAP} = Q_P \cdot \rho_{AM} \cdot (p_{AM} - p_i) \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_{BAP}}$$

$$P_{BAP} = 106,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (65 - 1) \text{ bar} \cdot \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}}$$

$$P_{BAP} = 277,67 \text{ kW}$$

-Potencia de pérdidas en bomba de alta presión:

$$P_{pBAP} = P_{BAP} \cdot (1 - \eta_{BAP})$$

$$P_{pBAP} = 277,67 \text{ kW} \cdot (1 - 0,7)$$

$$P_{pBAP} = 83,3 \text{ kW}$$

-Potencia del motor de la bomba de alta presión:

$$P_{motor} = Q_P \cdot \rho_{AM} \cdot (p_{AM} - p_i) \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_{BAP}} \cdot \frac{1}{\eta_{motor}}$$

$$P_{motor} = 106,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (65 - 1) \text{ bar} \cdot \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}}$$

$$P_{motor} = 308,52 \text{ kW}$$

-Potencia pérdidas en el motor de la bomba de alta presión:

$$P_{pmotor} = P_{motor} \cdot (1 - \eta_{motor})$$

$$P_{pmotor} = 308,52 \text{ kW} \cdot (1 - 0,9)$$

$$P_{pmotor} = 30,85 \text{ kW}$$

-Potencia de bomba booster:

El fabricante especifica que el rendimiento del equipo es de 98,7%, por lo tanto, la presión del permeado que salga del recuperador de energía ERI será:

$$R = \frac{p_{perm}}{p_{sal}} \cdot 100$$

Por lo tanto, la presión del permeado al salir del recuperador será:

$$p_{perm} = \frac{R \cdot p_{sal}}{100}$$

$$p_{perm} = \frac{98,7 \cdot 63}{100} \text{ bar} = 62,18 \text{ bar}$$

$$P_{Booster} = Q_s \cdot \rho_{AM} \cdot (p_{AM} - p_{sal}) \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_{booster}}$$



$$P_{Booster} = 130 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot 1025 \frac{kg}{m^3} \cdot (65 - 62,18) bar \cdot \frac{10,2 mca}{1 bar} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{0,75} \cdot \frac{1 kW}{1000 W}$$

$$\mathbf{P_{Booster} = 13,92 kW}$$

-Potencia de pérdidas en bomba booster:

$$P_{pbooster} = P_{booster} \cdot (1 - \eta_{booster})$$

$$P_{pbooster} = 13,92 kW \cdot (1 - 0,75)$$

$$\mathbf{P_{pbooster} = 3,48 kW}$$

-Potencia del motor de la bomba booster:

$$P_{mbooster} = Q_S \cdot \rho_{AM} \cdot (p_{AM} - p_{Sal}) \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_{booster}} \cdot \frac{1}{\eta_{mbooster}}$$

$$P_{mbooster} = 130 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot 1025 \frac{kg}{m^3} \cdot (65 - 62,18) bar \cdot \frac{10,2 mca}{1 bar} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{0,75} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{1 kW}{1000 W}$$

$$\mathbf{P_{mbooster} = 15,47 kW}$$

-Potencia pérdidas en el motor de la bomba booster:

$$P_{pmboster} = P_{mbooster} \cdot (1 - \eta_{mbooster})$$

$$P_{pmboster} = 15,47 kW \cdot (1 - 0,9)$$

$$\mathbf{P_{pmboster} = 1,55 kW}$$

-Potencia necesaria para ósmosis inversa:

$$P_{motor} + P_{mbooster} = P_{OI}$$

$$P_{OI} = 308,52 + 15,47$$

$$\mathbf{P_{OI} = 323,99 kW}$$

-Consumo específico:

$$\text{Consumo específico} = \frac{P_{OI}}{Q_P}$$

$$\text{Consumo específico} = \frac{323,99 \text{ kW}}{106,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}$$

$$\text{Consumo específico} = 3,04 \text{ kWh/m}^3$$

#### 4. Comparación entre sistema sin recuperación de energía y sistema con Isobarix XPR

En la siguiente tabla se pueden observar las diferentes potencias calculas además del consumo específico de ambos supuestos.

	<b>Sin recuperación de energía</b>	<b>Con ERI-PX</b>	<b>Con Isobarix XPR</b>
<b>P<sub>BAP</sub> (kW)</b>	615,77	277,67	277,67
<b>P<sub>pBAP</sub> (kW)</b>	184,73	83,3	83,3
<b>P<sub>motor</sub> (kW)</b>	684,19	308,52	308,52
<b>P<sub>pmotor</sub> (kW)</b>	68,42	30,85	30,85
<b>P<sub>booster</sub> (kW)</b>	-	18,62	13,92
<b>P<sub>pbooster</sub> (kW)</b>	-	4,65	3,48
<b>P<sub>mbooster</sub> (kW)</b>	-	29,68	15,47
<b>P<sub>pmboster</sub> (kW)</b>	-	2,07	1,55
<b>P<sub>OI</sub> (kW)</b>	684,19	329,2	323,99
<b>Consumo específico (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	6,43	3,09	3,04

**Tabla 1. Comparación energética entre sistema sin recuperación de energía y sistema con Isobarix XPR (Elaboración propia)**

Teniendo en cuenta que el precio del kWh ronda los 0,14€, el ahorro conseguido con el equipo Isobarix XPR respecto al ERI-PX será:

$$\text{Ahorro económico} = \left( 3,09 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} - 3,04 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right) \cdot 0,14 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 106,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{Ahorro económico/hora} = 0,75 \text{ €/h}$$

$$\text{Ahorro económico/día} = 0,75 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 18 \text{ €/día}$$

$$\text{Ahorro económico/mes} = \frac{18\text{€}}{\text{día}} \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 540 \text{ €/mes}$$

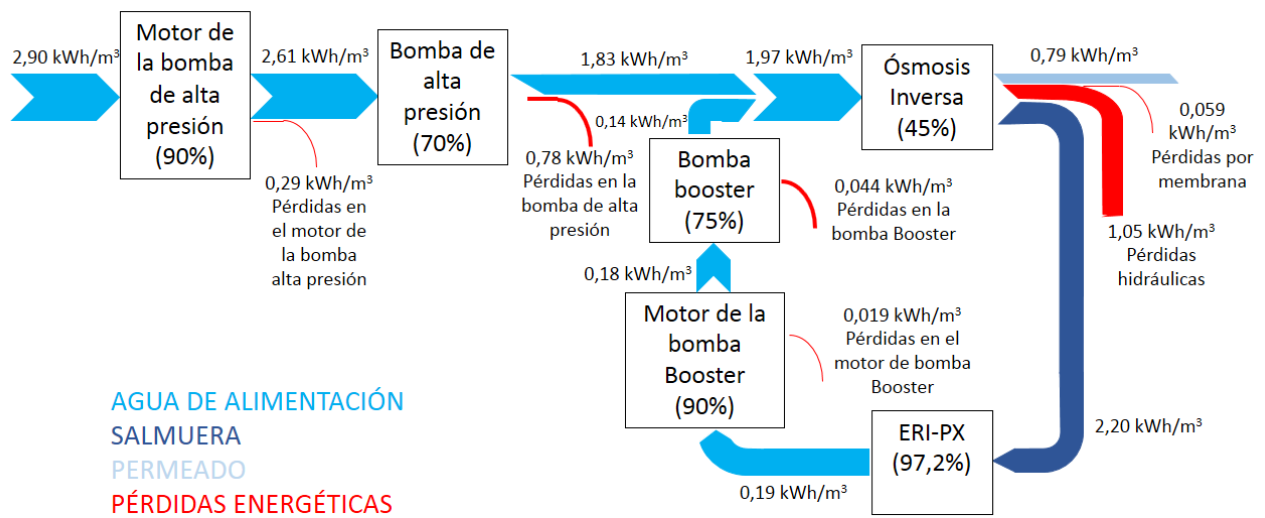
Se puede observar que con el sistema Isobarix XPR en una planta de desalación de agua de mar por ósmosis inversa se consigue un ahorro de 540 € por cada mes de funcionamiento de la planta, suponiendo que esté operativa las 24 horas del día.

