

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Aprovechamiento de gradientes salinos en plantas de
desalación convencionales

Autor: Ana Angelino Ridaó

Tutores: Lourdes García Rodríguez

Abel Riaza Frutos

Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Aprovechamiento de gradientes salinos en plantas de desalación convencionales

Autor:

Ana Angelino Ridao

Tutores:

Lourdes García Rodríguez

Abel Riaza Frutos

Departamento de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Aprovechamiento de gradientes salinos en plantas de desalación convencionales

Autor: Ana Angelino Ridao
Tutor: Lourdes García Rodríguez
Abel Riaza Frutos

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mis padres.
A mi hermano.
A Alejandro.

Agradecimientos

Tras haber logrado finalizar mi trabajo de fin de grado, sólo me queda agradecer a todas aquellas personas que me han apoyado enormemente y que han estado para ayudarme siempre que lo he necesitado.

Primero de todo me gustaría agradecer la colaboración de mi tutora, Lourdes García Rodríguez, la cual ha sido una guía fundamental en el desarrollo del proyecto, aportándome nuevos conocimientos y otorgándome sabios consejos que han hecho que pudiera llevar a cabo esta tarea con mayor facilidad.

A mi cotutor, Abel Riaza, por haberme brindado la oportunidad de realizar este estudio que ha abierto en mí un campo más de interés el cual hasta entonces era desconocido.

Reconocer también a mis amigos y familiares la ayuda desinteresada que me han ofrecido tanto en los buenos momentos como en los malos. Han sido un pilar fundamental de paciencia y comprensión a los que estaré eternamente agradecida.

*Ana Angelino Ridao
ETSI Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017*

Resumen

El agua dulce en nuestro planeta es un bien, en muchos lugares, escaso. Solo el 3% del agua total existente en el mundo es agua dulce apta para el consumo, el resto es agua salada. La desalación de agua de mar aparece como un proceso que será fundamental en el futuro debido al agotamiento de los recursos, el cambio climático o el aumento de la población mundial.

El desarrollo de los procesos de desalación siempre ha tenido como unos de sus grandes retos la reducción del consumo energético, lo cual se ha conseguido mediante el gran avance que esta tecnología ha logrado en las últimas décadas. Gracias a esto se ha llegado a reducir el consumo específico de 20 kWh/m³ a valores actuales por debajo de los 3kWh/m³, lo que significa un hecho sorprendente.

Este proyecto propone la integración de un proceso de ósmosis por presión retardada en una planta de desalación convencional para el aprovechamiento de los gradientes salinos de las corrientes de rechazo, con el fin de conseguir principalmente una reducción del consumo energético de la planta, teniendo siempre en cuenta la protección del medioambiente y los recursos económicos.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	10
Índice	12
Índice de tablas	14
Índice de figuras	16
1 Introducción	18
1.1 <i>Antecedentes</i>	18
1.2 <i>Objetivos</i>	19
1.3 <i>Estructura del proyecto</i>	19
2 Introducción a la RO y PRO	20
2.1 <i>Reverse Osmosis (RO)</i>	20
2.2 <i>Pressured Retarded Osmosis (PRO)</i>	22
2.3 <i>Integración de los procesos RO y PRO</i>	24
3 Descripción tecnología SWRO	25
3.1 <i>Introducción</i>	25
3.2 <i>Descripción de la tecnología RO</i>	26
3.2.1 <i>Componentes principales</i>	30
3.2.2 <i>Sistemas auxiliares</i>	32
3.3 <i>Consumo de energía y coste del agua</i>	35
3.4 <i>Turbinas Pelton en plantas SWRO</i>	37
4 Planta Lanzarote IV	38
5 Análisis termodinámico	45
6 Modernización planta SWRO	51
6.1 <i>Introducción</i>	51
6.2 <i>Modernización de la turbina Pelton</i>	51
6.3 <i>Análisis con aporte externo de agua de mar</i>	53
6.3.1 <i>Análisis energético</i>	53
6.3.2 <i>Análisis económico</i>	57
6.4 <i>Análisis con aporte externo de efluente acuoso de baja concentración</i>	59
7 Conclusiones	61
8 Referencias	62

Índice de tablas

Tabla 3.1: Previsión del crecimiento mundial de desalación

Tabla 3.2: Etapas del pretratamiento en plantas de desalación

Tabla 3.3: Sustancias químicas en el pre y postratamiento en plantas de desalación

Tabla 3.4: Parámetros del agua bruta de la planta Qingdao Desalination

Tabla 3.5: Pretratamiento y sistema de dosis químicas en la planta Qingdao Desalination

Tabla 3.6: Distribución de costes en plantas SWRO

Tabla 3.7: Precio del agua. Adaptado por Greenlee (2009)

Tabla 4.1: Composición del agua de mar en la planta Lanzarote IV

Tabla 4.2: Características nominales de los trenes de la planta SWRO

Tabla 4.3: Configuración de los tubos de presión de los trenes en la planta Lanzarote IV

Tabla 4.4: Datos de operación de caudal y presión de los trenes con dos pasos en la planta Lanzarote IV

Tabla 4.5: Datos de operación de caudal y presión para el quinto tren de solo un paso en la planta Lanzarote IV

Tabla 4.6: Ratio de recuperación por tren de RO de la planta Lanzarote IV

Tabla 4.7: Otros datos de operación de interés de la planta Lanzarote IV

Tabla 6.1: Datos de la planta Lanzarote IV para el análisis de la integración del sistema PRO cada dos trenes.

Tabla 6.2: Comparación de los requerimientos de energía cada dos trenes según las distintas configuraciones

Tabla 6.3: Costes aproximados asociados a la construcción de una planta convencional con capacidad productora de 30.000 m³/d

Tabla 6.4: Costes anuales asociados a una planta convencional con capacidad productora de 30.000 m³/d

Índice de figuras

Figura 1.1: Evolución del consumo específico en plantas SWRO.

Figura 2.1: Flujo espontáneo y situación de equilibrio en el proceso de ósmosis.

Figura 2.2: Proceso de ósmosis inversa.

Figura 2.3: Principio básico de la PRO.

Figura 2.4: Ejemplo sistema híbrido.

Figura 3.1: Diagrama proceso básico de SWRO.

Figura 3.2: Diagrama proceso SWRO con dos pasos.

Figura 3.3: Diagrama proceso BWRO configuración en dos etapas.

Figura 3.4: Diagrama proceso SWRO con *turbocharger*.

Figura 3.5: Diagrama proceso SWRO con intercambiadores de presión.

Figura 3.6: Esquema simplificado de una planta de desalación SWRO con recuperación de energía.

Figura 3.7: Diagrama conceptual de la configuración interna de los elementos en membranas espirales.

Figura 3.8: Diagrama conceptual de los elementos en membranas espirales.

Figura 3.9: Esquema del proceso de RO con recuperación de energía mediante turbina Pelton.

Figura 4.1: Trenes RO de la planta Lanzarote IV.

Figura 4.2: Bombas de alta presión y turbinas Pelton de la planta Lanzarote IV.

Figura 4.3: Detalle rueda turbina Pelton de la planta Lanzarote IV.

Figura 4.4: Esquema de la planta Lanzarote IV y datos principales de operación.

Figura 5.1: Diagrama proceso PRO.

Figura 5.2: Correlación de la entalpía específica del agua de mar.

Figura 5.3: Entalpía específica del agua saturada.

Figura 5.4: Correlación del coeficiente osmótico del agua de mar.

Figura 5.5: Correlación de la entropía específica del agua de mar.

Figura 5.6: Entropía específica del agua saturada.

Figura 6.1: Configuración planta Lanzarote IV con un equipo de cámaras isobáricas cada dos trenes.

Figura 6.2: Comparación de los requerimientos de energía cada dos trenes.

Figura 6.3: Configuración integración sistema PRO con aporte externo de agua de mar.

Figura 6.4: Configuración integración sistema PRO con aporte externo de efluente acuoso.

1 INTRODUCCIÓN

*El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza
- Leonardo Da Vinci -*

Con este primer capítulo se persigue tratar los antecedentes del proyecto y la motivación que ha llevado a cabo su realización, así como los objetivos marcados al inicio y durante el desarrollo del proyecto.

1.1 Antecedentes

La desalación de agua de mar como proceso para la obtención de agua dulce para consumo humano, agrícola o fines industriales es un proceso de alto consumo energético específico, es decir, la energía consumida por cada metro cúbico de agua tratada, si se compara con procesos convencionales de tratamiento de agua.

Además el consumo energético representa el mayor coste de operación de una desaladora, con un valor que supera el 50% del total de los costes de explotación. Este consumo es elevado en comparación con las estaciones de tratamiento de agua convencionales, por lo que las investigaciones se han centrado durante las últimas décadas en la reducción del mismo. A finales de la década de los 70, las plantas de desalación de agua de mar consumían hasta 20 kWh/m³, pero gracias al desarrollo de las membranas, el uso de aparatos recuperadores de energía y nuevos materiales con menor fricción, el consumo energético se ha reducido drásticamente, obteniendo hasta valores de 2.2 kWh en nuevas plantas de desalación.

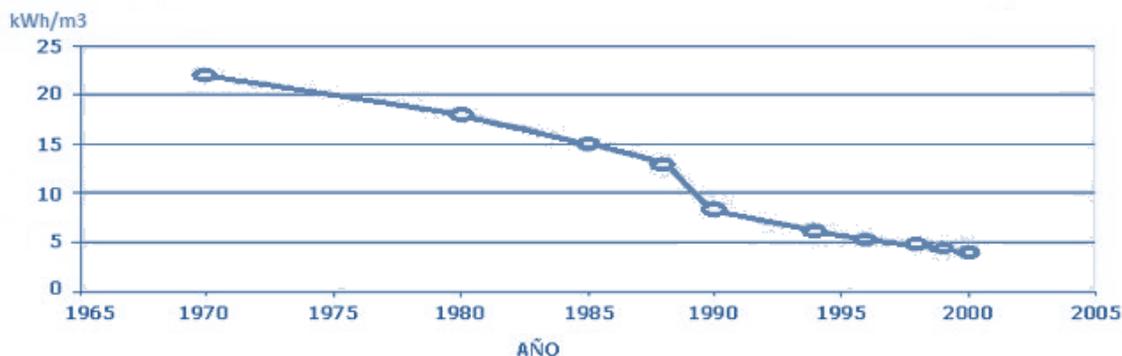


Figura 1.1: Evolución del consumo específico en planta SWRO. Fuente: Hispagua, Sistema Español de Información sobre el Agua

1.2 Objetivos

La motivación principal para llevar a cabo este proyecto ha sido el análisis de la gráfica anterior, y, entendiendo que uno de los principales temas fundamentales de la sociedad hoy día es el uso y consumo eficiente de la energía, se ha propuesto analizar el aprovechamiento de los gradientes salinos de las corrientes de rechazo de plantas convencionales de desalación de agua de mar mediante una unidad de ósmosis por presión retardada con un aporte externo de agua de mar, siendo esta la misma que alimenta la planta desaladora.

1.3 Estructura del proyecto

El proyecto se ha dividido en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción**

En este primer capítulo se hace una primera aproximación al trabajo que se ha realizado, mediante los antecedentes y los objetivos que el proyecto persigue

- **Capítulo 2: Introducción a la RO y PRO**

El segundo capítulo describe los procesos fundamentales en los que se basa el proyecto, la ósmosis inversa y la ósmosis por presión retardada, así como la posibilidad de hibridar ambos sistemas.

- **Capítulo 3: Descripción de la tecnología SWRO**

Aquí se detalla la tecnología existente en las plantas de desalación de agua de mar, los tratamientos y productos empleados así como los consumos energéticos.

- **Capítulo 4: Planta Lanzarote IV**

Este capítulo ofrece una visión detallada acerca de la configuración de la planta Lanzarote IV y sus parámetros de operación.

- **Capítulo 5: Análisis termodinámico**

El quinto capítulo trata de analizar los límites termodinámicos que rigen el comportamiento de un sistema de ósmosis por presión retardada en uno de los trenes de presión de la planta Lanzarote IV.

- **Capítulo 6: Modernización de una planta SWRO**

Se exponen en este capítulo todas las actuaciones que deben tenerse en cuenta al integrar un equipo PRO en una planta convencional así como los costes asociados.

- **Capítulo 7: Conclusiones**

En este último capítulo se recogen las conclusiones obtenidas tras el análisis realizado.

2 INTRODUCCIÓN A LA RO Y PRO

Se detalla en este capítulo la descripción de los procesos de ósmosis inversa, en adelante RO, y de ósmosis por presión retardada, en adelante PRO, así como la posibilidad de integrar el proceso PRO en plantas de desalación para la reducción del consumo específico de la planta.

2.1 Reverse Osmosis (RO)

Para comprender en qué consiste el fenómeno de la ósmosis inversa, es importante conocer el proceso osmótico por el que existe una difusión entre dos soluciones con distinta concentración mediante una membrana semipermeable al soluto.

La tecnología RO depende del fenómeno natural llamado ósmosis directa, que ocurre en las células de los seres vivos. A través de una membrana semipermeable, dos soluciones con diferente concentración en sales tienden a igualar sus concentraciones. El solvente pasa de la solución más diluida hacia la más concentrada, lo que producirá que el nivel de la solución aumente. El proceso se detiene una vez que el equilibrio entre las dos concentraciones haya sido alcanzado. La fuerza que genera la conducción del flujo de solvente, es llamada presión osmótica y se debe al gradiente de concentración de sales de las soluciones. Ver Figura 2.1.