## 5. Comparación de diagramas Sankey

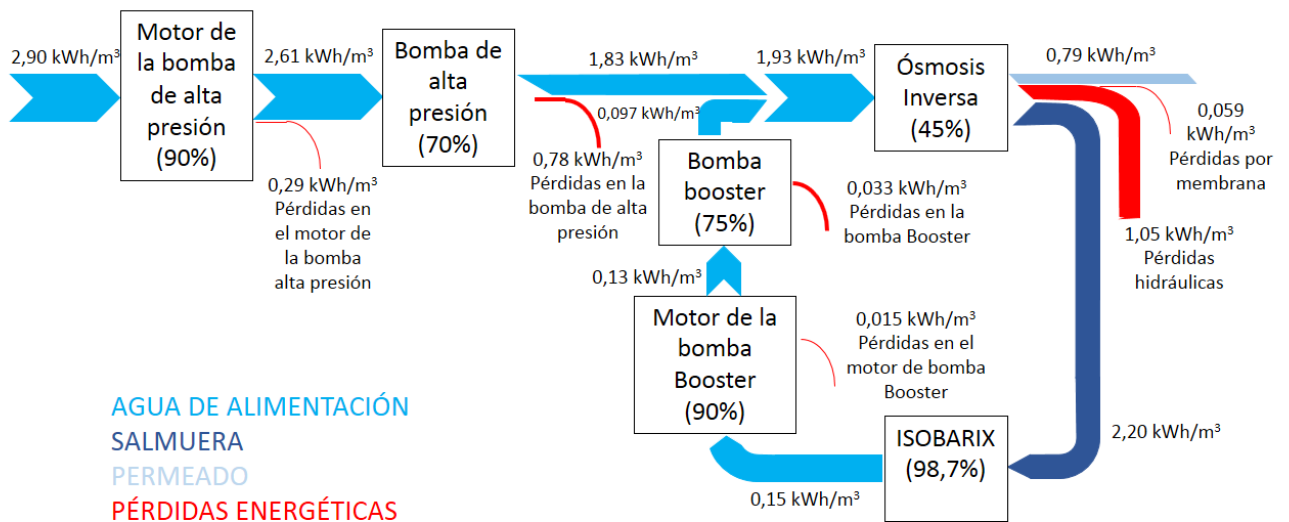
Se han elaborado los diagramas Sankey de los sistemas de desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa, utilizando los recuperadores ERI-PX 300 e Isobarix XPR.

Para ello se han tomado las potencias calculadas en apartados anteriores para obtener los consumos energéticos referidos en kWh/m<sup>3</sup> dividiendo estas por el caudal de permeado.

**DIAGRAMA SANKEY CON RECUPERADOR DE ENERGÍA ERI-PX**



**DIAGRAMA SANKEY CON RECUPERADOR DE ENERGÍA ISOBARIX XPR**



**Imagen 1. Comparación de diagramas Sankey con recuperador de energía ERI-PX 300 e Isobarix XPR 809SL (Elaboración propia)**

Como se puede observar, se reflejan los resultados de la tabla comparativa realizada en el apartado 4, estando el ahorro energético únicamente presente en el consumo de la bomba

booster, ya que el recuperador Isobarix XPR posee un rendimiento mayor y el agua de alimentación entra a ella con una presión mas alta.

## ANEXO II. COMPARACIÓN ENERGÉTICA ENTRE ISOBARIX XPR Y SALINO PRESSURE CENTER

### 1. Cálculo consumo específico de Isobarix XPR

El cálculo del consumo específico para una planta desaladora por ósmosis inversa con recuperación energética mediante Isobarix XPR se realizará teniendo en cuenta las siguientes características:

- Caudal de producto:  $Q_P = 9 \text{ m}^3/\text{h}$
- Tasa de conversión de la membrana:  $t = 45\%$
- Temperatura del agua de alimentación:  $T = 20^\circ\text{C}$
- Densidad del agua salada:  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$
- Presión de la alimentación:  $P = 1 \text{ bar}$
- Presión en la entrada al bastidor:  $P' = 62 \text{ bar}$
- Rendimiento de bomba de alta presión:  $\eta = 0,70$
- Rendimiento de bomba Booster:  $\eta' = 0,75$
- Número de etapas y pasos:  $n = 1$

Se podría realizar el estudio para una planta de mayor capacidad, pero para que sea comparable con el Salino Pressure Center, tomamos estos datos como referencia para ambos.

#### Cálculo de caudal de alimentación y de rechazo

$$Q_A = Q_P + Q_R$$

$$Q_P = \frac{t}{100} Q_A \longrightarrow Q_A = \frac{100}{t} Q_P$$

Por lo tanto:

$$Q_A = \frac{100}{45} \cdot 9 = 20 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_R = 20 - 9 = 11 \text{ m}^3/\text{h}$$

### Cálculo de altura manométrica

$$h = \frac{P_2 - P_1}{\rho}$$

- Altura manométrica de la alimentación:

Tomando como presión inicial del agua de alimentación, agua de mar pretratada,  $P_1=1$  bar y como presión de entrada al bastidor de ósmosis inversa  $P_2=62$  bar:

$$h = \frac{(62 - 1) \text{ bar}}{1027 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}} \cdot \frac{1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}{0,981 \text{ bar}} \cdot \frac{10000 \text{ cm}^2}{\text{m}^2} = 605,47 \text{ m. c. a.}$$

- Altura manométrica de la salmuera:

La presión del rechazo será de aproximadamente 60 bar, considerando pérdidas de carga en el bastidor, por accesorios, tuberías... de 2 bar, y saldrá del recuperador a 1 bar, aproximadamente.

$$h' = \frac{(60 - 1) \text{ bar}}{1027 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}} \cdot \frac{1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}{0,981 \text{ bar}} \cdot \frac{10000 \text{ cm}^2}{\text{m}^2} = 585,62 \text{ m. c. a.}$$

### Consumo específico del proceso:

$$\begin{aligned} \text{Consumo}_{01} &= \frac{\left( \left( Q_P \cdot \rho \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{h}{\eta} \right) + \left( Q_R \cdot \rho \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{(h - h')}{\eta'} \right) \right) \cdot g \cdot 1 \text{ kW}}{1000 \text{ W} \cdot Q_P} \\ &= 2,51 \text{ kWh/m}^3 \end{aligned}$$

## 2. Calculo de consumo específico de Salino Pressure Center KSB

Teniendo en cuenta que este sistema de recuperación energética está diseñado para plantas de pequeña y mediana capacidad, con determinadas limitaciones, se realizará el cálculo de consumo específico para una planta desaladora por ósmosis inversa de las siguientes características (las únicas diferencias con el recuperador ISOBARIX XPR son la presión de alimentación, la mínima especificada por el fabricante, y el rendimiento del motor eléctrico)