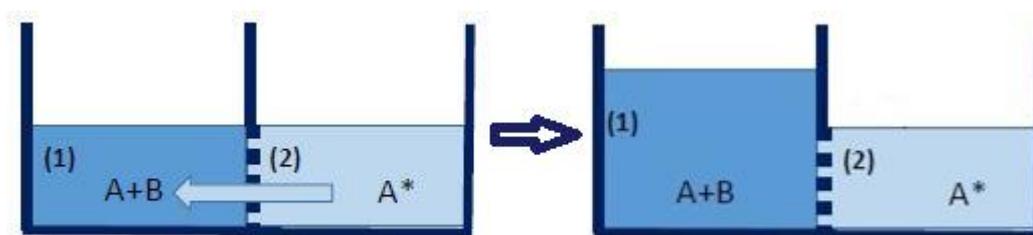


Figura 2.1: Flujo espontáneo y situación de equilibrio en el proceso de ósmosis. Fuente: Lourdes García-Rodríguez

El agua de mar es una solución con una alta concentración en sales, por lo que se tiende a querer separar las sales para la obtención de agua dulce. Por lo tanto si se desea invertir el flujo de agua hay que ejercer una presión en el lado de la solución concentrada esto es el principio básico de la ósmosis inversa, RO. Ver Figura 2.2.

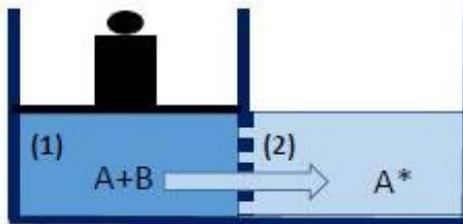


Figura 2.2: Proceso de ósmosis inversa. Fuente: Lourdes García-Rodríguez

La presión que produce el movimiento del agua de un lado a otro de la membrana se conoce con el nombre de *Net Driving Pressure*, la cual debe de ser mayor a la diferencia de presiones osmóticas de cada una de las soluciones para que pueda llevarse a cabo la transferencia de solvente a través de la membrana.

$$NDP = (p_1 - p_2) - (\pi_1 - \pi_2) > 0 \quad (2.1)$$

El cambio climático afecta a los niveles de precipitaciones y altera el ciclo hidráulico global. Como consecuencia agravan el acceso a agua dulce, lo que conlleva cambios drásticos. La tecnología de las membranas como la ósmosis inversa (RO), es una de las más dominantes en el mercado de la desalación de agua de mar y el tratamiento de agua, ya que tiene las restricciones geográficas más bajas además de ser un proceso estable, probado y fiable.

Cada vez está más extendido y desarrollado el uso del proceso de RO para la desalación de agua de mar, ya que es una tecnología que reduce tanto costes de mantenimiento como de operación. Además necesita menor espacio al ser una tecnología bastante compacta y no requiere de aporte de calor externo para cambios de fase. Tiene buen rendimiento y es apta para aplicaciones de agua salobre, marina, agua de proceso, residual etc.

Sin embargo, el desarrollo del proceso de RO se ve dificultado por el consumo relativamente alto de energía, debido a la presurización y polución medioambiental de los desechos de salmuera. Por lo tanto, maximizar la eficiencia en los procesos RO podría cubrir enormemente la demanda de agua potable.

A diferencia de la ósmosis inversa, la ósmosis no requiere alta presión para la separación, permitiendo menor consumo de energía para producir agua. Las ventajas principales de usar la ósmosis son que opera con bajas presiones, tiene alto rechazo en un amplio rango de contaminantes y suele operar con membranas menos propensas al ensuciamiento que en procesos con membranas presurizadas. Ya que la única presión involucrada en el proceso de ósmosis es debido a la resistencia de la membrana, el equipamiento usado es simple y el mantenimiento de las membranas no es un gran problema. Más allá de eso, para los procesos farmacéuticos y de alimentación, la ósmosis tiene el beneficio de concentrar el vapor de alimentación sin requerir altas presiones o temperaturas que suelen ser perjudiciales para la solución de alimentación.

Existen muchas investigaciones que buscan desarrollar la ósmosis como un proceso alternativo a la ósmosis inversa para la desalación de agua de mar, sin embargo, surgen siempre dos limitaciones importantes, la falta de membranas de alto rendimiento y la necesidad de una solución concentrada fácilmente separable. Además, cuando se considera la desalación de agua de mar y especialmente cuando se requiere una gran recuperación de agua, la ósmosis solo puede utilizarse si la solución concentrada puede inducir una gran presión osmótica. Por lo tanto la ósmosis inversa es la que está presente en la mayoría de las plantas desaladoras del mundo.

La tecnología de las membranas puede reducir las demandas de energía además de aliviar las demandas de agua.

2.2 Pressured Retarded Osmosis (PRO)

La ósmosis por presión retardada (PRO) es un proceso de producción de energía que utiliza la diferencia de presiones osmóticas entre la alta presión osmótica de un líquido como el agua de mar y la baja presión osmótica como la del agua dulce.

El módulo de membrana de PRO está separado mediante una membrana semipermeable que permite sólo el paso de moléculas de agua a través de ella. El agua de mar de mayor presión osmótica (P_s) se sitúa a uno de los lados de la membrana con un caudal (Q_s). El agua dulce de menor presión osmótica (P_w) se sitúa en el lado contrario con el caudal (Q_w). Entonces el agua dulce permea hacia el lado del agua de mar de mayor presión mediante un flujo (Q_p) debido a la diferencia de presión osmótica. Ver Figura 2.3.

La diferencia de potencial químico entre las soluciones produce el transporte de agua desde la solución diluida hacia la concentrada. Si se aplica una presión hidrostática en la solución concentrada, el transporte de agua sería parcialmente retardado, por lo tanto, el transporte de agua desde la solución diluida con baja presión hacia la solución concentrada a alta presión resulta en una presurización del volumen de agua transportada. Este volumen presurizado podría ser usado para la generación de energía eléctrica en una turbina.

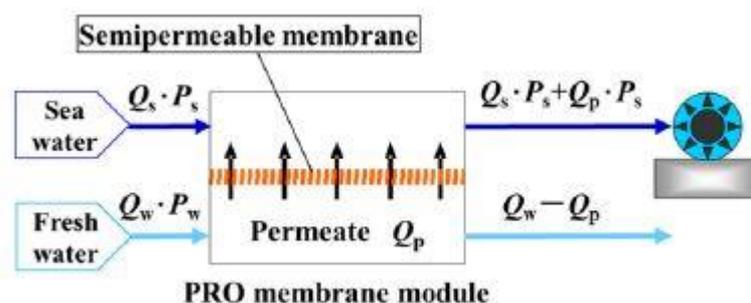


Figura 2.3: Principio básico de la PRO. Fuente: Science Direct, Desalination

La relación entre el flujo de agua (J_w) y la presión aplicada se describe en la Ecuación 1.

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P) \quad (2.2)$$

Donde A es el coeficiente de permeado del agua de la membrana, $\Delta\pi$ la diferencia de presión osmótica entre el agua de mar y agua dulce, y ΔP la diferencia de presión hidráulica entre el agua de mar y agua dulce.

La densidad de potencia (PD) que corresponde a la energía obtenida por unidad de área de la membrana se calcula usando la ecuación 2.

$$PD = J_w \Delta P = A(\Delta\pi - \Delta P) \Delta P \quad (2.3)$$

La Ecuación 2 es una función cuadrática de ΔP y la densidad de potencia alcanza el máximo cuando la diferencia de presión hidráulica es la mitad de la diferencia de presión osmótica.

En los sistemas de PRO que usan agua de mar, la densidad de potencia alcanza máximos cuando la presión del suministro de agua de mar es de 1,5 MPa asumiendo que la concentración de sales es del 3,5% y la presión osmótica ronda los 3 MPa. Cuando los sistemas de PRO usan concentrado de salmuera proveniente de una planta de SWRO, la densidad de potencia alcanza el máximo cuando el concentrado de salmuera tiene una presión de 3 MPa asumiendo una concentración de sales del 7% y una presión osmótica de 6 MPa.

La ósmosis por presión retardada ha re-emergido como un proceso de producción de energía. La viabilidad teórica de obtener energía eléctrica mezclando agua dulce y salada fue propuesta en 1950 y el proceso de PRO fue sugerido en 1970. Sin embargo, al principio de los procesos de PRO, estudios revelaron que las membranas de PRO eran insuficientes para producir agua que pudiera ser utilizada por una hidroturbina porque el sustrato poroso de la membrana de PRO tenía una alta resistencia interna al transporte de soluto y posteriormente resultaba una severa concentración de polarización interna. El desarrollo de una membrana con un parámetro relativamente bajo de estructura en la membrana ha renovado el interés en el proceso de PRO. Los progresos actuales en PRO como una fuente renovable de energía pueden ayudar a cubrir futuras demandas.

2.3 Integración de los procesos RO y PRO

Comparado con un sistema PRO autónomo, la integración de ambos procesos, RO y PRO, se ha investigado como una opción con numerosas ventajas. Por ejemplo, el rechazo generado durante el proceso RO se diluye hasta valores de concentración aproximados a la concentración del agua de mar, minimizando el impacto medioambiental que el rechazo pudiera tener en el hábitat marino y reduciendo así el coste de un postratamiento para la descarga de salmuera. Señalar que el agua producida en el proceso RO está siempre en un circuito independiente al del agua de desecho, por lo que no existe contacto alguno entre el rechazo y el agua potable producida, evitando así la posible contaminación de esta.

La producción de energía mediante PRO en el sistema RO-PRO se ve aumentada debido a la alta concentración de la corriente de *brine* procedente del sistema RO comparada con la concentración estándar del agua de mar.

Una característica evidente de la integración del proceso PRO es que la solución concentrada ya ha sufrido un pretratamiento antes de ser usada en el proceso RO, lo cual hace que dicha corriente esté libre de partículas, por lo que no se requiere un tratamiento adicional en la corriente concentrada. Esto supone un importante ahorro en el consumo tanto de energía como de agentes químicos.

La mejora de los procesos de RO junto con los de PRO promete aliviar futuras demandas de agua y energía.

La eficiencia de estos dos procesos es fuertemente dependiente de la concentración de las soluciones. El agua con baja salinidad induce una menor presión osmótica al igual que una solución de alimentación en RO por lo que requiere menor consumo de energía. Por otro lado, en PRO, una gran diferencia entre las concentraciones de la solución de alimentación y la solución concentrada, genera más energía. Por lo tanto podría ser beneficioso hibridar los dos procesos debido a la dependencia de los dos procesos de membrana en la concentración de las soluciones. Por ejemplo, una configuración híbrida donde la salmuera concentrada del proceso de RO fuera utilizada como la solución concentrada del proceso de PRO, lo que produciría un aumento en la producción de energía en PRO. Ver Figura 2. Es importante investigar la viabilidad de un proceso híbrido RO-PRO bajo distintas condiciones de las soluciones y presiones aplicadas.

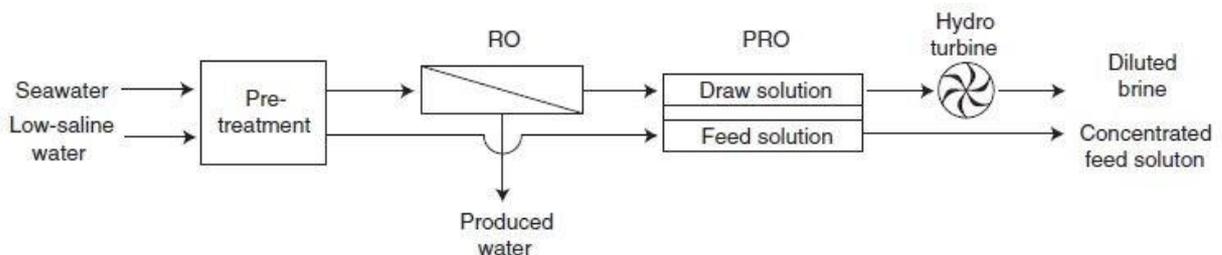


Figura 2.4: Ejemplo sistema híbrido. Fuente: Science Direct, Desalination

3 DESCRIPCIÓN TECNOLOGÍA SWRO

Este capítulo trata de describir detalladamente la tecnología empleada en procesos de ósmosis inversa de agua de mar, en adelante, SWRO.

3.1 Introducción

Entre todas las tecnologías de desalación, la tecnología de ósmosis inversa, a continuación RO, de agua de mar, es la más internacionalmente extendida. Está completamente desarrollada y presente en las zonas costeras del mundo donde los recursos hidrológicos naturales son escasos. Los avances en la investigación y desarrollo de esta tecnología son continuos. Básicamente las innovaciones recientes más importantes, además de las líneas de investigación existentes, están enfocadas en intentar alcanzar grandes reducciones en la energía consumida. Además, se está trabajando para minimizar los efectos negativos de la incrustación y ensuciamiento en las membranas.

Actualmente existen varias tecnologías que se usan a nivel industrial en la desalación de agua de mar. Estas tecnologías están básicamente divididas en dos grandes categorías: procesos térmicos y procesos de membranas. En cuanto a los procesos térmicos, se encuentran la destilación multietapa, la destilación multiefecto y la evaporación por compresión de vapor, diferenciando entre la compresión por vapor mecánica y la evaporación por termocompresión. Esta última usada conjuntamente en los procesos de destilación multiefecto. Considerando los procesos de membrana, lo más usado es la RO seguida de la electrodiálisis, cuyo uso es apropiado para el agua salobre.

Todas las experiencias que trabajan con la ósmosis como un proceso de desalación alternativo, exponen dos grandes limitaciones; la falta de membranas y la necesidad de una solución fácilmente separable. Además, al tratarse de agua de mar, y especialmente cuando se requiere de una alta recuperación de agua, la ósmosis sólo puede ser utilizada si la solución induce una alta presión osmótica.

Hasta 2011, existían en el mundo aproximadamente 16.000 plantas de desalación, que sumaban una capacidad total de 78,4 millones de m³/día, de los cuales el 60% correspondían al tratamiento de agua de mar.

Se espera que la SWRO sea uno de los mayores y más rápidos crecimientos en el mercado mundial de la desalación. La mayoría de las instalaciones locales y las demandas de riego en muchos países como EE.UU, España, China, Australia, usan técnicas con membranas base. Además, muchos países en las regiones del Mediterráneo y Medio Este dependen áltamente de la desalación por membranas para cubrir el crecimiento en la demanda de agua. La Tabla 3.1 muestra el crecimiento mundial esperado de desalación por regiones entre 2005-2015.

América	69%
Asia	76%
Mediterráneo	129%
Golfo	94%
Total	101%

Tabla 3.1: Previsión del crecimiento mundial de desalación. Fuente: Seawater Reverse Osmosis Desalination Technology

En Europa, la mayoría de la capacidad de desalación está concentrada en el Mediterráneo (España, Italia y Grecia), debido a la carencia de recursos naturales, la demanda de turismo y la intensa agricultura. La reciente capacidad instalada en Europa de plantas de desalación SWRO muestra una tendencia en la construcción de plantas con alta capacidad.

Recientemente España ha escalado hasta el tercer puesto en términos de capacidad contratada. El programa AGUA incluye la instalación de 20 plantas de desalación desde 2004. Algunas son nuevas construcciones y otras una remodelación de plantas existentes, la mayoría en la costa mediterránea. Especialmente, resaltan las Islas Canarias como comunidad pionera en España en el uso de agua desalada para consumo humano y apoyo agrícola. Hay alrededor de 130 plantas de desalación SWRO en esta región, la cual es una con las mayores densidades en el mundo de plantas de desalación SWRO (22.73 km²/planta).

3.2 Descripción de la tecnología RO

Los principales elementos necesarios para reproducir el fenómeno de la SWRO a escala industrial con agua de mar son una bomba, necesaria para aplicar presión, y una membrana, capaz de permitir el paso de solvente.

Las membranas de poliamida enrolladas en espiral son las mayormente usadas en procesos industriales y para la desalación de agua de mar. Considerando las bombas necesarias para aplicar la presión de trabajo, y dependiendo de la escala de la instalación, las bombas centrífugas multietapa son usadas cuando el flujo de trabajo es alto, mientras que para flujos bajos se usan bombas de desplazamiento.

En los procesos industriales de SWRO tienen lugar las siguientes etapas:

- Consumo de agua de mar y bombeo. El agua de mar puede ser tomada de la superficie o de pozos de playa, los cuales proveen mejor calidad del agua, con menos turbiedad y sin actividad biológica. Su desventaja para plantas con alta capacidad es que los flujos de alimentación están limitados debido a que requieren grandes áreas para perforaciones con alta permeabilidad cerca de la costa.

- Pretratamiento del agua de mar: El pretratamiento incluye todos los procesos físico-químicos para prevenir el ensuciamiento y la incrustación. Dependiendo de la calidad del agua de alimentación, se utilizan filtros clásicos anti-incrustación o membranas más desarrolladas basadas en la Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF) o Nanofiltración (NF). En comparación con los pretratamientos convencionales, el uso de membranas proporciona valores más bajos de SDI prácticamente independientes a las variaciones en la calidad del agua bruta. El proceso de selección apropiado de membranas debe considerar como requisito el caso específico de la extracción de contaminantes. Actualmente la UF es el proceso usado más común, el cual debe lograr el mejor equilibrio entre la extracción de contaminantes y la producción de permeado. Las membranas NF son capaces de extraer contaminantes disueltos y material coloidal mientras que las membranas MF extraen únicamente gran cantidad de materia en partículas.
- Desalación y etapas de recuperación de energía: A continuación se describirán brevemente los distintos procesos en las etapas de desalación del agua de mar así como el proceso de recuperación de energía.
 - Bombeo a alta presión: El caudal de alimentación del sistema de pretratamiento tiene que ser presurizado hasta la presión requerida. Sólo parte del caudal de alimentación pasa por la bomba de alta presión. El resto del flujo de alimentación es presurizado por los aparatos de recuperación de energía y a continuación por una bomba auxiliar.
 - Proceso SWRO: El proceso de desalación se lleva a cabo por los trenes de RO. Consiste en el ensamblaje de los tubos de presión, trabajando en paralelo, con los elementos de las membranas en su interior conectados en serie. El sistema más simple para la desalación de SWRO es una configuración del tren de SWRO con una etapa simple y un único paso. Ver Figura 3.1.

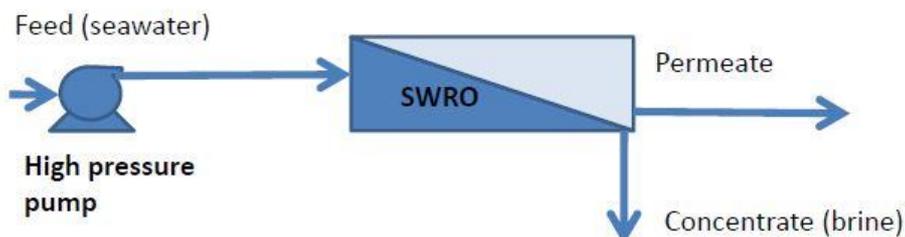


Figura 3.1: Diagrama proceso básico de SWRO. Fuente: Lourdes García-Rodríguez

Además de eso, puede ser instalado un segundo paso, lo que significa una segunda oportunidad para procesar el permeado – un tubo de presión de agua salobre por ósmosis inversa (BWRO) – para obtener mejor calidad en el producto. Ver Figura 3.2

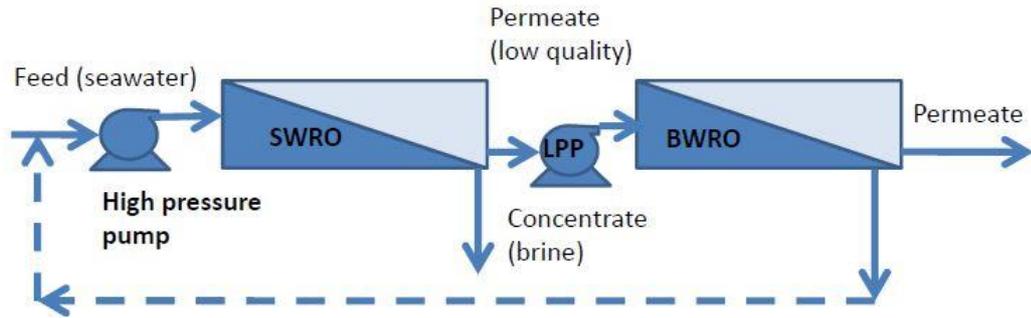


Figura 3.2: Diagrama proceso SWRO con dos pasos. Fuente: Lourdes García-Rodríguez

También podría ser posible el uso de una segunda etapa para la desalación de la salmuera del primer paso (SWRO). Esta etapa puede requerir elementos desarrollados para resistir altas presiones los cuales están comercialmente disponibles. Las configuraciones con dos etapas son usadas normalmente en la desalación de agua salobre con alta salinidad.

Los puntos de control más importantes del proceso de ósmosis inversa son la presión de pretratamiento, la presión de alimentación a la entrada del tubo de presión y el caudal de salmuera.

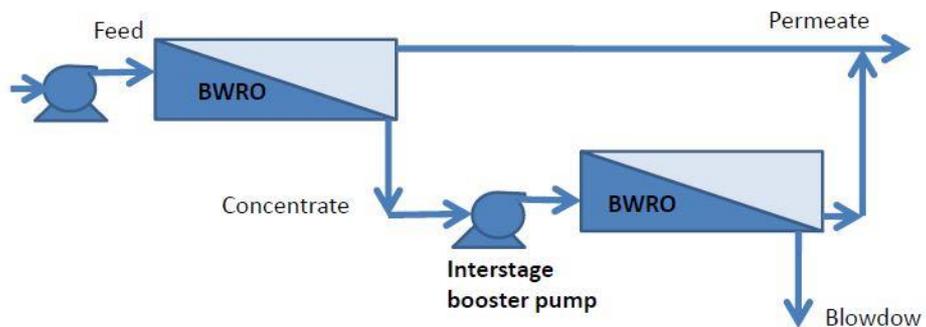


Figura 3.3: Diagrama proceso BWRO configuración en dos etapas. Fuente: Lourdes García-Rodríguez

- Recuperación de energía de la salmuera: En la actualidad son usados intercambiadores de presión (también conocidos como cámaras isobáricas) o *turbochargers*. Estos últimos actúan como bombas auxiliares de alta presión. Por lo tanto, los *turbochargers* son instalados tras la bomba de alta presión presurizando la descarga. Por el contrario, los sistemas de recuperación de energía basados en los intercambiadores de presión operan en paralelo con la bomba de presión. Ellos procesan solo una fracción del vapor proveniente del sistema de pretratamiento del agua de mar. Tras pasar por el intercambiador de presión se requiere una bomba auxiliar, antes de ser mezclado con el vapor a la salida de la bomba de alta presión. Ver Figura 3.4 y 3.5.

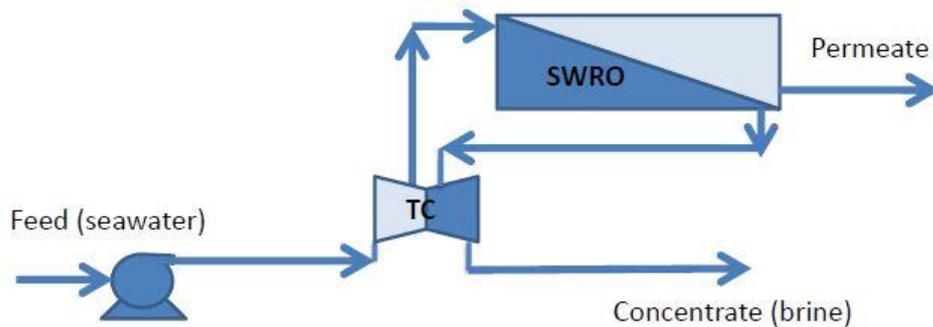


Figura 3.4: Diagrama proceso SWRO con *turbochargers*. Fuente: Lourdes García-Rodríguez

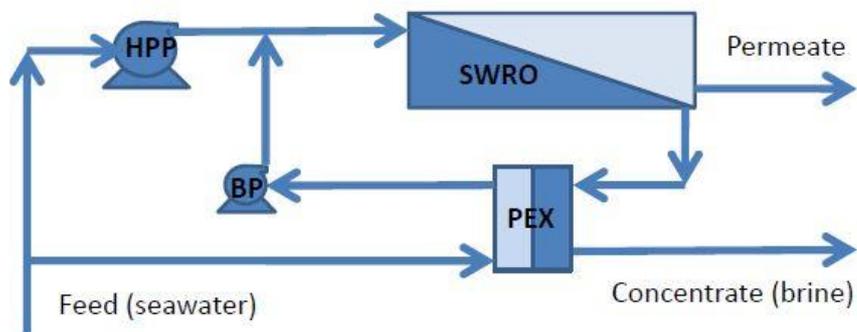


Figura 3.5: Diagrama proceso SWRO con intercambiadores de presión. Fuente: Lourdes García-Rodríguez

- Post-tratamiento del permeado y almacenamiento: El permeado es remineralizado, desinfectado y ajustado a los estándares establecidos del agua potable por la legislación local.
- Descarga de salmuera: La salmuera a la salida del sistema de recuperación de energía es vertida al mar a través de un emisario o un pozo de dilución.

3.2.1 Componentes principales

A continuación se describen brevemente los principales componentes de una planta de SWRO y los sistemas auxiliares. En ambos, el principal objetivo es ofrecer una breve pero representativa descripción de la tecnología actual de las plantas de SWRO. Para facilitar la comprensión se muestra en la Figura 3.6 un esquema simplificado del proceso, cuyos componentes principales son los que siguen:

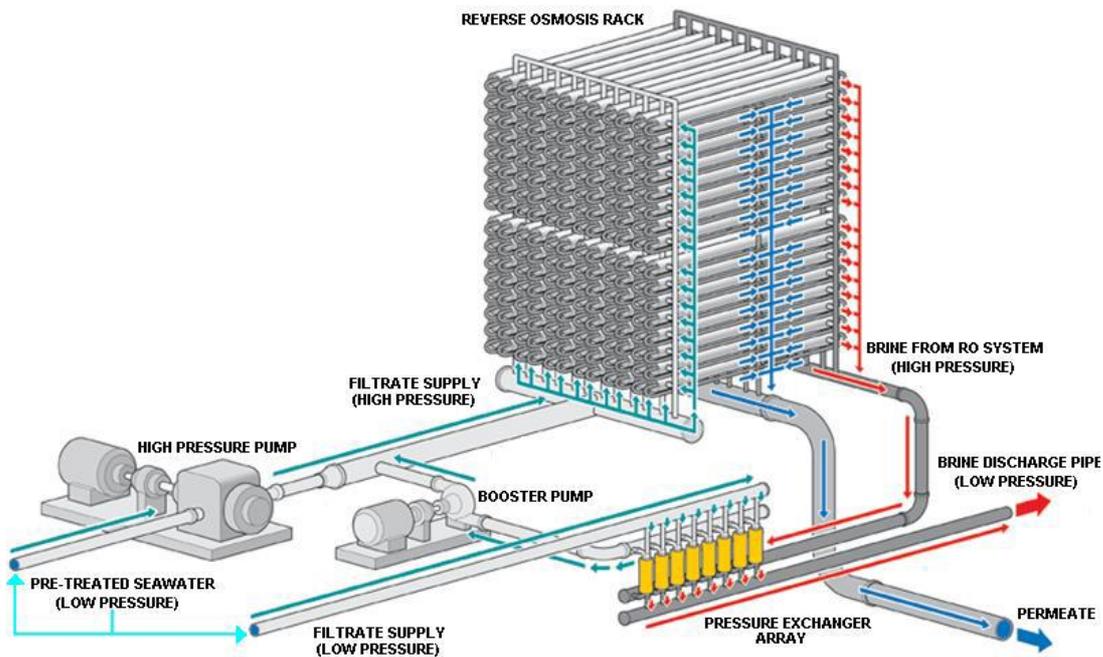


Figura 3.6: Esquema simplificado de una planta de desalación SWRO con recuperación de energía.