- Caudal de producto:  $Q_P=9$  m<sup>3</sup>/h

- Tasa de conversión de la membrana:  $t=45\%$
- Temperatura del agua de alimentación:  $T=20^{\circ}\text{C}$
- Densidad del agua salada:  $\rho=1027 \text{ kg/m}^3$
- Presión de la alimentación:  $P=2,5 \text{ bar}$
- Presión en la entrada al bastidor:  $P'=62 \text{ bar}$
- Rendimiento del motor eléctrico:  $\eta=0,85$
- Rendimiento bomba a la entrada:  $\eta'=0,75$
- Número de etapas y pasos:  $n=1$

### Cálculo de altura manométrica

$$h = \frac{P_2 - P_1}{\rho}$$

- Altura manométrica de la alimentación:

Como existe el requisito de presión a 2,5 bar a la entrada del equipo de recuperación energética, se deberá incluir una bomba que lleve al agua de 1 bar a 2,5 bar. Por lo tanto, tendrá que superar la altura manométrica siguiente:

$$h = \frac{(2,5 - 1)\text{bar}}{1027 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}} \cdot \frac{1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}{0,981 \text{ bar}} \cdot \frac{10000 \text{ cm}^2}{\text{m}^2} = 14,89 \text{ m. c. a.}$$

- Altura manométrica de la alimentación al proceso:

Tomando como presión inicial del agua de alimentación, agua de mar pretratada,  $P_1=2,5$  bar, por especificaciones del recuperador energético, y como presión de entrada al bastidor de ósmosis inversa  $P_2=62$  bar:

$$h' = \frac{(62 - 2,5)\text{bar}}{1027 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}} \cdot \frac{1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}{0,981 \text{ bar}} \cdot \frac{10000 \text{ cm}^2}{\text{m}^2} = 590,58 \text{ m. c. a.}$$



- Altura manométrica de la salmuera:

La presión del rechazo será de aproximadamente 60 bar, considerando pérdidas de carga en el bastidor, por accesorios, tuberías... de 2 bar, y saldrá del recuperador a 3 bar, aproximadamente.

$$h'' = \frac{(60 - 3) \text{ bar}}{1027 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}} \cdot \frac{1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}{0,981 \text{ bar}} \cdot \frac{10000 \text{ cm}^2}{\text{m}^2} = 565,76 \text{ m. c. a.}$$

### Consumo específico del proceso:

*Consumo<sub>2</sub>*

$$= \frac{\left( \left( Q_A \cdot \rho \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{h}{\eta} \right) + \left( Q_A \cdot \rho \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{h'}{\eta} \right) - \left( Q_R \cdot \rho \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} \cdot h'' \right) \right) \cdot g \cdot 1 \text{ kW}}{1000 \text{ W} \cdot Q_P}$$

$$= 2,51 \text{ kWh/m}^3$$

### 3. Comparación entre Isobarix XPR y Salino Pressure Center

Para una planta desaladora de 9 m<sup>3</sup>/h de permeado, es decir, 216 m<sup>3</sup>/día, el consumo específico es prácticamente el mismo según se ha podido observar en los cálculos realizados anteriormente. Existen equipos Isobarix XPR para plantas de mayor capacidad, pero se ha tomado este caudal para comparar más sencillamente con el recuperador compacto Salino Pressure Center.

A continuación se calcula el consumo en €/m<sup>3</sup> de ambos sistemas, teniendo en cuenta que el precio del kWh ronda los 0,14€.

- Consumo económico:

$$\text{Consumo}_{\text{por m}^3} = 2,51 \text{ kWh/m}^3 \cdot 0,14 \text{ €/kWh} = \underline{\underline{0,351 \text{ €/m}^3}}$$

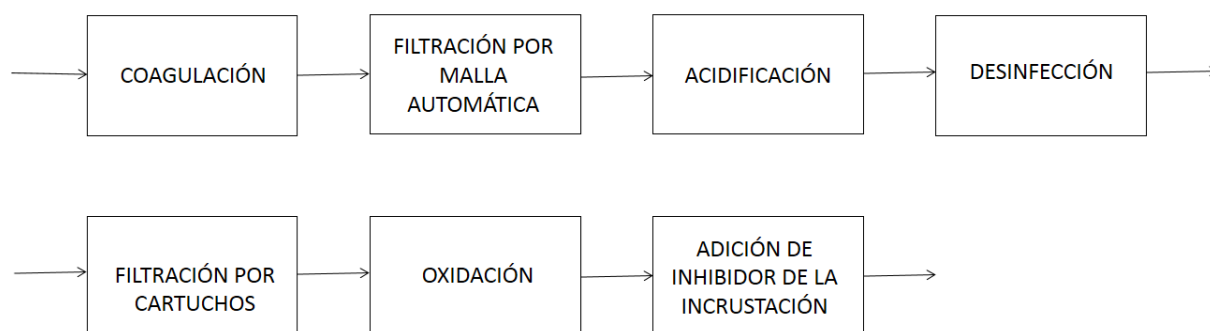
Debido a que se tratan 216 m<sup>3</sup>/día, el consumo eléctrico diario supone un gasto de:

$$\text{Consumo}_{\text{diario}} = 216 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 0,351 \text{ €/m}^3 = \underline{\underline{75,82 \text{ €/día}}}$$

## ANEXO III. DISEÑO DE UN PRETRATAMIENTO PARA UNA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA

En este Anexo se realizarán los cálculos para el diseño del siguiente pretratamiento:

- Pretratamiento físico: filtros de mallas y de cartuchos.
- Pretratamiento químico: adición de coagulante, desinfectante, inhibidor de las incrustaciones y agente reductor.



**Imagen 1. Diagrama de bloques de pretratamiento a calcular**

El mismo se realizará con las mismas condiciones que en el cálculo de consumo del recuperador energético Salino Pressure Center ya que el objetivo es incluir el mismo en el proceso.

### 1. Pretratamiento físico

#### 1.1. Filtros de mallas o pantallas filtrantes

Este tipo de filtros posee una limpieza automática cuando se detecta una caída de presión determinada en su interior.

Se analizará un modelo del fabricante AZUD S.A., concretamente el modelo AZUD LUXON LCA 900/2, ya que es el más apropiado para nuestro caudal de alimentación (20 m<sup>3</sup>/h).



**Imagen 2. Aspecto exterior de la serie AZUD LUXON LCA**

**FUENTE: Azud S.A.**

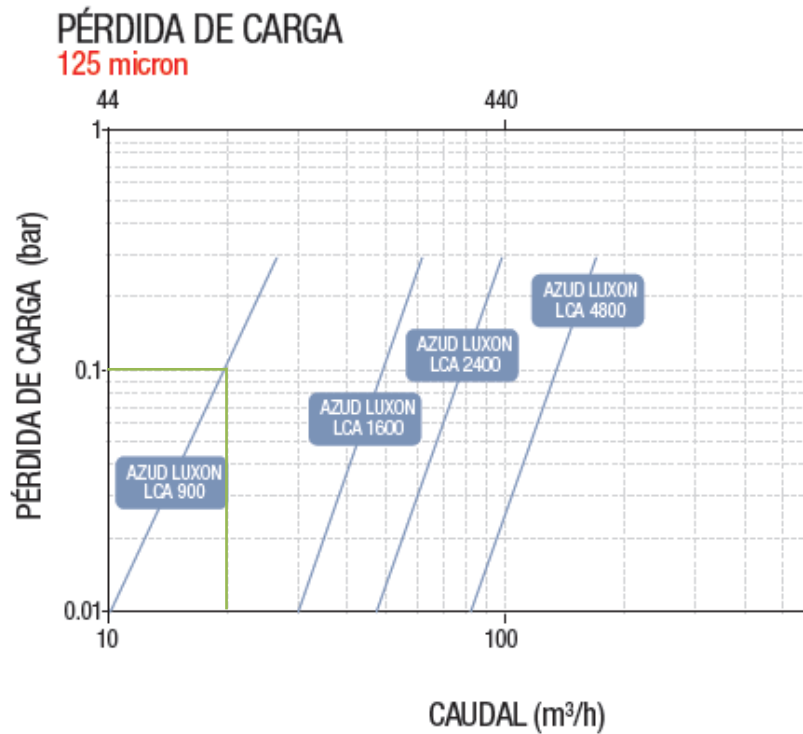
Las características principales del equipo se muestran en la siguiente tabla:

MODELO	FILTRACIÓN		CICLO DE LAVADO		
	Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	Superficie filtrante (cm <sup>2</sup> )	Caudal (l/s)	Tiempo (s)	Volumen (l)
Azud Luxon LCA 900/2	30	910	0,7	8	5,6

**Tabla 2. Características del filtro de malla Azud Luxon LCA 900/2**

**FUENTE: Azud S.A.**

En la ficha técnica del equipo se incluye la siguiente gráfica para calcular la pérdida de carga que ofrece el mismo en función del caudal.



**Gráfica 1. Pérdida de carga en función del caudal**

*FUENTE: Azud S.A.*

En este caso, la pérdida de carga ofrecida por el equipo será de aproximadamente 0,1 bar.

## 1.2. Filtros de cartuchos o de seguridad

Los filtros de cartuchos o de seguridad serán colocados inmediatamente anteriores a los bastidores como medida de seguridad para proteger a las membranas.

Los tipos de filtros de cartuchos más utilizados son los bobinados y los plegados, aunque cada vez se usan más los últimos debido a sus ventajas frente a los bobinados (mayor superficie filtrante, reducción del número de filtros necesarios y de la frecuencia de ensuciamiento de los mismos).

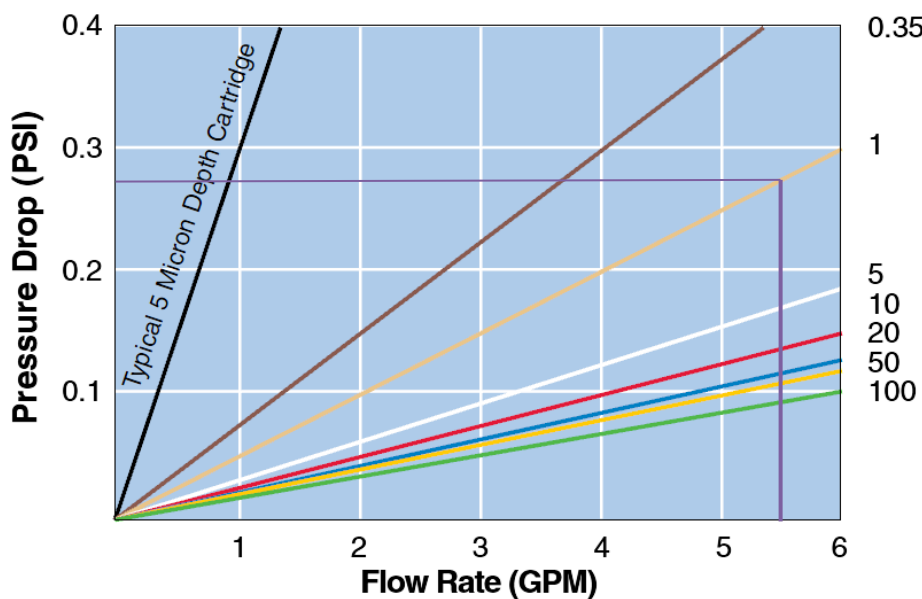
El portafiltros y los filtros serán del fabricante HARMSCO. Siendo los cartuchos elegidos para el caudal de este diseño, filtros de poliéster, concretamente el modelo 801-1/40. Estos tienen una longitud de 40" (1000 mm) y un grado de micraje absoluto de 1 micra. En cuanto al portafiltros, se escoge el modelo HMC-5, con capacidad máxima de filtración de 36 m<sup>3</sup>/h y en el cual se pueden colocar hasta 5 cartuchos de 40" de longitud.

Los filtros deberán tratar  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  de agua de mar, suponiendo caudales normales de operación de 24 GPM ( $5,45 \text{ m}^3/\text{h}$ ), según la recomendación del fabricante para este equipo, el número de cartuchos necesarios será:

$$N_{\text{cartuchos}} = \frac{Q_{\text{alimentación}}}{Q_{\text{cartucho}}} = \frac{20}{5,45} = 3,67 \approx 4 \text{ cartuchos}$$

La pérdida de carga ofrecida por cada filtro se puede obtener mediante la siguiente gráfica, procedente de la ficha técnica del equipo:

### Low Pressure Drop With Harmsco® Cartridges



**Gráfica 2. Pérdida de carga de los filtros de cartuchos plegados**

**FUENTE: HARMSCO**

Para  $5,45 \text{ m}^3/\text{h}$  (24 GPM) y 1 micra, se obtiene una pérdida de carga de 0,28 psi.

$$\text{Pérdida de carga}_{\text{cartucho}} = 0,28 \text{ psi} = 0,019 \text{ bar}$$

Como se instalan 4 cartuchos, la pérdida de carga total será:

$$\text{Pérdida de carga}_{\text{cartuchos}} = 0,019 \cdot 4 = 0,076 \text{ bar}$$

MODELO	Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	Número de filtros de 40"	Material
HMC-5	36	5	Ac. Inox 304

**Tabla 3. Características del portafiltro**

**FUENTE: HARMSCO**

MODELO	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Grado de micraje absoluto (µm)	Longitud (")	Material
801-1/40	5,45	1	40	Poliéster

**Tabla 4. Características de los cartuchos**

**FUENTE: HARMSCO**

## 2. Pretratamiento químico

Previamente al cálculo del pretratamiento químico se debe conocer la procedencia y composición del agua de entrada a la planta, es por ello que se debe calcular el índice de Langelier, para conocer las características del agua de mar y las posibles consecuencias que se darán en el sistema de ósmosis inversa.

El cálculo se realiza a través de la ecuación:

$$LSI = pH - pH_s$$

Dónde:

-pH es el valor medido del pH del agua.

-pH<sub>s</sub> es el pH de saturación en calcita o carbonato cálcico, definido como (sumiowater.com):

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D)$$

Siendo,

$$A = (\log_{10}[STD] - 1)/10$$

$$B = -13,22 \cdot (\log_{10}(^{\circ}C + 273) + 34,55$$

$$C = \log_{10}[Ca^{2+} \text{ como } CaCO_3] - 0,4$$

$$D = \log_{10}[\text{Alcalinidad como CaCO}_3]$$

Si el índice de Langelier:

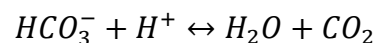
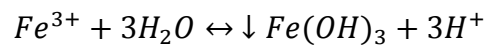
- Es menor de 0, el agua no está saturada de  $\text{CaCO}_3$  y la formación de incrustaciones será improbable.
- Es igual a 0, el agua está saturada de  $\text{CaCO}_3$ .
- Y si es mayor a 0, el agua está sobresaturada de  $\text{CaCO}_3$  y es muy probable la formación de incrustaciones.