Fuente: Water & Wastewater News

- El sistema de bombeo de alta presión: Es el encargado de aplicar la presión necesaria al agua de alimentación hasta llegar a la entrada de las membranas, comúnmente llamada tren de RO. En los procesos industriales normalmente cada tren es alimentado por una bomba de alta presión, siendo la presión de operación entre 5 y 6.5 MPa para una concentración del agua de mar inferior a 40.000 mg/L TDS. Sin embargo hay también plantas en las que una o más bombas de alta presión alimentan en paralelo varios trenes.
- El sistema de recuperación de energía: Este sistema representa la transferencia de energía de la salmuera a la alimentación. Normalmente hay varias unidades trabajando en paralelo. Actualmente existen varios fabricantes de aparatos de intercambio de energía, entre otros ERI, Calder, RO Kinetic, KBS, Danfoss. Algunos aparatos optimizados permiten eficiencias energéticas reales del vapor de la salmuera al caudal de alimentación de hasta un 97%. Estos aparatos obtienen excelentes consumos específicos de energía desde 1,80 kWh/m³ hasta 2,20 kWh/m³ en nuevas plantas instaladas de SWRO.

- Elementos de las membranas: Los elementos de las membranas en la desalación SWRO están enrollados en espiral y tienen un gran rechazo de sales, más del 99%. Tienen elementos de conversión normalmente en el rango entre el 8-10 % en condiciones normales. Las membranas y los separadores son envueltos en el tubo colector del permeado a través de los espacios entre las membranas circulares, el permeado o la alimentación de concentrado. Los compartimentos en el permeado y la alimentación concentrada son alternativos. El vapor permeado, perpendicular al colector axial de permeado, pasa a través de orificios existentes en la superficie del tubo colector y es recogido al final del elemento de la membrana. Por el contrario, el vapor de alimentación de concentrado circula axialmente. Normalmente los separadores de alimentación usados en membranas enrolladas en espiral tienen entre 0,66 – 0,86 mm de espesor y están hechos por materiales de poliolefina.

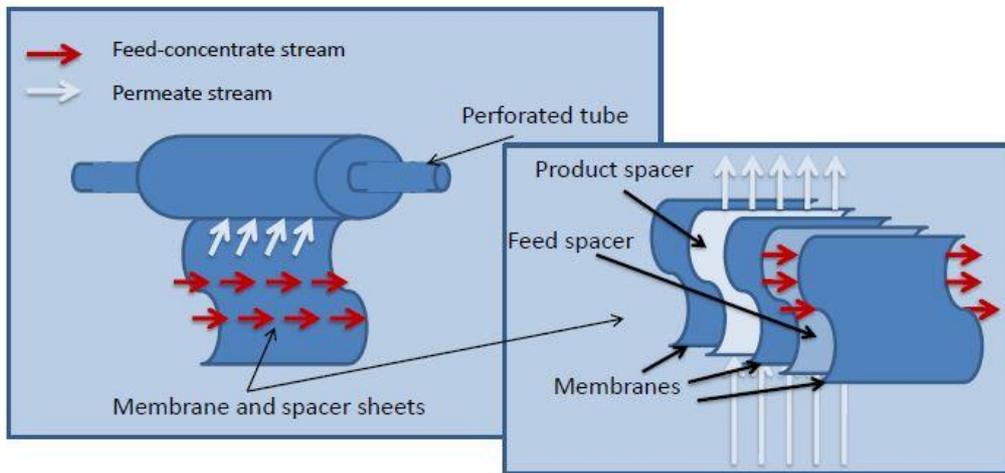


Figura 3.7: Diagrama conceptual de la configuración interna de los elementos en membranas espirales. Fuente: Lourdes García-Rodríguez

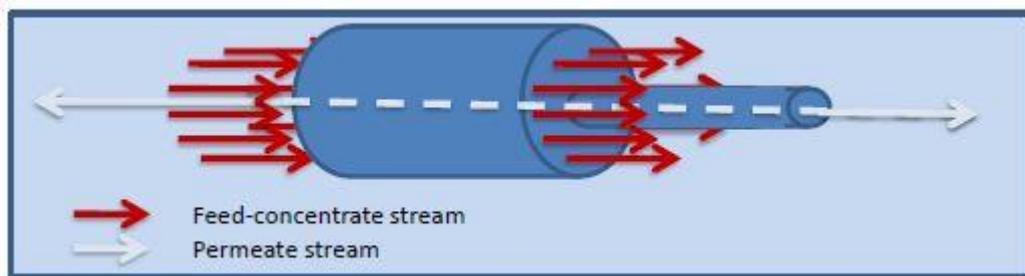


Figura 3.8: Diagrama conceptual de los elementos en membranas espirales. Fuente: Lourdes García-Rodríguez

- El tubo de presión: El agua de alimentación pasa a través de los elementos de la membrana en serie. El concentrado de un elemento alimenta al siguiente, así la salmuera del tubo de presión es el concentrado del último elemento. Normalmente el permeado de todos los elementos sucesivos se mezcla y recoge solo al final del tubo de presión. Sin embargo, el permeado puede ser recogido al final de cada elemento para obtener dos calidades de producto distintas. Actualmente el tubo de presión consiste normalmente en 7 elementos con un diámetro de 8”.

- El tren SWRO: La capacidad de producción de cada uno de los trenes de RO está a menudo relacionada con la capacidad total de la planta y el tipo de aparato de recuperación de energía instalado. Hoy día, los trenes de RO más comunes son de 7.500 m³/día e incluso más en instalaciones de alta capacidad instaladas recientemente. Los trenes de RO hasta 10.000 m³/día pueden ser diseñados debido a los intercambiadores de presión basados en cámaras isobáricas. Este es el caso de la planta de desalación SWRO en Carboneras (Almería). Esta planta cuenta con una capacidad de producción de 120.000 m³/día y tiene 10 trenes de RO de 12.000 m³/día.
- Segundo paso (si lo hubiera) para desalar el permeado del primer paso: Principalmente debido al cumplimiento de los límites de calidad del permeado, el caudal de permeado de SWRO puede requerir un proceso de desalación de la salmuera mediante ósmosis inversa (BWRO). El segundo paso normalmente opera a alto pH ya que el ácido de boro está casi húmedo en operación a pH neutro, resultando así una reducción del rechazo. Esto es atribuible al hecho de que el tamaño del poro de la membrana de RO es mayor que el ácido de boro no húmedo. Actualmente se recomienda una concentración de boro en el agua potable de 2.4 mg/L, dependiendo de las regulaciones específicas de la localización de la planta.

Otra razón por la que usar el segundo paso sería lograr una mayor recuperación en todos los procesos de desalación. En este caso serían considerados tanto el capital como los costes de operación.

Desde que el permeado existe en el tubo de presión a baja presión, este debe ser presurizado si es tratado con un proceso de BWRO. Normalmente el concentrado del segundo paso es mezclado con agua de mar pretratada en la succión de la bomba de presión.

- Segunda etapa (si la hubiera) para desalar el concentrado: La presión del concentrado en ambos procesos, SWRO y BWRO, es similar a la presión de alimentación respectiva, ya que la diferencia de presión es solo atribuible a pérdidas. Entonces, la necesidad de una bomba auxiliar en el tratamiento del concentrado depende de parámetros operacionales y de diseño. El interés del segundo paso con un segundo proceso de BWRO está basado principalmente en incrementar la recuperación del proceso de desalación.

3.2.2 Sistemas auxiliares

Con el fin de dar una descripción general, las etapas del pretratamiento usadas comúnmente se resumen en la Tabla 3.2. A veces es considerado un proceso DAF (Dissolved Air Flotation, flotación por aire disuelto) en el caso de alta turbidez del agua, posibilidad de floración de algas o polución de hidrocarburos. La Tabla 3.2 muestra algunos productos químicos usados en el pretratamiento y postratamiento.

ETAPAS DEL PRETRATAMIENTO	
DESINFECCIÓN. Previene el control de ensuciamiento biológico	Oxidantes químicos. A veces se requiere la decloración previa de las membranas.
COAGULACIÓN. Combina las partículas pequeñas para formar grandes agregados que se eliminan mediante un lecho de filtros.	Se usan comúnmente polielectrolito y sales férricas.
AJUSTE ÁCIDO DE pH. Incrementa la acción bacteriana de NaClO Evita la incrustación del carbonato cálcico en la superficie de las membranas Reduce la velocidad de oxidación de iones de hierro Reduce la velocidad de hidrólisis de las membranas	Se usa comúnmente H ₂ SO ₄ .
FILTRACIÓN MONO, MEDIA DUAL O MEDIA MIXTA.	La selección de filtros depende de la calidad del agua.
DECLORACIÓN. (Si fuera necesaria). Evita la presencia de agentes oxidantes en las membranas RO.	Agentes reductores.
INHIBICIÓN DE INCRUSTACIÓN. Controla la incrustación del carbonato, hidróxido de magnesio, sulfatos y fluoruro de calcio.	Diferentes tipos de anti-incrustantes: hexametáfosfato de sodio, organifosfonatos y policrilatos.
MICROFILTRACIÓN del agua presurizada después de las etapas nombradas de prefiltración y dosis químicas.	Pueden usarse filtros de cartucho de 5 µm.

Tabla 3.2: Etapas del pretratamiento. Fuente: Seawater Reverse Osmosis Desalination Technology

PRETRATAMIENTO	
HIPOCLORITO DE SODIO O CLORO LIBRE	Previene el crecimiento biológico.
CLORO FÉRRICO	Floculación y eliminación de materia suspendida en el agua.
ÁCIDO SULFÚRICO O HIDROCLORÍDRICO	Ajusta el pH.
HEXAMETAFOSFATO DE SODIO o similar	Previene la incrustación en tuberías y membranas.
BISULFATO DE SODIO	Neutralización del cloro restante en el agua de alimentación.
POSTRATAMIENTO	
ENZIMAS	
DETERGENTES, TENSOACTIVOS Y CÁUSTICOS	Resuspensión de partículas y disolución de materia orgánica y silicio.
BIOCIDAS	Mata las bacterias.
DEFEROXAMINA	Elimina la incrustación.
ÁCIDOS	Disuelve inorgánicos.

Tabla 3.3: Sustancias químicas en el pre y postratamiento. Fuente: Seawater Reverse Osmosis

Ya que el adecuado diseño de las etapas del pretratamiento es altamente dependiente de la calidad del agua de mar, es importante conocer los diferentes tratamientos adoptados en plantas de SWRO.

La planta de desalación Qingdao Desalination se encuentra cerca de Jiaozhou Bay, provincia de Shandong, China. Esta planta fue encargada en Enero de 2013 y es una planta de 100.000 m³/día. El tratamiento de agua de mar en esta localización es dificultoso ya que el agua no está tomada directamente desde el mar sino desde una laguna de agua de mar, resultando así un amplio rango de variaciones en la calidad y temperatura del agua a lo largo del año, entre 3-28 °C.

PARÁMETRO	UNIDAD	DATO DE DISEÑO
TEMPERATURA	°C	3 – 28
pH	Unidad de pH	7,7
TDS	mg/L	36.247
TSS (Total Sólidos Suspendidos)		
1-5 µm	mg/L	12
5-25 µm		14
1-5 µm		20
1-5 µm		20
TURBIDEZ	NTU	7
DUREZA (CACO ₃)	mg/L	5.410
ALCALINIDAD TOTAL (CACO ₃)	mg/L	115
TOC (TOTAL COMPUESTOS ORGÁNICOS)	mg/L	14
ACEITE Y GRASA	mg/L	Límite bajo detección

Tabla 3.4: Parámetros del agua bruta de la planta Qingdao Desalination. Fuente: Seawater Reverse Osmosis Desalination Technology

PRETRATAMIENTO Y DOSIS QUÍMICA	
Dosis química en la toma de agua bruta	Hipoclorito de sodio en la cámara de la bomba de toma de agua.
Dosis química en el sistema de pretratamiento	Ácido sulfúrico para reducir el pH, evitando así la precipitación del carbonato de calcio y mejorando el proceso coagulante.
DAF (se puede bypassar si el agua bruta no lo requiere)	12.000 m ³ /h de capacidad total: 6 líneas de DAF con una capacidad de 2.000 m ³ /h (2.240 con recirculación).
Estación de bombeo intermedia desde un tanque intermedio a sistema de filtros	2 bombas más una de reserva, 6.000 m ³ /h TDH, máx 58 mca.
Filtrado para proteger el sistema de MF/UF	100/250 microfiltros autolavables, velocidad máxima de 2.5 m/s.
MF/UF	Sistema presurizado de MF/UF. Sistema de limpieza que incluye dosis de hipoclorito de sodio, ácido cítrico, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio.

Tanque de agua ultrafiltrada	El agua pretratada se envía al primer paso del proceso de RO desde el tanque a través de las dos líneas del sistema de alta presión.
Dosis química en el primer paso del subsistema de RO	Bisulfito de sodio para eliminar el cloro residual antes de añadir hipoclorito de sodio. Tras la dosis un detector redox, un medidor de pH y de turbidez. Anti-incrustante.
Dosis química antes del segundo paso del subsistema de RO	Anti-incrustante e hidróxido de sodio.
Sistema de limpieza química y descarga del RO	Limpieza con ácido sulfúrico u otros agentes reactivos disueltos cuando se ensucian las membranas. Sistema de descarga usa agua desalada en caso de interrupción prolongada.
Neutralización	Tras lavar los módulos de RO, el agua de lavado es neutralizada con ácido sulfúrico o hidróxido de sodio. Tiene lugar en un tanque antes de mezclarse con la descarga de salmuera.

Tabla 3.5: Pretratamiento y sistema de dosis químicas en la planta Qingdao Desalination. Fuente: Seawater Reverse Osmosis Desalination Technology

3.3 Consumo de energía y coste del agua

A finales de los 70, las plantas de SWRO consumían hasta 20 kWh/m³ pero con el desarrollo de membranas más eficientes, el uso de los sistemas de recuperación de energía, nuevos materiales con menor fricción y aparatos con variador de frecuencia, el consumo de energía se ha reducido drásticamente, siendo de 8 kWh/m³ en 1980, 5 kWh/m³ en 1990 y 2 kWh/m³ en el 2000. Esto es atribuible al uso de eficientes aparatos de recuperación de energía basados en cámaras isobáricas y bombas de desplazamiento positivo, que pueden recuperar más del 90%. Actualmente, en las plantas de capacidad media-alta el consumo de energía es de 2.2 - 2.5 kWh/m³.

La influencia del coste de energía en la producción de agua varía con la capacidad de la planta y los parámetros de operación, los cuales son los que siguen:

- Calidad del agua, temperatura y consumo
- Coste de la energía local
- Ratio de recuperación
- Descarga de salmuera y distribución del agua producida
- Productos químicos y otros consumos
- Coste de inversión
- Detalles de financiación y periodo de amortización
- Costes de trabajo y reposición de membranas
- Contrato competitivo

Para cualquier planta de desalación, se deben considerar tanto el coste de operación como de capital.

Los costes de capital son amortizados durante el tiempo de vida de la planta, el cual se considera entre 15-20 años. La Tabla 3.6 muestra los costes de distribución en las plantas SWRO.

Categoría	Referencias			
	1	2	3	4
Energía	44	32	55	26
Cargadores fijos	37	50	30	59
Trabajo	4	4.8	2	-
Productos químicos	3	6	7	4
Mantenimiento	7	3.6	5	-
Reposición membranas	5	2.8	5	5
Otros	-	0.8	1	6

Tabla 3.6: Distribución de costes. Referencias: (1) Wilf 2004, (2) Sánchez 2008, (3) García-Molina 2009 – Plantas SWRO de alta capacidad, (4) Greenlee 2009 – Planta Ashkelon calculado para un coste del producto total de 0.525 \$/m³. (Unidades en %). Fuente: Seawater Reverse Osmosis Desalination Technology

Ambos, cargas y costes de energía, son los parámetros más importantes en el coste del producto. Por lo tanto, cualquier investigación de mejora en SWRO que logre una reducción en el consumo energético tendrá una alta influencia en el coste del agua. Usando una combinación de eficiencia energética, tecnologías RO disponibles, nuevas membranas y equipamiento de recuperación de energía, se puede producir agua con una ratio comparable con otras alternativas. En la Tabla 3.7 se muestran los costes del agua en diferentes plantas de SWRO.

Ubicación de la planta	1 ^{er} año de producción	Capacidad de la planta (m ³ /día)	Precio del agua (\$/m ³)
Larnarca, Chipre	2001	56.000	0,83
Eilat, Israel	2003	10.000	0,81
Tampa Bay, Florida, USA	2003	94.600	0,55
Fujairah, Emiratos Árabes Unidos	2005	170.500	0,87
AShkelon	2005	320.000	0,53

Tabla 3.7: Precio del agua. Adaptado por Greenlee (2009). Fuente: Seawater Reverse Osmosis Desalination Technology

3.4 Turbinas Pelton en plantas SWRO

Se han diseñado y testado gran cantidad de aparatos para recuperar energía de la salmuera dentro del proceso SWRO. Los primeros aparatos recuperadores de energía utilizados alrededor de 1980 fueron las turbinas Francis o las bombas inversas debido a su simplicidad y facilidad de operación. Sin embargo, a partir de 1985 aparece el desarrollo de las turbinas Pelton, las cuales en los años siguientes y hasta 2005 aproximadamente, se convirtieron en los aparatos recuperadores más usados en plantas SWRO debido a su fiabilidad y su probada eficiencia. Por otra parte las turbinas Pelton permitían una mejora en la recuperación de energía respecto a los aparatos anteriormente usados, que alcanzaba hasta el 80-90%. Además estas turbinas aceptaban variaciones en la presión de entrada sin que esto afectase al rendimiento y no necesitaba de una contrapresión en la descarga como ocurría con las bombas inversas, lo cual permitía que la salmuera no perdiese parte de su energía.

El caudal de salmuera que alimenta a la turbina Pelton tenía una presión elevada lo que hacía que esta produjese energía eléctrica, la cual era aprovechada para el funcionamiento de la bomba de alta presión.

Las turbinas Pelton operaban a alta eficiencia en aplicaciones de cabecera como grandes plantas de SWRO. Era común diseñar RO racks de 2.500 o 5.000 m³/día debido a este tipo de aparato de recuperación de energía.

En la actualidad, es una tecnología disponible con rendimientos cercanos al 90% aunque la mayoría de las plantas de desalación nuevas no están diseñadas con esta tecnología. Estas turbinas se han visto sustituidas por nuevos recuperadores basados en cámaras isobáricas, ya nombrados anteriormente, ya que reducen el consumo energético en mayor medida.

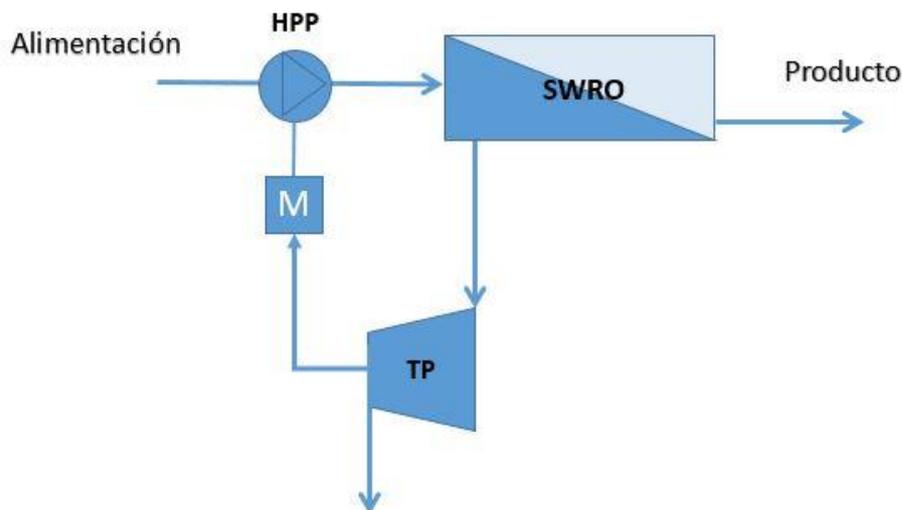


Figura 3.9: Esquema del proceso de RO con recuperación de energía mediante turbina Pelton. Fuente: Ana Angelino Ridao

4 PLANTA LANZAROTE IV

Una vez conocidos tanto los procesos como las diferentes tecnologías que se han desarrollado para llevarlos a cabo, se describirá, en el presente capítulo, una planta de desalación de agua de mar en la isla de Lanzarote.

Las Islas Canarias han sido un referente total a nivel mundial en la desalación de agua de mar durante más de cuarenta años, no solo por la gran densidad de plantas de desalación sino también por el rango en el uso de tecnologías industriales. En el caso de la isla de Lanzarote, los recursos disponibles de agua provienen normalmente de la desalación de agua de mar debido a que la explotación de recursos naturales tanto superficiales como subterráneos está muy limitada por la carencia de lluvias.

Lanzarote se ha convertido en un ejemplo destacado del siglo veintiuno considerando el exclusivo uso industrial en el abastecimiento de agua con el objetivo de satisfacer la demanda de la población, el turismo y la agricultura.

Debido a esto, la obtención de agua potable en Lanzarote está principalmente caracterizada por una significativa dependencia de energía exterior. La realidad es que en Lanzarote el consumo de energía asociado al ciclo del agua representa más del 20% del consumo eléctrico total de la isla. La demanda de agua desalada ha crecido entre 2006 y 2008 más de un 6%, forzando a los productores de agua a adaptar sus suministros o plantas de desalación para obtener la cantidad de agua deseada.

La isla de Lanzarote ha sufrido una clara y positiva evolución en términos de reducción del consumo específico de energía (SEC) en cuanto a procesos de desalación. De 8.33 kWh/d en 1976 hasta 4.89 kWh/d tres décadas más tarde. Sin embargo, la dependencia energética es muy relevante y por ello las plantas de desalación están trabajando para mejorar el diseño de sus plantas. En este escenario, toda medida correctiva será bienvenida si produce más recurso con el menor coste posible de energía.

Insular de Aguas de Lanzarote es la compañía responsable de la producción y suministro de agua potable en la isla. Operan dos centros de producción con una capacidad de desalación por RO de más de 66.000 m³/d.

Una de ellas es la planta Lanzarote IV que fue encargada en el año 2000 y tiene instalada una capacidad de 33.000 m³/d distribuidos en cinco trenes de RO. Esta planta tiene pozos de 11 metros de profundidad. El agua de alimentación de 39,152 mg/L y 20 °C es bombeada hacia el pretratamiento mediante cinco bombas verticales con una potencia nominal de 132 kW a 400 V. La caracterización del agua bruta se representa en la Tabla 4.1.

TDS		39,152 mg/l	
pH		7.81	
Temperature		20 °C	
SiO ₂		5.60 mg/l	
B _T		4.7 mg/l	
SDI		0.40	
Cations (mg/l)		Anions (mg/l)	
NH ₄ ⁺	0.3	CO ₃ ²⁻	<5.0
K ⁺	432.0	HCO ₃ ⁻	164.7
Na ⁺	11.328.0	NO ₃ ⁻	4.2
Mg ²⁺	1274.0	Cl ⁻	20.590.0
Ca ²⁺	542.0	F ⁻	0.8
Si ²⁺	5.9	SO ₄ ²⁻	4387.7

Tabla 4.1: Composición del agua de mar en la planta Lanzarote IV. Fuente: Inalsa Company Technical Department

El pretratamiento físico consiste en una filtración de seguridad mediante el uso de 5 microfiltros selectivos. Aun así, la excelente calidad del agua bruta hace innecesaria la primera etapa del proceso de filtrado mediante cinco filtros horizontales.

Previa a la microfiltración, se hace un pretratamiento químico con una dosis de anti-incrustante para prevenir la incrustación en las membranas.



Figura 4.1: Trenes RO de la planta Lanzarote IV. Fuente: Science Direct, Desalination.

La planta de desalación Lanzarote IV, consiste en trenes de siete elementos de 5x6000 m³/d, cada uno con una turbina de Pelton de recuperación de energía (ERT) con un ratio de recuperación del 42%. Cuatro de los trenes tienen una configuración en dos pasos de RO. El segundo paso está dividido en dos etapas de agua salobre. Las siguientes tablas resumen la configuración actual de los trenes e información relativa (Tablas 4.2-4.3). Los cuatro tubos de presión con dos pasos están alimentados por turbobombas como sistema de recuperación de energía con una potencia nominal de 900 kW a 6kV. El quinto RO con un paso es alimentado por otra turbobomba con una potencia nominal de 950 kW a 6 kV.

Description per train	4 trains (1st pass + 2nd pass (two stages))	1 train (1 pass)
Seawater feed	580 m ³ /h	595 m ³ /h
Permeate stream (1st pass)	262 m ³ /h	250 m ³ /h
Permeate stream (2nd pass)	240 m ³ /h	n/a
Brine water stream/turbine inlet	345 m ³ /h	345 m ³ /h
Average recovery rate (1st pass/ 2nd pass)	42% / 90%	42%

Tabla 4.2: Características nominales de los trenes de la planta SWRO. Fuente: Inalsa Company Technical Department. (n/a: not applicable)

Description per train		Train 1	Train 2	Train 3	Train 4	Train 5
1st pass	No. PVs	89	85	89	83	80
	No. elements	623	595	623	581	560
	Type installed	SW30-380	SW30-380	SW30-380	SW30-380	SW30HR-380
2nd pass	No. PVs 1st stage	30	25	24	30	
	No. PVs 2nd stage	11	12	14	11	
	No. elements	287	259	266	287	
	Type installed	BW30 LE440	XLE 440 (1st stage) BW30 LE440 (2nd stage)	XLE 440 (1st stage) BW30 LE440 (2nd stage)	BW30 LE440	

Tabla 4.3: Configuración de los tubos de presión de los trenes de la planta Lanzarote IV. Fuente: Inalsa Company Technical Department

La planta tiene un sistema de limpieza química, el cual es el mismo para los cinco trenes, está formado por 3 bombas de limpieza (200 kW, 400 V), un tanque de limpieza y un filtro de cartucho.