En Canarias, normalmente, es mayor de 0 por lo que se tiene que llevar a cabo el siguiente pretratamiento químico:

- Coagulación con cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ).
- Acidificación con ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) como medida de reducción del pH.
- Desinfección con hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ).
- Reducción de óxidos con bisulfito sódico ( $\text{NaHSO}_3$ ).
- Adición de inhibidor de las incrustaciones.

## 2.1. Coagulación

La adición del cloruro férrico se realizará antes de los filtros de mallas, mejorando así su funcionamiento, siendo las reacciones que se producen las siguientes:



Se hace uso de una disolución de cloruro férrico al 40% del proveedor Vadequímica y una densidad de 1418 g/l.

$Q_A$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Dosis (ppm)	Concentración (% peso)	Densidad (g/l)
20	15	40	1418

Si el caudal de alimentación es de  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  y se quiere una concentración de 15 ppm, entonces el flujo de coagulante deberá ser:

$$Q_{\text{coagulante}} = \frac{20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 15 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{1418 \frac{\text{g}}{\text{l}} \cdot 0,40} = 0,529 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 529 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}}$$

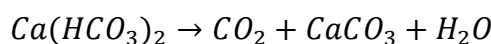
Suponiendo que la planta trabaje las 24 horas del día y se quiera un depósito para 30 días de operación:

$$V_{\text{depósito}} = 0,529 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 30 \text{ días} = \mathbf{380,9 \text{ litros}}$$

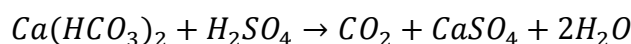
## 2.2. Acidificación

La acidificación se incluirá en el proceso entre los dos filtros, siendo las reacciones que se producen las siguientes:

Descomposición de bicarbonato:



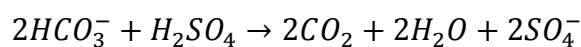
Reacción de ácido sulfúrico con bicarbonato de calcio:



Reacción de ácido sulfúrico con el carbonato de calcio:



Esta adición tiene una consecuencia negativa, el incremento del ión sulfato, que puede provocar precipitados de sulfato cálcico.



Esto se evitará con el antiincrustante que se añadirá después de los procesos de filtración.

Se hace uso de una disolución de ácido sulfúrico al 98% del proveedor Vadequímica y una densidad de 1,84 kg/l.

Si el caudal de alimentación es de 20 m<sup>3</sup>/h y se quiere una concentración de 20 ppm, entonces el flujo de ácido deberá ser:

Q <sub>A</sub> (m <sup>3</sup> /h)	Dosis (ppm)	Concentración (% peso)	Densidad (g/l)
20	20	98	1840



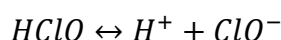
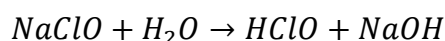
$$Q_{\text{ácido}} = \frac{20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 20 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{1840 \frac{\text{g}}{\text{l}} \cdot 0,98} = 0,222 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 222 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}}$$

Suponiendo que la planta trabaje las 24 horas del día y se quiera un depósito para 30 días de operación:

$$V_{\text{depósito}} = 0,222 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 30 \text{ días} = \mathbf{160 \text{ litros}}$$

### 2.3. Desinfección

Se utilizará hipoclorito sódico (NaClO) como desinfectante ya que se trata de un compuesto químico fuertemente oxidante, económico, ampliamente utilizado y de fácil adquisición. El pinchazo de este aditivo se realizará entre los dos procesos de filtración, siendo las reacciones que se producen las siguientes:



El efecto de desinfección se logra gracias a la formación del ácido hipocloroso (HClO), por lo tanto, el equilibrio de la segunda reacción se debe desplazar hacia la izquierda. Es este el motivo por el que se acidifica el agua de mar, ya que disminuyendo el pH se aumenta la concentración de protones H<sup>+</sup> y el equilibrio se desplaza hacia la izquierda, aumentando la concentración de HClO y mejorando la desinfección.

Se hace uso de una disolución de hipoclorito sódico al 12% del proveedor Vadequímica y una densidad de 1,25 g/cm<sup>3</sup>.

Q <sub>A</sub> (m <sup>3</sup> /h)	Dosis (ppm)	Concentración (% peso)	Densidad (g/l)
20	5	12	1250

Si el caudal de alimentación es de 20 m<sup>3</sup>/h y se quiere una concentración de 5 ppm, entonces el flujo de desinfectante deberá ser:

$$Q_{desinfectante} = \frac{20 \frac{m^3}{h} \cdot 5 \frac{g}{m^3}}{1250 \frac{g}{l} \cdot 0,12} = 0,667 \frac{l}{h} = 667 \frac{cm^3}{h}$$

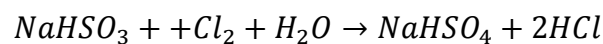
Suponiendo que la planta trabaje las 24 horas del día y se quiera un depósito para 30 días de operación:

$$V_{depósito} = 0,667 \frac{l}{h} \cdot 24 \frac{h}{día} \cdot 30 \text{ días} = \mathbf{480,2 \text{ litros}}$$

## 2.4. Reducción de óxidos

En los sistemas de ósmosis inversa en los que haya presente sustancias oxidantes se deben añadir agentes reductores, ya que estas en contacto con las membranas pueden dañar su estructura química y afectar a su rendimiento.

En este caso se utilizará bisulfito sódico ( $NaHSO_3$ ) como agente reductor, cuya principal función será neutralizar el cloro libre resultante de la desinfección. La adición del mismo se realizará posteriormente a ambas filtraciones, siendo la reacción que se produce la siguiente:



Se hace uso de una disolución de bisulfito sódico al 38% del proveedor Vadequímica y una densidad de  $1,35 \text{ g/cm}^3$ .

$Q_A$ ( $m^3/h$ )	Dosis (ppm)	Concentración (% peso)	Densidad (g/l)
20	10	12	1350

Si el caudal de alimentación es de  $20 \text{ m}^3/h$  y se quiere una concentración de 10 ppm, entonces el flujo del reductor de óxidos deberá ser:

$$Q_{reductor} = \frac{20 \frac{m^3}{h} \cdot 10 \frac{g}{m^3}}{1350 \frac{kg}{l} \cdot 0,12} = 1,234 \frac{l}{h} = 1234 \frac{cm^3}{h}$$

Suponiendo que la planta trabaje las 24 horas del día y se quiera un depósito para 30 días de operación:

$$V_{depósito} = 1,234 \frac{l}{h} \cdot 24 \frac{h}{día} \cdot 30 \text{ días} = \mathbf{1096,9 \text{ litros}}$$

## 2.5. Adición de inhibidor de incrustaciones

Se utilizará el inhibidor de incrustaciones Vitec 1500 del distribuidor Avista Technologies, siendo útil evitando incrustaciones de carbonato de calcio, sulfato de calcio, sulfato de bario y sulfato de estroncio, además de las de sílice. Es efectivo en un amplio rango de pH y para los diferentes tipos de membranas de ósmosis inversa (poliamida aromática y celulosa).

Para que proteja a las membranas de manera más efectiva se inyectará justo después de los filtros de cartucho.