Finalmente la planta tiene dos subestaciones de transformación de media tensión (MVTs), una con un transformador de 7500 KVA con una relación de transformación 20/6 kV y otro de 1600 kVA con una relación de 6/0.4 kV.

La potencia total instalada en la planta Lanzarote IV es de 5000 kW.



Figura 4.2: Bombas de alta presión y turbinas Pelton de la planta Lanzarote IV. Fuente: Inalsa



Figura 4.3: Detalle rueda turbina Pelton de la planta Lanzarote IV. Fuente: Inalsa

Los datos más relevantes de operación de la planta están resumidos en las Tablas 4.4 y 4.5.

Description	Train 1		Train 2		Train 3		Train 4	
	Flow (m ³ /h)	Pressure (bar)						
Seawater feed (HPP inlet)	579.9	3.9	580.1	3.9	582.6	3.9	569.9	3.9
Seawater feed (train inlet)	602.9	71.1	610.6	71.3	608.8	70.5	602.0	70.1
Brine water stream/turbine inlet	341.5	68.2	345.1	69.1	346.9	68.6	338.3	69.1
Permeate stream (1st pass)	261.4	11.1	273.9	11.5	262.1	11.3	254.0	11.2
Permeate stream (2nd pass)	241.6	0.7	245.0	0.7	238.2	0.7	228.0	0.7

Tabla 4.4: Datos de operación de caudal y presión de los trenes con dos pasos. Fuente: Inalsa Company Technical Department – Personal communication

Description	Train 5	
	Flow (m ³ /h)	Pressure (bar)
Seawater feed (HPP inlet)	586.0	3.9
Seawater feed (train inlet)	586.0	66.3
Brine water stream/turbine inlet	321.5	64.0
Permeate stream	264.5	0.6

Tabla 4.5: Datos de operación de caudal y presión para el quinto tren de solo un paso. Fuente: Inalsa Company Technical Department - Personal communication

Description	Train 1	Train 2	Train 3	Train 4	Train 5
1st pass (%)	43.4	42.9	43.0	42.5	45.0
2nd pass (%)	92.4	91.2	90.9	89.5	n/a

Tabla 4.6: Ratio de recuperación por tren de RO. Fuente: Inalsa Company Technical Department – Personal communication

Description	Data
Average permeate water quality (1st pass – 1-4 trains)	1717 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Average permeate water quality (2nd pass)	63.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Average permeate water quality (train 5)	965 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Average permeate water quality	259.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Average permeate	28,320 m^3/d
Total power consumption intake pumps	1013 kWh
Total power consumption HPPs	4044 kWh
Specific energy consumption (RO)	343 kWh/ m^3
Specific energy consumption (intake + RO)	428 kWh/ m^3

Tabla 4.7: Otros datos de operación de interés de la planta. Fuente: Inalsa Company Technical Department - Personal communication

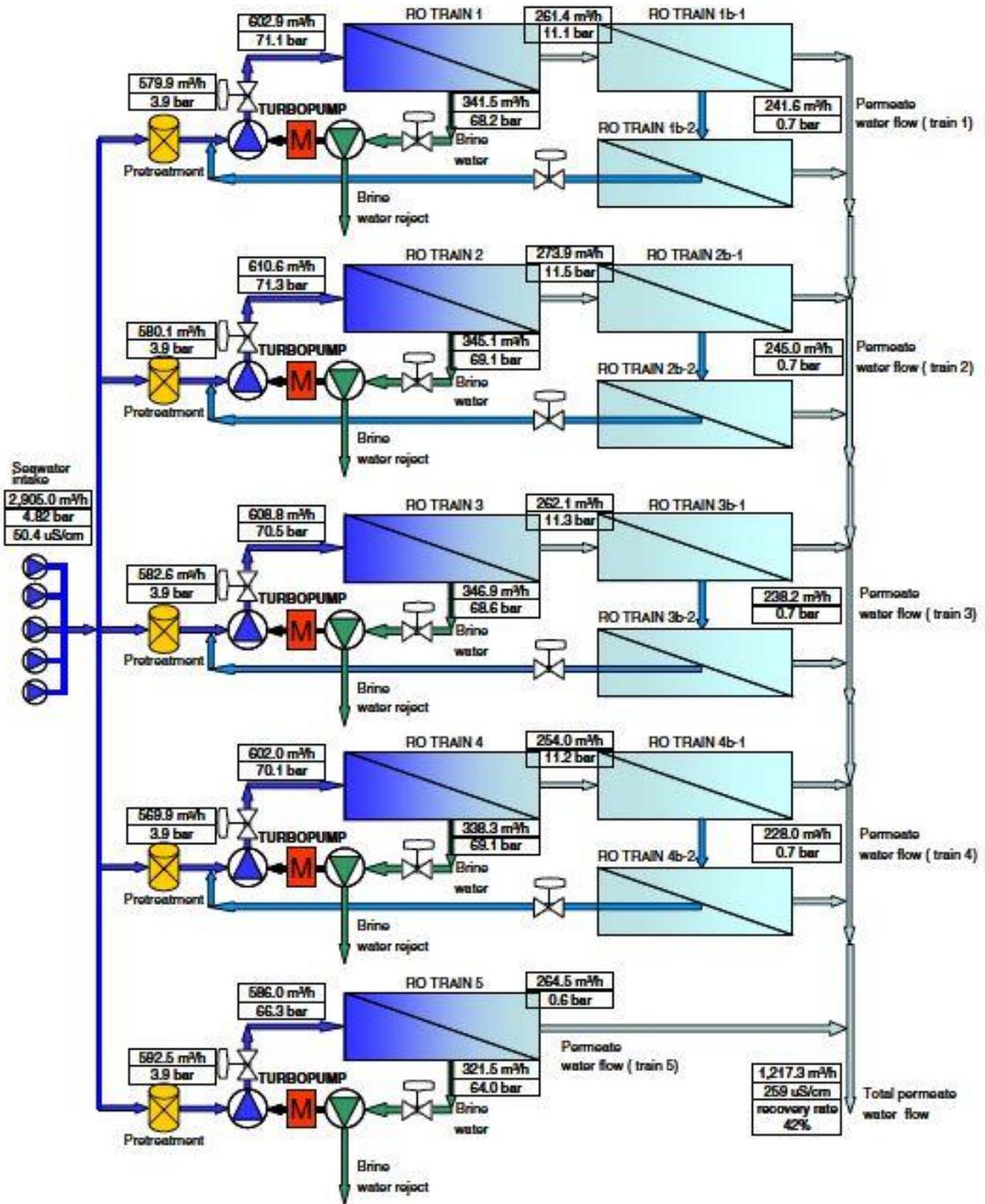


Figura 4.4: Esquema de la planta Lanzarote IV y datos principales de operación. Fuente: Science Direct, Desalination

5 ANÁLISIS TERMODINÁMICO

En este capítulo se procede a analizar termodinámicamente el uso del proceso de PRO en una planta de desalación en Canarias.

El agua de mar tras haber sufrido el proceso de ósmosis inversa, produce un rechazo, *brine*, el cual se aprovechará en el sistema PRO como solución *draw* junto con un aporte externo agua de mar, solución de alimentación. Para que esto sea posible la diferencia de presiones entre el *brine* diluido a la salida del proceso PRO y el agua de mar, debe ser inferior a la diferencia de preiones osmóticas de estos mismos caudales. Ver ecuación 5.1. Por consiguiente, es necesario despresurizar el *brine* proveniente del proceso de ósmosis inversa hasta aproximadamente la mitad de su presión para que pueda llevarse a cabo el proceso PRO.

$$p_{bd} - p_{sw} < \pi_{bd} - \pi_{sw} \quad (5.1)$$

Normalmente, para despresurizar el caudal de *brine*, se utilizan sistemas de recuperación de energía, tales como cámaras isobáricas o *turbochargers*, los cuales reducen la presión de la corriente de *brine*, aprovechándola para aumentar la presión de la corriente de entrada. En este caso, al no ser objeto de estudio del capítulo, no se tendrá en cuenta. Por ello, se ha incluido en el diagrama, una válvula de expansión que justificará la diferencia de presión del *brine* a la salida del proceso RO y la entrada al equipo PRO.

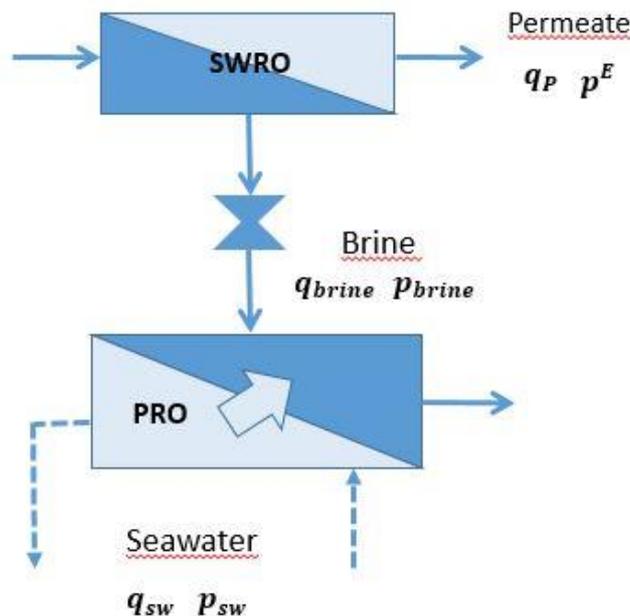


Figura 5.1: Diagrama proceso PRO. Fuente: Lourdes García Rodríguez

El análisis consistirá en evaluar los límites termodinámicos, aquellos para los cuales la potencia exergética destruida es positiva. Para ello se analizarán distintos casos en los que se variarán las concentraciones de sales de las corrientes de salida, es decir, la corriente de agua de mar concentrada y la de *brine* diluido. Se tendrá en cuenta que el recurso de agua de mar disponible para llevar a cabo el proceso PRO es ilimitado.

- Balances de materia en el disolvente

$$q_{A,sw} = q_{A,swc} + q_{A,transf}. \quad (5.2)$$

$$q_{A,bd} = q_{A,b} + q_{A,transf}. \quad (5.3)$$

- Balances de materia en el soluto

$$q_{B,sw} = q_{B,swc} \quad (5.4)$$

$$q_{B,b} = q_{B,bd} \quad (5.5)$$

Nota: suponemos que el caudal transferido a través de la membrana es agua pura.

- Primer principio de la termodinámica

$$\frac{\partial U^{PRO}}{\partial t} = P_Q^{PRO-E} + q_{sw} (h_{sw} - h^{ref}) - q_{swc} (h_{swc} - h^{ref}) + q_b (h_b - h^{ref}) - q_{bd} (h_{bd} - h^{ref}) \quad (5.6)$$

Donde

$$\frac{\partial U^{PRO}}{\partial t} = 0 \text{ por tratarse de un proceso estacionario}$$

$$P_Q^{PRO-E} \cong 0 \text{ al considerarse despreciable el intercambio térmico}$$

Quedando la ecuación

$$0 = q_{sw} (h_{sw} - h^{ref}) - q_{swc} (h_{swc} - h^{ref}) + q_b (h_b - h^{ref}) - q_{bd} (h_{bd} - h^{ref}) \quad (5.7)$$

Las entalpías serán obtenidas del documento: *Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data*. Mostafa H. Sharqawy, John H. Lienhard V, Syed M. Zubair.

$$h_{sw} = h_w - S \left(a_1 + a_2 S + a_3 S^2 + a_4 S^3 + a_5 t + a_6 t^2 + a_7 t^3 + a_8 S t + a_9 S^2 t + a_{10} S t^2 \right)$$

$$a_1 = -2.348 \times 10^4, a_2 = 3.152 \times 10^5, a_3 = 2.803 \times 10^6, a_4 = -1.446 \times 10^7, a_5 = 7.826 \times 10^3$$

$$a_6 = -4.417 \times 10^1, a_7 = 2.139 \times 10^{-1}, a_8 = -1.991 \times 10^4, a_9 = 2.778 \times 10^4, a_{10} = 9.728 \times 10^1$$

Validity: h_{sw} and h_w in (J/kg K); $10 \leq t \leq 120$ °C; $0 \leq S \leq 0.12$ kg/kg;
Accuracy: ± 0.5 % from IAPWS 2008 [27]

Figura 5.2: Correlación de la entalpía específica del agua de mar.

$$h_w = 141.355 + 4202.07 \times t - 0.535 \times t^2 + 0.004 \times t^3$$

Validity: h_w in (J/kg); $5 \leq t \leq 200$ °C
Accuracy: $\pm 0.02\%$ (best fit to IAPWS 1995 [24] data)

Figura 5.3: Entalpía específica del agua saturada

Como puede observarse es necesario la salinidad de las corrientes de entrada y salida para el cálculo de la entalpía. Son conocidas la del agua de mar y el *brine* a la entrada, ambas proporcionadas por los datos de la planta Lanzarote IV. Sin embargo, la concentración en sales de las corrientes de salida, agua de mar concentrada y *brine* diluido, dependerá del caudal de disolvente transferido, obteniendo así la siguiente dependencia.