$Q_A$ (m <sup>3</sup> /h)	Concentración (% peso)	Densidad (g/l)
20	15	1100

Debido a que no se ha obtenido el índice de langelier, no se conoce exactamente la necesidad de antiincrustante necesario, por lo que no se pueden realizar los cálculos de caudal ni de volumen del tanque necesario.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA  
DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA*

**PLANOS**

**Titulación:** Grado en Ingeniería Química Industrial

**Alumno:** Adrián Miguel Martín Cabrera

**Tutor:** Rafael Villarroel López

SEPTIEMBRE 2017

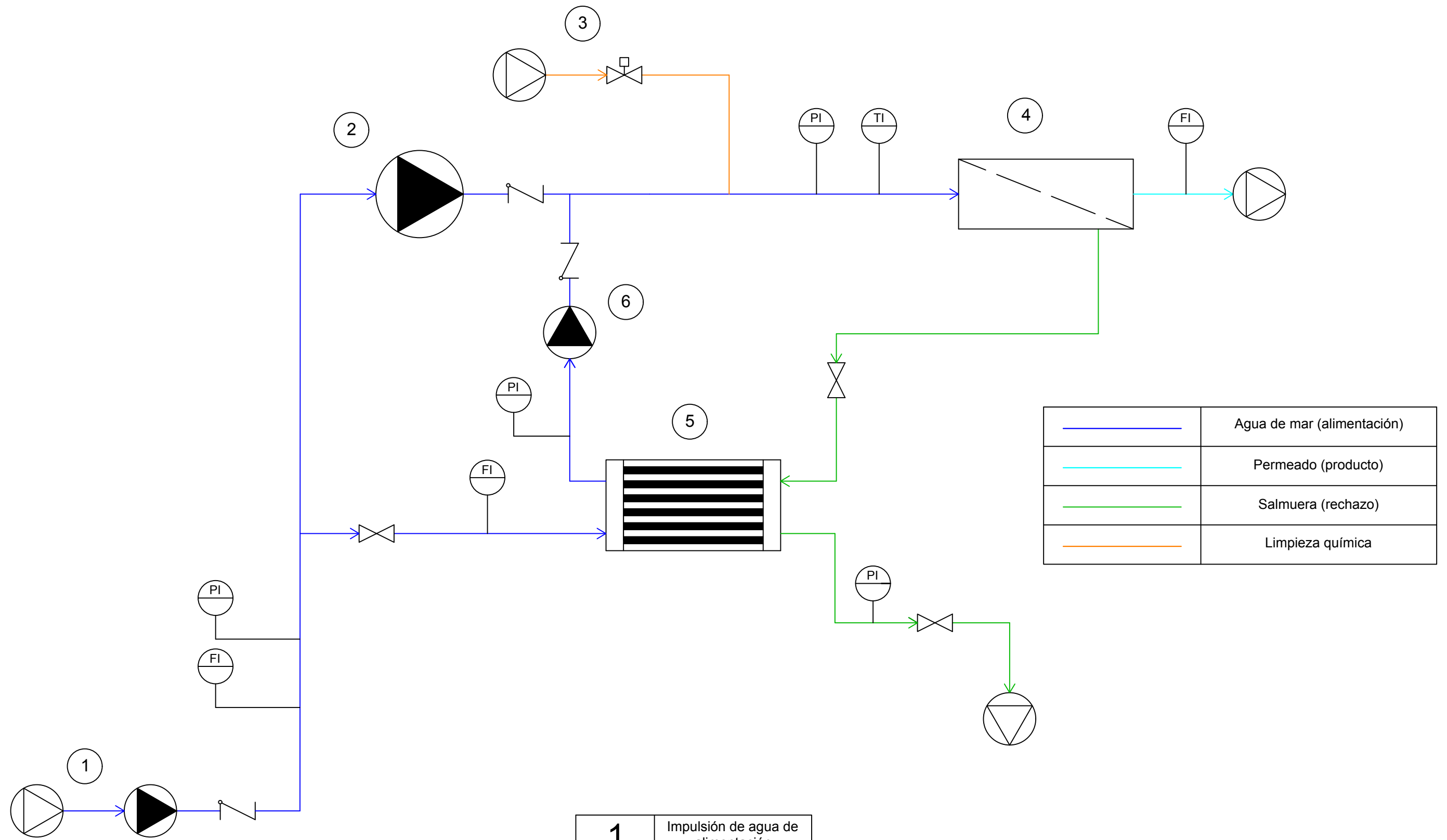
## ÍNDICE

1. Planos .....	1
Plano 1. Diagrama de flujo de recuperación energética con Isobarix XPR .....	2
Plano 2. Diagrama de flujo de recuperación energética con Salino Pressure Center .....	3
Plano 3. Diagrama de flujo de pretratamiento con electrocoagulación .....	4
Plano 4. Diagrama de flujo de pretratamiento con adsorción con lecho GAC y UF.....	5
Plano 5. Diagrama de flujo de pretratamiento con membranas MWCNTs.....	6

## 1. Planos

En el presente documento se recogen los siguientes planos, todos ellos editados en formato DIN A3:

- Plano 1: Diagrama de flujo de recuperación energética con Isobarix XPR.
- Plano 2: Diagrama de flujo de recuperación energética con Salino Pressure Center.
- Plano 3: Diagrama de flujo de pretratamiento con electrocoagulación.
- Plano 4: Diagrama de flujo de pretratamiento con adsorción con lecho GAC y UF.
- Plano 5: Diagrama de flujo de pretratamiento con membranas MWCNTs.