$$S_{sw} = \frac{q_{Bsw}}{q_{sw}} = 0.039 \frac{Kg}{Kg} \quad (5.8)$$

$$S_{brine} = \frac{q_{Bbrine}}{q_{brine}} = 0.0709 \frac{Kg}{Kg} \quad (5.9)$$

$$S_{swc} = \frac{q_{Bswc}}{q_{swc}} = \frac{q_{Bsw}}{q_{sw} - q_{transf}} = \frac{S_{sw} \cdot q_{sw}}{q_{sw} - q_{transf}} \quad (5.10)$$

$$S_{bd} = \frac{q_{Bbd}}{q_{bd}} = \frac{q_{Bb}}{q_b + q_{transf}} = \frac{S_b \cdot q_b}{q_b + q_{transf}} \quad (5.11)$$

Por otro lado se analiza la ecuación que hace posible la transferencia de disolvente a través de la membrana.

$$P_{bd} - P_{sw} = \pi_{bd} - \pi_{sw} \quad (5.12)$$

$$P_b - P_{swc} = \pi_b - \pi_{swc} \quad (5.13)$$

Donde la presión osmótica se obtiene mediante la fórmula siguiente:

$$\pi = 2 \cdot \phi \cdot \rho_w \cdot R \cdot T \left(\frac{S}{M_B} \right) \quad (5.13)$$

Siendo el coeficiente osmótico ϕ calculado por la correlación del documento: *Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data*. Mostafa H. Sharqawy, John H. Lienhard V, Syed M. Zubair.

$$\phi = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + a_4 t^4 + a_5 S + a_6 S t + a_7 S t^3 + a_8 S^2 + a_9 S^2 t + a_{10} S^2 t^2$$

Present work based on Bromley's et al. [79] data

where

$$a_1 = 8.9453 \times 10^{-1}, a_2 = 4.1561 \times 10^{-4}, a_3 = -4.6262 \times 10^{-6}, a_4 = 2.2211 \times 10^{-11}$$

$$a_5 = -1.1445 \times 10^{-1}, a_6 = -1.4783 \times 10^{-3}, a_7 = -1.3526 \times 10^{-8}, a_8 = 7.0132$$

$$a_9 = 5.696 \times 10^{-2}, a_{10} = -2.8624 \times 10^{-4}$$

Validity: $0 \leq t \leq 200$ °C; $10 \leq S \leq 120$ g/kg

Accuracy: ± 1.4 %

Figura 5.4: Correlación del coeficiente osmótico del agua de mar

Una vez obtenidos los distintos valores de q_{transf} se evaluará si la potencia exergética del proceso es mayor que cero, cumpliéndose así el segundo principio. Para ello se realiza un balance de exergía.

Balance de exergía

$$\frac{\partial E^{PRO}}{\partial t} = q_{sw} ex_{a,sw} - q_{swc} ex_{a,swc} + q_b ex_{a,b} - q_{bd} ex_{a,bd} - P_x^D \quad (5.14)$$

Donde

$$\frac{\partial E^{PRO}}{\partial t} = 0 \text{ por tratarse de un proceso estacionario}$$

Quedando la ecuación

$$P_x^D = q_{sw} ex_{a,sw} - q_{swc} ex_{a,swc} + q_b ex_{a,b} - q_{bd} ex_{a,bd} \quad (5.15)$$

Cálculo de las exergías

$$ex_a = (h - h^{ref}) - T^E (S - S^{ref}) \quad (5.16)$$

Donde las entropías serán obtenidas del documento: *Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data*. Mostafa H. Sharqawy, John H. Lienhard V, Syed M. Zubair.

$$s_{sw} = s_w - S (a_1 + a_2 S + a_3 S^2 + a_4 S^3 + a_5 t + a_6 t^2 + a_7 t^3 + a_8 S t + a_9 S^2 t + a_{10} S t^2)$$

$$a_1 = -4.231 \times 10^2, a_2 = 1.463 \times 10^4, a_3 = -9.880 \times 10^4, a_4 = 3.095 \times 10^5, a_5 = 2.562 \times 10^1$$

$$a_6 = -1.443 \times 10^{-1}, a_7 = 5.879 \times 10^{-4}, a_8 = -6.111 \times 10^1, a_9 = 8.041 \times 10^1, a_{10} = 3.035 \times 10^{-1}$$

Validity: s_w and s_w in (J/kg K); $10 \leq t \leq 120$ °C; $0 \leq S \leq 0.12$ kg/kg

Accuracy: ± 0.5 % from IAPWS 2008 [27]

Figura 5.5: Correlación de la entropía específica del agua de mar

$$s_w = 0.1543 + 15.383 \times t - 2.996 \times 10^{-2} \times t^2 + 8.193 \times 10^{-5} \times t^3 - 1.370 \times 10^{-7} \times t^4$$

Validity: s_w in (J/kg K); $5 \leq t \leq 200$ °C

Accuracy: ± 0.1 % (best fit to IAPWS 1995 [24] data)

Figura 5.6: Entropía específica del agua saturada

Nota: La temperatura de operación para todo el proceso será de 20 °C

➤ Resultados obtenidos

El análisis se ha realizado por cada tren de la planta Lanzarote IV, el cual produce un rechazo de 345 m³/h. El estudio ha proporcionado los valores de caudal de agua de mar extra que se necesitaría en la planta en el caso de integrar el sistema PRO. Se han propuesto cinco casos diferentes en función de las concentraciones que se deseen obtener a la salida del equipo PRO.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Sbd	0,0430	0,0440	0,0450	0,0460	0,0470
Sswc	0,0670	0,0660	0,0650	0,0640	0,0630
q_b (m³/h)	345,00	345,00	345,00	345,00	345,00
q_sw (m³/h)	535,81	515,76	496,59	478,25	460,70
q_tw (m³/h)	223,92	210,99	198,63	186,81	175,50
Pd (kW)	23,13	27,10	30,48	33,29	35,58

Tabla 5.1: Resultados análisis termodinámico

Se observa que cuanto más diluida se desea obtener la corriente de *brine* a la salida, es decir, cuanto mayor caudal se transfiera en el equipo, mayor será el aporte externo de agua de mar que se necesite. Además esto produce un incremento en la potencia exergética destruida.

Luego parece lógico que cuanto más beneficio se desee obtener del sistema PRO más costoso sea.

6 MODERNIZACIÓN PLANTA SWRO

En este capítulo se tratará de discutir la incorporación de un sistema PRO en una planta de desalación convencional para el aprovechamiento de los gradientes salinos con el fin de reducir el consumo energético en la planta. Para ello se tomará de base la planta Lanzarote IV descrita en el capítulo 4.

6.1 Introducción

Las plantas de desalación han visto una expansión considerable durante la pasada década debido al aumento de la necesidad de agua potable con el crecimiento de la población. La producción mundial de desalación de agua se estima en torno a los 30 millones de metros cúbicos al día.

Uno de los mayores retos de la industria desaladora, especialmente en aquellos países que dependen en gran medida del proceso de desalación para la obtención de agua potable, es el aprovechamiento de la corriente de rechazo, la cual está áltamente concentrada tras pasar por el proceso de desalación. Por cada metro cúbico de agua desalada, se genera una cantidad equivalente de *brine*. La práctica más común en el tratamiento del *brine* producido es su descarga al mar, lo cual puede resultar a largo plazo, perjudicial par la vida acuática y la calidad del agua de mar disponible para su desalación. Por ello se investiga la integración de un sistema PRO que utilice el *brine* como solución concentrada para recuperar energía, con el fin de reducir tanto el consumo energético del proceso de desalación como la concentración del *brine*, lo que limitaría su impacto en el medioambiente.

Otro reto importante es la eficiencia en el uso de la energía para la producción de agua ya que la desalación de agua de mar requiere más energía que cualquier otro método de tratamiento de agua. Sin embargo, la potencia consumida asociada a la desalación de agua de mar es exagerada e imprecisa cuando se compara con la tecnología de otros tratamientos que ofrecen un suministro de agua seguro y fiable.

6.2 Modernización de la turbina Pelton

En la planta Lanzarote IV ya se había propuesto el uso de un sistema de recuperación de energía que aprovecharse la energía del *brine* proveniente del equipo SWRO y que sustituyera a la turbina Pelton.

Por lo tanto nuestro análisis partirá de la base en la que el módulo de cámaras isobáricas se ha establecido como medida de ahorro energético. Ver figura 6.1

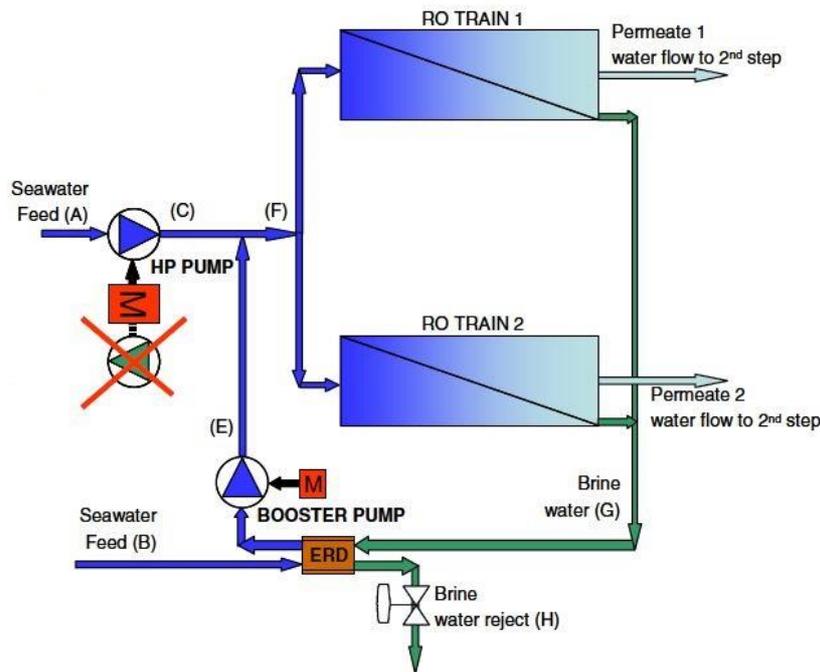


Figura 6.1: Configuración planta Lanzarote IV con un equipo de cámaras isobáricas cada dos trenes.
Fuente: B.Peñate, L. García-Rodríguez / Desalination 266 (2011) 244-255

Esta configuración permite la reducción del consumo energético manteniendo la capacidad total de la planta. Las turbinas Pelton se descartan y se utiliza una bomba de alta presión cada dos trenes. No obstante, al contar con un total de cinco trenes, el quinto tren dispondría de un ERD propio. La razón de no implantar un ERD por cada tren de presión es que la planta Lanzarote IV no dispone del espacio suficiente.

Esta configuración no requiere aumentar la presión a la que el agua de alimentación es bombeada ya que se demanda la misma cantidad de agua por tren. Además tampoco se ven afectados los ratios de recuperación ni los caudales.

Sin embargo, la instalación requiere la modificación de la instalación hidráulica debido a que el ERD está alojado cada dos trenes, por lo que se necesita una bomba *booster*, que compense las pérdidas de carga del bastidor de membranas y del módulo de *turbochargers*.

El total de la energía requerida para esta configuración es 1.300 kW, obteniendo un ahorro de 29.74 % con una reducción del consumo específico (SEC) de 1.02 kWh/m³.

Description	ERT configuration (2 trains)	Retrofit
HPP (kW)	2011	1170
BOP(kW)	n/a	130
Total requirement (kW)	2011	1300
SEC (kWh/m ³)	3.43	2.41
Energy saving (%)	29.74	

n/a: not applicable.

Figura 6.2: Comparación de los requerimientos de energía cada dos trenes (configuración estándar con turbina Pelton vs. configuración con cámaras isobáricas)

	CAUDALES (M3/H)	PRESIONES (BAR)
$q_{V,Feed}$	1160	4
$q_{V,HPP}$	450	70
$q_{V,ERD}$	710	-
$q_{V,Brine}$	700	68
$q_{V,transf}$	400	-
$q_{V,Brine\ diluido}$	1100	20

Tabla 6.1: Datos de la planta Lanzarote IV para el análisis de la integración del sistema PRO cada dos trenes.

El objetivo ahora es conocer qué cantidad de energía cede el *brine* a la alimentación al atravesar los dos sistemas de recuperación de energía, la cual se reflejará en una disminución del consumo de las bombas de alta presión y *booster*.

➤ *Turbocharger*

El *turbocharger* transfiere la energía hidráulica de la salmuera a la alimentación. Ambos fluidos tienen presiones y caudales diferentes y no es necesario ningún aporte de energía exterior. El *turbocharger* consiste en una turbina hidráulica y una bomba, en la cual se transfiere la presión de la salmuera incrementando la presión de alimentación. Es capaz de transferir en torno al 95% de la energía hidráulica de un flujo hacia otro. La única incógnita debe ser la presión de salida.

$$q_{V,FeedERD} \cdot (p_{FeedERD,out} - p_{FeedERD,in}) = 0.95 \cdot q_{V,Brine\ diluido} \cdot (p_{Brine\ diluido,in} - p_{Brine\ diluido,out}) \quad (6.1)$$

De esta ecuación se obtiene que la presión de la alimentación a la salida del *turbocharger* es de 26 bar aproximadamente.

➤ Cámara isobárica

El fabricante de un ERD concreto, ERI-PX, define la eficiencia de modo diferente al concepto termodinámico. De la definición se deduce:

$$q_{V,ERD} = q_{V,BD} \cdot \frac{[(p_{Feed,ERDin} - LP\ DP) - p_{Brine,ERDin} \cdot Eff]}{[p_{Feed,ERDin} \cdot Eff - (p_{Brine,ERDin} - HP\ DP)]} \quad (6.2)$$

$$HP\ DP = p_{Brine,ERDin} - p_{Feed,ERDout} \quad (6.3)$$

$$LP\ DP = p_{Feed,ERDin} - p_{Brine,ERDout} \quad (6.4)$$

Donde LP DP es la diferencia de presiones en el lado de baja presión y HP DP la diferencia en el lado de alta presión.

HP DP suele tener un valor de 0.7 bar, por tanto la presión de la alimentación a la salida del ERD es aproximadamente 67.3 bar.

La presión de la alimentación a la entrada del ERD coincide con la de la salida del *turbocharger*, es decir, 26 bar. Teniendo en cuenta que LP DP suele valer 0.6, la presión del brine a la salida debe estar en torno a 25.4 bar, valor adecuado para que el proceso de PRO pueda llevarse a cabo.

En caso de que la presión fuese elevada, la configuración cuenta con una válvula de expansión para controlar la presión a la entrada del equipo PRO.

➤ Bomba *Booster*

Los cálculos anteriormente realizados me permiten conocer el consumo que tendría la bomba *booster*.

$$P_{BP} = \frac{\left(\frac{q_{V,ERD}}{(m^3 \cdot h^{-1}) \cdot 3600}\right) \cdot \left(\frac{p_{Feed,HPP} - p_{Feed,ERDout}}{bar \cdot 100^{-1}}\right)}{\eta_{BP} \cdot \eta_{motor}} \cdot kW \quad (6.5)$$

De la ecuación anterior se obtiene un consumo de 80 kW aproximadamente, suponiendo un rendimiento de 70%.

➤ Bomba de alta presión

La bomba de alta presión, procesa el caudal que no atraviesa el ERD, y su potencia es la siguiente.

$$P_{HPP} = \frac{\left(\frac{q_{V,HPP}}{(m^3 \cdot h^{-1}) \cdot 3600}\right) \left(\frac{p_{F,HPP} - p^E}{bar \cdot 100^{-1}}\right)}{\eta_{HPP} \cdot \eta_{motor}} \cdot kW \quad (6.6)$$

Con los datos anteriores se calcula que la bomba *booster* tiene una potencia alrededor de 1100 kW con un rendimiento del 70%.

➤ Bombeo toma de agua

El uso de una corriente externa de agua de mar en el sistema PRO trae consigo un aumento en el bombeo a pie de equipos de la planta por lo que el consumo energético del sistema de bombeo se ve incrementado. Tras el análisis termodinámico, el caudal de agua de mar necesaria para el equipo de PRO alcanzaba los 500 m³/h, por lo que el consumo que este bombeo extra sería de 50 kW.

$$P_{W_{feed}} = \frac{\left(\frac{q_{V,feed}}{(m^3 \cdot h^{-1}) \cdot 3600}\right) \left(\frac{p_{F,feed} - p^E}{bar \cdot 100^{-1}}\right)}{\eta_{HPP} \cdot \eta_{motor}} \cdot kW \quad (6.8)$$

Con los datos anteriores puede obtenerse el valor del consumo energético específico de la configuración propuesta, siendo este de 2.27 kWh/m³.

$$SEC = \frac{P_{HPP} + P_{BP}}{q_{V,P}} \quad (6.7)$$

La Tabla 6.2 muestra los resultados del análisis energético, derivando estos en una reducción del consumo específico del 6%.

	CONFIGURACIÓN ERT	MEJORA 1	MEJORA 2
HPP (KW)	2011	1170	1100
BP (KW)	N/A	130	80
BFEED EXTRA (KW)	-	-	50
SEC (KWH/M3)	3.43	2.41	2.27
TOTAL REQUERIDA (KW)	2011	1300	1180

Tabla 6.2: Comparación de los requerimientos de energía cada dos trenes según las distintas configuraciones (Mejora1: Con ERD basado en cámaras isobáricas; Mejora2: con ERD y sistema PRO)

6.3.2 Análisis económico

Una vez realizada la justificación energética y tras obtener resultados favorables para su posible puesta en marcha, hay ciertos aspectos económicos que se deben tener en cuenta.

La integración de un sistema PRO en una planta de desalación convencional no es un proceso sencillo ya que supone la remodelación de parte de la infraestructura de la planta, lo cual lleva asociados unos costes de capital y operación importantes.

En la planta Lanzarote IV el agua tomada para alimentar la planta alcanza los 70.000 m³/d, cifra que tomará valores mayores debido a los metros cúbicos de agua necesarios para el proceso PRO. El coste asociado a la toma de agua en una planta de estas características está en torno al 4.8%, lo que equivale aproximadamente a 1.957.000 \$.

La planta Lanzarote IV, como bien se citó en el capítulo 4, toma el agua de pozos de playa de unos 11 metros de profundidad. Estos pozos podrían tener una capacidad insuficiente para cubrir la nueva demanda de agua de mar de la planta. Por lo tanto, hay que tener en cuenta una posible ampliación de la infraestructura de los pozos. El coste de la infraestructura se tasa alrededor del 2%, 870.000 \$ del coste total de la planta.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta, que el agua que alimenta la planta sufre un proceso de pretratamiento el cual conlleva unos costes considerables. Por ello, un aumento en el volumen bombeado de agua de mar supone un incremento en el coste del pretratamiento. Normalmente los procesos de pretratamiento son un 8% de los costes de capital del proyecto, lo cual es un porcentaje importante y que debe tenerse en consideración. En el caso de la planta Lanzarote IV equivaldrían a un total de 3.480.000\$.

No olvidar que otro coste asociado sería la compra de los nuevos equipos, como son, el módulo de *turbochargers*, bombas *booster*, equipos PRO etc. Además podría ser necesario realizar una reforma en el sistema de tuberías, sumando así otro gasto.

En la tabla 6.3 se muestran los costes asociados a una planta desaladora convencional como la Lanzarote IV.

Unidades	Coste capital	
	\$	% Total
Costes de construcción		
1. Lugar, carreteras y parking	435.000	1.0
2. Toma de agua	2.088.000	4.8
3. Pretratamiento	3.480.000	8.0
4. Equipos sistema RO	13.920.000	32.0
5. Post-tratamiento	870.000	2.0
6. Eliminación del concentrado	1.087.500	2.5
7. Tratamiento de desechos	652.500	1.5
8. Sistemas eléctricos y de instrumentación	957.000	2.2
9. Equipos y herramientas auxiliares	870.000	2.0
10. Edificios	1.305.000	3.0
11. Puesta marcha y pruebas de aceptación	870.000	2.0
Total costes directos	26.535.000	61.0 %
Servicios de ingeniería de proyectos		
1. Ingeniería preliminar	435.000	1.0
2. Prueba piloto	435.000	1.0
3. Diseño específico	2.175.000	5.0
4. Dirección de obra y supervisión	1.305.000	3.0
Desarrollo del proyecto		
1. Administración, contratación y gestión	870.000	2.0
2. Permisos medioambientales	1.740.000	4.0
3. Servicios legales	652.500	1.5
Costes de financiación	4.785.000	11.0
Imprevistos	4.350.000	10.0
Total costes indirectos	16.965.000	39.0 %
Total coste capital	43.500.000 \$	100.0 %

Tabla 6.3: Costes aproximados asociados a la construcción de una planta convencional con capacidad productora de 30.000 m³/d

Por último, comentar que el funcionamiento de la planta lleva asociados unos costes anuales de operación y mantenimiento alrededor de 4.380.000 \$, cifra que será mayor si se plantea integrar los equipos PRO.

Unidades	Coste capital	
	\$	% Total
Energía	2.430.900	55.5
Químicos	262.800	6.0
Sustitución de membranas y filtros	464.280	10.6
Mantenimiento	284.700	6.5
Operarios	249.600	5.7
TOTAL	4.380.000 \$	100 %

Tabla 6.4: Costes anuales asociados a una planta convencional con capacidad productora de 30.000 m³/d

6.4 Análisis con aporte externo de efluente acuoso de baja concentración

Este tipo de configuraciones se podrá llevar a cabo si la planta se localiza en una zona cercana a plantas industriales o de depuración que puedan ceder su corriente residual para el aprovechamiento en el sistema de PRO. En este caso, también afectan las modificaciones nombradas anteriormente salvo el aumento del sistema de bombeo a pie de equipos ya el agua tomada no proviene de una toma abierta en el mar o pozos playeros como en la configuración anterior. Sin embargo, otro aspecto a tener en cuenta, sería comprobar la calidad y composición del efluente acuoso ya que al tratarse de un vertido industrial podría ser contaminante. Por ello es necesario que la planta haga pasar por un sistema de membranas, como mínimo dos veces, al efluente acuoso antes de que este pueda formar parte del producto de salida. Son admitidos como pasos por membranas los procesos de NF, FO, PRO y RO, excluyendo la UF y MF.

Otra opción sería que la planta contara con un proceso BWRO de doble paso, de tal forma que se convertiría directamente en producto, agua dulce, para satisfacer la demanda. En este caso, todos los trenes de la planta tienen doble paso salvo el tren 5.

Un de las ventajas más importantes de usar este tipo de soluciones como corriente de alimentación al sistema PRO es que se evita tener que pretatarla, lo cual supone una reducción del coste de operación de la planta.

7 CONCLUSIONES

Para finalizar con el análisis, este capítulo recoge las conclusiones obtenidas tras el estudio de la posible integración del sistema PRO en una planta SWRO convencional. Valorando principalmente los aspectos energéticos y comentando el coste económico que podría suponer.

En este estudio llevado a cabo sobre la producción sostenible de energía mediante el aprovechamiento de gradientes salinos de las corrientes de rechazo en una planta de desalación de agua de mar por ósmosis inversa, habiendo sido estas procesadas junto con un aporte externo de agua de mar en un equipo PRO, se llega a la conclusión de que este tipo de equipos producen una favorable reducción del consumo específico de la planta para la configuración propuesta. Este ahorro puede suponer hasta un 6% del consumo específico de la planta.

Este hecho hace pensar que sería beneficioso energéticamente disponer de este tipo de sistemas de ahorro en plantas de desalación, pues transfieren una corriente de agua a la corriente de rechazo concentrada de la planta, presurizándola de tal manera, que esa energía en forma de presión pueda ser aprovechada por diversos sistemas de recuperación energética.

Sin embargo, la integración del proceso de PRO para la modernización de una planta convencional lleva asociado numerosas obras de modificación de la misma. No sólo se requiere la compra de los nuevos equipos sino la remodelación de la infraestructura de la planta, lo que supondría una inversión importante.

La inversión inicial para la modernización de esta planta puede ser considerada moderadamente alta debido a la cantidad de actuaciones que deben llevarse a cabo y sus costes asociados.

Por lo tanto se concluye de este estudio que la integración de equipos PRO en plantas de desalación mediante RO como medida de ahorro energético está aún por investigar, pues los costes asociados a la integración de este sistema en plantas que ya están en operación son demasiado elevados, siendo más eficientes otro tipo de dispositivos de aprovechamiento energético que pueden conseguir buenos resultados.

8 REFERENCIAS

- [1] Mostafa H. Sharqawy, John H. Lienhard V, Syed M. Zubair, *Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data*. Desalination and Water Treatment 16 (2010) 354-380.
- [2] Baltasar Peñate, Lourdes García-Rodríguez, *Retrofitting assessment of the Lanzarote IV seawater reverse osmosis desalination plant*. Desalination 266 (2011) 244-255
- [3] Hideyuki Sakai, Tetsuro Ueyama, Morihiro Irie, Kei Matsuyama, Akihiki Tanioka, *Energy recovery by PRO in seawater desalination plant*. Desalination 389 (2016) 52-57
- [4] Baltasar Peñate, Lourdes García-Rodríguez, *Current trends and future prospects in the desing of seawater reverso osmosis desalination plant technology*. Desalination 284 (2012) 1-8
- [5] Lourdes García-Rodríguez, *Fundamentos termodinámicos de la desalación por ósmosis inversa: Transferencia de disolvente a través de una membrana semipermeable*, Departamento de ingeniería energética.
- [6] Baltasar Peñate, Lourdes García-Rodríguez, *Energy-Efficient Design of Seawater Reverse Osmosis Desalination Technology*.
- [7] Post, Jan W.; Veerman, Joost; Hamelers, Hubertus V.M; Euverink, Gerrit; Metz, Sybrand J.; Nymeijer, Kitty; Buisman, Cees J.N, *Salinity-gradient power*, University of Groningen.
- [8] Jihye Kim, Minkyu Park, Shane A. Snyder, Joon Ha Kim, *Reverse osmosis (RO) and Pressure Retarded osmosis (PRO) hybrid processes: Model-based scenario study*. Desalination 322 (2013) 121-130.
- [9] Baltasar Peñate, Lourde García-Rodríguez, *Reverse osmosis hybrid membrane inter-stage design: A comparative performance assessment*. Desalination 281 (2011) 354-363.
- [10] Wilf, M., *The Guidebook to Membrane Desalination Technology. Reverse Osmosis, Nanofiltration and Hybrid Systems Process, Design, Applications and Economics*. Balaban Desalination Publications, 2007. ISBN 0-86689-065-3.