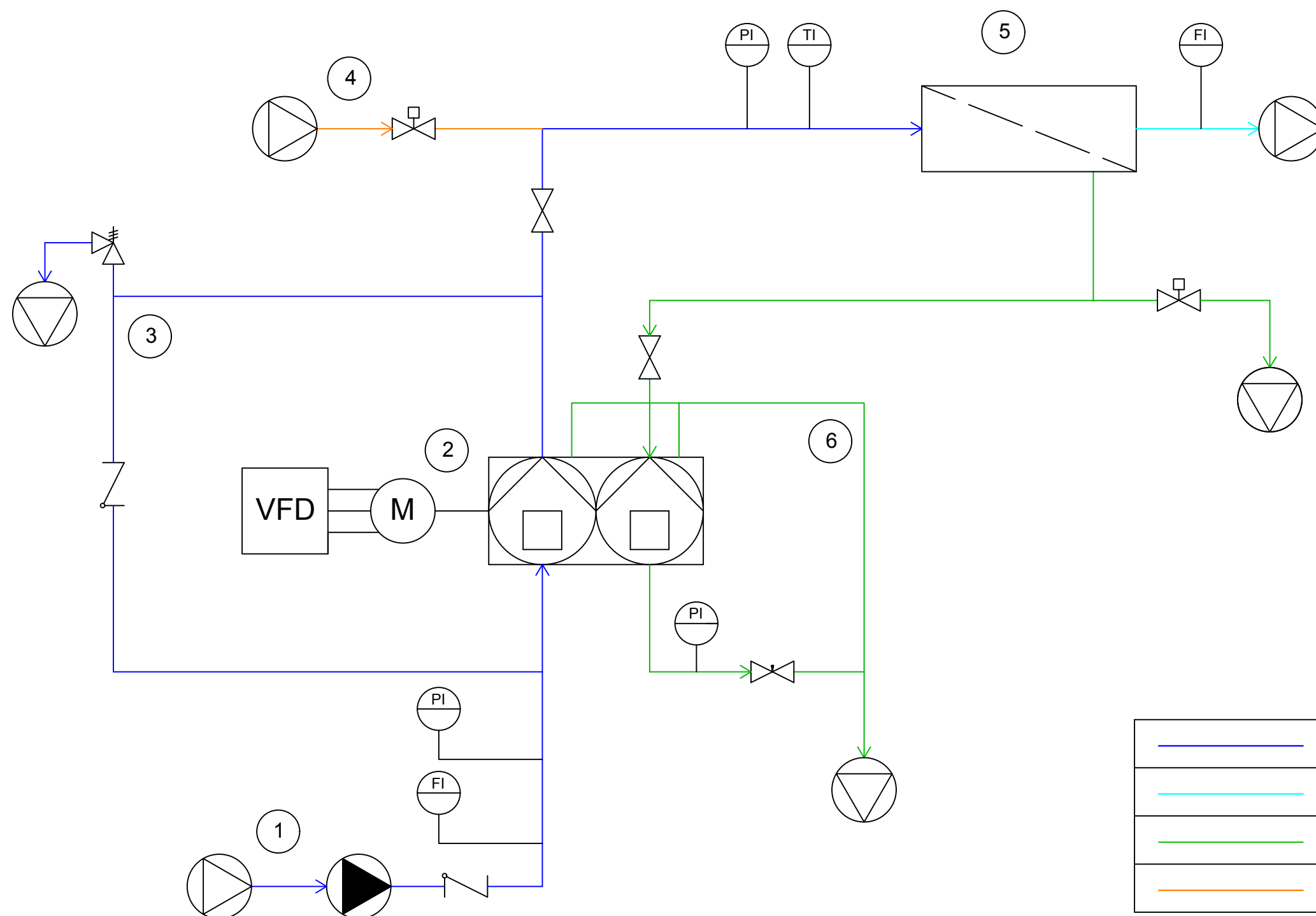


	Agua de mar (alimentación)
	Permeado (producto)
	Salmuera (rechazo)
	Limpieza química

VÁLVULAS	
	Válvula de compuerta
	Válvula anti-retorno
	Válvula monitorizada

<b>1</b>	Impulsión de agua de alimentación
<b>2</b>	Bomba de alta presión
<b>3</b>	Entrada limpieza química
<b>4</b>	Bastidor de ósmosis inversa
<b>5</b>	Recuperador energético ISOBARIX XPR
<b>6</b>	Bomba Booster

ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA		
FECHA	AUTOR	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Química Industrial Universidad de La Laguna
04/2017	ADRIÁN M. MARTÍN CABRERA	
ESCALA	DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA CON RECUPERADOR ENERGÉTICO ISOBARIX XPR	Nº de plano
S/E		1



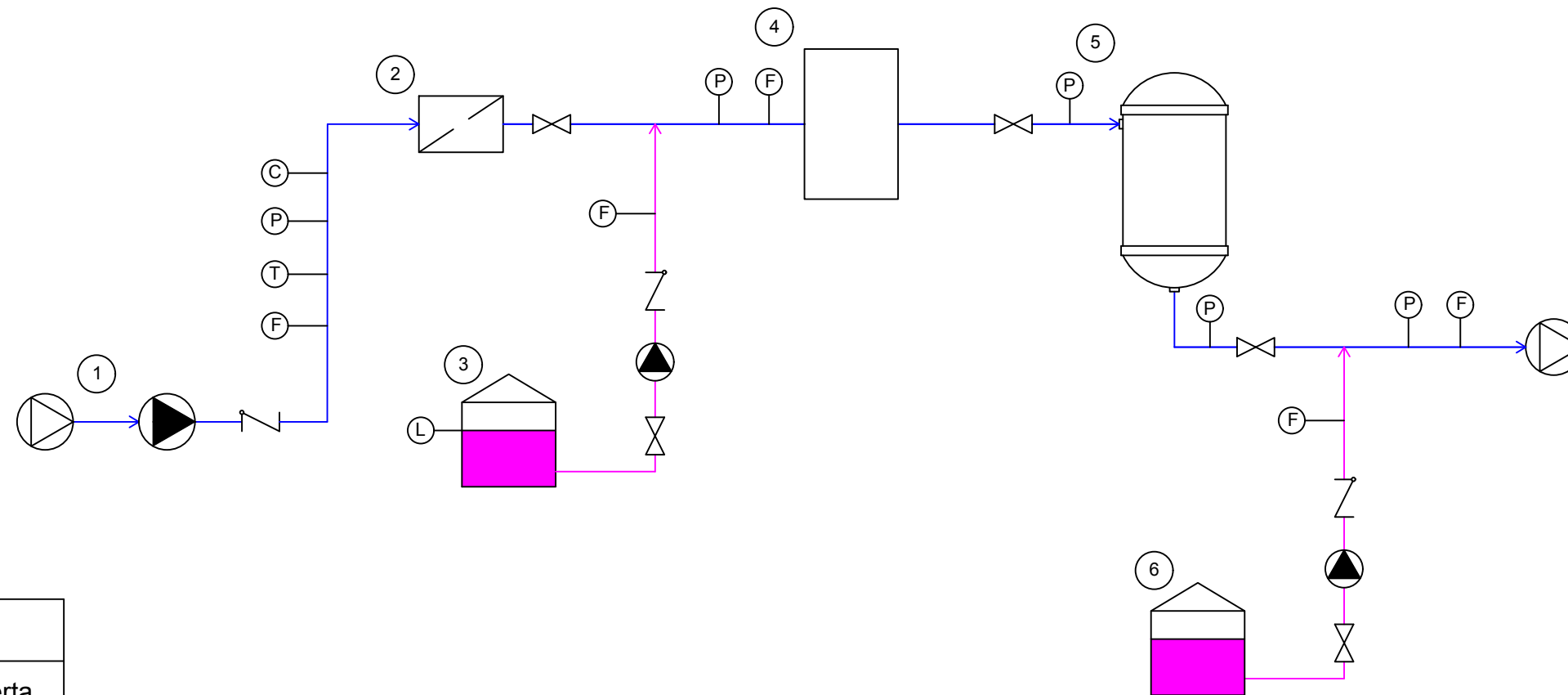
	Agua de mar (alimentación)
	Permeado (producto)
	Salmuera (rechazo)
	Limpieza química

VÁLVULAS	
	Válvula de compuerta
	Válvula de aguja
	Válvula anti-retorno
	Válvula monitorizada
	Válvula de seguridad

<b>1</b>	Impulsión de agua de alimentación
<b>2</b>	Salino Pressure Center
<b>3</b>	Bypass de agua de alimentación
<b>4</b>	Entrada limpieza química
<b>5</b>	Bastidor de ósmosis inversa
<b>6</b>	Lubricación del Salino Pressure Center

ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA		
FECHA	AUTOR	<small>ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA</small> Grado en Ingeniería Química Industrial Universidad de La Laguna
04/2017	ADRIÁN M. MARTÍN CABRERA	
ESCALA	DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA CON RECUPERADOR ENERGÉTICO SALINO PRESSURE CENTER	Nº de plano
S/E		2





VÁLVULAS	
	Válvula de compuerta
	Válvula anti-retorno

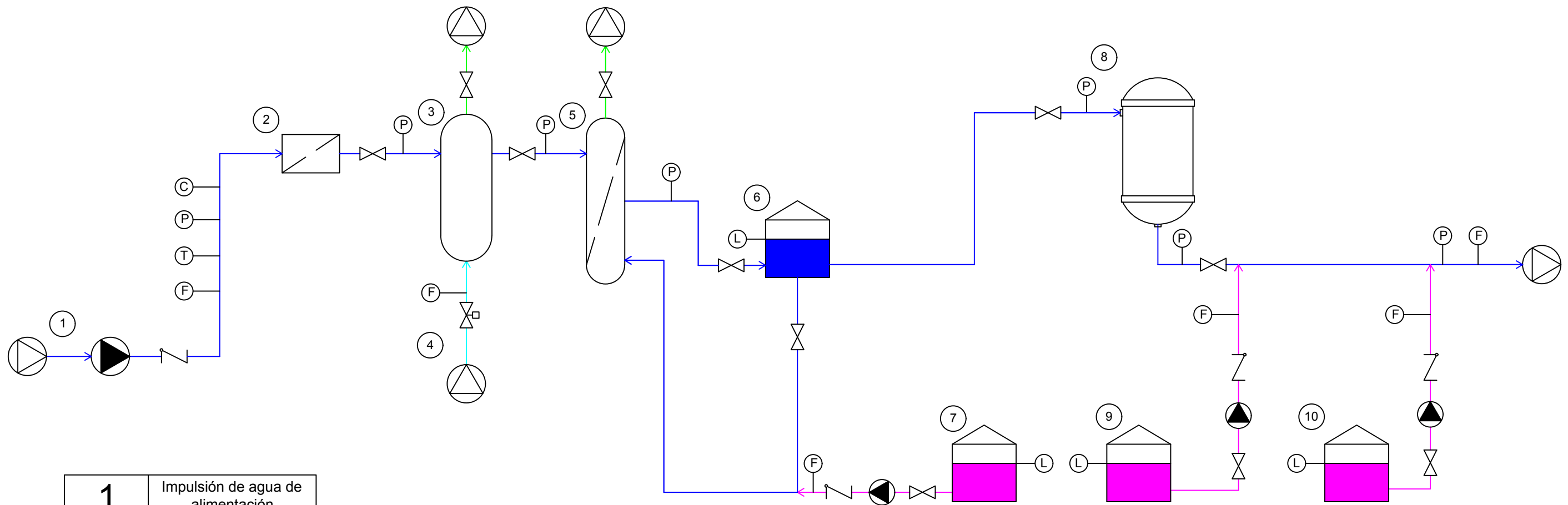
MEDIDORES	
(C)	Conductividad
(F)	Flujo
(P)	Presión
(T)	Temperatura

1	Impulsión de agua de alimentación
2	Prefiltrado
3	Almacenamiento de ácido sulfúrico
4	Electrocoagulación
5	Filtración por cartucho
6	Almacenamiento de inhibidor de incrustaciones

	Agua de mar (alimentación)
	Aditivos

### ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA

FECHA	AUTOR	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Química Industrial Universidad de La Laguna
06/2017	ADRIÁN M. MARTÍN CABRERA	
ESCALA	DIAGRAMA DE FLUJO PRETRATAMIENTO MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN	Nº de plano
S/E		3



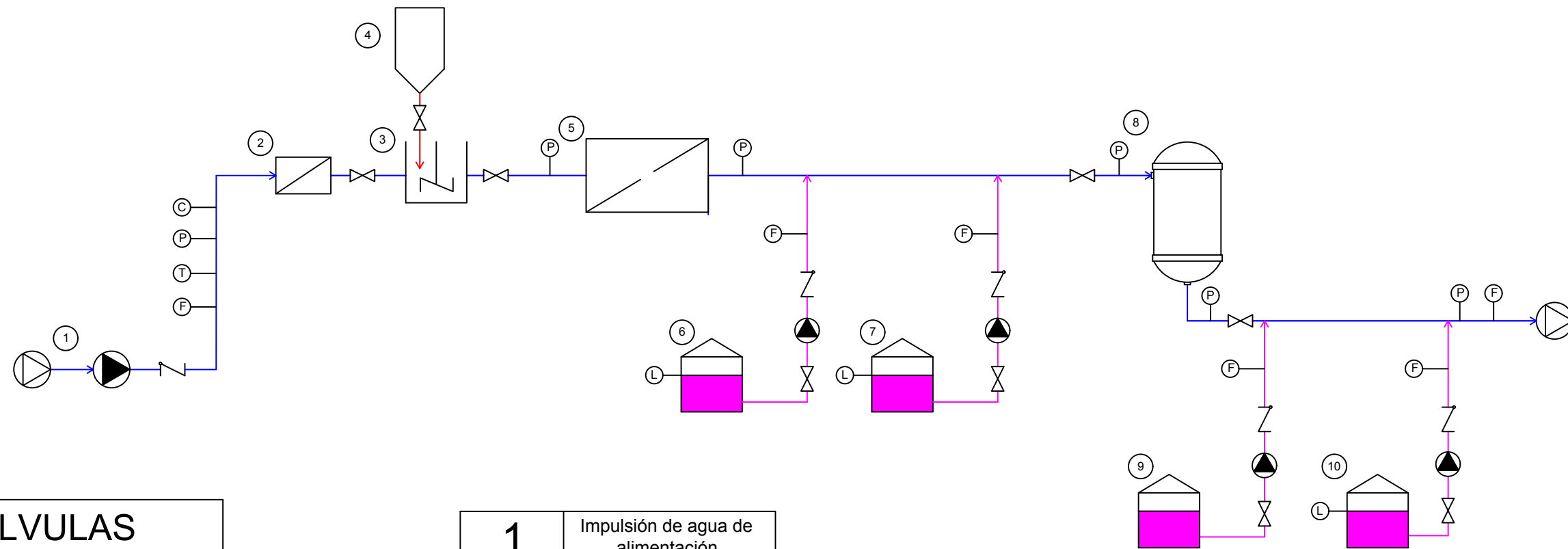
1	Impulsión de agua de alimentación
2	Prefiltrado
3	Lecho GAC
4	Limpieza lecho GAC
5	UF
6	Almacenamiento permeado UF
7	Almacenamiento de hipoclorito de sodio
8	Filtración por cartucho
9	Almacenamiento de inhibidor de incrustaciones
10	Almacenamiento de bisulfito de sodio

	Agua de mar (alimentación)
	Permeado
	Aditivos
	Desechos

VÁLVULAS	
	Válvula de compuerta
	Válvula anti-retorno
	Válvula monitorizada

### ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA

FECHA	AUTOR	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Química Industrial Universidad de La Laguna	
06/2017	ADRIÁN M. MARTÍN CABRERA		
ESCALA	DIAGRAMA DE FLUJO PRETRATAMIENTO POR ADSORCIÓN CON LECHO GAC Y UF		Nº de plano
S/E			4



VÁLVULAS	
	Válvula de compuerta
	Válvula anti-retorno

MEDIDORES	
(C)	Conductividad
(F)	Flujo
(P)	Presión
(T)	Temperatura

	Agua de mar (alimentación)
	Aditivos

1	Impulsión de agua de alimentación
2	Prefiltrado
3	Mezclado de agua de mar y PAC
4	Almacenamiento de PAC
5	Filtración con membranas MWCNTs
6	Almacenamiento de hipoclorito de sodio
7	Almacenamiento de ácido sulfúrico
8	Filtración por cartucho
9	Almacenamiento de inhibidor de incrustaciones
10	Almacenamiento de bisulfito de sodio

**ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA**

FECHA	AUTOR	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Química Industrial Universidad de La Laguna
06/2017	ADRIÁN M. MARTÍN CABRERA	
ESCALA	DIAGRAMA DE FLUJO PRETRATAMIENTO MEDIANTE FILTRACIÓN CON MEMBRANAS MEJORADAS CON NANOTUBOS DE CARBONO	Nº de plano
S/E		5